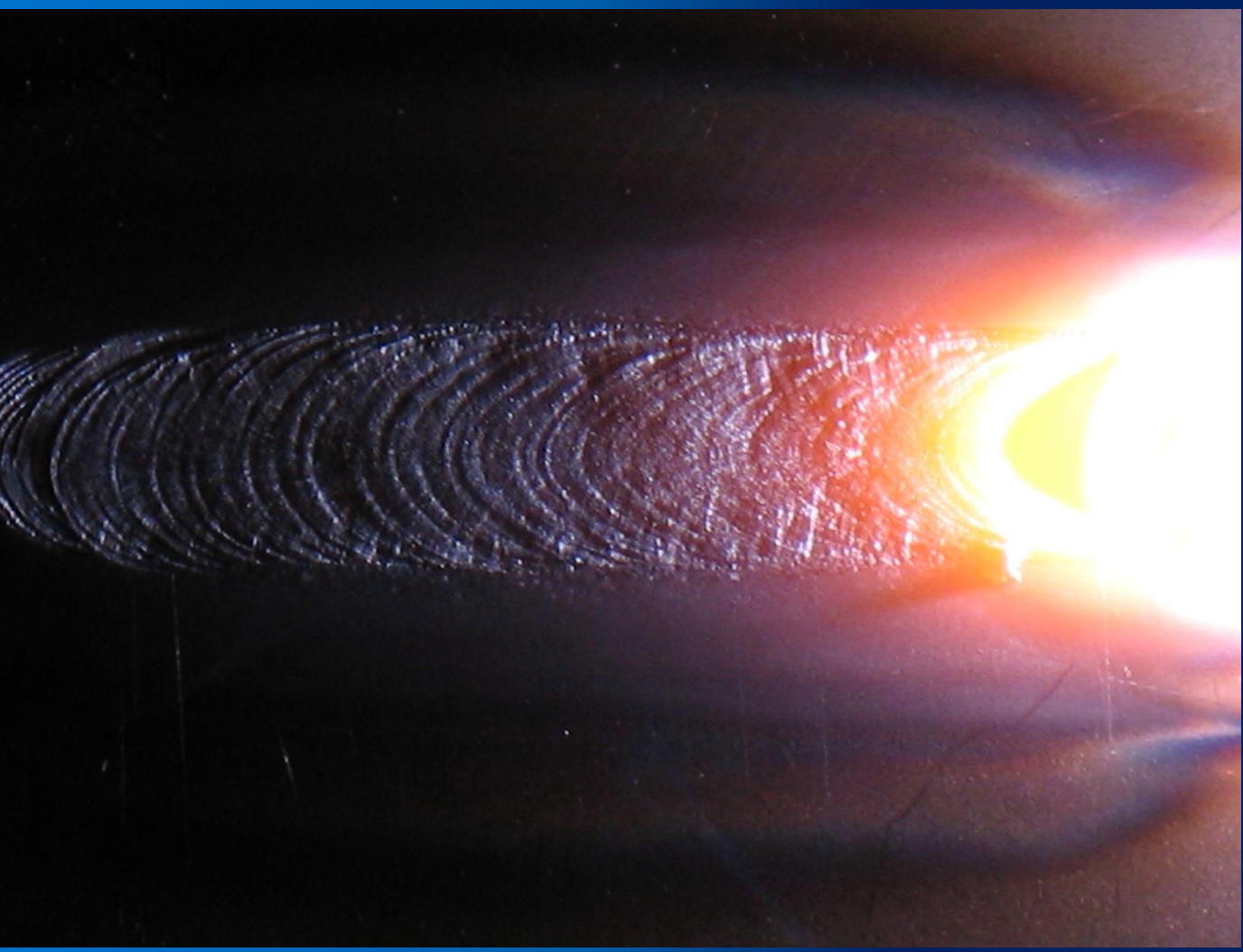
เทคโนโลยีการเชื่อม
WELDING TECHNOLOGY

สำหรับวิศวกรปฏิบัติการ



รองศาสตราจารย์ ดร. วิชาญ ช่วยพันธ์ : D.Eng.

เทคโนโลยีการเชื่อม
WELDING TECHNOLOGY

สำหรับวิศวกรปฏิบัติการ

รองศาสตราจารย์ ดร. วิชาญ ช่วยพันธ์ : D.Eng.

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
พุทธศักราช 2565

เทคโนโลยีการเชื่อม

WELDING TECHNOLOGY

สำหรับวิศวกรปฏิบัติการ

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537
ห้ามลอกเลียนแบบไม่ว่าส่วนใดส่วนหนึ่งของหนังสือเล่มนี้ ไม่ว่ารูปแบบใด
นอกจากจะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากผู้เขียนและเรียบเรียงเท่านั้น

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของสำนักหอสมุดแห่งชาติ
National Library of Thailand Cataloging Publication Data

วิชาญ ช่วยพันธ์.
เทคโนโลยีการเชื่อม. – กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ, 2565.
753 หน้า.
หนังสืออิเล็กทรอนิกส์ (E-book) เว็บไซต์ หรือ URL
http://dspace.rmutk.ac.th/handle/123456789/4591 สามารถโหลดได้ฟรี (FREE COPY)

1. การเชื่อม. I. ชื่อเรื่อง.
671.52
ISBN 978-616-590-640-1

เขียนและเรียบเรียงโดย : รองศาสตราจารย์ ดร. วิชาญ ช่วยพันธ์

ISBN 978-616-590-640-1
เผยแพร่แบบหนังสืออิเล็กทรอนิกส์ (E-book) โหลดได้ฟรี (FREE COPY) เดือน พฤษภาคม 2565

เผยแพร่ที่ : เว็บไซต์ หรือ URL http://dspace.rmutk.ac.th/handle/123456789/4591
สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120
โทร. 0-2287-9600 ต่อ 7034, 7042

เผยแพร่โดย : รองศาสตราจารย์ ดร. วิชาญ ช่วยพันธ์

เทคโนโลยีการเชื่อม
WELDING TECHNOLOGY

รองศาสตราจารย์ ดร. วิชาญ ช่วยพันธ์ : D.Eng.

สารบัญ

CONTENTS

คำนำ

สารบัญ

บทที่ 1 ความปลอดภัยในงานเชื่อม Welding Safety 1

จุดประสงค์การเรียนรู้ 1

บทนำ 2

1.1 อุปกรณ์เพื่อความปลอดภัย (Safety equipment) 2

อุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยส่วนบุคคล (Personal protective equipment : PPE) 2

อุปกรณ์ความปลอดภัยระหว่างปฏิบัติงาน (Operation protective equipment : OPE) 6

1.2 อันตรายที่ต้องระวังจากการเชื่อม (Welding hazards) 12

อันตรายจากความร้อนและเปลวไฟ (Heat and fire hazards) 12

อันตรายจากรังสี ควันและแก๊ส (Rays, Fumes and Gases hazards) 13

อันตรายจากประกายไฟ เพลิงและระเบิด (Sparks, Fires and Explosions hazards) 19

อันตรายจากเสียง ไฟฟ้าดูดและพื้นที่ทำงาน (Noise, Electric shock and Work area hazards) 24

ดัชนีคำศัพท์บทที่ 1 29

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 1 30

บรรณานุกรมบทที่ 1 31

บทที่ 2 กรรมวิธีการตัดและการเซาะร่อง Cutting and Gouging Processes 33

จุดประสงค์การเรียนรู้ 33

บทนำ 34

2.1 ขบวนการตัดด้วยแก๊สออกซิเจน (Oxy–fuel gas cutting : OFC) 35

เครื่องมือและอุปกรณ์ในขบวนการตัดด้วยแก๊สออกซิเจน 35

ขบวนการตัด (Cutting processes)..... 38
การเตรียมหัวตัดและหัวทิป (Preparation of cutting torches and cutting tip)..... 41
การวางตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของหัวตัด (Alignment and movement of the cutting torch)..... 46
การป้องกันการบิดเบี้ยวของงานตัด (Distortion in flame cutting)..... 53
2.2 ขบวนการตัดด้วยลำอาร์กพลาสมา (Plasma arc cutting : PAC)..... 54
องค์ประกอบของกรรมวิธีการตัดพลาสมา (Plasma arc cutting component)..... 55
เทคนิคของกรรมวิธีการตัดพลาสมา (Technic of plasma arc cutting)..... 60
การเลือกระบบการอาร์กหัวตัดพลาสมา (Type of arc torch)..... 60
ความกว้างของร่องตัด (Widths of kerf)..... 63
การเลือกแก๊สตัดพลาสมา (Gases for plasma cutting)..... 64
ความปลอดภัยจากระบบการอาร์กหัวตัดพลาสมา (Type of arc torch)..... 65
การบิดตัวจากการตัดพลาสมา (Plasma cutting distortion)..... 67
การตัดเซาะร่องด้วยพลาสมา (Plasma arc gouging)..... 69
2.3 ขบวนการตัดและเซาะร่องด้วยอากาศ–คาร์บอนอาร์ก (Carbon arc–air cutting and gouging)..... 73
องค์ประกอบและระบบของการอาร์กด้วยลวดคาร์บอนและอากาศอัด..... 73
หัวตัดเซาะร่อง (Gouging torch)..... 74
เครื่องตัดเซาะร่อง (Gouging machine)..... 75
ปัจจัยการตัดเซาะร่อง (Gouging parameter)..... 75
กระแสไฟฟ้าของการอาร์กเซาะร่อง (Gouging current)..... 76
มุมของลวดอาร์กเซาะร่อง (Gouging angle)..... 77
2.4 ขบวนการตัดด้วยลำแสงเลเซอร์ (Laser beam cutting : LBC)..... 79
หลักการตัดโลหะด้วยลำแสงเลเซอร์ (LBC)..... 79
แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ (Laser resonator)..... 79
หัวตัดเลเซอร์ (Laser cutting torch)..... 80
ปัจจัยการตัดด้วยลำแสงเลเซอร์ (Parameter of laser cutting)..... 82
ดัชนีคำศัพท์บทที่ 2..... 85
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 2..... 87
บรรณานุกรมบทที่ 2..... 90

บทที่ 3 กรรมวิธีการเชื่อม : กลุ่มเติมลวดเชื่อม 93
Welding Processes : Consumable

จุดประสงค์การเรียนรู้ 93
บทนำ 94
3.1 การเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding : SMAW) 97
ชนิดของกระแสไฟเชื่อม (Type of welding current) 98
เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเชื่อม (Welding equipment) 101
เครื่องเชื่อมชนิดผลิตกระแสไฟตรง (Motor generator welding machine) 101
เครื่องเชื่อมชนิดหม้อแปลงกระแสไฟสลับ (Transformer welding machine) 102
เครื่องเชื่อมชนิดหม้อแปลงและเรียงกระแสไฟฟ้า (Transformer – rectifiers welding machine) 102
เครื่องเชื่อมชนิดอินเวอร์เตอร์ (Inverter welding machine) 103
อุปกรณ์การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded metal arc equipment) 105
3.2 การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding : GMAW) 108
หลักการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (GMAW) 109
วงจรการเชื่อมและกระแสไฟเชื่อม (Welding circuit and welding current) 109
ระบบการอาร์ก (Welding equipment) 112
การถ่ายโอนน้ำโลหะ (Weld metal transfer methods) 115
เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเชื่อม (Welding equipment) 121
เครื่องเชื่อม (Welding machine) 121
ชุดอุปกรณ์ป้อนลวด (Wire feeder equipment) 126
ระบบการป้อนลวดเชื่อมจากม้วนลวดเชื่อมเข้าสู่หัวเชื่อม (Wire feed system) 130
หัวเชื่อมและสายเชื่อม (Welding gun and Welding cables) 132
ส่วนประกอบของหัวเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (Component of torch) 134
อุปกรณ์ควบคุมแก๊สปกคลุมและอุปกรณ์อื่น ๆ (Shielding gas equipment) 139
แก๊สปกคลุม (Shielding gases) 141
3.3 การเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux Cored Arc Welding : FCAW) 147
หลักการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW) 147
วิธีการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ตามชนิดของลวดเชื่อม 147
ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux cored electrode) 148
ระบบการอาร์กของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux core electrode arc system) 150
กระแสไฟ แรงดันอาร์กและอัตราการป้อนลวด (Current, voltage and, deposition rate) 152

เครื่องมือและอุปกรณ์การเชื่อม (Welding equipment)..... 156
แก๊สปกคลุมสำหรับการเชื่อมลวดไส้ฟลักซ์ (Shielding gas)..... 162
3.4 การเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding : SAW)..... 164
หลักการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมใต้ฟลักซ์ (SAW)..... 164
ระบบการอาร์ก (Arc system)..... 164
ผงฟลักซ์เชื่อม (Welding flux powder)..... 165
ลวดเชื่อม (Solid wire)..... 167
เครื่องเชื่อมและกระแสไฟเชื่อม (Welding machine and welding current)..... 169
องค์ประกอบการเชื่อมอื่น ๆ (Other welding parameter)..... 172
3.5 การเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม (Electro Slag Welding : ESW)..... 176
หลักการเชื่อมอาร์กไฟฟ้าสแลกคลุม (ESW)..... 176
ลวดเชื่อมอาร์กไฟฟ้าสแลกคลุม (Electrodes)..... 179
ฟลักซ์เชื่อม (Flux welding)..... 180
อัตราการป้อนเติมเนื้อเชื่อม (Deposition rates)..... 182
ดัชนีคำศัพท์บทที่ 3..... 185
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 3..... 188
บรรณานุกรมบทที่ 3..... 191

บทที่ 4 กรรมวิธีการเชื่อม : กลุ่มไม่เติมลวดเชื่อม 195
Welding Processes : Non Consumable
จุดประสงค์การเรียนรู้..... 195
บทนำ..... 196
4.1 การเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (Oxy–Acetylene Welding : OAW)..... 196
หลักการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (OAW)..... 196
เครื่องมือและอุปกรณ์ในการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (Tool and equipment of OAW)..... 197
ถังแก๊สอะเซทิลีน (Acetylene cylinder)..... 197
ถังแก๊สออกซิเจน (Oxygen cylinder)..... 199
อุปกรณ์มาตรวัดความดันแก๊ส (Pressure regulator)..... 199
สายเชื่อมและข้อต่อ (Welding hose and Connection)..... 201
หัวเชื่อมและหัวทิพเชื่อม (Torch and tip)..... 203
อุปกรณ์ที่สำคัญอื่น ๆ (Other equipment)..... 205

เปลวไฟการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (Welding flame)..... 207
เทคนิคการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (Welding technique)..... 209
องค์ประกอบที่สำคัญในการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (Component of OAW)..... 211
ลวดเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (Filler rod)..... 211
4.2 การเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW).... 213
หลักการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม (GTAW)..... 213
ระบบการอาร์กเชื่อม (Arc welding system)..... 213
ระบบกระแสไฟเชื่อม (System of welding current)..... 215
เครื่องเชื่อม (Welding machine)..... 216
หัวเชื่อมพร้อมอุปกรณ์ (Welding torches)..... 217
ส่วนประกอบของหัวเชื่อมทิก (Components of TIG torch)..... 218
ลวดทังสเตนสำหรับอาร์กเชื่อม (Tungsten electrode)..... 220
การลับลวดทังสเตน (Grinding tungsten electrode)..... 222
แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม (Shielding gases)..... 224
การเพิ่มกระแสขณะเริ่มอาร์ก (Hot Start)..... 226
การรักษาระยะอาร์ก (Arc Force)..... 227
4.3 กรรมวิธีการเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance Welding : RW)..... 228
หลักการเชื่อมด้วยความต้านทาน (RW)..... 228
การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding)..... 229
วัฏจักรของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding cycles)..... 230
ความร้อนของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding)..... 231
ความสัมพันธ์ของความต้านทานกับความร้อนของการเชื่อมแบบจุด..... 232
ความสัมพันธ์ของขนาดแนวเชื่อม กระแสไฟเชื่อม และเวลาเชื่อมของขบวนการเชื่อมแบบจุด..... 233
เครื่องมือและอุปกรณ์การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Welding equipment)..... 235
แท่งขั้วอิเลคโทรด (Electrode)..... 237
ลักษณะรูปร่างของแท่งขั้วอิเลคโทรด (Shape of electrode)..... 239
ข้อควรพิจารณาของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Considered of spot welding)..... 240
ประเภทของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Type of spot welding)..... 243
การเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทาน (Resistance seam welding)..... 246
หลักของการเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทาน (Seam welding)..... 246

การออกแบบรอยต่อการเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทาน (Seam joint design)..... 247
เครื่องเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทาน (Seam welding machine)..... 250
การเชื่อมปุ่มยื่นด้วยความต้านทาน (Resistance projection welding)..... 251
หลักของการเชื่อมปุ่มยื่นด้วยความต้านทาน (Projection welding)..... 251
การออกแบบการเชื่อมปุ่มยื่นด้วยความต้านทาน (Projection joint design)..... 253
เครื่องเชื่อมปุ่มยื่นด้วยความต้านทาน (Projection welding machine)..... 255
การเชื่อมต่อชนด้วยความต้านทาน (Resistance butt welding)..... 257
หลักของการเชื่อมต่อชนด้วยความต้านทาน (Butt welding)..... 257
กรรมวิธีการเชื่อมยู่ด้วยความต้านทาน (Resistance upset welding)..... 257
กรรมวิธีการเชื่อมวาบด้วยความต้านทาน (Resistance flash welding)..... 257
เครื่องเชื่อมยู่ด้วยความต้านทาน (UW) และเครื่องเชื่อมวาบด้วยความต้านทาน (FW)..... 260
การเชื่อมกระทบด้วยความต้านทาน (Resistance percussion welding)..... 261
หลักของการเชื่อมกระทบด้วยความต้านทาน (Percussion welding)..... 261
กรรมวิธีการเชื่อมกระทบด้วยความต้านทาน (Resistance percussion welding)..... 262
เครื่องเชื่อมกระทบด้วยความต้านทาน (Percussion welding machine)..... 263
4.4 กรรมวิธีการเชื่อมสลักเกลียว (Stud Arc Welding : SW)..... 264
หลักของขบวนการเชื่อมสลักเกลียว (Stud arc welding)..... 264
เทคนิคการเชื่อมสลักเกลียวด้วยการอาร์ก (Arc stud welding)..... 265
การประยุกต์ใช้งานเทคนิคการเชื่อมสลักเกลียวด้วยการอาร์ก..... 266
เครื่องเชื่อม และหัวเชื่อมของสตัดแบบอาร์ก (Arc stud welding machine and welding gun)..... 266
เทคนิคการเชื่อมสลักเกลียวด้วยวิธีการปล่อยประจุ (Capacitor discharge stud welding)..... 268
การประยุกต์ใช้งานเทคนิคการเชื่อมสลักเกลียวด้วยการปล่อยประจุ..... 268
เครื่องเชื่อมและหัวเชื่อมสตัดแบบปล่อยประจุ (CD stud welding machine and welding gun)..... 269
4.5 กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทาน (Friction Welding : FRW)..... 271
หลักของขบวนการเชื่อมเสียดทาน (FRW)..... 271
ขั้นตอนวิธีการเชื่อมเสียดทาน (Step of friction welding process)..... 271
เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding : FSW)..... 273

เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Friction stir spot welding : FSSW)..... 275
เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบเส้นตรง (Linear friction welding : LFW)..... 279
เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบหมุน (Rotary friction welding : RFW)..... 281
4.6 กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิต (Thermit Welding : TW)..... 284
หลักของขบวนการเชื่อมเทอร์มิต (TW)..... 284
กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ (Thermit rail welding process)..... 285
กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิตแท่งวัสดุเสริมแรง (Thermit reinforcing bar welding process)..... 289
กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิตงานต่อทางไฟฟ้า (Thermit electrical connections welding process)..... 290
4.7 กรรมวิธีการเชื่อมด้วยอาร์กพลาสมา (Plasma Arc Welding : PAW)..... 293
หลักของขบวนการเชื่อมด้วยอาร์กพลาสมา (PAW)..... 293
เครื่องเชื่อมพลาสมา (Power source)..... 294
หัวเชื่อมพลาสมาและอุปกรณ์เสริม (Plasma welding torch and accessory)..... 295
แก๊สและแท่งอิเลคโทรดของขบวนการเชื่อมพลาสมา (Gases and electrode of PAW)..... 299
4.8 กรรมวิธีการเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์ (Laser Beam Welding : LBW)..... 301
หลักของขบวนการเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์ (LBW)..... 302
ระบบกลไกของการสร้างลำแสงเลเซอร์ (Mechanism of laser beam)..... 302
หัวเชื่อมเลเซอร์ (Welding torch)..... 303
เครื่องเชื่อมเลเซอร์ (Welding machine)..... 305
การเชื่อมเลเซอร์แบบไม่เติมลวดกับแบบเติมลวด (Autogenous and filler)..... 306
4.9 กรรมวิธีการเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Welding : EBW)..... 308
หลักของขบวนการเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน (EBW)..... 308
ระบบหน่วยเชื่อมด้วยลำแสงอิเลคตรอน (Unit welding)..... 308
เครื่องเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน (EB Welding machine)..... 309
ลำดับขั้นตอนขบวนการเชื่อมด้วยลำแสงอิเลคตรอน (Step of EBW)..... 311
ดัชนีคำศัพท์บทที่ 4..... 313
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 4..... 315
บรรณานุกรมบทที่ 4..... 318

บทที่ 5 องค์ประกอบหรือปัจจัยในการเชื่อม Welding Parameter 323

จุดประสงค์การเรียนรู้ 323

บทนำ 324

5.1 องค์ประกอบการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding : SMAW) 324

กระแสไฟเชื่อม (Welding current) มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A) 324

ระยะอาร์ก (Arc length) มีหน่วยเป็น โวลท์ (V) 327

มุมลวดเชื่อมและการส่ายลวดเชื่อม (Electrode angle and electrode weaving) 330

การส่ายลวดเชื่อม (Electrode weaving) 334

ความเร็วเชื่อม (Welding speed or travel speed) 337

5.2 องค์ประกอบการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding : GMAW) 342

กระแสไฟเชื่อม (Welding current) 342

แรงดันอาร์ก (Arc voltage) 346

ความสัมพันธ์ของกระแสไฟเชื่อม แรงดันอาร์ก และอัตราการป้อนลวด (Relationship of welding current, arc voltage, and wire feed speed) 347

ความเร็วเชื่อม (Welding speed) 350

ระยะโผล่ลวดเชื่อม (Electrode extension) 352

มุมหัวเชื่อม (Nozzle angles) 354

แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม (Shielding gas) 358

5.3 องค์ประกอบการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW) 361

ลวดทังสเตน และมุมหัวเชื่อมลวดทังสเตน (Tungsten electrodes and Torch angle) 362

ชนิดของลวดป้อนเติมและโลหะเชื่อม (Filler metals and base metals) 365

ระยะยื่นของปลายแท่งลวดทังสเตน (Tungsten electrode extension) 366

กระแสไฟเชื่อม (Welding current) 368

แรงดันอาร์ก (Arc voltage) 370

ชนิดแก๊สปกคลุม และอัตราการไหล (Type and flow rate of shielding gases) 371

ความเร็วเชื่อม (Welding speed) 372

ดัชนีคำศัพท์บทที่ 5 375
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 5 377
บรรณานุกรมบทที่ 5 381

บทที่ 6 โลหะวิทยาในการเชื่อม Welding Metallurgy **385**

จุดประสงค์การเรียนรู้ 385
บทนำ 386
6.1 โครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallurgical structure) 386
โครงสร้างของผลึก (Crystal structure) 387
โครงสร้างเกรน (Grain structure) 388
ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานเชื่อม (Heat input) 391
อัตราการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานของการเชื่อม (Heat rate of welding) 394
อัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อม (Cooling rate of welding) 395
6.2 บริเวณต่าง ๆ ของแนวเชื่อม (Weld regions/zone) 398
บริเวณแนวเชื่อม (Weld metals zone : WMZ) 398
การเจือจาง (Dilution) ของแนวเชื่อม 400
บริเวณผลกระทบจากความร้อน (Heat affected zone : HAZ) 406
ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดผลกระทบร้อน (Causes of heat affected zone) 408
การพิจารณาตรวจสอบหรือประมาณการขนาดของ HAZ ด้วยสายตา 412
บริเวณที่ไม่กระทบจากความร้อน (Non−heat affected zone : Non−HAZ) 413
6.3 แนวเชื่อมแบบเชื่อมเสริมเนื้อโลหะ (Adding up weldments) 414
การสร้างชั้นพอกผิว (Buttering/Buffer layer) 415
การสร้างชั้นผิวแบบหุ้ม (Cladding welding) 417
การสร้างชั้นผิวแบบซ้อนทับ (Overlay welding หรือ Weld overlay : WOL) 417
การเชื่อมเพื่อเพิ่มขนาด/รูปทรง (Built up welding) 418
การเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hard−facing welding) 419
สมบัติทางด้านกายภาพ ด้านเคมี และด้านทางกลของเนื้อเชื่อมเสริม 421
6.4 โครงสร้างทางโลหะวิทยาของแนวเชื่อม (Metallurgical structure of weld metal) 462
โครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite structure) 427
โครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite structure) 431
โครงสร้างซีเมนไทต์ (Cementite structure) 438

โครงสร้างมาร์เทนไซต์ และเบนไนต์ (Martensite and Bainite structures)..... 440
6.5 กรรมวิธีทางความร้อนกับงานเชื่อม (Heat treatments associated with welding)..... 443
การอุ่นโลหะงานก่อนเชื่อม (Preheating in welding)..... 443
การให้ความร้อนโลหะชิ้นงานหลังการเชื่อม (Post−Weld Heat Treatment : PWHT)..... 445
6.6 โลหะวิทยางานเชื่อมของแก๊สปกคลุม (Welding metallurgy of shielding gases)..... 448
กลุ่มแก๊สเฉื่อยปกคลุม (Inert shielding gas)..... 448
กลุ่มแก๊สแอคทีฟปกคลุม (Active shielding gas)..... 449
ดัชนีคำศัพท์บทที่ 6..... 452
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 6..... 454
บรรณานุกรมบทที่ 6..... 459

บทที่ 7 ลวดเชื่อมและมาตรฐานลวดเชื่อม **463**
Welding Consumables & Standardisation
จุดประสงค์การเรียนรู้..... 463
บทนำ..... 464
7.1 มาตรฐานลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Standard covered electrodes)..... 466
สมบัติและหน้าที่ฟลักซ์พอกหุ้ม (Properties and functions of cover flux)..... 468
การแบ่งลวดเชื่อมตามชนิดของสารฟลักซ์หุ้ม (Type of electrode flux)..... 471
การจัดเก็บและการอบลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Stored and oven electrode)..... 474
มาตรฐานต่าง ๆ ของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Classification standards code of covered electrode)..... 476
ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มาตรฐาน AWS เหล็กกล้าคาร์บอน (AWS A5.1)..... 477
ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มาตรฐาน AWS เหล็กกล้าผสมต่ำ (AWS A5.5)..... 481
ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มาตรฐาน AWS เหล็กกล้าไร้สนิม (AWS A5.4)..... 493
ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มาตรฐาน AWS เหล็กหล่อ (AWS A5.15)..... 500
ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มาตรฐาน AWS โลหะอลูมิเนียม (AWS A5.3)..... 503
ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มาตรฐาน JIS เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้างานเย็น (JIS Z3211)..... 506
ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มาตรฐาน JIS เหล็กกล้าไร้สนิม (JIS Z3221)..... 508

ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มาตรฐาน JIS โลหะเหล็กหล่อ (JIS Z3252)..... 513
ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มาตรฐานสากล ISO เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (ISO 2560)..... 516
ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มาตรฐานสากล ISO เหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าทนความร้อนสูง (ISO 3581)..... 520
ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มาตรฐานสากล ISO โลหะเหล็กหล่อ (ISO 1701)..... 524
7.2 มาตรฐานของลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมด้วยแก๊สปกคลุม (Standards of filler electrode)..... 526
ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมมาตรฐาน AWS เหล็กกล้าคาร์บอน (AWS A5.18)..... 530
ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมมาตรฐาน AWS เหล็กกล้าไร้สนิม (AWS A5.9)..... 534
ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมมาตรฐาน AWS โลหะเหล็กหล่อ (AWS A5.15)..... 539
ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมมาตรฐาน AWS โลหะอลูมิเนียมและโลหะอลูมิเนียมผสม (AWS A5.10)..... 541
ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุม MIG/MAG มาตรฐาน JIS เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานเย็น (JIS Z3312)..... 543
ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุม TIG มาตรฐาน JIS เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานอุณหภูมิต่ำ (JIS Z3316)..... 547
ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุม MIG/TIG/PAW มาตรฐาน JIS เหล็กกล้าไร้สนิม (JIS Z3321)..... 550
ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุม MIG/TIG/PAW มาตรฐาน JIS โลหะอลูมิเนียมและโลหะอลูมิเนียมผสม (JIS Z3232)..... 552
7.3 มาตรฐานของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Standards code flux cored electrode)..... 554
ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ MIG/MAG มาตรฐาน AWS โลหะเหล็กกล้าคาร์บอน (AWS A5.20)..... 555
ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ FCAW และ TIG และ PAW มาตรฐาน AWS เหล็กกล้าไร้สนิม (AWS A5.22)..... 559
ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ SMAW มาตรฐาน AWS โลหะเหล็กหล่อ (AWS A5.15)..... 564
ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์มาตรฐาน JIS เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานเย็น (JIS Z3313)..... 565
ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์มาตรฐาน JIS เหล็กกล้าไร้สินม (JIS Z3323)..... 569
7.4 ลวดเชื่อมเซาะร่อง (Gouging electrode)..... 572
ประเภทลวดเชื่อมเซาะร่อง..... 573

ดัชนีคำศัพท์บทที่ 7 576
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 7 578
บรรณานุกรมบทที่ 7 580

บทที่ 8 **ข้อบกพร่องงานเชื่อมและการป้องกัน** **585**
Welding Defects & Prevention

จุดประสงค์การเรียนรู้ 585
บทนำ 586
8.1 **รอยแตกร้าวของงานเชื่อม (Weld cracking)** 587
รอยแตกร้าวปลายบ่อหลอม (Crater crack) 589
รอยแตกร้าวกึ่งกลางตามแนวเชื่อม (Throat crack) 591
รอยแตกร้าวใต้แนวเชื่อม (Underbead crack) 593
การแตกร้าวขวางแนวเชื่อม (Transverse weld crack) 595
การแตกร้าวตามยาวแนวเชื่อม (Longitudinal weld crack) 597
การแตกร้าวที่รากและขอบแนวเชื่อม (Root and toe crack) 600
การแตกร้าวเมื่อได้รับความร้อนซ้ำ (Reheat crack) 606
การแตกร้าวแนวหลอมละลาย (Fusion line crack)/(Weld interface crack) 609
การฉีกร้าวของแนวเชื่อม (Lamellar tearing) 612
8.2 **ข้อบกพร่องโพรงอากาศงานเชื่อม (Cavities in weld)** 617
รูพรุน (Porosity) 618
โพรงหนอน (Wormholes) 621
ช่องว่างจากการหดตัว (Shrinkage voids) 622
8.3 **ข้อบกพร่องมีสารแปลกปลอมฝังในงานเชื่อม (Inclusion in weld)** 626
ข้อบกพร่องแบบสแลกฝังใน (Slag inclusion defect) 626
ข้อบกพร่องแบบสารออกไซด์ฝังใน (Oxide inclusion defect) 628
ข้อบกพร่องแบบสารโลหะฝังใน (Metallic inclusion defect) 629
8.4 **การหลอมละลายและหลอมลึกไม่สมบูรณ์ในแนวเชื่อม (Lack of fusion and penetration in weld)** 632
การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Lack of fusion) 632
การหลอมลึกไม่สมบูรณ์ (Lack of penetration) 635
8.5 **ความไม่สมบูรณ์ของรูปร่างและมิติแนวเชื่อม (Imperfect shape)** 639
รอยกัดแหว่ง (Undercut) 639

โลหะเชื่อมเกิดส่วนเกินผิวหน้าและราก (Excess of face and root weld)..... 642
รอยเกย (Overlap)..... 645
การเติมร่องเชื่อมไม่สมบูรณ์ (Incompletely filled groove หรือ Underfill)..... 647
แนวเชื่อมทะลุ (Burn through)..... 649
รอยต่อขอบเชื่อมเยื้อง (Weld misalignment)..... 651
ดัชนีคำศัพท์บทที่ 8..... 656
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 8..... 658
บรรณานุกรมบทที่ 8..... 660

บทที่ 9 **กรณีศึกษา : การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก** **663**
Case Study : Welding Austenitic Stainless Steels

จุดประสงค์การเรียนรู้..... 663
บทนำ..... 664
9.1 **การแบ่งประเภทของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม (Type of stainless steels)** 665
เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steel)..... 668
เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic stainless steel)..... 672
เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic stainless steel)..... 675
เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex stainless steel)..... 680
เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มชุบแข็งโดยการตกผลึก (Precipitation hardening stainless steel)..... 683
บทนำการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Welding of austenitic stainless steel)..... 686
9.2 **โลหะวิทยางานเชื่อม (Welding metallurgy)**..... 686
บ่อหลอมละลายและโครงสร้างภายใน (Weld pool and microstructure)..... 687
ปัจจัยในการสร้างบ่อหลอมละลายด้วยการอาร์ก (Factor of arc fusion)..... 688
โครงสร้างของแนวเชื่อม (Microstructure of fusion weld)..... 690
โครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกกับโลหะชนิดอื่น (Microstructure of ASS welding with other steels)..... 696
บริเวณผลกระทบจากความร้อน (Heat affecter zone) : HAZ..... 699
ผลกระทบร้อนสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกต่างชนิด (HAZ of dissimilar welding ASS welding) : ซีรีย์ 200 กับ ซีรีย์ 300..... 700

ผลกระทบร้อนสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกต่างชนิด (HAZ of dissimilar welding ASS welding) : ซีรีย์ 200 ต่างเกรด..... 701
การเกิดโครเมียมคาร์ไบด์บริเวณกระทบร้อน (Chromium carbide at HAZ)..... 702
แนวทางการป้องกันหรือลดการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรนที่บริเวณกระทบร้อน..... 705
9.3 อิทธิพลของแก๊สเชื่อมปกคลุม (Effect of shielding gases)..... 707
แก๊สเฉื่อย (Inert gas)–แก๊สอาร์กอน (Ar) และแก๊สฮีเลียม (He)..... 708
แก๊สแอคทีฟ (Active gas)–แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)..... 709
แก๊สแอคทีฟ (Active gas)–ไนโตรเจน (N_2) ไฮโดรเจน (H_2) และออกซิเจน (O_2)... 712
9.4 สมบัติทางกลของแนวเชื่อม (Mechanical properties of weldmemts)..... 717
สมบัติด้านความแข็ง กรณีการเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน (Hardness of similar welding)..... 717
สมบัติด้านความแข็ง กรณีการเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน (Hardness of dissimilar welding)..... 719
สมบัติด้านความแข็งแรง กรณีการเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน (Strength of similar welding)..... 723
สมบัติด้านความแข็งแรง กรณีการเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน (Strength of dissimilar welding)..... 725
9.5 สมบัติด้านทานการกัดกร่อนของแนวเชื่อม (Corrosion resistance of weldmemts)..... 728
การกัดกร่อนของแนวเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน (Corrosion of similar weldment)..... 729
การกัดกร่อนของแนวเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน (Corrosion of dissimilar weldment)..... 733
การกัดกร่อนของแนวเชื่อมโลหะต่างชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่เกรดต่างกัน (Dissimilar welding ASS different grade)..... 735
9.6 การกัดกร่อนตามขอบเกรนของแนวเชื่อม (Intergranular corrosion of weldmemts)..... 739
ดัชนีคำศัพท์บทที่ 9..... 742
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 9..... 745
บรรณานุกรมบทที่ 9..... 747
ประวัติผู้เขียน..... 753

บทที่ 1

ความปลอดภัยในงานเชื่อม

Welding Safety





ที่มา : Welder worker safety first design vector image, 2015

จุดประสงค์การเรียนรู้ บทที่ 1 ความปลอดภัยในงานเชื่อม

- รู้และเข้าใจถึงความหมายและความสำคัญของความปลอดภัยในงานเชื่อม
- รู้และเข้าใจถึงอันตรายในรูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดจากปฏิบัติการในงานเชื่อม
- รู้จักชนิดและประเภทของอุปกรณ์ป้องกันอันตรายประเภทบุคคลสำหรับปฏิบัติการในงานเชื่อม
- รู้จักชนิดและประเภทของอุปกรณ์ป้องกันอันตรายประเภทส่วนรวมสำหรับปฏิบัติการในงานเชื่อม
- สามารถเลือกใช้ชนิดและอุปกรณ์เพื่อสร้างความปลอดภัยในงานเชื่อมได้ถูกต้องและเหมาะสม
- ตระหนักและมีจิตใต้สำนึกการให้ความสำคัญกับความปลอดภัยในขณะปฏิบัติการงานเชื่อม
- มีจรรยาบรรณในการพิจารณาและตัดสินใจกับปัญหาด้านความปลอดภัยเมื่อต้องปฏิบัติงานร่วมกับผู้อื่นที่เกี่ยวข้องในสถานที่ปฏิบัติการด้านงานเชื่อม

"Safety first" เป็นข้อความที่คุ้นตาและพบเห็นกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในภาคส่วนของงานด้านอุตสาหกรรมที่มีมนุษย์เข้าไปมีส่วนร่วมในการปฏิบัติงาน ซึ่งโดยความหมายมีเจตนากระตุ้นเตือนให้แก่ผู้ปฏิบัติงานคิดและระลึกอยู่เสมอว่ากระทำการสิ่งใดก็ตามต้องคำนึงถึงปลอดภัยไว้ก่อน มิเช่นนั้น อาจเกิดอุบัติเหตุที่สร้างความเสียหายต่อทางร่างกายและทรัพย์สินทั้งต่อตนเองและผู้อื่น

เทคโนโลยีงานเชื่อม (Welding technology) เป็นการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีที่มีโอกาสเกิดอันตรายสูง เนื่องจากเป็นการปฏิบัติงานที่ต้องสัมผัสกับแหล่งความร้อน พลังงานไฟฟ้า การแผ่รังสี การระเบิด การเกิดประกายไฟ การแพร่กระจายสารเคมี ก๊าซ ควัน และการปฏิบัติงานในพื้นที่จำกัดรวมถึงอันตรายจากเครื่องมืออื่น ๆ ที่ใช้ประกอบในงานเชื่อม โดยอันตรายจากสิ่งเหล่านี้หมดไปเมื่อผู้ปฏิบัติงานหรือผู้ที่เกี่ยวข้องใส่ใจและปฏิบัติตามกฎความปลอดภัยในการเชื่อม (Welding safety) อย่างเคร่งครัดตลอดจนเข้าใจถึงอุปกรณ์ป้องกันอันตราย พร้อมกับการเลือกใช้งานอย่างถูกต้องและเหมาะสมกับรูปแบบของอันตรายที่อาจเกิดขึ้นในขณะปฏิบัติงาน โดยสามารถแบ่งเป็นหมวดหมู่ของอันตรายพร้อมรายละเอียด ดังนี้

1.1 อุปกรณ์เพื่อความปลอดภัย (Safety equipment)

เป็นอุปกรณ์ที่ช่างเชื่อมต้องใช้สำหรับป้องกันภัยอันตรายในระหว่างปฏิบัติการเชื่อม ซึ่งแต่ละชนิดของอุปกรณ์ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมาเพื่อใช้งานเฉพาะทางโดยตรง โดยสามารถแบ่งออกเป็นอุปกรณ์ประเภทเพื่อความปลอดภัยส่วนบุคคล (Personal protective equipment) และอุปกรณ์ประเภทเพื่อความปลอดภัยระหว่างปฏิบัติงาน (Operation protective equipment) โดยอุปกรณ์ทั้งสองประเภทนี้ผู้ใช้ต้องทำการตรวจสอบทั้งคุณภาพและมาตรฐานต้องอยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน มิเช่นนั้น ขณะใช้งานอาจเกิดปัญหาหรืออุบัติเหตุขึ้นได้ ซึ่งจะแสดงถึงอุปกรณ์ของแต่ละประเภท ดังนี้

1.1.1 อุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยส่วนบุคคล (Personal protective equipment : PPE)

ช่างเชื่อมทุกคนต้องมีอุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยในส่วนนี้ ซึ่งอาจถือได้ว่าเป็นของใช้ส่วนตัวไม่ควรหยิบยืมจากช่างเชื่อมท่านอื่น นอกจากต้องคำนึงถึงความสะอาดของอุปกรณ์แล้วนั้น ขนาดและรูปทรงของอุปกรณ์ของแต่ละคนจะเลือกอย่างเฉพาะเจาะจงเพื่อความเหมาะสมกับตนเอง อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลเหล่านี้ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ในมาตรฐานของ OSHA' 29 CFR (Occupational Safety and Health Administration) ซึ่งเป็นข้อกำหนดของมาตราฐานอุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยส่วนบุคคล ที่ระบุว่าอุปกรณ์ต้องสามารถป้องกันการบาดเจ็บจากความร้อน ประกายไฟ รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet rays) และรังสีอินฟราเรด (Infrared rays) ซึ่งความร้อนหรือประกายไฟอาจนำไปสู่การเผาไหม้ผิวกายที่รุนแรง และรังสีอัลตราไวโอเลตกับรังสีอินฟราเรดเป็นอันตรายอย่างยิ่งต่อดวงตาและผิวหนัง ช่างเชื่อมจะต้องตระหนักและระมัดระวังอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับร่างกายในระหว่างการเชื่อมหรือการตัดเตรียมงาน การเรียนรู้วิธีป้องกันและเข้าใจถึงขบวนการปฏิบัติงานที่ปลอดภัย เป็นการสร้างสวัสดิภาพให้กับอวัยวะของตัวเอง ซึ่งจะได้กล่าวถึงชนิดของอุปกรณ์ส่วนบุคคล

เพื่อป้องกันอวัยวะในส่วนต่าง ๆ ของร่างกายที่มักได้รับอันตรายได้ง่าย ดังต่อไปนี้ โดยใช้รูปประกอบคำอธิบายดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยอ้างอิงตามข้อกำหนดของ OSHA (2005)

1. เสื้อหนังและกางเกงหนัง (Leather jacket and Leather long pants) รูปที่ 1.1 (ก) และ (ข) เป็นชุดอุปกรณ์สวมปกปิดร่างกายเพื่อป้องกันอันตราย จากรังสี ความร้อน สารเคมี เปลวไฟ ประกายไฟ และจากกระเด็นของเศษน้ำโลหะ โดยวัสดุที่เหมาะสมและดีที่สุดนิยมนำมาผลิตเป็นจำพวกวัสดุหนัง (Leather) หรือจำพวกฝ้าย (Cotton) เพราะวัสดุเหล่านี้ติดไฟยากและเป็นฉนวนความร้อนได้ดี ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมี นอกจากนี้ยังต้องมีคุณสมบัติที่เหนียวยืดหยุ่นได้ดีและน้ำหนักเบา เพื่อความสะดวกสบายในการเคลื่อนไหวร่างกายขณะปฏิบัติงาน การเลือกชุดอุปกรณ์เสื้อหนังและกางเกงหนังแนะนำให้เลือกหนังโทนที่มีสีเข้มและมีความหนาที่เพียงพอ เพราะจะมีประสิทธิภาพในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet radiation : UV) ได้ดี

การออกแบบเสื้อต้องเป็นแบบแขนยาวเพื่อป้องกันส่วนแขน มีกระดุมคอเพื่อปกป้องส่วนคอ ตัวเสื้อต้องยาวปกคลุมขอบเอวกางเกงเพื่อปกป้องส่วนเอว และต้องไม่มีส่วนของกระเป๋าเพื่อป้องกันประกายไฟกระเด็นตกลงไป สำหรับกางเกงต้องยาวมากพอถึงปกคลุมส่วนบนของรองเท้าบูทหุ้มหัวเหล็ก (Steel toe work boots) เพื่อป้องกันสิ่งของอันตรายจากประกายไฟหรือของร้อนตกลงไปในรองเท้า และต้องไม่พับปลายขาเพื่อไม่ให้เป็นที่กักเก็บของประกายไฟ นอกจากนี้ มีข้อห้ามพกพาไม้ขีดไฟ (Matches) หรือไฟเช๊คแก๊สบิวเทน (Butane lighters) รวมถึงวัตถุไวไฟอื่น ๆ ติดตัวมาปฏิบัติงานเชื่อมเพราะอาจเป็นต้นเหตุให้เกิดการลุกติดไฟและระเบิดขึ้นได้ ซึ่งเป็นอีกเหตุผลของการออกแบบชุดป้องกันที่ไม่ควรมีประเป๋าทั้งเสื้อและกางเกง

2. รองเท้าบูทหุ้มหัวเหล็ก (Steel toe work boots) รูปที่ 1.1 (ค) เป็นอุปกรณ์สวมเพื่อป้องกันส่วนของเท้าที่ต้องออกแบบให้มีรูปทรงกระบอกสูงจนเกือบถึงหัวเข่า ส่วนหัวต้องมีเหล็กหุ้มกันของตกกระแทกนิ้วเท้า พื้นรองเท้าต้องแข็งป้องกันการแทงทะลุ กันลื่นและเป็นฉนวนป้องกันกระแสไฟฟ้า ส่วนหลังเท้าต้องราบเรียบ ไม่มีข้อหรือตะเข็บ และสายผูกเชือกเพื่อป้องกันการกักเก็บประกายไฟ วัสดุที่ผลิตเป็นหนังเพราะทนความร้อนและน้ำหนักเบา การเลือกขนาดควรเลือกที่สวมใส่สบายไม่คับหรือหลวมมากเกินไป เพราะทำให้ไม่สะดวกในการปฏิบัติงาน ส่วนสีควรเป็นสีเข้มเพื่อประสิทธิภาพของการป้องกันรังสี โดยสวมคู่กับถุงเท้าที่หนามากเพียงพอเพื่อป้องกันนิ้วเท้าเสียดสีกับหัวเหล็ก และควรเป็นวัสดุฉนวนความร้อนที่ติดไฟได้ยาก

3. เอี๊ยมหนัง (Leather apron) รูปที่ 1.1 (ง) หรือบางครั้งเรียกว่า “ผ้ากันเปื้อน” อุปกรณ์ส่วนนี้สวมไว้ด้านหน้าเพื่อป้องกันสะเก็ดหรือประกายไฟที่เกิดจากการเชื่อม การตัด หรือการเจียระไน ต้องผลิตจากวัสดุทนความร้อนและทนประกายไฟ ต้องมีน้ำหนักเบาที่หนามากเพียงพอ ส่วนใหญ่เป็นจำพวกหนังหรือผ้ายีนส์ มีรูปทรงหลายแบบ เช่น แบบเต็มตัว แบบครึ่งตัว ซึ่งมีสายคล้องคอและรัดหลัง ต้องผูกให้กระชับแนบแน่นกับลำตัวเพื่อความสะดวกและคล่องตัวในขณะปฏิบัติงาน

4. ปลอกแขน (Leather sleeves) รูปที่ 1.1 (จ) อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลนี้มี 2 ชิ้น สวมไว้เพื่อป้องอวัยวะส่วนแขนทั้งสองข้างจากความร้อน ประกายไฟ หรืออันตรายอื่น ๆ ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นได้มาก เหตุเพราะขณะปฏิบัติงานต้องใช้มือเป็นสำคัญ ส่วนใหญ่ผลิตจากวัสดุประเภทจำพวกหนังเพราะน้ำหนักเบาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลื่อนไหว โดยมีทั้งแบบสั้นหรือแบบครึ่งแขน (Half sleeves) สามารถเลือกใช้กับท่าเชื่อมที่หัวเชื่อมอยู่ในตำแหน่งต่ำกว่าหน้าอกของช่างเชื่อม แต่ถ้าหัวเชื่อมอยู่ในระดับที่เหนือหน้าอกขึ้นไปให้เลือกใช้แบบยาวเต็มแขนปกคลุมหัวไหล่ (Full sleeves) การจับยึดสามารถใช้กระดุมติดกับตัวเสื้อหรือใช้สายเชือกผูกอ้อมคอของช่างเชื่อม

5. หมวกหนังคลุมศีรษะ (Leather hoods) รูปที่ 1.1 (ฉ) เป็นอุปกรณ์ป้องกันศีรษะจากอันตรายที่เกิดจากการเชื่อม โดยเฉพาะสะเก็ดไฟและความร้อนในตำแหน่งท่าเชื่อมเหนือศีรษะ ซึ่งผลิตจากวัสดุหนังที่ติดไฟได้ยาก มักออกแบบมาให้สามารถใช้ปกป้องใบหน้า คอ และบ่าจากรังสีของการเชื่อมได้เป็นอย่างดี บางชนิดออกแบบมาปกปิดเฉพาะเจาะจงที่ศีรษะเรียกว่า “หมวกเชื่อม (Cap welding)” และบางชนิดประกอบมาพร้อมกับเลนส์เชื่อมซึ่งสามารถใช้เป็นหน้ากากเชื่อมได้ด้วย เรียกว่า Welding hood

6. ถุงมือหนัง (Leather gloves) รูปที่ 1.1 (ช) เป็นถุงมือหนังที่ผลิตออกมาเพื่อใช้สำหรับงานเชื่อมโลหะโดยตรง ต้องการป้องกันความร้อนจากการเชื่อมไม่ว่าขณะเชื่อมหรือหยิบจับชิ้นงานหลังการเชื่อมต้องเป็นฉนวนทางไฟฟ้า (Electrical insulation) และมีความอ่อนนุ่มสวมพอดีกับขนาดนิ้วมือเพื่อความสะดวก คล่องแคล่วในการหยิบจับชิ้นงาน ความยาวของถุงมือมีหลายระดับแตกต่างกัน ตั้งแต่สั้นระดับข้อมือและยาวถึงระดับหัวไหล่ที่สามารถใช้แทนปลอกแขนได้เป็นอย่างดี ถุงมือหนังที่ใช้งานในการปฏิบัติการเชื่อม มี 2 ประเภท คือ

ก. ถุงมือหนังเชื่อมแบบทั่วไป (Gauntlet welding) ออกแบบโดยใช้วัสดุประเภทหนังที่มีผ้าเป็นฉนวนบุอยู่ภายใน ป้องกันความร้อนได้ดีแต่อาจไม่คล่องแคล่วในการหยิบจับมากนัก เนื่องจากมีความแข็งกระด้างและค่อนข้างมีน้ำหนักจึงเหมาะกับงานเชื่อมที่ไม่เน้นความประณีตหรือความละอียด

ข. ถุงมือหนังเชื่อมแบบพิเศษ (Soft leather welding) เป็นอุปกรณ์ถุงมือเชื่อมพิเศษ ที่ใช้สำหรับการเชื่อมเน้นความละเอียดและคุณภาพของแนวเชื่อม ที่ต้องควบคุมความแม่นยำในระหว่างการเชื่อมจึงต้องใช้เป็นถุงมือหนังอ่อนนิ่มสวมเข้ากับรูปทรงของนิ้วมือได้ดี ซึ่งบางครั้งมีการนำฝ้ายมาใช้แทนหนังเพราะมีน้ำหนักเบา

7. หน้ากากกันฝุ่น (Dusk mask) รูปที่ 1.1 (ซ) พื้นที่ปฏิบัติการเชื่อมมักมีสภาพแวดล้อมที่เต็มไปด้วยจำพวกฝุ่น (Dusk) ควัน (Fumes) แก๊ส (Gases) เขม่า (Smokes) สเปรย์ (Sprays) และไอระเหยต่าง ๆ (Vapors) สิ่งเหล่านี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาไม่เป็นที่แน่นอน โดยเฉพาะในสภาพพื้นที่อากาศไม่ถ่ายเทหรือมีอากาศปริมาณน้อย หรืออาจเกิดจากการเชื่อมด้วยฟลักซ์ที่มีควันเกิดขึ้นมาก เพื่อความปลอดภัยของช่างเชื่อมในการที่จะสูดดมหรือหายใจเอาสารปนเปื้อนเข้าสู่ร่างกาย จึงต้องสวมหน้ากากปิดฉมูกไว้ตลอดเวลา โดยมีการออกแบบไว้หลากหลายรูปแบบให้เลือกใช้ตามความต้องการและมีหลากหลายชั้นคุณภาพ



เสื้อหนังแขนยาว (Leather jacket)

(ก)



กางเกงหนังขายาว (Leather long pants)

(ข)



เอี๊ยมหนัง (Leather apron)

(ง)



รองเท้าบูทหุ้มหัวเหล็ก (Steel toe work boots)

(ค)



ปลอกแขนหนัง (Leather sleeves)

(จ)



หมวกหนังคลุมศีรษะ
(Leather hoods)

(ฉ)



ถุงมือหนัง
(Leather gloves)

(ช)



หน้ากากกันฝุ่น
(Dusk mask)

(ซ)

รูปที่ 1.1 อุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยส่วนบุคคล (Personal protective equipment : PPE)

ที่มา : ANSI Z49.1– Safety in welding, cutting and allied processes, 2005

1.1.2 อุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยระหว่างปฏิบัติงาน (Operation protective equipment)

ช่างเชื่อมทุกคนต้องจัดเตรียมชุดอุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยส่วนบุคคลมาด้วยตนเองของแต่ละคน เพราะเป็นอุปกรณ์ใช้ส่วนตัวไม่ควรมาจัดหาหรือหยิบยืมกันในพื้นที่ปฏิบัติงาน ส่วนในพื้นที่ปฏิบัติงานต้องเตรียมพร้อมอุปกรณ์ส่วนกลางของพื้นที่ ซึ่งต้องใช้ร่วมกันกับช่างเชื่อมคนอื่น ๆ หรืออุปกรณ์บางอย่างที่ต้องเบิกจากห้องเครื่องมือ (Tools room) เพื่อสำหรับใช้คนเดียว โดยปกติแล้วอุปกรณ์เหล่านี้มีทั้งเบิกมาใช้เฉพาะบุคคลหรือเบิกมาใช้ร่วมกัน ทั้งนี้จะได้กล่าวถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ต้องใช้ระหว่างการปฏิบัติงานเชื่อม ดังต่อไปนี้

1. หน้ากากเชื่อมและเลนส์กรองแสง (Welding helmet and filter lenses) รูปที่ 1.2 (ก) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับปฏิบัติการเชื่อม ใช้ป้องกันอันตรายที่เกิดขึ้นกับดวงตาและอวัยวะบริเวณใบหน้า (Eye and face protection) โดยเฉพาะดวงตาเป็นอวัยวะที่บอบบางและใช้งานตลอดเวลาปฏิบัติงานจึงมีโอกาสเกิดอันตรายได้บ่อยครั้ง ในขณะทำการเชื่อมจะเกิดแสงที่มองเห็น(Visible light) และรังสีที่มองไม่เห็น ได้แก่ รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet rays) รังสีอินฟราเรต (Infrared rays) สิ่งเหล่านี้เกิดขึ้นจากกรรมวิธีการเชื่อมซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ แต่สามารถป้องกันไม่ให้ดวงตาสัมผัสโดยตรงได้ด้วยอุปกรณ์หน้ากากเชื่อม การออกแบบหน้ากากเชื่อมมีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องจากแบบใช้มือถือ (Flip front) มาเป็นแบบสวมหัว (Passive) หรือจากเดิมใช้มือปิด–เปิดเลนส์ (Fixed–Variable shade lens) พัฒนามาเป็นแบบเลนส์ปรับตามความเข้มของแสงโดยอัตโนมัติ (Auto darkening) โดยแต่ละแบบต้องมีเลนส์กรองแสงควบคู่มาด้วยเสมอเพื่อทำหน้าที่กรองแสงและรังสีขณะเชื่อม ช่างเชื่อมต้องมีความรู้และความเข้าใจถึงวิธีการเลือกเลนส์ให้เหมาะสมกับกรรมวิธีการเชื่อม โดยเรียกเป็นนัมเบอร์ (Number : No.) ซึ่งนัมเบอร์ความเข้มของเลนส์ (Shade number) สัมพันธ์กับระดับของกระแสเชื่อม (Welding current) และขบวนการเชื่อม (Welding processes) ดังแสดงใน ตารางที่ 1.1 อ้างอิงตามมาตรฐาน ANSI Z49.1 (2012) (กระแสเชื่อมสูง นัมเบอร์เลนส์จะสูงตาม) สำหรับหน้ากากเชื่อมแก๊สหรือที่เรียกว่า “แว่นตาเชื่อมแก๊ส(Welding goggles)” ดังแสดงใน รูปที่ 1.2 (ข) มีลักษณะและรูปทรงแตกต่างจากหน้ากากเชื่อมแบบอาร์ก ใช้สวมศรีษะมีกระจกใสชั้นในป้องกันเศษโลหะกระเด็นเข้าตาและมีเลนส์กรองแสงอยู่ชั้นนอก สามารถปิด–เปิดเลนส์ได้ การเลือกใช้เลนส์ต้องยึดหลักตามเกณฑ์มาตรฐานของการเชื่อมและตัดด้วยแก๊สอะเซทิลีน (Gas welding and oxygen cutting operations) ดังแสดงใน ตารางที่ 1.2 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานข้อกำหนดของ OSHA (2005) และANSI Z 49.1 (2012)

2. หน้ากากปกป้องใบหน้า (Face shield) และแว่นนิรภัย (Safety goggles) รูปที่ 1.2 (ค) และ (ง) ตามลำดับ อุปกรณ์ทั้งสองนี้มีหน้าที่ช่วยป้องกันหรือปกป้องเหมือนกัน ต่างกันที่แบบแรกปกป้องบริเวณส่วนของใบหน้าทั้งหมด และส่วนแบบหลังช่วยปกป้องเฉพาะส่วนของดวงตา โดยช่วยป้องกันความร้อนประกายไฟ หรือการกระเด็นของเศษโลหะจากการเจียระไน การสกัด และสสารจำพวกที่เป็นของเหลวหรือแก๊สที่จะเกิดขึ้นกับใบหน้าและดวงตา วัสดุที่ใช้โปร่งใสหรือมีสีอ่อน ๆ สามารถมองทะลุผ่านได้ดีทน

การกระแทกหรือการขีดข่วน แบบปกป้องใบหน้าส่วนใหญ่มักผลิตมาจากพลาสติกแข็งเพราะลดการแตกร้าวและน้ำหนักเบากว่ากระจกแก้ว ส่วนแว่นนิรภัยนิยมใช้แก้วกระจกเพราะโปร่งใสมากกว่า ทนรอยขีดข่วนได้ดีและมีขนาดเล็ก โดยมีขอบยางของแว่นกันกระแทก ช่างเชื่อมสามารถเลือกใช้งานตามความเหมาะสมหรือตามสภาพการทำงาน เพราะแว่นนิรภัยมีสะดวกคล่องแคล่วในการเคลื่อนไหวมากกว่า และยังสามารถป้องกันด้านข้างของตาได้ดีแต่ไม่สามารถป้องกันส่วนอื่น ๆ ของใบหน้าได้เหมือนหน้ากากปกป้องใบหน้า

3. อุปกรณ์ปกป้องหู (Ear muffs and plugs) รูปที่ 1.2 (จ) พื้นที่หรือสภาพแวดล้อมที่ปฏิบัติงานเชื่อมมักมีเสียงดังอยู่ในระดับที่เป็นอันตรายซึ่งเกิน 85 เดซิเบลเอ (dBA) ตามข้อกำหนดขององค์การอนามัยโลกจะส่งผลกระทบต่อระบบการได้ยินของหูช่างเชื่อมและอาจถึงขั้นสูญเสียการได้ยินอย่างถาวร ดังนั้น ช่างเชื่อมหรือบุคคลที่ปฏิบัติงานในสภาพแวดล้อมดังกล่าว จำเป็นต้องสวมอุปกรณ์ป้องกันอันตรายที่จะเกิดอวัยวะหู อุปกรณ์ป้องกันประเภทนี้มีหลากหลายรูปแบบแต่ที่นิยมใช้งานกันเป็นแบบครอบปิดใบหู (Ear muffs) กับแบบอุดรูหู (Ear plugs) เพื่อช่วยลดการได้ยินของเสียงที่อันตรายให้อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยตามมาตรฐานของ OSHA 1910.95 (2005) ที่กำหนดระยะเวลาในการสัมผัสเสียงที่ปลอดภัยในแต่ละรับความดังของเสียง นอกจากนี้ อุปกรณ์ปกป้องหูยังช่วยป้องกันประกายไฟ สะเก็ดไฟหรือเศษโลหะกระเด็นเข้าหูได้ ดังนั้น ช่างเชื่อมต้องตระหนักถึงอันตรายในสิ่งนี้ให้มาก เพราะความเสียหายของระบบประสาทการได้ยินอาจไม่เกิดแบบฉับพลันทันที แต่เป็นการเสื่อมสมรรถณะของระบบการได้ยินที่ค่อย ๆ เกิดขึ้นจนเกิดความเสียหายเกินที่แก้ไขได้ทันเวลา

4. เครื่องดูดควัน (Fume extractors) เป็นอุปกรณ์ที่มีความจำเป็นสำหรับพื้นที่ปฏิบัติงานเชื่อม มีไว้เพื่อกำจัดหรือดูดควัน (Fume) ที่เกิดจากการเชื่อมแบบอาร์ก ซึ่งควันจะฟุ้งกระจายทั่วบริเวณโดยเฉพาะสถานที่อับหรือคับแคบอากาศถ่ายเทน้อย มีผลกระทบต่อระบบการหายใจและการมองเห็น จึงต้องทำการกำจัดออกไปด้วยเครื่องดูดควัน โดยทั่วไปถ้าเป็นพื้นที่ปฏิบัติประจำ เช่น โรงงานเชื่อมประกอบ โรงปฏิบัติการวิศวกรรมงานเชื่อม หรือพื้นที่ปฏิบัติการเชื่อมที่มีเครื่องเชื่อมติดตั้งประจำถาวร เครื่องดูดควันจะเป็นระบบท่อดูด (Duct system) ที่ทำการติดตั้งไว้เป็นระบบอย่างถาวร เรียกว่า เครื่องดูดควันแบบติดตั้ง (Stationary fume extractors) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1.2 (ฉ–1) ขนาดกำลังดูดของเครื่องขึ้นอยู่กับปริมาณจำนวนหัวเชื่อม (Torch welding) หรือบูทเชื่อม (Booth welding) เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ถ้ากรณีเป็นพื้นที่ทำงานชั่วคราว งานภาคสนาม หรือมีเครื่องเชื่อมเพียง 1–2 เครื่องไม่ได้ติดตั้งถาวรนิยมใช้เครื่องดูดควันแบบเคลื่อนที่ (Mobile fume extractors) ลักษณะของเครื่องดังในรูปที่ รูปที่ 1.2 (ฉ–2) สามารถเคลื่อนย้ายไปที่ต่าง ๆ ได้ตามสภาพของการทำงานเชื่อม สะดวกและสามารถเลือกขนาดของเครื่องได้ตามความต้องการ มีการผลิตออกมาหลากหลายรูปแบบให้เลือกใช้งาน บางรุ่นสามารถปรับระดับความแรงของลมดูดได้ตามต้องการ เพราะความแรงของลมดูดต้องมีความ

เหมาะสม มิเช่นนั้นจะเป็นการดูดเอาแก๊สเฉื่อย (Shielding gas) ที่ปล่อยออกมาเพื่อใช้ปกคลุมบ่อหลอมละลายเข้าไปด้วย

5. เครื่องตรวจจับแก๊ส (Gas detectors) และหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ (Respirator) ดังแสดงในรูปที่ รูปที่ 1.2 (ช) และ (ซ) ตามลำดับ เครื่องตรวจจับแก๊สมีไว้เพื่อตรวจหาหรือตรวจวัดการมีอยู่ของสสารที่อยู่ในรูปของแก๊ส ซึ่งอาจเป็นแก๊สพิษ แก๊สที่ระเบิดได้ แก๊สลุกติดไฟได้ง่าย รวมไปถึงแก๊สออกซิเจน ซึ่งช่างเชื่อมต้องพกติดตัวที่สามารถใช้งานได้ทันที โดยเฉพาะสถานที่ปฏิบัติงานที่อากาศไม่ถ่ายเท เป็นสถานที่แบบซอกอับและคับแคบ บางสถานที่อาจเสี่ยงในการขาดอากาศหายใจขณะปฏิบัติงาน ควรเปิดเครื่องตรวจจับแก๊สวัดอากาศตลอดเวลาเพื่อแจ้งเตือน เพราะอาจเกิดสภาวะขาดอากาศหายใจและหมดสติโดยไม่รู้ตัว สำหรับสถานที่ทำการเชื่อมที่สุ่มเสี่ยงว่าจะมีแก๊สพิษ ต้องสวมหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ เรียกว่า อุปกรณ์ป้องกันระบบการหายใจ (Respirator protection equipment) เป็นอุปกรณ์ที่ต้องมีประสิทธิภาพและมาตรฐานรับรอง โดยที่ยอมรับกันเป็นมาตรฐานสากลเป็นสถาบันความปลอดภัยและอาชีวอนามัย (National Institute for Occupational Safety and Health : NIOSH) ซึ่งกำหนดประเภทของเครื่องหายใจ ได้แก่ เครื่องช่วยหายใจแบบมีสายอากาศ (Air–line respirators) เครื่องช่วยหายใจแบบมีถังอากาศ (Self–contained breathing apparatuses respirators) เครื่องช่วยหายใจแบบมีหน้ากากต่อกับสายอากาศ (Hose–mask respirators) รวมถึงการเลือกใช้แผ่นกรองตามประเภทแก๊สพิษ (สารตะกั่ว สารสังกะสี สารแคดเมี่ยม ฯลฯ) หรือเลือกเครื่องตามที่อากาศมีแรงดันต่ำ–แรงดันสูง บนเครื่องบิน (SRAs) หรือมีถังอากาศในตัว (SCBAs) เป็นต้น

6. พัดลมระบายอากาศ (Ventilating fans) และสายรัดตัวนิรภัย (Safety harnesses) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 (ฌ) และ (ญ) ตามลำดับ เป็นอุปกรณ์เสริมที่อาจไม่จำเป็นในบางสถานที่ปฏิบัติการเชื่อม แต่มีความจำเป็นในบางสถานการณ์ เช่น สถานที่ทำการเชื่อมประกอบงานอยู่ในบริเวณที่มีพื้นที่คับแคบหรือจำกัด (Confined space) อากาศไม่ถ่ายเท หรือมีปริมาณอากาศหายใจเบาบาง สถานที่ดังกล่าวเหล่านี้ต้องมีเครื่องช่วยระบายอากาศ ซึ่งอาจเป็นพัดลมระบายอากาศหรืออุปกรณ์อื่นใดที่สามารถทำให้อากาศเกิดการหมุนเวียนและถ่ายเทตลอดเวลาขณะปฏิบัติงาน เพราะอาจหมดสติได้โดยไม่รู้ตัวเนื่องจากขาดอากาศหายใจ สำหรับสายรัดนิรภัยจัดว่าเป็นอุกรณ์ความปลอดภัยพื้นฐานที่ใช้กับทุกสายงานวิชาชีพที่ต้องมีความเสี่ยงที่จะเกิดการตกหล่นจากที่สูง ในส่วนของงานเชื่อมก็มีมากมายลักษณะงานที่ต้องปฏิบัติการเชื่อมในตำแหน่งที่สูง เช่น โครงสร้างอาคาร หรือโครงงานของระบบต่าง ๆ ที่ติดตั้งเหนือพื้นดิน ขณะเชื่อมงานมีความโอกาสตกหล่นได้เสมอ เพื่อความปลอดภัยช่างเชื่อมต้องสวมสายรัดนิรภัยทุกครั้งและทดสอบความสมบูรณ์พร้อมใช้งานของสายรัดเสมอ ต้องพิจารณาเลือกขนาดและรูปแบบตามความเหมาะสมของแต่ละคนโดยไม่คับหรือหลวมมากจนเกินไป



หน้ากากเชื่อม และเลนส์กรองแสง

(Welding helmet and lens)

(ก)



หน้ากากเชื่อมแก๊ส

(Oxy–acetylene goggles)

(ข)



หน้ากากปกป้องใบหน้า

(Face shield)

(ค)



แว่นนิรภัย

(Safety goggles)

(ง)



อุปกรณ์ปกป้องหู

(Ear muffs and ear plugs)

(จ)

รูปที่ 1.2 อุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยระหว่างปฏิบัติงาน (Safety equipment during operation)

ที่มา : ตามข้อกำหนดของ Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 2012



เครื่องดูดควันแบบติดตั้ง

(Stationary fume extractors)

(ฉ-1)



เครื่องดูดควันแบบเคลื่อนที่

(Mobile fume extractors)

(ฉ-2)



เครื่องตรวจจับแก๊ส

(Gas detectors)

(ช)



หน้ากากป้องกันแก๊สพิษ

(Respirator)

(ซ)



สายรัดตัวนิรภัย

(Safety harnesses)

(ญ)



พัดลมระบายอากาศ

(Ventilating fan)

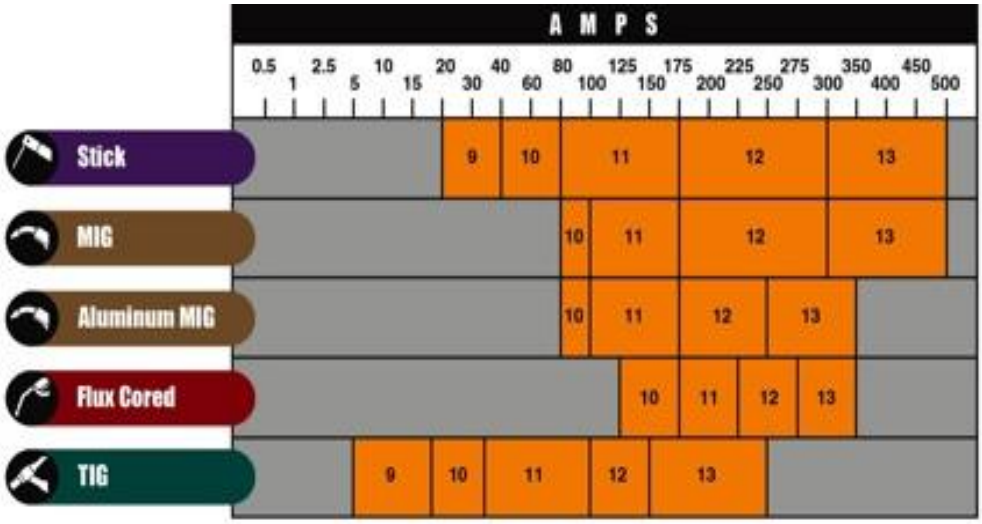
(ฌ)

รูปที่ 1.2 (ต่อ) อุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยระหว่างปฏิบัติงาน (Safety equipment during operation)

ที่มา : ตามข้อกำหนดของ Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 2012

ตารางที่ 1.1 มาตราฐานการเลือกใช้เลนส์ในการเชื่อม (Welding lens shade chart)

ที่มา : ANSI Z49.1– Safety in welding, cutting and allied processes, 2012



ตารางที่ 1.2 มาตราฐานการเลือกใช้เลนส์ในงานเชื่อมและงานตัดด้วยแก๊ส (Filter lenses for gas welding and oxygen cutting operations chart)

ที่มา : ANSI Z49.1– Safety in welding, cutting and allied processes, 2005

ขบวนการ (Operation)	ความหนาแผ่นตัด (Plate thickness) มม.	นัมเบอร์เลนส์ ([a] Shade number : OSHA)	นัมเบอร์เลนส์ ([b] Shade number : ANSI&AWS)
การเชื่อมแก๊ส	ต่ำกว่า 3.2	4	5
(Gas welding)	3.2 ถึง 12.7	5	6
	มากกว่า 12.7	6	8
การตัดแก๊ส	ต่ำกว่า 25	3	4
(Oxygen cutting)	25 ถึง 150	4	5
	มากกว่า 150	5	6

หมายเหตุ ของตารางที่ 1.2

- a = Occupational Safety and Health Administration : OSHA
- b = American National Standards Institute : ANSI & American Welding Society : AWS

1.2 อันตรายที่ต้องระวังจากการเชื่อม (Welding hazards)

วิศกรรมการเชื่อมได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการเชื่อมต่อวัสดุเข้าด้วยกันจนเกิดเป็นขบวนการเทคโนโลยีเชื่อมที่แปลกใหม่อยู่เสมอซึ่งถือเป็นข้อดี (Advantages) แต่อย่างไรก็ตามอันตรายที่เกิดจากการเชื่อมยังมีอยู่และต้องเรียนรู้ควบคู่ไปกับการระมัดระวัง เพื่อสร้างความปลอดภัยในการปฏิบัติงานเชื่อมทั้งตนเองและผู้อื่น มีหลายองค์กรที่ก่อตั้งขึ้นเพื่อศึกษาพัฒนาเครื่องมือและสร้างอุปกรณ์รวมถึงเทคนิคต่าง ๆ ที่ช่วยลดความเสี่ยงที่จะเกิดอันตรายขึ้นจากการเชื่อม จนเกิดเป็นข้อกำหนด (Provision) และมาตรฐาน (Standard) เพื่อความปลอดภัยที่สูงขึ้นแก่ผู้ที่ปฏิบัติการเชื่อม ได้แก่ สมาคมส่งเสริมความปลอดภัยและอนามัยในการทำงานในพระราชูปถัมภ์ (ประเทศไทย) องค์กรความปลอดภัยและอาชีวอนามัยของอเมริกา (Occupational Safety and Health Administration : OSHA) สถาบันมาตรฐานแห่งชาติ และสมาคมการเชื่อมแห่งอเมริกา (American National Standards Institute : ANSI & American Welding Society : AWS) สถาบันการเชื่อมสากล (International Institute of Welding : IIW) อย่างไรก็ตามถ้าช่างเชื่อมไม่ตระหนักหรือไม่ปฏิบัติตามกฎของความปลอดภัยอันตรายจากการเชื่อมก็จะยังเกิดขึ้นอยู่เสมอต่อชีวิตและทรัพย์สินทั้งที่เห็นเป็นอุบัติเหตุทันทีและผลกระทบต่อสุขภาพในอนาคต ดังนั้น การเรียนรู้และการระมัดระวังถึงอันตรายจากการเชื่อมในรูปแบบต่าง ๆ อาจเกิดขึ้นจึงมีความจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่ง โดยได้รวบรวมเป็นหมวดหมู่ของประเภทอันตรายที่มักเกิดขึ้นเสมอ ดังนี้

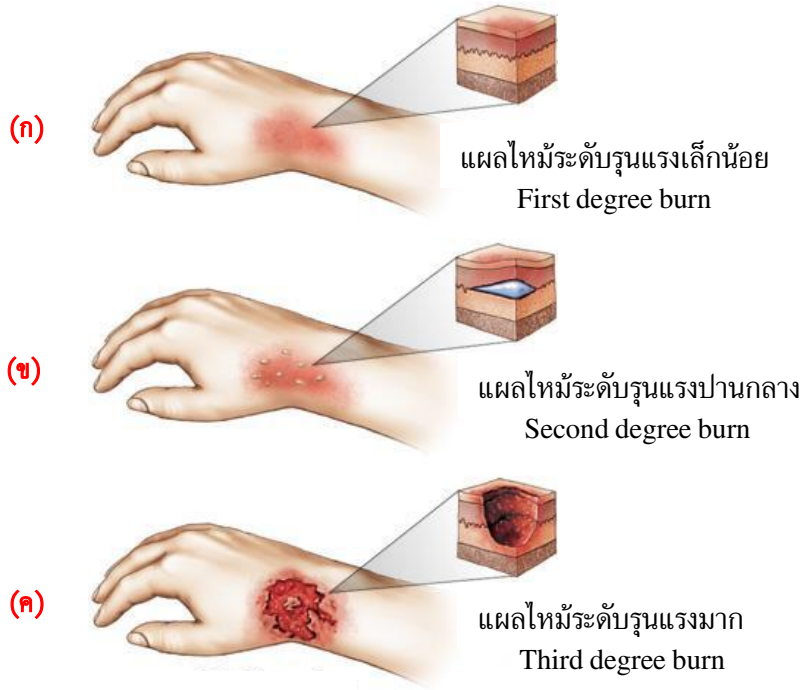
1.2.1 อันตรายจากความร้อนและเปลวไฟ (Heat and fire hazards)

กรรมวิธีการเชื่อมและการตัดย่อมเกิดความร้อนและมีเปลวไฟเกิดขึ้น ช่างเชื่อมมักได้รับอันตรายจากสิ่งนี้อยู่เสมอ ทั้งรังสีของความร้อนจากการเชื่อม และความร้อนที่สะสมอยู่ในชิ้นงานเชื่อม (Work piece) ทั้งนี้ รวมไปถึงเปลวไฟและความร้อนจากการตัดโลหะ (Cutting process) เพื่อเตรียมชิ้นงานเชื่อม ซึ่งมักเกิดจากความประมาทหรือผิดพลาดในขั้นตอนการปฏิบัติงาน รังสีความร้อน (Ultraviolet light) จะกระทบโดยตรงกับผิวกายภายนอกซึ่งอาจทำให้เกิดการทำลายผิวหนัง ช่างเชื่อมจึงต้องสวมชุดป้องกันอย่างมิดชิด ส่วนการสัมผัสความร้อนโดยตรงจากชิ้นงานเชื่อมจะรุนแรงกว่า เพราะความร้อนสะสมมากซึ่งอาจเกิดการไหม้ของเนื้อเยื่อเป็นแผลลึก ซึ่งแบ่งระดับของรุนแรงของแผลไหม้ไว้ 3 ระดับ ซึ่งกำหนดไว้ใน OAHA (2004) ดังนี้

1. แผลไหม้ระดับผิวหนังรุนแรงเล็กน้อย (First degree burn) รูปที่1.3 (ก) เกิดเป็นแผลไหม้ที่เกิดบนผิวหนังภายนอก จากความร้อนไม่สูงมากกระทบเฉพาะผิวหนังชั้นนอกสุดเกิดเป็นผื่นแดง สามารถรักษาแผลโดยการประคบความเย็นทันทีเมื่อสัมผัส จากนั้น ใช้ยาตามคำแนะนำของแพทย์

2. แผลไหม้ระดับผิวหนังรุนแรงปานกลาง (Second degree burn) รูปที่1.3 (ข) เป็นแผลไหม้ที่รุนแรงมากขึ้นผิวหนังจะพองตัวขึ้นเกิดเป็นแผลไหม้ที่ชัดเจน เบื้องต้นอาจปฐมพยาบาลด้วยการใช้ยาที่มีความเย็นทาบริเวณแผลไหม้เพื่อลดอุณหภูมิของรอยไหม้แล้วพบแพทย์

3. แผลไหม้ระดับลึกใต้ผิวหนังรุนแรงมาก (Third degree burn) รูปที่1.3 (ค) เป็นแผลไหม้ที่มีระดับการรุนแรงมากมักเกิดจากการสัมผัสกับความร้อนจากชิ้นงานโดยตรง ความร้อนที่สูงจะทำลายผิวหนังกำพร้าจนถึงเนื้อเยื่อใต้ผิวหนัง ผิวหนังภายนอกจะถูกไหม้เกรียมหรืออาจหลุดออกมาจนเห็นเนื้อเยื่อใต้ผิวหนัง ต้องรีบพบแพทย์ทันที



รูปที่ 1.3 ระดับความรุนแรงของแผลไหม้จากความร้อน (Degree burn from heating)

ที่มา : Occupational Safety and Health Administration (OSHA)–American Health Care Academy, 2004

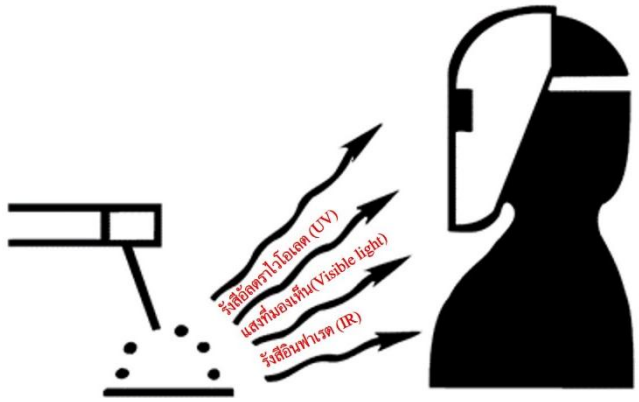
นอกจากนี้ ความร้อนที่สะสมในสภาพแวดล้อมที่ปฏิบัติการเชื่อมหรือการเชื่อมงานในที่อับคับแคบที่มีระดับความร้อนอบอ้าวที่สูงมากเกินไป ก็ส่งผลต่อความอ่อนเพลียของร่างกายจากการเสียเหงื่อมากอาจทำให้เกิดอาการหน้ามืดเป็นลมหรือหมดสติ (Fainting) โดยเฉพาะการเชื่อมงานในตำแหน่งที่สูง ในทางกลับกันในสถานที่เชื่อมงานมีอุณหภูมิต่ำหรือเย็นมากเกินไปมีผลต่ออุณภูมิของร่างกายต่ำกว่าปกติ(Hypothermia) จะให้เกิดอาการเหนื่อยล้า (Fatigue) ซึ่งอาจเกิดอันตรายในขณะปฏิบัติงานได้ อ้างอิงข้อมูลรายงานความปลอดภัยในสถานที่อับอากาศของ สสปท ปี 2562

1.2.2 อันตรายจากรังสี ควันและแก๊ส (Rays, Fumes and Gases hazards)

อันตรายจากรังสี (Rays hazards)

รังสีที่เกิดจากขบวนการเชื่อมมีทั้งชนิดที่มองเห็นและมองไม่เห็น ซึ่งเป็นอันตรายต้องป้องกันและระมัดระวังด้วยการสวมอุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยขณะทำการเชื่อม โดยจำแนกชนิดของรังสีที่เกิด

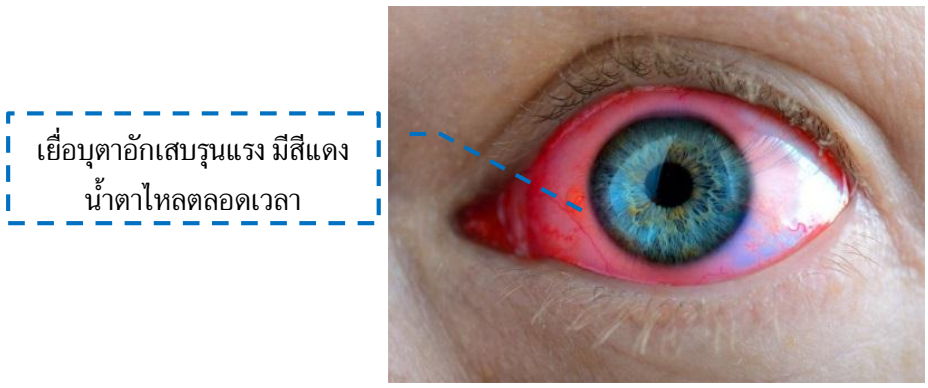
ขึ้นระหว่างการเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 1.4 และต่อด้วยรายละเอียดของแต่ละชนิดเพื่อความเข้าใจถึงพิษภัยอันตรายและความรุนแรงต่ออวัยวะของร่างกาย ดังนี้



รูปที่ 1.4 รังสีที่เกิดจากการเชื่อม (Radiation from welding process)

ที่มา : Canadian Centre for Occupational Health and Safety : CCOHS , 2020

1. รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet) หรือเรียกว่ารังสียูวี (UV) มีช่วงความยาวคลื่นอยู่ที่ 200–400 นาโนเมตร เป็นชนิดของรังสีที่มองไม่เห็นจึงมักได้รับอันตรายอยู่บ่อย ๆ โดยสามารถทำลายเม็ดสีที่ผิวหนังและถ้าได้รับเป็นเวลานาน ๆ อาจเกิดการไหม้ของผิวหนังชั้นนอกได้ ส่วนที่พบเจอแล้วเป็นปัญหาอยู่ประจำของช่างเชื่อมฝึกหัด คือ รังสีเข้าตาแล้วไปทำลายเยื่อบุดวงตาทำให้เยื่อตาอักเสบ มีชื่อเรียกหลากหลาย เช่น “Arc eye” “Welders eye” “Arc flash” หรือ “Welder flash” ทั้งหมดเหมือนกัน ซึ่งจะเกิดอาการหลังจากได้รับรังสีไปแล้วหลายชั่วโมง อาการระคายเคืองดวงตาเหมือนมีเม็ดทรายเข้าตา น้ำตาแห้งอาการรุนแรงมีตั้งแต่เจ็บตาเล็กน้อยจนถึงมีความรุนแรงต้องพบแพทย์ ดังแสดงในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 การอักเสบของเยื่อบุตาเมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเลต

ที่มา : Canadian Centre for Occupational Health and Safety : CCOHS , 2020

รังสียูวี (UV) สามารถแบ่งย่อยตามช่วงความยาวคลื่นได้ 3 ชนิด ได้แก่ ชนิดที่ 1. UV–C ความยาวคลื่น 100–280 นาโนเมตร ชนิดที่ 2. UV–B ความยาวคลื่น 280 –315 นาโนเมตร ความยาวคลื่นของทั้งคู่เมื่อรังสีเข้าตากระจกตาจะดูดกลืนได้หมด ไม่ทะลุเข้าไปสู่เยื่อบุตาข้างในจึงเป็นรังสีที่ไม่อันตราย และส่วนชนิดที่ 3. UV–A ความยาวคลื่น 315–400 นาโนเมตร ซึ่งเป็นชนิดที่สร้างปัญหาต่อดวงตาของช่างเชื่อม ช่วงความยาวของคลื่นนี้กระจกตาจะดูดกลืนได้ไม่หมดจึงทะลุผ่านไปทำลายเยื่อบุตาชั้นในทำให้เกิดการอักเสบและเจ็บปวดดวงตา อ้างอิงจาก CCOHS Annual Report (2020–2021)

2. แสงที่มองเห็น (Visible light) มีช่วงความยาวคลื่น 400–700 นาโนเมตร เป็นแสงที่สามารถมองเห็นได้เกิดจากการเชื่อมอาร์กหรือเปลวไฟ ซึ่งมีความสว่างจ้าของแสงสูงมาก มองนาน ๆ มีผลกระทบต่อม่านตาและเรตินาตาทำให้ดวงตาพล่ามัวไม่สามารถมองเห็นได้เป็นเวลาชั่วคราว เนื่องจากเกิดความตึงของม่านตา ที่เรียกว่า Eye strain ถ้าเกิดบ่อย ๆ อาจทำให้สูญเสียการมองเห็นอย่างถาวร อย่างไรก็ตาม อันตรายเหล่านี้ช่างเชื่อมสามารถป้องกันได้ด้วยการสวมอุปกรณ์ป้องกัน

3. รังสีอินฟราเรต (Infrared rays) หรือ รังสีไออา (IR) มีช่วงความยาวคลื่น 700–1,400 นาโนเมตร เป็นชนิดของรังสีที่มองไม่เห็นเนื่องจากใช้เวลาในการเคลื่อนที่นานกว่าคลื่นความถึงแสงที่มองเห็นได้ (Light frequencies) รังสีชนิดนี้มีอันตรายน้อยเพราะเป็นรังสีความร้อนเมื่อสัมผัสนาน ๆ จะรู้สึกร้อนทำให้รู้ตัวและหลีกเลี่ยงได้ แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าได้รับรังสีนานเกินไปจะเกิดความร้อนสะสมสามารถทำลายผิวหนังและทำลายเนื้อเยื่อภายในลูกตา (Retina) และเป็นต้นเหตุของการเกิดโรคตาต้อกระจก (Cataracts) โดยผลร้ายนี้อ้างอิงจากข้อกำหนดของกฎกระทรวง เล่มที่ 133 ตอน 91 ก ปี 2559 สำหรับรังสีอินฟาเรตจะเกิดขึ้นในขบวนการของการตัดด้วยแก๊สอะเซทิลีน (Oxy–acetylene cutting) มากกว่าขบวนการเชื่อมอื่น ๆ ดังนั้น ขอแนะนำให้เลือกใช้แว่นตาที่มีเลนส์เหมาะสมและสวมชุดอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลจะช่วยลดอันตรายจากยังสีความร้อนอินฟาเรตได้ดี นอกจากนี้ ยังต้องคอยระมัดระวังถึงรังสีอินฟาเรตที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในบรรยากาศสถานที่ปฏิบัติงาน ความร้อนก่อนให้เกิดแก๊สพิษได้โดยไม่รู้ตัว จึงแนะนำให้ผู้ปฏิบัติงานเปิดเครื่องมือตรวจจับแก๊สพิษไว้ในสถานที่ทำงานที่จำกัดและคับแคบ

อันตรายจากควันและแก๊ส (Fumes and Gases hazards)

ขบวนการเชื่อมด้วยการอาร์กรวมไปถึงการเชื่อมด้วยการบัดกรี มักจะพบกับจำพวกควันและแก๊สในรูปแบบต่าง ๆ ในระหว่างปฏิบัติงาน ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อช่างเชื่อมโดยหลีกเลี่ยงได้ยาก จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ช่างเชื่อมทุกคนต้องเรียนรู้ถึงแหล่งกำเนิดของควันและแก๊ส รู้จักชนิดและประเภทของแก๊ส ต้องเข้าใจถึงระดับความรุนแรงเมื่อสัมผัสรวมถึงวิธีการป้องกัน พร้อมกับปฏิบัติตามกฎของความปลอดภัยอย่างเคร่งครัด เพื่อขจัดปัญหาต่าง ๆ เหล่านี้ให้หมดไปและสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย

เป็นที่ทราบกันดีว่าทั้งควันและแก๊สที่ช่างเชื่อมสัมผัสจะมีผลกระทบโดยตรงต่อระบบการหายใจ (Respiration system) โดยควัน (Fumes) ที่เป็นอันตรายมักเป็นควันของไอระเหยของโลหะหนักที่ถูกหลอมละลาย เช่น โลหะตะกั่ว สังกะสี แคดเมียม เป็นต้น โดยอ้างอิงจาก ความปลอดภัยในการเชื่อม–ตัด (สสปท) ปี 2562 ซึ่งรวมไปถึงฟลักซ์บางชนิดที่นำมาใช้เป็นสำคัญ ส่วนแก๊ส (Gases) จะเป็นจำพวกสารป้องกันบ่อหลอมละลายขณะเชื่อมที่เป็นได้ทั้งสถานะแก๊ส (Shielding gas) และของแข็ง (Solid flux) ได้แก่ อาร์กอน (Ar) ฮีเลียม (He) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไนโตรเจน (N_2) และไฮโดรเจน (H_2) เป็นต้น ดังจะได้กล่าวถึงรายละเอียดต่าง ๆ ต่อไปนี้

1. อันตรายจากควันของโลหะหนัก (Inhalation of metal fumes) ซึ่งสูดดมเข้าไปสะสมในร่างกายเป็นอันตรายอย่างยิ่ง โดยสารโลหะหนักแต่ละชนิดก็จะเกิดพิษร้ายและแสดงผลต่อร่างกายช่างเชื่อมในลักษณะที่แตกต่างกัน ดังสรุปผลวิเคราะห์ไว้ในตารางที่ 1.3 ซึ่งอ้างอิงจากข้อมูลของ TLVs and BEls, ACGIH (2005) และผลการศึกษาของ Maria Grazia Riccelli et al. (2020)

ตารางที่ 1.3 สารโลหะหนักกับผลกระทบต่อระบบการหายใจ (Metal and result of inhalation)

ที่มา : The American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), 2005

ชนิดสารโลหะ (Metals)	ผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อหายใจเข้าไป (Result of inhalation)
สังกะสี (Zinc)	เจ็บป่วยทางระบบการหายใจ ปวดเมื่อย มีไข้ อุณหภูมิร่างกายสูง
ตะกั่ว (Lead)	เจ็บป่วยต่อระบบประสาทและระบบย่อยอาหาร อัตราการเสียชีวิตสูง
แคดเมียม (Cadmium)	อาการแน่นหน้าอก ไอ ปวดศีรษะ มีโอกาสเกิดสารก่อมะเร็งได้
เบริลเลียม (Beryllium)	เจ็บป่วยทางระบบหายใจ ไอ หายใจไม่เต็มปอด โอกาสเกิดสารก่อมะเร็งได้
โครเมียม (Chromium)	โอกาสเกิดสารก่อมะเร็งได้สูง
โคบอลต์ (Cobalt)	เกิดอาการระคายเคืองกับระบบการหายใจ
แมงกานีส (Manganese)	เจ็บป่วยต่อระบบประสาทสั่งการ ทำให้การพูดการเดินควบคุมได้น้อยลง
นิกเกิล (Nickel)	อาการปวดเมื่อย ตัวร้อน ระคายเคืองของระบบหายใจ และอาจก่อสารมะเร็ง
อลูมิเนียม (Aluminum)	เกิดการเจ็บป่วยทางระบบการหายใจและระคายเคือง
ทองแดงออกไซด์ (Copper oxides)	ปวดเมื่อยร่างกาย ตัวร้อน ระคายเคืองของระบบหายใจ และอาจก่อสารการเกิดมะเร็ง

2. อันตรายจากสารเคลือบบนผิวโลหะ (Surface coating metal) เป็นอันตรายที่เกิดจากการเชื่อมวัสดุโลหะที่มีสารอันตรายเคลือบผิว (Coating) หรือสารเคลือบผิวเสื่อมสภาพ (Coating deteriorate) และรวมถึงสารตกค้างบนพื้นผิวโลหะ (Residue on surface) ซึ่งอันตรายจากสิ่งเหล่านี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้สูงมากเนื่องจากความร้อนจากการเชื่อมจะทำให้สารอันตรายในสภาพของแข็งกลายเป็นควันหรือไอระเหย ซึ่งง่ายในการเข้าสู่ร่างกายไม่ว่าจะทางตา ฉมูก ปาก หรือซึมผ่านรูขุมขนทางผิวหนัง ช่างเชื่อมทุกคนต้องทำการตรวจสอบสารเคลือบและสารตกค้างต่าง ๆ บนผิวงานก่อนเชื่อมเสมอ เพื่อป้องการสารอันตราย และต้องมีความรู้ความเข้าใจถึงการพิจารณาเลือกอุปรณ์ป้องกันที่เหมาะสมกับชนิดของสารพิษ

ที่อันตราย ที่สำคัญต้องทราบถึงชนิดของสารอันตรายและผลกระทบที่เกิดขึ้นรวมถึงการสังเกตลักษณะของอาการเมื่อได้รับสารเพื่อช่วยเหลือส่งพบแพทย์ทันเวลา โดยได้นำข้อมูลสารอันตรายที่พบบ่อย ๆ ใน ตารางที่ 1.4 โดยอ้างอิงข้อมูลจาก ACGIH (2012)

ตารางที่ 1.4 สารเคลือบและสารตกค้างบนผิวโลหะกับผลกระทบต่อระบบการหายใจ

ที่มา : The American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), 2012

สารเคลือบผิว (Coating)	สารอันตราย (Harmful substance)	ผลกระทบจากการสูดดม (Affected of inhalation)	ข้อสังเกต (Notes)
สี (Paint)	ปรอท (Mercury) ตะกั่ว (Lead) สังกะสี (Zinc) เหล็กออกไซด์ (Iron oxide)	เจ็บป่วยที่ปอด ระคายเคือง หายใจไม่เต็มปอด ได้รับปริมาณมากอาจเสียชีวิตได้ ในระยะยาวอาจก่อสารเกิดมะเร็งทางระบบการหายใจ	รับสารในรูปแบบไอระเหยโลหะ (Metal fume fever)
สารยับยั้งการเกิดสนิม (Rust inhibitors)	ก๊าซฟอสไฟต์ (Phosphide gases)	เป็นแก๊สพิษที่อันตรายมาก แรกสัมผัสจะเคืองดวงตา หายใจไม่ออก มีผลต่อไตและอวัยวะอื่นๆ อีกในระยะยาว	แก๊สไม่มีสี (Colorless gases)
	สังกะสีออกไซด์ (Zinc oxide)	หลังรับสารหลายชั่วโมงจะมีอาการไข้สูง ตัวหนาวสั่น คล้ายไข้หวัดใหญ่	หายเองได้ภายใน 24–48 ชั่วโมง
	แคดเมียมออกไซด์ (Cadmium oxide)	ระคายเคืองระบบหายใจ หลอดลมอักเสบ ถุงลมโป่งพอง ได้รับปริมาณมากรุนแรงถึงเสียชีวิต	เกิดอาการหลังรับสารหลายชั่วโมง
	โครเมียม (Chromium VI)	เยื่อบุระบบทางเดินหายใจเสียหาย และเกิดโรคผิวหนังหรือหิด	สารควบคุมโครมเมียม 6
พลาสติกเทฟลอน (Teflon)	แก๊สพิษ (Poisonous Gases)	ทำลายระบบทางเดินหายใจ เนื้อเยื่อโพรง จมูก ปอด และ ช่องคอ	ควบคุมอุณหภูมิไม่ 260°C
สารตกค้าง (Residue on surface)	**สารอันตราย (Harmful substance)**	**ผลกระทบจากการสูดดม (Affected of inhalation)**	**ข้อสังเกต (Notes)**
สารทำความสะอาดที่มีคลอรีน (Chlorinated)และไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon)	แก๊สฟอสจีน (Phosgene gases) กรดเกลือ (Hydrochloric acid)	กระทบต่อระบบการหายใจ หลอดลม ปอด โพรงจมูก ตา และช่องคอ	เกิดจากปฏิกิริยาของรังสีอัลตราไวโอเลตกับสารชะล้าง
น้ำยาประสานบัดกรี	บอแรกซ์ (Borax)	ระคายเคืองผิวหนัง ตา และระบบทางเดินหายใจ	มีกลิ่นฉุน

3. แก๊สอันตรายจากการเชื่อม (Gases hazards from welding) ในขบวนการเชื่อมจะมีแก๊สเกิดขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะของไอระเหยที่มองไม่เห็น ส่วนสสารที่สามารถมองเห็นเรียกว่า ควัน (Fumes) โดยแก๊สอันตรายที่จะกล่าวถึงมีแหล่งที่มาจากแก๊สที่ป้อนเข้าไปใช้ในขบวนการเชื่อม (Shielding gases) กับแก๊สมาจากการสลายตัวของฟลักซ์ (Flux) เนื่องจากความร้อน ซึ่งเป็นปกติที่แก๊สจากการเชื่อมจะลอยขึ้นสู่ด้านบนสู่สภาพบรรยากาศแวดล้อมในบริเวณปฏิบัติการเชื่อม และเนื่องจากอิทธิพลของแก๊สที่ร้อนประจวบกับการมีอนุภาคที่เล็ก ดังนั้น ช่างเชื่อมที่กำลังทำการเชื่อมจึงมีโอกาสได้สัมผัสกับแก๊สเหล่านี้ได้อย่างง่ายดายหากไม่มีอุปกรณ์ป้องกันที่ดีพอ อันตรายของแก๊สจากการเชื่อมสามารถก่อให้เกิดผลเสียต่อร่างกายของช่างเชื่อมได้ทั้งระยะสั้นและระยะยาว โดยอ้างอิงข้อมูลจาก NIOSH (2007) ดังนี้

ผลระยะสั้น (Short-term effects) หมายถึง การที่ช่างเชื่อมสัมผัสกับแก๊สอันตรายในปริมาณมากแล้วเกิดอาการทันทีหรือเว้นช่วงหลังสัมผัสไปในระยะเวลาไม่นานอาจพบอาการได้ ดังต่อไปนี้

ก. อาการไข้สูงอันเนื่องจากผลของแก๊ส (Exposure to volume of gases) มักเกิดขึ้นกับการได้รับสารจำพวก ออกไซด์สังกะสี ออกไซด์ทองแดง หรือออกไซด์เหล็กมากเกินไป

ข. อาการเนื่องจากได้รับโอโซนมากเกินไป (Exposure to ozone) แก๊สโอโซนเกิดจากการเชื่อม TIG MIG และ PAWเป็นสำคัญ หากสูดดมมากเกินไปจะมีอาการน้ำมูกไหล ปวดศีรษะ ง่วงนอน ซึม ระคายเคืองตา และหายใจไม่สะดวก

ค. อาการเนื่องจากได้รับแก๊สชนิดออกไซด์ในปริมาณมากเกินไป (Exposure to gases oxide) ได้แก่จำพวก แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_2) ไนตริกออกไซด์ (NO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คาร์บอนมอนออกไซด์ (CO) หรือแก๊สฟอสจีน (Phosgene) จะเกิดจากการเชื่อมแบบอาร์ก มีอาการทันทีไม่กี่ชั่วโมงหลังได้รับในปริมาณที่มากเกินไป โดยเกิดลักษณะอาการระคายเคืองของระบบทางเดินหายใจ ปวดศีรษะ อาเจียร และอาจหมดสติได้

ผลระยะยาว (Long-term effects) หมายถึง อาการที่แสดงออกหลังจากได้รับหรือสัมผัสแก๊สไปแล้วเป็นเวลานาน ๆ อาจพบอาการได้ ดังต่อไปนี้

ก. อาการทางระบบทางเดินหายใจ มักเกิดในรูปแบบของการหายใจไม่เต็มปอด หายใจติดขัด ช่องคออักเสบ ระคายเคืองเรื้อรังและเป็นปัญหาเกี่ยวกับอวัยวะปอด

ข. อาการทางระบบประสาท มักเกิดกับการได้รับสารจำพวกตะกั่วหรือแมงกานีสมากเกินไป อาการระบบประสาทเสื่อมรวมถึงระบบเลือดและระบบทางเดินอาหาร

ค. อาการทางระบบหัวใจและเลือด เกิดจากได้รับแก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์ โดยเฉพาะจากการเชื่อม MIG/MAG แก๊สเข้าไปรวมตัวกับฮีโมบิลในเลือด ทำให้เลือดลดความสามารถในการนำพาออกซิเจนได้ลดลง ซึ่งเป็นต้นเหตุของการเป็นโรคหัวใจ

ง. อาการทางผิวหนัง ส่วนใหญ่เกิดจากแก๊สที่มีระดับความร้อนสูง ๆ ได้แก่ สารประกอบของโครเมียม VI จากการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม

จ. โรคมะเร็ง แก๊สจากการเชื่อมมีโอกาสก่อสารเกิดมะเร็งให้กับช่างเชื่อมมากกว่าบุคคลทั่วไป ถึง 30–40 เปอร์เซ็นต์ เพราะการทำงานเชื่อมมีโอกาสได้รับแก๊สอันตรายอยู่บ่อย ๆ ซึ่งเป็นอาการที่สะสมเรื้อรังจึงเป็นบ่อเกิดของสารการก่อมะเร็งได้ง่าย

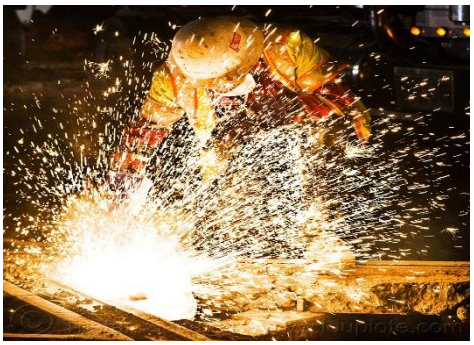
1.2.3 อันตรายจากประกายไฟ เพลิง และระเบิด (Sparks, fires and explosions hazards)

อันตรายของกลุ่มนี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้ง่ายมากถ้าหากไม่ระมัดระวังหรือไม่เข้าใจวิธีการป้องกัน โดยเฉพาะอันตรายจากการระเบิดซึ่งสร้างความเสียหายและเป็นอันตรายที่รุนแรง เพื่อความปลอดภัยของช่างเชื่อมจึงพยายามชี้แนะและรวบรวมวิธีการป้องกันอันตรายของแต่ละชนิด ดังรายละเอียดต่อไปนี้

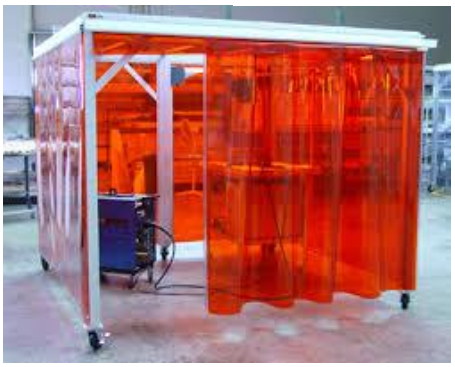
1. อันตรายจากประกายไฟ (Sparks hazards) การเชื่อมหรือการตัดโลหะเหล็กมีประกายไฟหรือที่เรียกว่าสะเก็ดไฟเกิดขึ้นเสมออย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังรูปที่ 1.6 (ก และ ข) ซึ่งประกายไฟมีความร้อน มีการกระเด็นและลุกไหม้ได้ เป็นอันตรายอย่างมากแก่ช่างเชื่อมหรือบุคคลอื่นในบริเวณใกล้ ๆ กัน ดังนั้น จึงต้องศึกษาและทำความเข้าใจถึงวิธีการป้องกัน โดยสวมชุดอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสม ทำการขจัดวัตถุติดไฟออกจากพื้นที่ปฏิบัติงาน โดยเฉพาะจำพวกถังที่มีความดันที่บรรจุสารติดไฟ พร้อมสร้างม่านหรือฉากกั้นประกายไฟที่จะกระจายออกไปไกลให้อยู่ในพื้นที่จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 1.6 (ค)



(ก) ประกายไฟจากการเชื่อม (Welding sparks)



(ข) ประกายไฟจากการตัด (Cutting sparks)



(ค) ฉากกั้นป้องกันประกายไฟ (Welding curtains)

รูปที่ 1.6 ประกายไฟจากการเชื่อม การตัด และฉากกั้นป้องกันประกายไฟ

ที่มา : สสปท– ความปลอดภัยพื้นฐานในงานเชื่อม–ตัด โดยใช้ออกซิเจนและแก๊สเชื้อเพลิง 2562

การกระเด็นของประกายไฟมีระยะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับที่มาของแต่ละแหล่งกำเนิดและทิศทางของการกระเด็น ดังแสดงในตารางที่ 1.5 ซึ่งใช้เป็นหลักเกณฑ์การพิจารณาป้องกันอันตรายโดยการหลีกเลี่ยงประกายไฟที่จะเกิดขึ้นในการปฏิบัติงาน อ้างอิงข้อมูลจากบทความความปลอดภัยส่วนบุคคล โดย ยุคล จุลอุภัย (2015)

ตารางที่ 1.5 การพิจารณาป้องกันอันตรายโดยการหลีกเลี่ยงประกายไฟที่เกิดขึ้นในการปฏิบัติงานเชื่อม

ที่มา : The Journal of Welding Institute of Thailand (JWIT), Vol. 1, 2015

แหล่งกำเนิดประกายไฟ (Sparks source)	พื้นที่อันตรายจากการกระเด็นของประกายไฟ		
	ระยะกระเด็นแนวราบ (Horizontal range)	ระยะกระเด็นแนวตั้ง (Vertical range)	
		กระเด็นขึ้นบน (Upward)	กระเด็นลงล่าง (Downward)
เปลวไฟงานบัดกรี (Flame−soldering)	สูงสุด 2 เมตร	สูงสุด 2 เมตร	สูงสุด 10 เมตร
เชื่อมแก๊สและเชื่อมอาร์ก (Manual gases and Arc welding)	สูงสุด 7.5 เมตร	สูงสุด 4 เมตร	สูงสุด 20 เมตร
ตัดด้วยความร้อน (Thermal cutting)	สูงสุด 10 เมตร	สูงสุด 4 เมตร	สูงสุด 20 เมตร

2. อันตรายจากเพลิง (Fires hazards) เพลิงหรือเปลวเพลิงมีโอกาสเกิดการลุกไหม้ได้สูงในพื้นที่ของการเชื่อม “Hot work area” ด้วยเหตุที่บริเวณดังกล่าวเป็นต้นกำเนิดของประกายไฟ เมื่อประกายไฟกระเด็นไปตกในวัสดุเชื้อเพลิงหรือวัสดุที่ติดไฟได้ง่ายไม่ว่าจะเป็นวัสดุที่เป็นเชื้อเพลิงแข็ง เหลว หรือแก๊ส สามารถเกิดเปลวเพลิงขึ้นได้ทันทีซึ่งเป็นอันตรายต่อช่างเชื่อม จึงได้สร้างกฎเกณฑ์ความปลอดภัยไว้ว่าก่อนทำการเชื่อมงานทุกครั้งต้องสำรวจสภาพแวดล้อมทั่วบริเวณต้องปราศจากวัสดุที่ลุกติดไฟได้ง่าย ถ้ามีให้ทำการเคลื่อนย้ายออกไปห่าง 35 ฟุต หรือ 10.7 เมตรเป็นอย่างน้อย ตามมาตรฐานการป้องกันอัคคีภัย (National Association of Fire Prevention : NFPA) จากตำแหน่งของประกายไฟจากการเชื่อมหรือการตัด และสิ่งสำคัญสถานที่ปฏิบัติงานต้องทำการติดตั้งถังดับเพลิง (Fire extinguisher) หรือเครื่องดับเพลิงอื่นใดไว้ในตำแหน่งที่ถูกต้องและสามารถหยิบใช้ได้ทันที ในการณีมีความเสี่ยงที่จะมีโอกาสเกิดเพลิงได้สูงจำเป็นต้องมีเจ้าหน้าที่ระวังเพลิง (Fire watcher) ทำหน้าที่เฝ้าระวังเสียงสัญญาณเตือนและทำการเข้าระงับเพลิงด้วยเครื่องหรือถังดับเพลิงได้ทันเหตุการณ์ นอกจากนี้บางสถานที่ปฏิบัติงานจำเป็นต้องมีใบอนุญาตจากเจ้าหน้าที่ของแต่ละพื้นที่ ซึ่งอาจเป็นนักดับเพลิง ซึ่งเรียกใบอนุญาตนี้ว่า “Hot work permit” ถึงจะสามารถปฏิบัติงานได้

ประเภทของเพลิงแบ่งออกได้ 5 ประเภท ตามข้อกำหนดของ NFPA (2018) ได้แก่

เพลิงประเภท A (Ordinary combustibles) เพลิงไหม้ประเภทนี้เกิดจากเชื้อเพลิงธรรมดาที่ติดไฟง่าย เช่น ไม้ ผ้า กระดาษ ขยะ และพลาสติก ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่พบได้ในอาคารที่พักอาศัยทั่วไป โดยเพลิงไหม้ประเภทนี้สามารถดับได้ด้วยน้ำเปล่า

เพลิงประเภท B (Flammable liquids) เป็นเพลิงไหม้ที่เกิดจากเชื้อเพลิงที่เป็นของเหลวติดไฟ มีส่วนประกอบพื้นฐานเป็นน้ำมันดิบ น้ำมันก๊าซ น้ำมันเบนซิน และก๊าซไวไฟ เช่น บิวเทน (Butane) หรือโพรเพน (Propane) โดยเชื้อเพลิงเหล่านี้พบได้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเชื้อเพลิงน้ำมันหล่อลื่นไปจนถึงการผลิตสีบางชนิด เชื้อเพลิงประเภท B สามารถลุกไหม้ได้นานเมื่อมีออกซิเจนอยู่รอบ ๆ การดับเพลิงไหม้ประเภทนี้จึงต้องกำจัดออกซิเจนโดยรอบออก

เพลิงประเภท C (Electrical equipment) เป็นเพลิงไหม้ที่เกิดกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ยังมีกระแสไฟฟ้าอยู่ หรืออุปกรณ์ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอยู่ตลอดเวลาที่ทำงาน เช่น มอเตอร์ เครื่องใช้ไฟฟ้า ตัวแปลงกระแสไฟฟ้า เป็นต้น อุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านี้เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอยู่ตลอดเวลาจะทำให้เกิดความร้อนสูง เมื่อมีการชำรุดเสียหายอาจก่อให้เกิดเพลิงไหม้ประเภท C ได้ การดับเพลิงไหม้ประเภทนี้ควรต้องตัดระบบไฟฟ้าก่อนทำการดับไฟ

เพลิงประเภท D (Combustible metals) เพลิงไหม้ประเภทนี้เกิดจากเชื้อเพลิงที่เป็นโลหะจำพวกติดไฟได้ เช่น ไทเทเนียม (Titanium) แมกนีเซียม (Magnesium) อลูมิเนียม (Aluminum) และโพแทสเซียม (Potassium) เป็นต้น เป็นเชื้อเพลิงที่พบได้ในห้องปฏิบัติการ ห้องทดลองไปจนถึงอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานโลหะเหล่านี้ โดยเพลิงไหม้ประเภทนี้ไม่สามารถดับด้วยน้ำเปล่าได้

เพลิงประเภท K (Combustible cooking) เพลิงไหม้ประเภทนี้เกิดกับน้ำมันที่ใช้ในครัว ไขมันสัตว์ไปจนถึงของเหลวที่ใช้ในการประกอบอาหาร ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่พบได้ในครัวเรือนและร้านอาหาร

ตามมาตรฐานสากลได้กำหนดประเภทของถังดับเพลิงไว้ที่เข้าใจตรงกันว่ามีถังดับเพลิง 4 ชนิด สารดับเพลิง ที่กำหนดไว้ใน NFPA (2018) คือ สเปร์ยโฟม (Foam spray extinguishers) ผงเคมีแห้ง (Dry chemical extinguishers) สารเหลวระเหย (Halotron extinguishers) และเคมีสูตรน้ำ (Wet chemical extinguishers) ซึ่งแต่ละชนิดสารใช้ดับเพลิงได้เฉพาะเพลิงบางประเภท แต่บางชนิดสารสามารถใช้ได้กับเพลิงมากกว่าหนึ่งประเภท อย่างไรก็ตาม หากมีการใช้เครื่องดับเพลิงที่ผิดประเภทอาจเป็นอันตรายทำให้เกิดเปลวไฟที่ลุกลามเพิ่มขึ้น หรืออาจทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้ หรืออาจทำให้เกิดการระเบิดขึ้นได้ ดังนั้น จึงได้มีการสร้างเอกสารเพื่อแนะนำการเลือกใช้งานอุปกรณ์ถังดับเพลิง ดังแสดงชนิดของถังดับเพลิง ความสามารถของถังดับเพลิงแต่ละชนิดและพร้อมสัญลักษณ์ใน ตารางที่ 1.6

การติดตั้งถังดับเพลิงต้องเป็นตำแหน่งที่สามารถเข้าถึงได้สะดวก อยู่ในจุดที่องเห็นได้ง่ายและชัดเจน ถังดับเพลิง 1 ถังจะครอบคุลมพื้นที่ประมาณ 100 ตารางเมตร และกรณีที่ติดตั้งแขวนผนังจะต้องสูงจากพื้น 1 เมตร ส่วนกรณีที่วางไว้บนพื้นต้องมีฐานรองเพื่อป้องกันความชื้นและป้องกันถังล้ม และเนื่องจากในการปฏิบัติงานเชื่อมมีโอกาสที่จะเกิดเพสิงไหม้ค่อนข้างสูง ดังนั้น ช่างเชื่อมหรือผู้ปฏิบัติการ

ด้านการเชื่อมทุกคนต้องศึกษาเรียนรู้การเลือกใช้ถังดับเพลิงและต้องใช้อย่างมีสติ ซึ่งก่อนการลงมือปฏิบัติการเชื่อมทุกครั้งต้องสังเกตและตรวจสอบว่าถังดับเพลิงยังอยู่ในสภาพพร้อมใช้งานหรือไม่และมีสิ่งขีดขวางในการหยิบใช้หรือไม่

ตารางที่ 1.6 การเลือกใช้ชนิดของถังดับเพลิงให้ถูกกับประเภทของเพลิง

ที่มา : www. Safetymanshop.com

สัญลักษณ์				
ชนิดถังดับเพลิง	เกิดจากเชื้อเพลิงวัสดุของแข็ง	เกิดจากเชื้อเพลิงของเหลวและเชื้อเพลิงแก๊สติดไฟ	เกิดจากวัสดุและอุปกรณ์ที่มีกระแสไฟฟ้า	เกิดจากน้ำมันที่ใช้ประกอบอาหาร
	 **ใช้ได้**	 **ใช้ได้ (แบบจำกัด)**	 **ใช้ไม่ได้**	 **ใช้ไม่ได้**
	 **ใช้ได้**	 **ใช้ได้**	 **ใช้ได้ (แบบจำกัด)**	 **ใช้ไม่ได้**
	 **ใช้ได้**	 **ใช้ได้**	 **ใช้ได้**	 **ใช้ไม่ได้**
	 **ใช้ได้**	 **ใช้ได้**	 **ใช้ได้**	 **ใช้ได้**

3. อันตรายจากการระเบิด (Explosions hazards) ในขบวนการเชื่อมมีความจำเป็นต้องใช้สารหรือวัสดุประเภทติดไฟได้ง่ายรวมถึงแก๊สที่มีแรงดัน ซึ่งส่วนใหญ่เก็บอยู่ภายในถังภาชนะความดัน (Pressure vessel) ดังนั้น จึงมีความเสี่ยงที่จะเกิดระเบิดขึ้นได้และมีอันตรายถึงชีวิต ดังแสดงตัวอย่างการระเบิดของการเชื่อมถังความดัน ในรูปที่ 1.7 และตัวอย่างสถานที่การจัดเก็บที่ดีในรูปที่ 1.8 ช่างเชื่อมจึงต้องตระหนัก (Be aware) และเรียนรู้เพื่อป้องกันอุบัติเหตุเหล่านี้ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา ซึ่งจากข้อมูลที่รวบรวมพอระบุสาเหตุของการเกิดระเบิดได้ ดังนี้

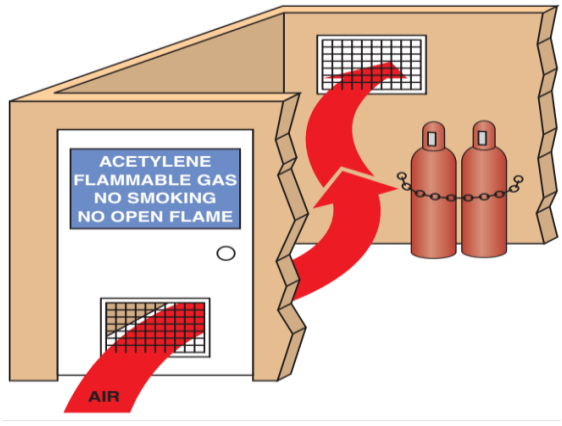
– สาเหตุจากการใช้ถังความดันที่ไม่ได้มาตรฐานหรือเสื่อมสภาพ
– สาเหตุจากใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ไม่ถูกวิธีหรือชำรุด
– สาเหตุจากถังความดันได้รับความร้อนสูงเกินกำหนด
– สาเหตุจากการเชื่อม ตัด หรือเกิดประกายไฟกับถังบรรจุสารเชื้อเพลิง
– สาเหตุจากสภาพพื้นที่ปฏิบัติงานเชื่อมมีสารวัตถุระเบิดโดยไม่ทราบคุณสมบัติของสาร
– สาเหตุจากสถานที่จัดเก็บแก๊สติดไฟในสถานที่อับอากาศไม่ถ่ายเท เกิดจุดวาบไฟขึ้น



สถาพของถังที่เกิดการระเกิด

รูปที่ 1.7 ตัวอย่างการเชื่อมที่เกิดการระเบิดของถังภาชนะความดัน

ที่มา : The federal Occupational Health and Safety Administration–AVS, 2018



รูปที่ 1.8 ตัวอย่างการออกแบบจัดสถานที่จัดเก็บที่ถูกต้องเพื่อป้องกันการระเบิดจากจุดวาบไฟ

ที่มา : Larry j., and Lawrence B., Welding for entry level welders. 2010

1.2.4 อันตรายจากเสียง ไฟฟ้าดูด และพื้นที่ทำงาน (Noise, electric shock and work area hazards)

1. อันตรายจากเสียง (Noise hazards) โรงงานหรือพื้นที่งานประกอบด้วยวิธีการเชื่อม มักมีเสียงดังจากขบวนการปฏิบัติงานอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งถ้าระบบเยื่อหูชั้นในของช่างเชื่อมได้รับการรบกวนนาน ๆ จะเกิดอาการของหูอื้อ ปวดศีรษะ โมโหฉุนเฉียว เสียสมาธิ ลดประสิทธิภาพในการทำงานลง ถ้ามีอาการบ่อย ๆ หรือเป็นประจำจะทำลายระบบการได้ยินอย่างถาวร ต้องมีการตรวจวัดระดับความดังเสียงที่เกิดจากขบวนการเชื่อม โดยได้มีการตรวจวัดระดับเสียงของบางขบวนการเชื่อม ได้ดังนี้

– ขบวนการเชื่อมแก๊ส (Gas welding) ระดับเสียง 60 ถึง 95 dBA

– ขบวนการเชื่อมอาร์กด้วยมือ (MMA welding) ระดับเสียง 85 ถึง 95 dBA

– ขบวนการเชื่อมมิก/แม็ก (MIG/MAG welding) ระดับเสียง 90 ถึง 95 dBA

– ขบวนการเชื่อมทิก (TIG welding) ระดับเสียง 75 ถึง 85 dBA

จากข้อมูลข้างต้นเห็นได้ว่าขบวนการเชื่อมทั้งหมดที่กล่าวถึงอยู่ในระดับความดังที่เป็นอันตราย (85 dBA อ้างอิงตามองค์การอนามัยโลก) และองค์กรความปลอดภัยและอาชีวอนามัยของอเมริกา (Occupational Safety and Health Administration : OSHA) ได้กำหนดมาตรฐานมลพิษทางเสียงที่เป็นอันตรายดังแสดงในตารางที่ 1.7 ดังนั้น ช่างเชื่อมต้องป้องกันตนเองโดยการใช้อุปกรณ์ป้องกัน เพื่อลดระดับเสียงให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยตลอดการทำงาน

ตารางที่ 1.7 มลพิษทางเสียงตามมาตรฐานของ OSHA –1910 Subpart G

ที่มา : Occupational Health and Environmental Control–Occupational noise exposure 2005

มลพิษทางเสียง ตามมาตรฐานของ OSHA 1910.95 Occupational Health and Environmental Control–Occupational noise exposure	
ระดับความดังเสียง (Noise level)	ขีดจำกัดที่สามารถได้ยินเสียงรบกวน (Permissible noise exposure limit)
90 dBA	8.0 ชั่วโมง
92 dBA	6.0 ชั่วโมง
95 dBA	4.0 ชั่วโมง
97 dBA	3.0 ชั่วโมง
100 dBA	2.0 ชั่วโมง
102 dBA	1.5 ชั่วโมง
105 dBA	1.0 ชั่วโมง
110 dBA	30 นาที
115 dBA	15 นาที

2. อันตรายจากไฟฟ้าดูด (Electric shock hazards) เครื่องมืออุปรณ์ที่ใช้ในงานวิศวกรรมการเชื่อม ส่วนใหญ่ใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นสำคัญ ดังนั้น โอกาสที่ผู้ปฏิบัติการด้านงานเชื่อมจะถูกไฟฟ้าดูดจึงมีโอกาสเกิดขึ้นมาก ถ้าไม่หาวิธีการป้องกันหรือประมาทในการใช้เครื่องมือทางไฟฟ้า ระดับความอันตรายของการโดนไฟฟ้าดูดขึ้นอยู่กับแรงดันของระบบ (Open Circuit Voltage : OCV) แรงดันหรือแรงเคลื่อนสูงจะอันตรายมากซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าแรงสูงหรือไฟฟ้าโรงงาน สำหรับเครื่องเชื่อม (Welding machine) เป็นระบบไฟฟ้าแรงเคลื่อนต่ำ (Low welding voltage) แต่กระแสสูง ช่างเชื่อมจึงมักเคยชินกับการโดนไฟฟ้าดูดที่แค่รู้สึกได้ว่าไฟฟ้าดูดมักไม่ค่อยเกรงกลัวจึงขาดความเอาใจใส่ ซึ่งถ้าเกิดขึ้นอยู่บ่อย ๆ ก็จะมีผลต่อระบบกล้ามเนื้อหัวใจ ระบบหารหายใจ และระบบประสาทการรับรู้ รวมไปถึงระบบสมองที่บอบบางที่อาจนำไปสู่การก่อเกิดโรคร้ายอื่น ๆ และเสียชีวิตได้ เพื่อความเข้าใจและสร้างความปลอดภัยให้กับช่างเชื่อมจึงได้นำเกณฑ์มาตรฐานของระดับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายและผลกระทบที่มีต่อปฏิกิริยาของร่างกาย ดังแสดงในตารางที่ 1.8

ตารางที่ 1.8 ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านและมีผลต่อร่างกาย

ที่มา : International Electrochnical Commission IEC/TS 60479–1. 2005

ปริมาณกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมป์ : mA)	ผลกระทบที่มีต่อปฏิกิริยาของร่างกาย (Impact on the body's reaction)
ต่ำกว่า 2	ไม่มีผลกระทบต่อร่างกาย
2	มีอาการอ่อนเพลีย ประสาทมือสั่น กล้ามเนื้อกระตุกเล็กน้อย
5 – 10	มีอาการช๊อค (Shock) กล้ามเนื้อกระตุก เกิดอาการเจ็บปวด ระบบหายใจล้มเหลว
10 – 25	ความดันเลือดสูง บริเวณถูกดูดเกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อ ระบบหายใจล้มเหลวถึงขั้นหมดสติ
25 – 80	เกร็งกล้ามเนื้อ หายใจติดขัด อาจทำให้สมองขาดออกซิเจน ถ้านานเกิน 4 นาทีถึงขั้นพิการทางสมอง
80 – 200	ขาดเลือดเลี้ยงหัวใจ หัวใจล้มเหลวหลังถูกดูดชั่วขณะ หัวใจหยุดเต้นหรือเสียชีวิต
200 – 5,000	หัวใจล้มเหลวหลังถูกดูด 0.1 วินาที ผิวหนังถูกทำลาย หัวใจหยุดเต้นและเสียชีวิตได้
มากกว่า 5,000	ถูกเผาไหม้ เนื้อเยื่อตาย เสียชีวิต

การการป้องกันหรือหลีกเลี่ยงสภาวะถูกไฟฟ้าดูด (Protection or avoiding electrical shock) ในการปฏิบัติการเชื่อมสามารถทำได้หลากหลายวิธีการ ซึ่งจะนำเสนอในบางวิธีการ ดังต่อไปนี้

ก. การเลือกใช้เสื้อผ้า (Clothing) ต้องไม่เป็นผ้าที่ดูดเก็บน้ำจากเหงื่อหรือสภาพการที่เปียกน้ำ เพราะเป็นสื่อทางไฟฟ้ารวมไปถึงส่วนประอบอื่น ๆ บนผ้าต้องไม่มีประเภทวัสดุโลหะติดอยู่ ทุกครั้งที่เลือกใช้เสื้อผ้าต้องแน่ใจว่าแห้งสนิทซึ่งรวมไปถึงจำพวกถุงมือ ถุงเท้าและรองเท้า

ข. ใช้อุปกรณ์สำหรับตัดวงจรไฟฟ้าไหลสู่ดิน (Ground fault circuit interrupter : GFCI) เป็นอุปกรณ์ช่วยตัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายไหลผ่านลงดิน โดยมีระบบตัวตัดหรือหยุดวงจร (Senses) ว่ามีกระแสไหลผ่านเข้ามาภายใน 1/40 วินาที ที่ระดับกระแสประมาณ 5 mA ช่วยป้องกันกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย

ค. การใช้เครื่องมือและอุปกรณ์การเชื่อมที่มีความพร้อม ไม่ชำรุด ไม่เปียกน้ำรวมไปถึงมีปริมาณเพียงพอต่อการใช้งาน

ง. การเรียนรู้พื้นฐานทางไฟฟ้า เรื่องของสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าชนิดของกระแสไฟฟ้า ข้อห้าม ข้อควรระวังต่าง ๆ รวมไปถึงการช่วยเหลือคนที่โดนไฟฟ้าดูดอย่างถูกวิธีและปลอดภัย

3. อันตรายจากพื้นที่ทำงาน (Work area hazards) พื้นที่ปฏิบัติงานหรือสภาพแวดล้อมของงานช่างเชื่อม มีโอกาสเกิดอันตรายได้เสมอถ้าไม่ระมัดระวัง ยกตัวอย่าง ดังนี้

ก. พื้นที่งานเชื่อม มีทั้งแบบเฉพาะสำหรับงานเชื่อม (Specific welding area) กับแบบพื้นที่งานเชื่อมร่วมกับงานอื่น (General welding area) โดยพื้นที่เชื่อมร่วมกับงานอื่นจะอันตรายมากกว่าเนื่องจากมีเครื่องมือและอุปกรณ์รวมถึงวัสดุของงานอื่นที่อาจเกิดอันตรายจากการเชื่อมได้ และในบางกรณีช่างเชื่อมอาจต้องใช้เครื่องมืออื่นที่ไม่คุ้นเคยซึ่งต้องสอบถามและมั่นใจว่าใช้งานได้ไม่เกิดอันตราย นอกจากนี้ ก็ต้องระวังการทำงานของส่วนงานอื่นที่อาจมีอันตรายขณะทำการเชื่อม เช่น งานโครงสร้างประกอบอื่น งานระบบไฟฟ้า หรืองานที่มีวัสดุที่ติดไฟได้ง่ายร่วมอยู่ด้วยขณะเชื่อม เป็นต้น

ข. พื้นที่ปิดหรือจำกัด (Enclosed or confined areas) เป็นพื้นที่เชื่อมที่อันตรายมากกว่าพื้นที่ปกติอื่น ๆ ได้แก่ การเชื่อมถังภาชนะความดัน (Presser vessel) สถานที่อับคับแคบ (Confined spaces) หรือตู้บรรจุสินค้า (Containers) ดังแสดงตัวอย่างของพื้นที่งานในรูปที่ 1.9 (ก–ค) ตามลำดับ พื้นที่เชื่อมเหล่านี้มีความเสี่ยงเกิดอันตรายสูง ช่างเชื่อมต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ โดยต้องพิจารณาสิ่งสำคัญตามข้อบังคับและคู่มือความปลอดภัยในการทำงานของ สสปท (2554) ดังต่อไปนี้

– ต้องสืบค้นข้อมูลพื้นฐานของงานที่จะทำการเชื่อมก่อนเสมอ
– ต้องตรวจวัดปริมาณอากาศออกซิเจนที่เพียงพอและต้องไม่มีแก๊สอื่นปนเปื้อน
– ต้องปราศจากไอระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิงหรือสารติดไฟชนิดใด ๆ
– ต้องมีระบบระบายอากาศที่สามารถถ่ายเทอากาศได้มากเพียงพอ
– ต้องตรวจสอบระบบไฟฟ้าที่อาจโดนไฟฟ้าดูดขณะทำการเชื่อมได้
– ต้องมีการวางแผนช่วยเหลือ กรณีเกิดเหตุอันตรายขึ้นและปฏิบัติการได้ทันที

รูปแบบของอันตรายที่เกิดจากการเชื่อมงานในบริเวณพื้นที่ปิดหรือจำกัด ซึ่งอาจได้รับผลกระทบโดยตรงทันที หรืออาจมีผลกระทบข้างเคียงในระยะยาว ที่พบมากพอจะรวบรวมสรุปได้โดยสังเขป ดังนี้

- อันตรายที่เกิดจากการขาดอากาศหายใจ (Oxygen deficient atmosphere)
- อันตรายที่เกิดจากภาวะบรรยากาศมีพิษ (Toxic atmosphere)
- อันตรายที่เกิดจากภาวะบรรยากาศที่ไวไฟ (Flammable atmosphere)
- อันตรายที่เกิดจากสภาพท่าทางการทำงานที่ไม่เหมาะสม (Ergonomics)



(ก) การเชื่อมถังความดัน (Pressure vessel)



(ข) การเชื่อมในที่แคบ (Confined spaces)



(ค) การเชื่อมตู้สินค้า (Container)

รูปที่ 1.9 ตัวอย่างพื้นที่เชื่อมที่ปิดหรือจำกัด (Enclosed or confined areas)

ที่มา : OSH Academy–Occupational Safety & Heath Training

ค. พื้นที่เชื่อมบนที่สูง (Working at heights) โดยสภาพปกติงานเชื่อมจัดว่าเป็นงานที่มีโอกาสเกิดอันตรายได้สูงจากขบวนการทำงานเอง เมื่อช่างเชื่อมต้องปฏิบัติงานบนที่สูงย่อมต้องระมัดระวังอันตรายมากขึ้น ดังแสดงตัวอย่างการเชื่อมงานในที่สูงในรูปที่ 1.10 (ก) คำว่า การทำงานบนที่สูง ได้กำหนดไว้หลากหลาย เช่น กฎหมายความปลอดภัยของไทยระบุว่าสูงจากพื้นดิน 2 เมตรขึ้นไป

ของ OSHA 1926.503 ระบุว่าสูงจากพื้นดิน 1.8 เมตรขึ้นไป และของ ANSI Z359.2 ระบุว่าทุกสถานที่ที่สามารถเกิดการพลัดตกได้ แต่เป้าหมายที่เหมือนกันคือ สร้างกฎป้องกันอันตรายจากการพลัดตก (Fall) จากที่สูง ซึ่งส่งผลต่อการบาดเจ็บกลายเป็นผู้พิการหรือถึงขั้นเสียชีวิตได้ การเชื่อมงานบนที่สูงนอกจากต้องสวมอุปกรณ์ป้องกันสำหรับการเชื่อมโดยตรงแล้ว ยังต้องสวมชุดอุปกรณ์ป้องกันการตกเพิ่มเติม และสถานที่แวดล้อมที่เชื่อมต้องปราศจากวัสดุหรือสารเชื้อเพลิงใด ๆ โดยเฉพาะพื้นที่ ด้านล่างใต้พื้นที่เชื่อม เพราะประกายไฟจากการเชื่อมหรือเศษลวดเชื่อมที่ตกลงมาเป็นแหล่งกำเนิดของไฟไหม้ได้ และที่สำคัญคือต้องระวังผู้ปฏิบัติงานร่วมอื่น ๆ ที่อาจไม่รู้ถึงอันตรายที่เกิดจากการเชื่อม จึงต้องปิดกันบริเวณห้ามเข้าพร้อมป้ายบอกที่เห็นได้ชัดเจน ดังแสดงตัวอย่างป้ายในรูปที่ 1.10 (ข) (ค) และ (ง)



(ก) การเชื่อมงานบนที่สูง (Welding at heights)



(ข) ป้ายบอกอันตรายพื้นที่การเชื่อม



(ค) ป้ายบอกอันตรายจากเครื่องเชื่อม



(ง) ป้ายบอกพื้นที่สวมหน้ากากงานเชื่อม

รูปที่ 1.10 ตัวอย่างการเชื่อมงานในพื้นที่สูง และป้ายบอกอันตรายจากการเชื่อม

ที่มา : CSSIGN–Danger Arc Welding, 2013

ดัชนีคำศัพท์บทที่ 1

American National Standard Institute (ANSI) – สถาบันมาตรฐานแห่งชาติอเมริกา

Confined space – พื้นที่ทำงานจำกัดหรือสถานที่ทำงานคับแคบ

Degree of burn – ระดับความรุนแรงของแผลไฟไหม้

Electric shock hazards – อันตรายไฟฟ้าดูดจากขบวนการเชื่อม

Explosions hazards – อันตรายการระเบิดจากขบวนการเชื่อม

Fume extractors – เครื่องดูดควันเชื่อม

Fumes hazards – อันตรายจากควันเชื่อม

Gases hazards – อันตรายจากแก๊สเชื่อม

Heat and fire hazards – อันตรายจากความร้อนและเปลวไฟเชื่อม

Hot work permit – ใบอนุญาตทำงานเสี่ยงพื้นที่เพลิงไหม้

Infrared rays (IR) – รังสีอินฟาเรดจากแสงของขบวนการเชื่อม

Noise hazards – อันตรายจากเสียงดังเกินไปในงานเชื่อม

Occupational Safety and Health Administration (OSHA) – การบริหารความปลอดภัยและอาชีวอนามัยกระทรวงแรงงานแห่งสหรัฐอเมริกา

Operation protective equipment – อุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยระหว่างปฏิบัติงาน

Personal protective equipment – อุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยส่วนบุคคล

Rays hazards – อันตรายของรังสีที่เกิดจากขบวนการเชื่อม

Respirator – หน้ากากป้องกันแก๊สพิษ

Respirator protection equipment – อุปกรณ์ป้องกันระบบการหายใจ

Safety equipment – อุปกรณ์เพื่อความปลอดภัย

Safety first – ความปลอดภัยต้องให้ความสำคัญเป็นอันดับแรก

Safety harnesses – สายรัดตัวนิรภัย

Sparks hazards – อันตรายจากประกายไฟ

Ultraviolet rays (UV) – รังสีอัลตราไวโอเลตจากแสงของขบวนการเชื่อม

Ventilating fan – พัดลมระบายอากาศในพื้นที่เชื่อม

Visible light – แสงเชื่อมที่สามารถมองเห็น

Welding goggles – หน้ากากเชื่อมแก๊ส

Welding hazards – อันตรายจากการเชื่อม

Welding helmet – หน้ากากเชื่อม

Welding safety – ความปลอดภัยในการเชื่อม

Working at heights – การเชื่อมงานบนที่สูง

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 1

ข้อที่ 1. อุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยส่วนบุคคล (Personal protective equipment) ของช่างเชื่อมประกอบด้วยอุปกรณ์อะไรบ้าง และมีหน้าที่อย่างไรบ้าง

ข้อที่ 2. อุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยระหว่างปฏิบัติงาน (Operation protective equipment) ในพื้นที่ของช่างเชื่อมควรมีอุปกรณ์ใดบ้าง บอกมาอย่างน้อย 6 อย่าง พร้อมอธิบายเหตุผล

ข้อที่ 3. ท่านคิดว่าอันตรายที่เกิดจากขบวนการเชื่อมมีอะไรบ้าง บอกมาเป็นข้อ ๆ พร้อมเหตุผลประกอบ

ข้อที่ 4. อันตรายจากความร้อน และเปลวไฟ (Heat and fire hazards) มีโอกาสเกิดจากอะไรได้บ้าง และสามารถป้องกันได้อย่างไร อธิบายมาพอสังเขป

ข้อที่ 5. ระดับความรุนแรงของแผลไฟไหม้ (Degree of burn) เกิดขึ้นได้กี่ระดับ และแต่ละระดับมีความแตกต่างกันอย่างไร อธิบายมาอย่างละเอียด (ควรวาดภาพประกอบการอธิบาย)

ข้อที่ 6. รังสีจากขบวนการเชื่อม (Rays from welding process) มีกี่ชนิด อะไรบ้าง แต่ละชนิดเกิดผลกระทบต่อผู้ปฏิบัติงานช่างเชื่อมอย่างไร และสามารถหาวิธีการป้องกันอย่างไร

ข้อที่ 7. อธิบายความหมายของคำว่า “Arc eye” หรือ “Arc flash” พร้อมแนะนำหลักการป้องกันที่ถูกต้อง

ข้อที่ 8. อันตรายจากควันโลหะหนักที่เกิดขึ้นจากขบวนการเชื่อม ท่านคิดว่ามีโลหะหนักชนิดใดบ้าง บอกมาอย่างน้อย 5 ชนิด

ข้อที่ 9. อันตรายจากประกายไฟ เพลิง และการระเบิด (Sparks, fires and explosion hazards) สามารถเกิดจากแหล่งปฏิบัติงานในลักษณะใดได้บ้าง จงอธิบายมาพอสังเขป

ข้อที่ 10. จงบอกประเภทของเพลิงมาให้ครบถ้วนตามมาตรฐานอัคคีภัยพร้อมสัญลักษณ์ และบอกชนิดของถังดับเพลิงที่สามารถนำมาใช้มา พร้อมระบุประเภทของสารดับเพลิงมาให้ครบถ้วน

ข้อที่ 11. จงอธิบายถึงความหมายของ คำว่า พื้นจำกัดหรือคับแคบ (Confined or enclosed areas) สำหรับพื้นที่การเชื่อม พร้อมระบุอันตรายที่ต้องระวัง (ยกตัวอย่างประกอบการอธิบาย)

ข้อที่ 12. จงบอกวิธีการสร้างความปลอดภัยของการทำงานบนที่สูง (Welding at heights) มาเป็นข้อ ๆ

ข้อที่ 13. จากรูปเป็นถังความดันที่ระเบิดจากการเชื่อม จงบอกสาเหตุที่มีโอกาสทำให้เกิดการระเบิด



ตัวอย่างการถังความดันระเบิดที่เกิดจากการเชื่อม

ที่มา : The federal Occupational Health and Safety Administration–AVS, 2018

บรรณานุกรมบทที่ 1

กระทรวงแรงงาน *กฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และ ดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง* ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 133 ตอน 91 ก 2559

กระทรวงแรงงาน *กฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และ ดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับที่อับอากาศ* ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 136 ตอน 18 ก 2562

ส่งเสริมความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน (สสปท) *คู่มือการจัดการความเสี่ยงด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงาน (Occupational Safety and Health Risk Management Manual)* สสปท (2–4–02–01) กระทรวงแรงงาน พิมพ์ครั้งที่ 1 2562

สถาบันส่งเสริมความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน (สสปท) นิตยสาร *ความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงาน (Occupational Safety, Health and Environment)* สสปท กระทรวงแรงงาน ฉบับที่ 12 2562

สถาบันส่งเสริมความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน (สสปท) *ความปลอดภัยพื้นฐานในงานเชื่อม–ตัด โดยใช้ออกซิเจนและแก๊สเชื้อเพลิง* พิมพ์ใน Infographic 2562

สมาคมส่งเสริมความความปลอดภัยและอนามัยในการทำงาน (ประเทศไทย) ในพระราชูปถัมภ์ (Safety and Health Work Promotion Association) *ข้อบังคับและคู่มือความปลอดภัยในการทำงาน (Safety Manual)* ตามพระราชบัญญัติ ความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ. 2554

สถาบันส่งเสริมความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน (สสปท) *การเสียชีวิตและมาตรการป้องกันอันตรายจากการทำงานในสถานที่อับอากาศ* โดยกระทรวงแรงงาน เผยแพร่เมื่อวันพุธที่ 6 กุมภาพันธ์ 2562

American National Standard Institute (ANSI), *Safety in Welding, Cutting and Allied processes*, ANSI Z49.1:2012, Published by AWS, USA, 2012.

American Welding Society (AWS), *Welding Handbook–Welding Science and Technology*, 9th Edition, Vol. 1, Published by AWS, USA, 2001.

CCOHS : Canadian Centre for Occupational Health and Safety. *CCOHS Annual Report of the Council*– A Year Like No Other. Hamilton, Ontario, Canada L8N 1M5, 2020–2021.

Government of Canada. *Canadian Centre for Occupational Health and Safety* : CCOHS, 2020.

Industrial Safety & Hygiene News (ISHN), *Welding Safety*, Published by ISHN Magazine, USA, 2001.

Larry Jeffus and Lawrence Bower. *Welding – Skill, Processes and Practices for Entry–Level Welders, Book 1*. 1st Edition, Delmar Cengage Learning. Cliftan Park, USA, 2010.

Maria Grazia Riccelli, Matteo Goldoni, Diana Pola Mozzoni et al. *Welding Fumes, a Risk Factor for Lung Diseases.* MDPI– International Journal of Environmental Research and Public health. 17, 2552, 2020.

National Fire Protection Association (NFPA). *Life Safety Code*. NFPA 101, Edition, 2018.

National Institute for Occupational safety and Health (NIOSH). *NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards* (NIOSH Published No. 2005–149). 3rd Printing, 2007.

Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 1910 *Subpart G – Occupational Health and Environmental Control, 1910.95–Occupational Noise Exposure*., U.S. Department of Labor, 2005.

Occupational Safety and Health Administration (OSHA), *1960 Subpart E – National Institute for Occupational Safety and Health*, 1960.35, U.S. Department of Labor, 2005.

Occupational Safety and Health Administration (OSHA), *ANSI Z49.1 and 29 CFR 1915.153(a)(4)–Eye Protection Against Radiant Energy during Welding and Cutting in Shipyard Employment*., U.S. Department of Labor, 2005.

Occupational Safety and Health Administration (OSHA)–*American Health Care Academy*, United States Department of Labor, 2004.

Welding Institute of Thailand (WIT) *Journal of Welding Institute of Thailand*. Vol. 1 No. 1, January–June, 2015.

The Welding Institute (TWI), *UK Health and Safety Executive Issues Welding Safety Alert*, Published by TWI, UK, 2019.

TLVs and BEls, *Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices*. ACGIH, 2005.

Unitor, Maritime Welding Handbook : *Welding and Related Processes for Repair and Maintenance Onboard*, 11th Revision 2, Wilhelmsen ships service, Norway, 2008.

United States Department of Labor. Occupational Safety and Health Administration: *OSHA 29–CFR Standards–Welding, Cutting and Brazing*. USA, 2004.

บทที่ 2

กรรมวิธีการตัดและการเซาะร่อง

Cutting and Gouging Processes



ที่มา : AUTOMATED OXY–FUEL CUTTING, 2012



ที่มา : GOUGING HOW TO, 2015

จุดประสงค์การเรียนรู้ บทที่ 2 กรรมวิธีการตัดและการเซาะร่อง

- รู้จักและเข้าใจถึงความสำคัญของการตัดและการเซาะร่องสำหรับงานเชื่อม
- รู้จักและเข้าใจถึงขบวนการตัดโลหะด้วยแก๊สออกซิอะเซทิลีน
- รู้จักและเข้าใจถึงขบวนการตัดโลหะด้วยลำอาร์กพลาสมา
- รู้จักและเข้าใจถึงขบวนการเซาะร่องโลหะด้วยลำอาร์กพลาสมา
- รู้จักและเข้าใจถึงขบวนการตัดและเซาะร่องโลหะด้วยอากาศ–คาร์บอนอาร์ก
- รู้จักและเข้าใจถึงขบวนการตัดโลหะด้วยลำแสงเลเซอร์
- ตระหนักและมีจิตใต้สำนึกในการให้ความสำคัญกับความปลอดภัยในขณะปฏิบัติงานตัดและงานเซาะร่อง

"Cutting Porcess" เป็นขบวนการตัดเนื้อโลหะเพื่อแยกออกเป็นชิ้น ซึ่งมีความสำคัญและจำเป็นในงานด้านเทคโนโลยีการเชื่อม เพราะการเตรียมรอยต่อของโลหะที่จะทำการเชื่อมมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการเชื่อมและคุณภาพของรอยเชื่อม โดยเฉพาะโอกาสของการเกิดข้อบกพร่องของงานเชื่อม ดังนั้น การรู้และเข้าใจถึงขบวนการตัดด้วยวิธีการต่าง ๆ เป็นอย่างดีจะทำให้สามารถเลือกใช้ขบวนการตัดที่ถูกต้องและเหมาะสมกับสภาพงานที่นำไปใช้ ปัจจุบันกรรมวิธีการตัดมีหลากหลายวิธีให้เลือกใช้ ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดี–ข้อด้อย และความเหมาะสมที่แตกต่างกัน พบว่าในงานทางด้านเทคโนโลยีงานเชื่อมนิยมการตัดแบบใช้พลังงานของความร้อนเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น ในบทนี้จึงเจตนามุ่งเน้นเนื้อหาสาระของแต่ละกรรมวิธีในการตัดแบบใช้ความร้อนช่วยในการตัด ได้แก่ ขบวนการตัดด้วยแก๊สออกซิเจน (Oxy–fuel gas cutting : OFC) ขบวนการตัดด้วยพลาสมา (Plasma arc cutting : PAC) ขบวนการตัดด้วยอากาศ–คาร์บอนอาร์ก (Carbon arc– air cutting : CAC–A) และขบวนการตัดด้วยลำแสงเลเซอร์ (Laser beam cutting : LBC) ซึ่งแต่ละวิธีสามารถเลือกใช้กับวัสดุโลหะที่เหมาะสมในขีดความสามารถของการตัด ดังแสดงในตารางที่ 2.1

"Gouging Porcess" เป็นขบวนการตัดเซาะเนื้อโลหะเพื่อให้เกิดร่องหรือขจัดเนื้อโลหะเชื่อมที่เป็นข้อบกพร่องของรอยเชื่อมเพื่อทำการเชื่อมซ่อมหรือแก้ไข ซึ่งมีกรรมวิธีการเซาะร่องที่นิยมใช้งานกัน ได้แก่ การเซาะร่องโลหะด้วยลำอาร์กพลาสมาและขบวนการเซาะร่องโลหะด้วยอากาศ–คาร์บอนอาร์ก ซึ่งได้นำรายละเอียดของขบวนการตัดเซาะ องค์ประกอบที่สำคัญของขบวนการ รวมถึงคำแนะนำต่าง ๆ ของการเลือกใช้ขบวนการตัดเซาะร่องที่เหมาะสม ผู้เขียนได้ศึกษาและรวบรวมไว้ในบทเรียนนี้อย่างครบถ้วน

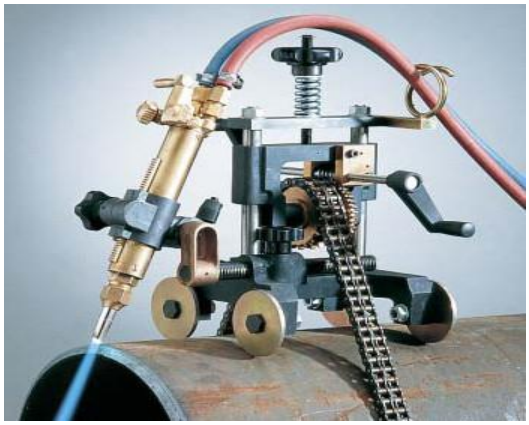
ตารางที่ 2.1 ตารางการเลือกกรรมวิธีการตัดแบบใช้ความร้อนที่เหมาะสมกับชนิดของวัสดุโลหะ

ที่มา : AWS– Welding science and technology. Vol. 19th, 2001

วัสดุโลหะ (Materials)	กรรมวิธีการตัด (Cutting processes)			
	การตัดด้วยแก๊สออกซิเจน (OFC)	การตัดด้วยพลาสม่า (PAC)	การตัดด้วยอากาศ–คาร์บอนอาร์ก (CAC–A)	การตัดด้วยลำแสงเลเซอร์ (LBC)
เหล็กกล้าคาร์บอน	✓	✓	✓	✓
เหล็กกล้าไร้สนิม	✓	✓	✓	✓
เหล็กหล่อ	✓	✓	✓	✓
อลูมิเนียม	X	✓	✓	✓
ไทเทเนียม	✓	✓	✓	✓
ทองแดง	X	✓	✓	✓
วัสดุทนไฟ	X	✓	✓	✓

2.1 ขบวนการตัดด้วยแก๊สออกซิเจน (Oxy–fuel gas cutting : OFC)

ขบวนการตัดนี้มีมานานซึ่งอาจเป็นที่รู้จักกันในชื่อว่า การตัดด้วยเปลวไฟ (Flame Cutting) หรือการตัดด้วยแก๊ส (Gases cutting) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 มีการใช้งานกันแพร่หลายไม่ว่าจะเป็นการตัดโลหะเพื่องานทั่วไป หรืองานตัดเตรียมงานเพื่อการเชื่อมโดยใช้สององค์ประกอบร่วมกัน คือ เชื้อเพลิงแก๊ส (Fuel gases) กับออกซิเจน (Oxygen) ซึ่งเชื้อเพลิงแก๊สทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่โลหะที่ต้องการตัดจนร้อนแดงเกือบหลอมละลาย (Ignition point) จากนั้นปล่อยแก๊สออกซิเจนที่มีแรงดันสูงออกมาเพื่อให้ทำปฏิกิริยากับเนื้อโลหะร้อนแดงแล้วเกิดการออกซิไดซ์ (Oxidized) ได้เป็นโลหะออกไซด์ที่ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำลง จึงเกิดการหลอมละลายของเนื้อโลหะที่ง่ายและรวดเร็วขึ้น ในขณะเดียวกันแรงดันของแก๊สออกซิเจนที่สูงจะเป่าเนื้อโลหะที่หลอมเลวออกไปทำให้โลหะขาดออกจากกัน โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าเชื้อเพลิงแก๊สที่นำมาใช้มีหลายชนิด และแต่ละชนิดจะให้พลังงานความร้อนแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งสามารถเลือกใช้ตามความเหมาะสมของชนิดวัสดุโลหะ กรณีทำการตัดโลหะที่มีสมบัติต้านทานต่อการเกิดออกซิไดซ์จะตัดยากขึ้น แนะนำว่าจำเป็นต้องใช้ฟลักซ์เคมี (Chemical flux) หรือผงโลหะ (Power metals) เข้าร่วมกับออกซิเจนเพื่อช่วยให้การตัดง่ายขึ้น (Low melting)



(ก) การตัดด้วยเครื่องมืออุปกรณ์



(ข) การตัดด้วยมือ

รูปที่ 2.1 การตัดเตรียมโลหะด้วยขบวนการแก๊สออกซิเจน

ที่มา : TWI–Cutting processes and application of oxyfuel cutting, 2000

2.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในขบวนการตัดด้วยแก๊สออกซิเจน

ขบวนการตัดด้วยแก๊สออกซิเจนมีทั้งที่เป็นเครื่องมือหลักและอุปกรณ์ช่วยเสริม ซึ่งมีหลักการใช้งานไม่ยุ่งยากหรือสลับซับซ้อน สิ่งที่ต้องระมัดระวังเป็นพิเศษจะเป็นเรื่องของความปลอดภัย เนื่องจากเป็นขบวนการที่มีทั้งความร้อน ประกายไฟ และถังภาชนะที่มีความดันที่อาจระเบิดหรือลุกติดไฟได้ ดังนั้น ผู้ปฏิบัติการตัดต้องมีชุดอุปกรณ์ป้องกันอันตราย โดยเฉพาะแว่นกรองแสง (Goggles) ต้อง

เลือกนัมเบอร์ความเข้มของเลนส์ที่เหมาะสม ดังข้อแนะนำตามมาตรฐานการป้องกันดวงตาของ OSHA (2005) และต้องสวมตลอดเวลาขณะปฏิบัติงาน

ตารางที่ 2.2 แก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการตัดด้วยแก๊สออกซิเจน

ที่มา : Larry Jeffus and Lawrence Bower, Welding skill, process and practices Book 1, 1st, 2010

แก๊สเชื้อเพลิง (Fuel gases)	ความร้อนของเปลวไฟ (Heat of flame)	
	องศาฟาเรนไฮต์ (°F)	องศาเซลเซียส (°C)
แก๊สอะเซทิลีน (Acetylene)	5,589	3,087
แก๊สผสมไฮโดรคาร์บอน (MAPP)[a]	5,301	2,927
แก๊สธรรมชาติ (Natural gas)	4,600	2,538
แก๊สโพรเพน (Propane)	4,579	2,526
แก๊สโพรพิลีน (Propylene)	5,193	2,867
แก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen)	4,820	2,660

หมายเหตุ ของตารางที่ 2.2

- a = MAPP เป็นแก๊สผสมของ โพรพิลีน (Propylene) โพรทาดีน (Propadiene) และเมทิลอะเซทิลีน (Methylacetylene)

ในรูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับขบวนการตัดด้วยแก๊สออกซิเจนตามข้อระบุของ Harold P. Manly (2008) ซึ่งประกอบด้วย

(1) ถังแก๊สเชื้อเพลิง (Fuel cylinder)
(2) ถังแก๊สออกซิเจน (Oxygen cylinder)
(3) สายแก๊สเชื้อเพลิง (Fuel hose)
(4) สายแก๊สออกซิเจน (Oxygen hose)
(5) เกจวัดแก๊สเชื้อเพลิง (Fuel regulator)
(6) เกจวัดแก๊สออกซิเจน (Oxygen regulator)
(7) หัวตัดแก๊ส (Torch)
(8) หัวทิปตัด (Nozzle)
(9) วาวล์กันไฟกลับ (Non–return valve)
(10) อุปกรณ์จุดไฟ (Spark lighter)
(11) ประแจ (Spanner)
(12) อุปกรณ์ทำความสะอาด (Tip cleaner)
(13) รถเข็นวางถัง (Trolley)
(14) ฝาครอบหัวถัง (Cylinder cap)

งานตัดโลหะด้วยแก๊สออกซิเจนมีได้ทั้งภายในโรงปฏิบัติงานและภายนอกในพื้นที่ต่าง ๆ ดังนั้น รูปแบบการเตรียมความพร้อมของเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเคลื่อนย้ายก็จะแตกต่างกัน โดยแต่ละรูปแบบต้องคำนึงความปลอดภัยและความสะดวกในการใช้งานเป็นหลักสำคัญ ซึ่งมี 3 รูปแบบหลัก ดังสรุปไว้ใน Kehl (2017) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แต่อย่างไรก็ตาม รายละเอียดของเครื่องมือและอุปกรณ์ไม่แตกต่างกันนอกจากในบางสถานที่ปฏิบัติงานตัดที่อาจจำเป็นต้องมีเครื่องมือหรืออุปกรณ์พิเศษอื่น ๆ

เสริมเพื่อปฏิบัติงานร่วมกัน เช่น ตัดงานบนพื้นที่สูง ตัดงานในสถานที่อับและคับแคบ ตัดงานที่เป็นภาชนะความดัน หรือตัดงานในพื้นที่ใต้น้ำ เป็นต้น



รูปที่ 2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการตัดด้วยแก๊สออกซิเจน

ที่มา : Equipment for DIY and Lincoln Oxy–Acetylene Cutting



(ก) รูปแบบในโรงปฏิบัติงาน (ข) รูปแบบนอกโรงปฏิบัติงาน (ค) รูปแบบพกพา (DIY)

รูปที่ 2.3 การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ในการตัดด้วยแก๊สออกซิเจน

ที่มา : Equipment for DIY and Lincoln Oxy–Acetylene Cutting

2.1.2 ขบวนการตัด (Cutting processes)

1. องค์ประกอบของขบวนการตัด Prior F Willis (2009) ได้อธิบายไว้ว่าการตัดด้วยปัจจัยที่แตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นชนิดของเชื้อเพลิง ชนิดของปลายหัวตัด (Tip) ขนาดรูออกซิเจน อัตราการไหลของออกซิเจน และอัตราความเร็วในการตัดจะได้ผลของรอยตัดที่แตกต่างกัน ได้แก่ ร่องตัดที่เรียกว่า “Kerf” จะกว้างแตกต่างกัน ดังในรูปที่ 2.4 และใช้เป็นตัวระบุถึงคุณภาพของการตัดซึ่งจะถูกระบุไว้ในแบบสั่งงาน โดยปกติชิ้นงานที่มีความหนามากขนาดของ Kerf จะมีค่าที่มากขึ้น นอกจากนี้ ยังมีค่าของ Drag ที่เกิดต่างกันซึ่งพิจารณาได้จากในรูปที่ 2.4 กล่าวคือ เมื่อทำการปล่อยแรงดันของออกซิเจนผ่านหัวตัดจนกระทั่งลำของออกซิเจนทะลุออกสู่ด้านล่างของชิ้นงานตัด เรียกตำแหน่งนี้ว่า “Zero Drag” จากนั้นเริ่มเคลื่อนหัวตัด ถ้าเพิ่มความเร็วในการตัดหรือลดปริมาณการไหลของออกซิเจนลงจะส่งผลทำให้ลำออกซิเจนทะลุออกไปด้านหลังลดลง ผิวงานด้านล่างหลอมเหลวยากและขาดออกช้าลง ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าลำของออกซิเจนจะอยู่ในแนวเยื้องกับด้านบนหรือเกิดตามหลังในทิศทางการเคลื่อนหัวตัด เรียกระยะเยื้องนี้ว่า “Drag” ปกติระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ของความหนาชิ้นงานตัด เช่น 8% หมายถึงแนวการตัดที่สมบูรณ์ของด้านล่างมีระยะห่างจากด้านบนตามแนวทิศทางการตัด 8% ของขนาดความหนาชิ้นงาน กรณีค่า Drag ที่มากขึ้นจะทำให้คุณภาพการตัดลดลง มักเกิดจากความเร็วตัดที่สูงมากเกินไปทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง และในทางกลับกันกรณีความเร็วต่ำเกินไปออกซิเจนมากเกินไปคุณภาพรอยตัดก็ไม่ดีเรียกลักษณะนี้ว่า “Reverse Drag”

เชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการตัดด้วยแก๊สออกซิเจนมีหลายชนิดให้เลือกใช้ ซึ่งแต่ละชนิดจะให้พลังงานความร้อนของเปลวไฟต่างกันและมีข้อดี–ข้อเสีย จึงต้องเลือกใช้ให้เหมาะสม ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 เมื่อพิจารณาจะพบว่าแก๊สอะเซทิลีน (C_2H_2) เป็นแก๊สที่นิยมใช้กันในภาคอุตสาหกรรมเพราะติดไฟง่ายให้ความร้อนสูง สามารถใช้ได้ทั้งการเชื่อมและการตัดราคาค่อนข้างสูง โดยสามารถปรับเปลวไฟที่ให้ความร้อนแตกต่างกันได้ ดังรูปที่ 2.5 (ก) ส่วนจำพวกแก๊สธรรมชาติ จะใช้ในงานทั่ว ๆ ไป ให้พลังงานความร้อนไม่สูงมากแต่ประหยัดราคาถูก โดยเปลวไฟที่ปรับเพื่อสร้างอุณหภูมิทางความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ข) ซึ่งเปลวไฟที่ทำการปรับมี 5 แบบเปลวไฟหลัก อ้างอิงตาม American Torch Tip (2020)

1. เปลวไฟเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนในบรรยากาศปกติ โดยปรับจนไม่มีควัน
2. เปลวไฟ Carburizing เป็นเปลวที่ใช้ให้ความร้อนก่อนการเป่าออกซิเจนตัด
3. เปลวไฟ Reducing เป็นเปลวไฟใช้อุ่นงานก่อนตัด ความร้อนไม่สูงมากพอสำหรับตัด
4. เปลวไฟ Neutral เป็นเปลวไฟที่มีความร้อนสูงสำหรับตัด ได้ทั้งแบบที่มี Jet Open
5. เปลวไฟ Oxidizing เป็นเปลวไฟที่เหมาะสมสำหรับช่วงให้ความร้อนก่อนตัด (Preheat)

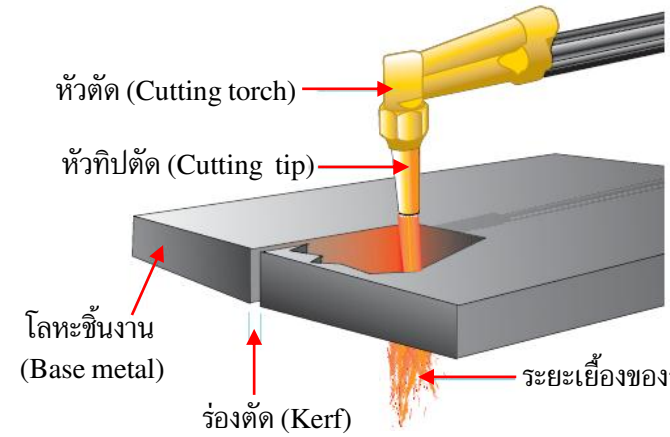
การปรับเปลวไฟจะปฏิบัติการบนหัวตัดแก๊ส (Torch) มี 2 ประเภทหัวตัด คือ

ก. หัวตัดประเภทผสมแก๊สที่ปลายหัวทิป (Mixing in tip chamber) เป็นประเภทที่แก๊สเชื้อเพลิงและแก๊สออกซิเจนได้รับการผสมกันที่ภายในปลายของหัวทิปตัด (Torch tip) ดังรูปที่ 2.6 (ก)

ข. หัวตัดประเภทผสมแก๊สที่ห้องของหัวตัด (Mixing in torch chamber) เป็นหัวตัดประเภทที่แก๊สเชื้อเพลิงและแก๊สออกซิเจนจะได้รับการผสมกันที่ภายในห้องของหัวตัด (Torch) ดังรูปที่ 2.6 (ข) ซึ่งมี 2 แบบ ให้เลือกตามระดับแรงดันของแก๊ส ได้แก่

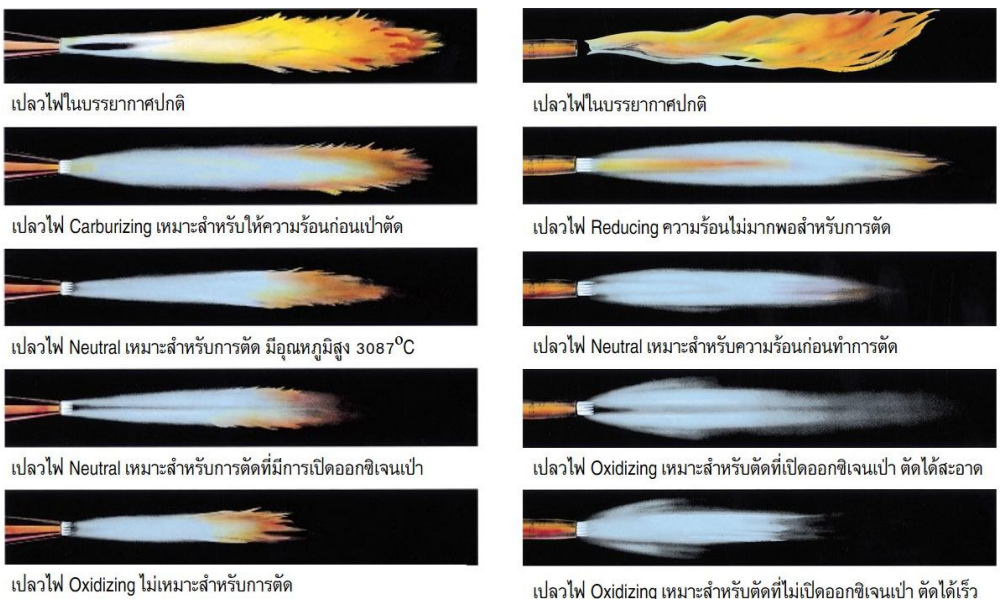
– แบบแรงดันแก๊สสูง (High pressure gases) หรือเรียกว่า Positive type จะใช้ได้ดีกับการตัดด้วยแก๊สที่มีแรงดันสูงเพราะแก๊สสามารถส่งเข้าไปสู่หัวตัดได้ด้วยตัวเอง เช่น แก๊สอะเซทิลีน

– แบบแรงดันแก๊สต่ำ (Low pressure gases) หรือเรียกว่า Injection type จะเหมาะสมกับแก๊สเชื้อเพลิงที่มีแรงดันต่ำกว่า 2 Psig โดยแก๊สที่ไหลจะถูกดึงผ่านคอคอด (Ventury) เช่น จำพวกแก๊สธรรมชาติ



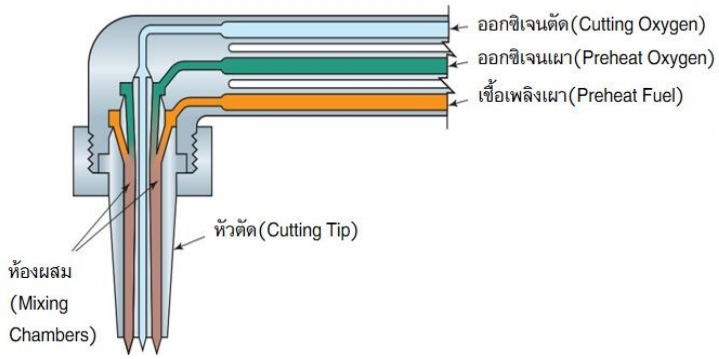
รูปที่ 2.4 ตำแหน่งของ Kerf และ Drag ของขบวนการตัดด้วยแก๊สออกซิเจน

ที่มา : Weld Guru, Oxyfuel cutting equipment and operations, 2019

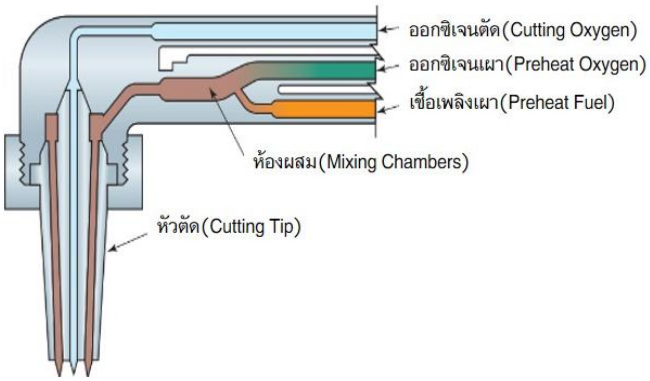


รูปที่ 2.5 เปลวไฟความร้อน (ก) เชื้อเพลิงแก๊สอะเซทิลีน และ(ข) เชื้อเพลิงแก๊สธรรมชาติ

ที่มา : Halverson CTS, Oxygen cutting process, 2011



(ก) ประเภทผสมแก๊สที่ปลายหัวทิป

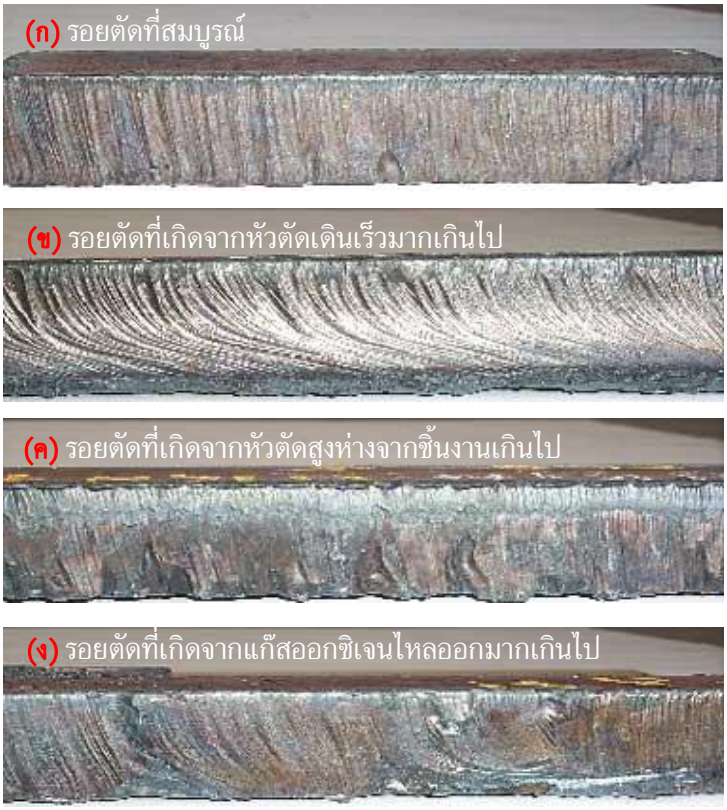


(ข) ประเภทผสมแก๊สที่ห้องหัวตัด

รูปที่ 2.6 ประเภทของการผสมแก๊สสำหรับหัวตัดแก๊ส (Type of mixing gas in torch cutting)

ที่มา : Welding – Skills, Processes and Practices for Entry-Level Welders, 2010

ร่องของการตัดเรียกว่า “Kerf” จะเกิดเป็นผิวรอยตัด (Cutting surface) มีลักษณะแตกต่างกันตามปัจจัยที่ใช้ในการตัดซึ่งรวมไปถึงความสมบูรณ์ของการตัด ดังตัวอย่างรอยตัดที่จะนำเสนอพร้อมสาเหตุดังในรูปที่ 2.7 อย่างไรก็ตาม การยอมรับในคุณภาพของรอยตัดก็ขึ้นอยู่กับประเภทของงานหมายถึง บางประเภทงานต้องการความละเอียดและแม่นยำสูง (High precision) บางลักษณะงานที่ต้องการคุณภาพของผิวรอยตัดที่ดีมาก หรือบางลักษณะงานมีการกำหนดขนาดของร่องตัด ประเภทงานตัดเหล่านี้ต้องเลือกใช้ปัจจัยในการตัดที่ค่อนข้างแม่นยำและมีทักษะในการตัดสูง แต่สำหรับงานบางประเภทไม่ต้องการความละเอียดสูง เช่น งานตัดเพื่อทำลาย หรืองานตัดเพื่อต้องการแยกชิ้นแล้วนำไปทำการตกแต่งผิวในขั้นตอนต่อไป งานในลักษณะแบบนี้อาจไม่ต้องการใช้ทักษะหรือเครื่องมืออุปกรณ์ในการตัดที่ดีมากและสามารถทำงานได้รวดเร็วกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ผู้ปฏิบัติการตัดก็ต้องมีพื้นฐานความรู้ความสามารถในระดับที่ดีเพียงพอที่จะสามารถตัดได้ โดยเฉพาะความปลอดภัยในระหว่างการเตรียมอุปกรณ์และในระหว่างการตัด รวมถึงต้องมีความรู้ในการแก้ปัญหาถ้าเกิดเพลิงไหม้จากเปลวไฟในการตัด



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างผิวของรอยตัดที่เกิดจากปัจจัยในการตัดต่างกัน *ที่มา : Halverson CTS, Oxygen cutting process, 2014*

2. เทคนิคและวิธีการตัดโลหะด้วยแก๊สออกซิเจน

นอกจากช่างเชื่อมจะมีความรู้ความเข้าใจในการเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ถูกต้องและปลอดภัยแล้วนั้น สิ่งที่จะทำให้ผลงานการตัดมีประสิทธิภาพและตรงตามแบบงานนั้น ต้องมีทักษะพื้นฐานและเทคนิควิธีการต่าง ๆ ที่สำคัญที่จะนำมาใช้ในขบวนการตัด ดังต่อไปนี้

ก. การเตรียมหัวตัดและหัวทิป (Preparation of cutting torches and cutting tip)

หัวตัดแก๊ส (Cutting torches) เป็นอุปกรณ์หลักที่สำคัญในการตัด ซึ่งผู้ตัดสามารถเลือกตามความเหมาะสมกับลักษณะของงาน โดยทั่วไปที่นิยมใช้กันมี 2 แบบ คือ หัวตัดแบบสั้น (Short cutting torch) กับหัวตัดแบบยาว (Long cutting torch) ดังแสดงลักษณะรูปร่างในรูปที่ 2.8 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ซึ่งหัวตัดแบบสั้นออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับการตัดโลหะที่มีขนาดเล็ก ๆ บาง ๆ รูปทรงกะทัดรัดสะดวกในการจับ น้ำหนักเบา และคล่องตัวในการเคลื่อนที่หรือควบคุมได้แม่นยำ ขณะทำการตัดจะต้องระวังความร้อนและประกายไฟที่เกิดจากการตัดเนื่องจากมือจับอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับโลหะชิ้นงานที่ตัด ส่วนหัวตัดแบบยาวมีน้ำหนักค่อนข้างมาก มีท่อแก๊สที่ยาวมากพอที่ผู้ตัดสามารถจับหรือประคองได้มั่นคงแต่ต้องมีความแข็งแรง ซึ่งสามารถตัดโลหะงานที่มีความหนามาก ๆ ได้ดี เพราะความยาวที่มากของหัวตัดทำให้ปลายของหัวตัดอยู่ห่างจากผู้ตัด ช่วยลดความร้อนและประกายไฟที่จะเกิด

อันตราย และนอกจากนี้ ยังมีหัวตัดแก๊สที่มีการออกแบบพิเศษสำหรับงานเฉพาะบางอย่างที่มีขีดจำกัดสำหรับหัวตัดแก๊สทั่ว ๆ ไปที่อาจต้องมีความยาวมากกว่าหัวตัดปกติ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ค) อย่างไรก็ตามหัวตัดของทั้งสองแบบสามารถประกอบหรือสลับสับเปลี่ยนชิ้นส่วนของข้อต่อสวมต่าง ๆ ได้ในมาตรฐานเดียวกันไม่ว่าจะเป็นหัวทิปหรือระบบเกลียวสวม



(ก) หัวตัดแบบสั้น (Short cutting torch)



(ข) หัวตัดแบบยาว (Long cutting torch)



(ค) หัวตัดแบบยาวที่ออกแบบพิเศษเฉพาะงาน (Special long cutting torch)

รูปที่ 2.8 ขนาดความยาวของหัวตัดแก๊ส (Size of torch cutting)

ที่มา : Courtesy of Victor Equipment, a Thermadyne Company, 2010

หัวทิปตัด (Cutting tips) คือ อุปกรณ์ประกอบที่อยู่ส่วนปลายสุดของหัวตัดมีหน้าที่ควบคุมรูปร่างของเปลวไฟตัด ซึ่งสัมผัสกับความร้อน เปลวไฟ และประกายไฟตัดขณะทำการตัดโดยตรง จึงต้องผลิตจากวัสดุที่มีสมบัติทนความร้อนสูง มีจุดหลอมเหลวสูง และนำความร้อนต่ำ ซึ่งที่พบเห็นจากผู้ผลิตส่วนใหญ่ผลิตด้วยโลหะทองแดงผสม (Copper alloys) ดังรูปที่ 2.9 (ก) และบางครั้งนำไปเคลือบด้วยโครเมียมเพื่อยืดอายุการใช้งาน เหตุเพราะผิวที่ลื่นเป็นมันวาวของโครเมียมช่วยลดปัญหาเม็ดโลหะเกาะติดหัวทิป ดังรูปที่ 2.9 (ข) อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติพบว่าความแตกต่างของลักษณะงานที่ตัดและชนิดของแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้ตัด จึงจำเป็นต้องมีการผลิตหัวทิปตัดเพื่อสอดรับกับความเหมาะสมในการเลือกใช้ จึงมีลักษณะของหัวทิปตัดในรูปแบบต่าง ๆ เช่น หัวทิปสำหรับงานโลหะแผ่น หัวทิปมีระบบน้ำหล่อเย็น หรือหัวทิปแบบประกอบ 2 ชิ้น เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ ดังรูปที่ 2.9 (ค) นอกจากนี้ ยังมีการ

ออกแบบรูของปลายหัวทิปเพื่อสร้างหรือกำหนดรูปร่างของเปลวไฟ ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมตามปัจจัยข้อหรือกำหนดในขบวนการตัด



(ก) หัวทิปตัดทองแดงผสม
(Cutting tips copper alloy)



(ข) หัวทิปตัดเคลือบโครเมียม
(Cutting tips chrome plating)



(ค) หัวทิปตัดออกแบบในรูปแบบต่าง ๆ
(Differently designed torch tips)

รูปที่ 2.9 หัวทิปสำหรับหัวตัดแก๊ส (Tip for torch cutting)
ที่มา : ESAB Welding & cutting products

การเลือกใช้หัวทิปตัดปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานกำหนดที่แน่นอน จะเป็นข้อแนะนำการเลือกใช้ของผู้ผลิตหัวทิปเองโดยยึดหลักความหนาของวัสดุเป็นเกณฑ์กำหนด จากนั้นผู้ผลิตก็กำหนดหมายเลขนัมเบอร์ (Number : No) ขึ้นมาเป็นของตัวเอง ซึ่งแต่ละผู้ผลิตจะมีเลขนัมเบอร์แตกต่างกัน วิธีการเปรียบเทียบขนาดรูหัวทิปจะมีขนาดนัมเบอร์ของปากรูเจาะด้วยดอกสว่านเป็นตัวเทียบขนาด (Cutting orifice drill number) ESAB (2009) โดยข้อกำหนดของแต่ละผู้ผลิตหัวทิปมีทั้งเหมือนกัน ใกล้เคียง

กัน และไม่เหมือนกัน ดังแสดงตัวอย่างการเลือกหัวทิปตัดที่เหมาะสมกับความหนาวัสดุโลหะของผู้ผลิตบางรายที่มีผลิตภัณฑ์แพร่หลายและนิยมใช้งานกันทั่วไปในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบขนาดของหัวทิปตัดต่อความหนาโลหะของแต่ละผู้ผลิต

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metals Fabrication, 2011

ผู้ผลิตหัวทิปตัด (Manufacturers)	ความหนาของโลหะ : นิ้ว (มิลลิเมตร) (Metal thickness : Inches (mm))										
	1/8	1/4	1/2	3/4	1	11/2	2	21/2	3	4	5
	(3)	(6)	(13)	(19)	(24)	(37)	(49)	(61)	(74)	(98)	(123)
Cutting orifice drill number	70	68	60	56	54	53	50	47	45	39	31
[a]Airco	00	0	1	1	2	2	3	4	4	5	6
[b]ESAB	1/4	1/4	1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	4	4	4	4	8
Harris	000	00	0	1	1	2	2	3	3	3	4
Oxweld	2	3	4	6	6	6	8	8	8	8	8
Purox	3	3	4	4	5	5	7	7	7	7	9
Smith	00	0	1	2	2	3	3	4	4	4	5
Victor	000	00	0	1	2	2	3	4	4	5	6

หมายเหตุ ของตารางที่ 2.3

- a = ตัวอย่างหัวทิปของผลิตภัณฑ์ของ Airco นัมเบอร์ 00 แสดงว่ามีขนาดของปากหัวทิปเท่ากับนัมเบอร์ 70 ของดอกสว่านใช้ตัดโลหะที่ความหนา 1/8นิ้ว หรือ 3 มิลลิเมตร
- b = ตัวอย่างหัวทิปของผลิตภัณฑ์ของ ESAB นัมเบอร์ 1/4 แสดงว่ามีขนาดของปากหัวทิปเท่ากับนัมเบอร์ 70–68 ของดอกสว่าน ใช้ตัดโลหะที่หนา1/8–1/4 นิ้ว หรือ 3–6 มิลลิเมตร

ในบางกรณีพบว่า ผู้ตัดไม่มีข้อมูลการเลือกใช้จากผู้ผลิตอาจสูญหาย หรืออยู่ในสถานการณ์ที่ไม่สามารถหาได้ ช่างเชื่อมหรือผู้ตัดงานสามารถเลือกใช้หัวทิปตัดให้ถูกต้องได้ (โดยค่าประมาณ) ซึ่งใช้หลักการเปรียบเทียบกับนัมเบอร์ของเข็มทำความสะอาดหัวทิป (Tip cleaner) หรือเทียบกับระดับแรงดันแก๊สที่ใช้ตัด (Gas pressures for cutting) ที่ได้กล่าวไว้ในหนังสือของ Larry Jeffus (2011) ดังแสดงในตารางที่ 2.4 อย่างไรก็ตาม หลังจากเลือกใช้หัวทิปตัดกับความหนาของงานที่เหมาะสมแล้วนั้น ในขณะปฏิบัติงานผู้ตัดงานต้องคอยสังเกตและตรวจสอบถึงประสิทธิภาพของการตัดว่ามีความสมบูรณ์หรือไม่ ถ้าเกิดความบกพร่องใด ๆ ก็สามารถทำการปรับเปลี่ยนแก้ไขได้ เหตุผลเพราะยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีอิทธิพลของการตัดเช่น สภาพของอุปกรณ์ ขนาดความยาวของท่อหัวตัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อหัวตัด ความเร็วในการตัด ระยะห่างของหัวตัด รวมถึงทักษะของผู้ตัดที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของรอยตัด

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบขนาดของหัวทิปตัดต่อความหนาโลหะโดยเทียบเคียงกับเข็มทำความสะอาดหัวทิปกับแรงดันแก๊สที่ใช้ในการตัด

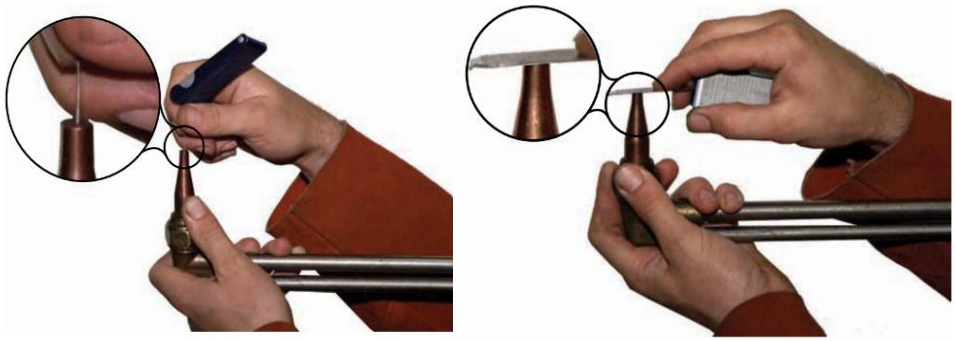
ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metals Fabrication, 2011

ขนาดของหัวทิปตัด (Tip size)	ความหนาของโลหะ : นิ้ว (มิลลิเมตร) (Metal thickness : Inches (mm))										
	1/8	1/4	1/2	3/4	1	11/2	2	21/2	3	4	5
	(3)	(6)	(13)	(19)	(24)	(37)	(49)	(61)	(74)	(98)	(123)
Cutting orifice drill number	70	68	60	56	54	53	50	47	45	39	31
[a]WYPO tip cleaner number	10	10	15	18	22	24	26	–	–	–	–
[a]Campbell Gausfeld tip cleaner number	3	3	6	9	10	11	12	–	–	–	–
[b]Oxyen pressure, psi	20–25	20–25	25–30	30–35	35–40	35–40	40–45	40–45	40–45	45–55	45–55
[b]Oxyen pressure, kPa	140–170	140–170	170–200	200–240	240–275	240–275	275–310	275–310	275–310	310–380	310–380
[b]Acetylene pressure, psi	3–5	3–5	3–5	3–5	3–5	3–5	4–8	4–8	5–11	6–13	8–14
[b]Acetylene pressure, kPa	20–35	20–35	20–35	20–35	20–35	20–35	30–55	30–55	35–75	40–90	55–95

หมายเหตุ ของตารางที่ 2.4

- a = นัมเบอร์ขนาดของเข็มทำความสะอาดหัวทิปเฉพาะผู้ผลิตเท่านั้น (ไม่มีนัมเบอร์ที่เป็นมาตรฐาน)
- b = ขนาดของหัวทิปที่เทียบกับแรงดันแก๊ส (โดยค่าประมาณ)

การทำความสะอาดหัวทิปตัด (Cleaning cutting tip) เป็นข้อพึงปฏิบัติที่สำคัญ เพราะขณะทำการตัดหัวทิปจะเกิดความร้อนและอยู่ใกล้ชิดกับชิ้นงานตัด จึงมีโอกาสที่จะเกิดการอุดตันของรูหัวทิปจากเศษน้ำโลหะ (Spatter) จึงต้องใช้เข็มทำความสะอาดตามขนาดของนัมเบอร์ที่สัมพันธ์กับขนาดของรูปหัวทิป โดยการแหย่ลงไปในรูเพื่อทำการขจัดสิ่งสกปรกออกจากรูของหัวทิป ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก) หรือกรณีที่เศษน้ำโลหะกระเด็นมาติดที่ปลายของหัวทิป แนะนำให้ใช้ชุดทำความสะอาดชนิดตะไบแบน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ข) ถ้าไม่ทำความสะอาดหรือทำความสะอาดไม่ดีพอสิ่งสกปรกเหล่านี้จะขัดขวางทางการไหลของแก๊สตัดจะเกิดผลกระทบต่อความสมบูรณ์ของผิวรอยตัด ดังนั้น ผู้ตัดต้องคอยสังเกตและทำความสะอาดอย่างสม่ำเสมอ ถ้าเกิดกรณีที่เศษน้ำโลหะติดแน่นมากจนไม่สามารถขจัดออกได้ด้วยชุดทำความสะอาดหัวทิปหรือในกรณีที่อุดรูหัวทิปจนตัน ให้ทำการเจาะด้วยดอกสว่านที่มีขนาดดอกเท่ากับขนาดรูของหัวทิปเจาะล้างเพื่อทำความสะอาดได้ ส่วนภายนอกรูสามารถใช้การเจียระไนหรือใช้ตะไบหยาบขจัดออกได้เช่นกัน แต่ต้องระมัดระวังความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับหัวทิปตัดได้



(ก) ทำความสะอาดรูหัวทิปตัด (Cleaning holes of cutting tip)

(ข) ทำความสะอาดปลายหัวทิปตัด (Cleaning flat end of cutting tip)

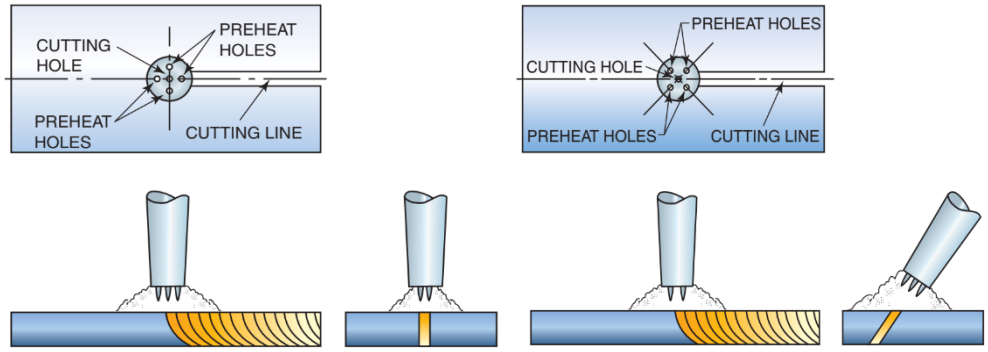
รูปที่ 2.10 การทำความสะอาดหัวทิปตัด (Cleaning cutting tip)

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metals Fabrication, 2011

ข. การวางตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของหัวตัด (Alignment and movement of the cutting torch)

การกำหนดตำแหน่งที่ต้องการตัดหรือตามแบบงาน (Layout) ที่ชัดเจนและมีความแม่นยำจะเป็นตัวช่วยส่งเสริมให้ได้รอยตัดมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ไม่ว่าเป็นการตอกนำศูนย์ (Punch) หรือ ขีดเส้นบอกทิศทางการเคลื่อนที่ของหัวตัด (Cutting line) โดยใช้ชอล์กหรือหินสบู่ขีดเส้น จากนั้นก็กำหนดตำแหน่งการวางของหัวทิปโดยการพิจารณาให้รูเปลวไฟ (Preheat holes) อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องซึ่งได้แนะนำไว้ในหลักการตัดโดย Larry Jeffus (2011) กล่าวคือ กรณีการตัดแบบตรง (Square cut) รูของเปลวไฟต้องอยู่ตำแหน่งบนเส้นกำหนด (Layout) ส่วนกรณีการตัดแบบเอียง (Bevel cut) รูของเปลวไฟต้องอยู่ตำแหน่งขอบข้างขนานของเส้นกำหนด สำหรับรูออกซิเจนตัด (Cutting holes) จะอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของเส้นกำหนดซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของหัวทิปตัด ดังแสดงความแตกต่างของการตัดทั้งสองแบบใน รูปที่ 2.11

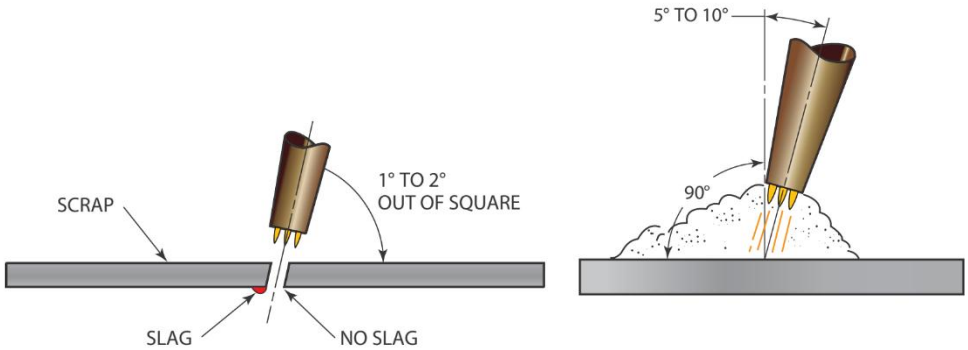
Harold Phillips Manly (2013) ได้แนะนำไว้ว่าการเอียงของมุมหัวตัดเล็กน้อย (1–2°) ในการตัดแบบเส้นตรง เปลวไฟบางส่วนจะพุ่งกระจายไปข้างหน้าช่วยในการอุ่นงาน (Preheat) ก่อนตัด และยังช่วยขจัดสิ่งสกปรกบนผิวชิ้นงาน ที่สำคัญเปลวไฟตัดจะช่วยเป่าให้เศษโลหะ (Slag) ให้ทะลุไปสู่ด้านล่างโดยไม่ติดค้างที่ขอบรอยตัดแต่จะไปติดอยู่กับเศษโลหะส่วนที่ทิ้งแทนดังรูปที่2.12 (ก) และถ้าเอียงมุมหัวตัดมากขึ้นที่ 5–10° จะช่วยให้สามารถตัดโลหะได้หนาเพิ่มขึ้น โดยต้องควบคุมกรวยเปลวตัด (Inner cone) ให้มีระยะห่างกับผิวชิ้นงานให้อยู่ในระยะ 1/8–3/8 นิ้ว (3–10 มม) รูปที่2.12 (ข) ส่วนกรณีการตัดโลหะแผ่นที่บางหรือความหนาไม่มากต้องปรับมุมของหัวตัดให้แหลมมาก และต้องเคลื่อนที่หัวตัดด้วยความเร็วสูงเพราะโลหะแผ่นบางร้อนเร็วและหลอมละลายได้ง่ายดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ค)



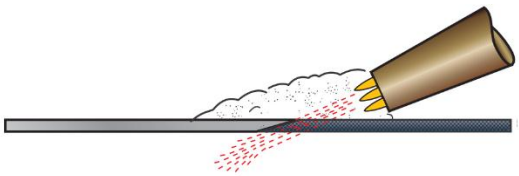
(ก) การตัดแบบตรง (Square cut) (ข) การตัดแบบเอียง (Bevel cut)

รูปที่ 2.11 การวางตำแหน่งของหัวทิปตัด (Tip alignment for cutting)

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metals Fabrication, 2011



(ก) มุมหัวตัดเอียง 1–2° (กำจัดสแลก) (ข) มุมหัวตัดเอียง 5–10° (ตัดโลหะหนา)



(ก) มุมหัวตัดเอียงเป็นมุมแหลม (ตัดโลหะบาง)

รูปที่ 2.12 การเอียงมุมของหัวทิปตัด (Tip angle for cutting)

ที่มา : Harold Phillips manly, 2013

Davis (2017) ได้อธิบายอิทธิพลของสแลก (Slag) หรือเศษโลหะหลอมเหลวที่โดนเป่าออกไป (Metals oxidized) ไว้ว่า สแลกที่เกิดขึ้นในระหว่างปฏิบัติการตัดมี 2 ลักษณะ คือ สแลกที่มีส่วนของโลหะที่ไม่เป็นออกไซด์เกิดขึ้นน้อย (Less unoxidized) ลักษณะเป็นรูพรุนมากมีความเปราะสูง กำจัดออกได้ง่ายด้วยการเคาะออกซึ่งไม่ลำบากมากนัก เรียกสแลกลักษณะแบบนี้ว่า สแลกอ่อน (Soft slag) ซึ่งจะเกิดขึ้นในขบวนการตัดด้วยปัจจัยที่ถูกต้องเหมาะสมและรอยตัดที่สมบูรณ์ ส่วนสแลกอีกลักษณะเป็นส่วนของโลหะที่ไม่เป็นออกไซด์เกิดเพิ่มมากขึ้น (More unoxidized) ประมาณ 30–40% มีรูพรุนน้อยติดแน่นอยู่ตามขอบด้านล่าง แกะออกยากค่อนข้างเหนียวและแข็งกำจัดออกด้วยการเจียระไน จึงเรียกสแลกในลักษณะแบบนี้ว่า สแลกแข็ง (Hard slag) ซึ่งเกิดขึ้นกับวิธีการตัดด้วยปัจจัยที่ไม่ถูกต้องหรือไม่เหมาะสม สาเหตุมักเกิดจากหัวทิปตัดสกปรก อุ่นงานร้อนเกินไป ความเร็วตัดช้าเกินไป ระยะห่างของหัวตัดน้อยเกินไป หรือความดันของออกซิเจนไม่ถูกต้อง

ดังนั้น การควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ของการตัดจะเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของรอยตัดอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม จากประสบการณ์พบว่าการตัดด้วยมือคน (Hand cutting) มีโอกาสเกิดความผิดพลาดและไม่เที่ยงตรงตลอดเวลาของการตัด ซึ่งอาจเกิดจากความชำนาญไม่มากพอ หรือเกิดจากความเมื่อยล้า จึงมักเกิดปัญหาต่อคุณภาพของรอยตัดอยู่เสมอ จึงได้พยายามหาเครื่องมือมาช่วยเสริมความแม่นยำ เช่น อุปกรณ์ตัดเอียง (Bevel cutting) อุปกรณ์ตัดตรง (Straight cutting) อุปกรณ์ตัดวงกลม (Circle cutting) หรืออุปกรณ์ตัดท่อ (Pipe cutting) ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.13 ส่วนสำหรับงานตัดที่มีขนาดใหญ่ที่ไม่เหมาะสมกับการตัดด้วยมือคนหรืองานที่ผลิตจำนวนมาก ๆ (Mass production) จะต้องมีเครื่องมือหรือเครื่องจักรที่นำมาใช้ควบคุมหัวตัด (Machine cutting) ซึ่งมีความแม่นยำสูง ควบคุมขบวนการตัดได้เที่ยงตรง รอยตัดมีคุณภาพดีและสามารถตัดแบบงานรูปทรงพิเศษต่าง ๆ ได้ดังแสดงตัวอย่าง ในรูปที่ 2.14

Larry Jeffus (2012) ได้กล่าวถึงการเคลื่อนหัวตัดแก๊สว่า มักพบปัญหาในกรณีการตัดด้วยมือคนและไม่มีอุปกรณ์เสริมช่วยเพราะใช้ทักษะของผู้ตัดเป็นตัวควบคุมหัวตัด ดังนั้น การมีเทคนิคหรือวิธีการที่ดีจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตัดได้เป็นอย่างดี โดยมีข้อแนะนำบางเทคนิคจากประสบการณ์ เช่น

1. โดยหลักการพื้นฐานก่อนเริ่มตัดงานจริง ช่างเชื่อมควรทดสอบเคลื่อนหัวตัดขณะที่ยังไม่มีเปลวไฟก่อน เพื่อตรวจสอบความคล่องตัวในการเคลื่อนไหวรวมถึงอุปสรรคต่าง ๆ ในทิศทางของการตัดจริง ซึ่งถ้าพบก็สามารถปรับปรุงแก้ไขได้ โดยที่ไม่เกิดความเสียหายกับชิ้นงานจริง

2. มือที่จับหรือถือหัวตัดควรเป็นมือที่ไม่ถนัด กล่าวคือ ถ้าช่างเชื่อมถนัดมือซ้ายให้ถือหัวตัดด้วยมือขวาและถ้าช่างเชื่อมถนัดมือขวาให้ถือหัวตัดด้วยมือซ้าย เหตุผลเพราะมือถนัดจะใช้รองรับการวางหัวตัดเพื่อควบคุมการตัด ซึ่งความถนัดช่วยให้การควบคุมหัวตัดได้ดี สามารถเคลื่อนที่ไปในทิศทางใด ๆ ได้สะดวกและคล่องตัว

3. การตัดงานที่แนวตัดสั้น (Short cuts) แนะนำให้วางหัวตัดบนมือที่ถนัดแล้วเคลื่อนหัวตัดเข้าหาตัวเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ก) ส่วนกรณีการตัดงานที่แนวตัดยาว (Longer cuts) ให้วางหัวตัดบน

มือข้างถนัดแล้วเคลื่อนหัวตัดไปด้านข้างตามแนวเส้นตัดดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข) นอกจากนี้พบว่าระยะห่างของมือถนัดกับหัวทิปตัดควรชิดให้มากที่สุดเท่าที่ทำได้ เพราะสามารถตัดได้ราบรื่นและแม่นยำเที่ยงตรงกว่าระยะห่างที่มาก ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ค)

4. การตัดโลหะเพื่อเอารู (Flame cutting hole) มีเทคนิคการตัดด้วยการเริ่มที่จุดศูนย์กลางของแบบงานรู เมื่อเริ่มเกิดเป็นรูทะลุแล้วต่อด้วยการเคลื่อนหัวตัดแบบหมุนเกลียวออกไปนอกตัวเราจนกว่าจะได้รูตามขนาด ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ก) และตัวอย่างลำดับของการตัดแสดงในรูปที่ 2.16 (ข)

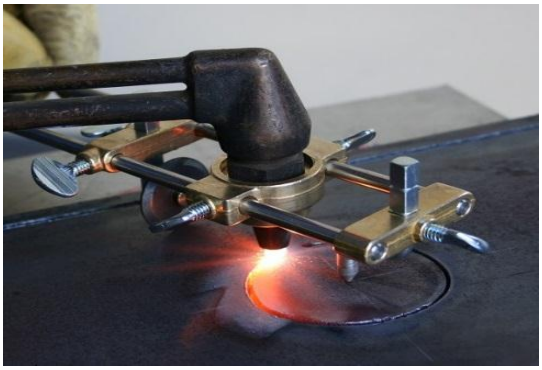
นอกจากเทคนิคหรือวิธีการเคลื่อนหัวทิปตัดที่ถูกต้องแล้วนั้นสิ่งที่ต้องใช้ร่วมกัน คือ ความเร็วในการตัด (Cutting speed) ซึ่งการกำหนดความเร็วในการตัดต้องพิจารณาร่วมกับองค์ประกอบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องโดยตรง ได้แก่ ความหนาของโลหะที่ตัด แรงดันแก๊สอะเซทิลีน แรงดันแก๊สออกซิเจน และตลอดจนความกว้างของร่องตัด (Kerf) โดยปกติที่พบผู้ผลิตหัวทิปตัดมักทำการทดสอบแล้วกำหนดไว้เป็นคู่มือในการเลือกใช้ หรือบางครั้งได้มีการทดลองแล้วบันทึกเป็นข้อมูลมาตรฐานการเลือกใช้ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.5 ซึ่งได้กล่าวไว้ในหนังสือเทคโนโลยีการผลิตของ PN RAO (2009)



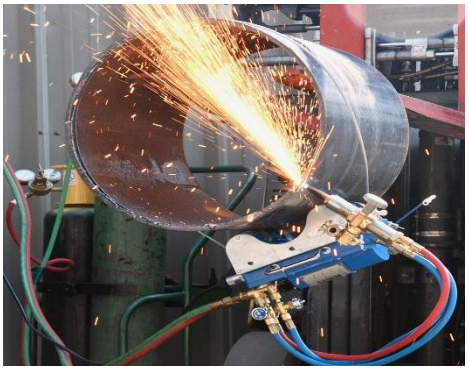
(ก) อุปกรณ์ตัดเอียง (Bevel cutting)



(ข) อุปกรณ์ตัดตรง (Straight cutting)



(ค) อุปกรณ์ตัดวงกลม (Circle cutting)



(ง) อุปกรณ์ตัดท่อ (Pipe cutting)

รูปที่ 2.13 ตัวอย่างอุปกรณ์ช่วยควบคุมหัวทิปตัด (Equipment support cutting)

ที่มา : Krakowitzer GmbH–Hand cutting equipment , 2020



(ก) เครื่องตัดโลหะแบบแผ่น



(ข) เครื่องตัดโลหะแบบท่อ



(ค) เครื่องตัดโลหะหลายหัวตัด



(ง) เครื่องตัดโลหะวงกลม

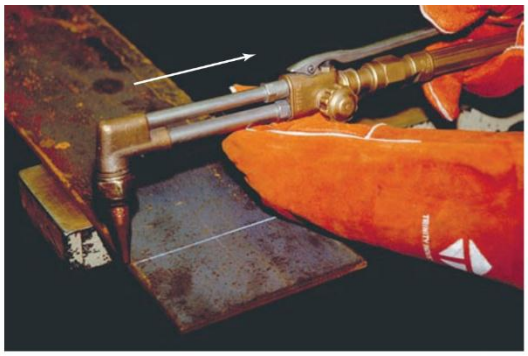
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างเครื่องจักรควบคุมหัวทิปตัด (Machine flame cutting)

ที่มา : Shanghai Tayor Heavy Industry, 2019

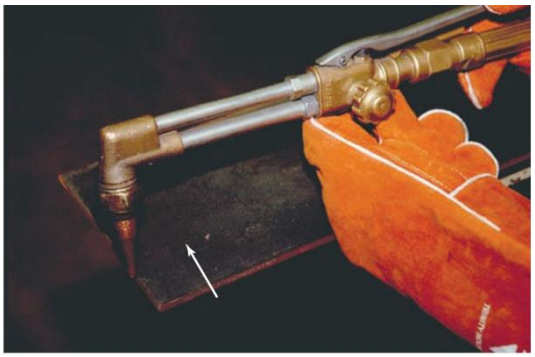
ตารางที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของปัจจัยในการตัดโลหะด้วยแก๊สอะเซทิลีน

ที่มา : PN Rao, Manufacturing Technology V.1. 3th edition, 2009

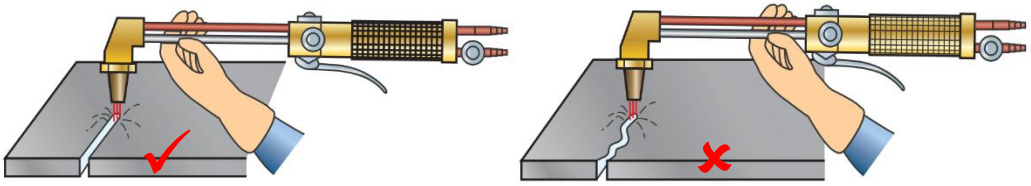
โลหะหนา (มม.)	แรงดันอะเซทิลีน (kPa)	แรงดันออกซิเจน (kPa)	ความเร็วในการตัด (ม./นาที)	ความกว้างของร่องตัด (Kerf) (มม.)
3.2 ถึง 9.5	21	138 ถึง 207	0.356 ถึง 0.457	1.5 ถึง 2.5
9.5 ถึง 19.1	34	207 ถึง 276	0.305 ถึง 0.381	2.5 ถึง 2.8
19.1 ถึง 38.1	34	276 ถึง 310	0.254 ถึง 0.305	1.8 ถึง 3.3
38.1 ถึง 50.8	34	310 ถึง 345	0.229 ถึง 0.254	3.3



(ก) การตัดงานที่แนวตัดสั้น (Short cuts)



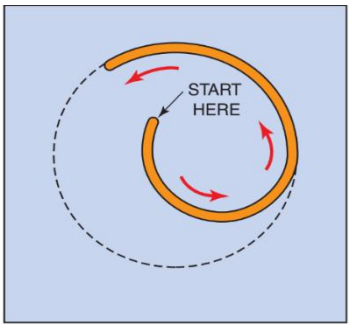
(ข) การตัดงานที่แนวตัดยาว (Longer cuts)



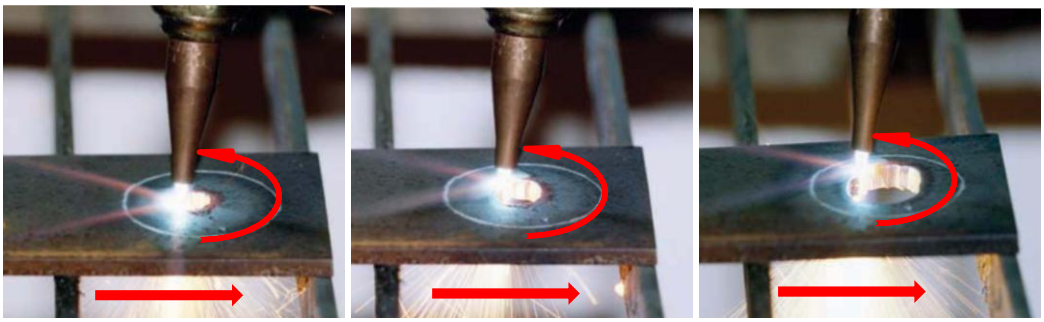
(ค) ระยะห่างระหว่างมือที่ถนัดกับหัวทิปตัด

รูปที่ 2.15 การเคลื่อนและการจับหัวตัดแก๊ส (Moves and brace the cutting torch)

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and metal fabrication , 2012



(ก) แสดงจุดเริ่มและทิศทางการเคลื่อน
ของหัวทิปตัดของการจัดเจาะรู (Hole)



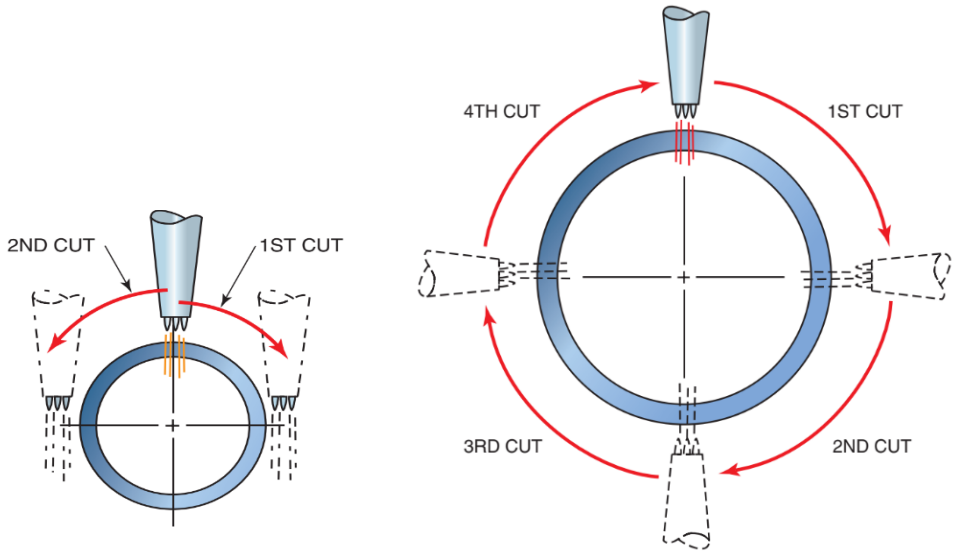
(ข) แสดงเทคนิคลำดับการเกิดรูจากการตัดเจาะเพื่อเอารู (Hole) ใช้งาน

รูปที่ 2.16 เทคนิคการเคลื่อนหัวทิปเพื่อตัดเจาะเอารู (Moves the cutting torch for hole)

ที่มา : Larry Jeffus and Laerence Bower, Welding –Skill, Processes and Practices, 2010

5. เทคนิคการเคลื่อนหัวทิปในการตัดโลหะประเภทท่อ (Pipe cutting) การตัดท่อด้วยมือมีการแบ่งเทคนิคการตัดได้สองแบบ แบบแรก คือ เทคนิควิธีการตัดท่อแบบเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กมีขนาดความโตโดยประมาณเล็กกว่า 3 นิ้ว หรือเล็กกว่า 76 มิลลิเมตร โดยหัวตัดเริ่มที่จุดตรงกลางด้านบนของท่อ จากนั้นเคลื่อนหัวตัดไปทีละด้านตามความโค้งท่อ (Step by Step) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ก) กับแบบที่สอง คือ เทคนิควิธีการตัดท่อแบบเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ ซึ่งขนาดความโตโดยประมาณ 3 นิ้ว หรือ 76 มิลลิเมตร หรือที่มีขนาดโตกว่าและเหมาะกับท่อผนังหนา โดยกำหนดจุดเริ่มตัดแล้วเคลื่อนหัวตัดไปทางใดทางหนึ่งที่ถนัด ไปบนผิวโค้งท่อทีละช่วง (Step) จนกว่ารอบท่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ข) ขณะเคลื่อนของหัวตัดต้องให้ชี้เข้าหาจุดศูนย์กลางของท่อและขนาดกับเส้นศูนย์กลาง (Centerline) ตลอดเวลา ซึ่งทำให้เกิดรอยตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Cut square) เทคนิคดังกล่าวได้แนะนำโดย Larry Jeffus (2010)

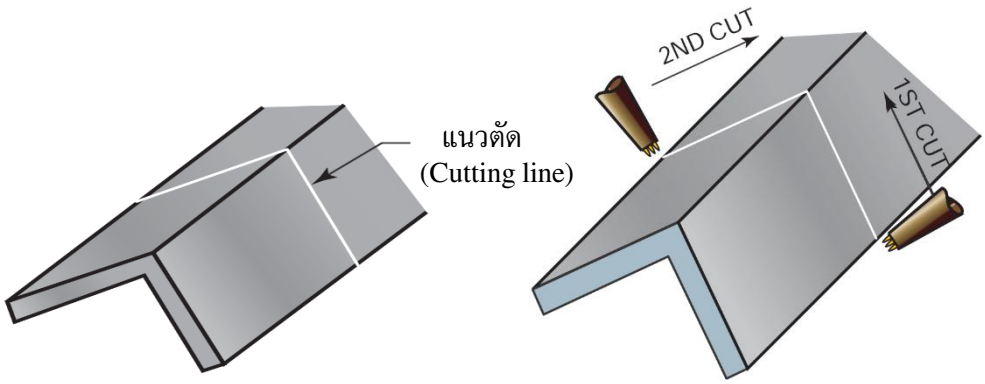
6. เทคนิคการเคลื่อนหัวทิปในการตัดโลหะประเภทเหล็กที่มีมุม (Angle iron cutting) เป็นเทคนิคการตัดโลหะต่าง ๆ ที่มีรูปทรงเป็นมุมขนาดต่างๆ เช่น มุมฉาก มุมแหลม หรือมุมป้าน เริ่มต้นด้วยการจัดวางโลหะงานที่ตัดบนโต๊ะงานหรือตำแหน่งที่เหมาะสม โดยตรวจสอบว่าชิ้นส่วนที่โดนตัดขาดสามารถตกลงพื้นได้หรือไม่ มีโอกาสเกิดความเสียหายหรือไม่ จากนั้นก็ทำการกำหนดเส้นตำแหน่งการตัดดังตัวอย่างในรูปที่ 2.18 (ก) การเริ่มต้นตัดต้องเริ่มที่ขอบของงานที่ไม่ใช่มุมด้านใดด้านหนึ่ง (Step 1) ทำการเคลื่อนหัวตัดทิศทางจากขอบเข้าหามุม แล้วย้ายตัดไปอีกด้านเคลื่อนหัวตัดแบบเดียวกัน (Step 2) ดังแสดงในรูปที่รูปที่ 2.18 (ข) ซึ่งทำได้ง่ายและรอยตัดที่เป็นรูปรอยตัดสี่เหลี่ยมที่สมบูรณ์โดย Larry Jeffus (2010)



(ก) แสดงเทคนิควิธีการตัดท่อขนาดเล็ก **(ข)** แสดงเทคนิควิธีการตัดท่อขนาดใหญ่

รูปที่ 2.17 เทคนิคการเคลื่อนหัวทิปเพื่อตัดท่อ (Moves cutting torch for pipe)

ที่มา : Larry Jeffus and Laerence Bower, Welding –Skill, Processes and Practices, 2010



(ก) วิธีกำหนดตำแหน่งตัด (Layout) **(ข)** เทคนิควิธีการเคลื่อนหัวตัดสำหรับโลหะที่มีมุม

รูปที่ 2.18 เทคนิคการตัดโลหะที่มีมุม (Cutting technique for angle iron)

ที่มา : Larry Jeffus and Laerence Bower, Welding –Skill, Processes and Practices, 2010

ค. การป้องกันการบิดเบี้ยวของงานตัด (Distortion in flame cutting)

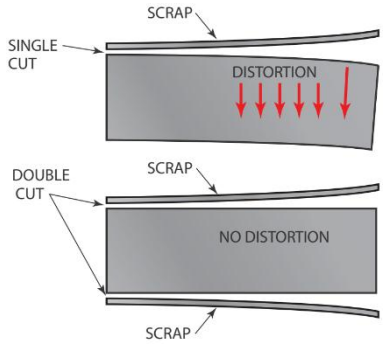
การตัดโลหะด้วยเปลวไฟอาศัยปริมาณความร้อนค่อนข้างสูงและเกิดบริเวณผลกระทบร้อนเป็นวงกว้าง โดยปริมาณความร้อน เวลาอุ่นงาน และความเร็วในการตัดต้องสัมพันธ์กับความหนาของชิ้นงานและขนาดของหัวทิปตัด ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัดมีผลกระทบทำให้เกิดการขยายตัวของโลหะตัดไม่เท่ากันทุกบริเวณจึงเกิดการบิดเบี้ยวขึ้นเสมอ โดยมักเกิดขึ้นกับโลหะแผ่นประเภทแผ่นบางหรือมีความหนาไม่มากนัก จากประสบการณ์ของผู้ที่เคยปฏิบัติการตัดหลาย ๆ ท่านที่ได้พบเจอกับปัญหาการบิดเบี้ยวและได้คิดหาวิธีการเพื่อขจัดปัญหาดังกล่าว พบว่า วิธีการป้องกันหรือวิธีลดการบิดเบี้ยวอันเนื่องจากอิทธิพลความร้อนจากการตัดสามารถทำได้ 2 วิธีการ โดย Larry Jeffus (2010)

วิธีการที่ 1. อาศัยหลักการสมดุลของความร้อนจากการตัด โดยการออกแบบหัวตัดแบบหัวคู่ดังแสดงลักษณะของหัวตัดในรูปที่ 2.19 (ก) ทำการตัดเคลื่อนขนานกันบนแผ่นโลหะด้วยปัจจัยการตัดที่เหมือนกัน ซึ่งชิ้นงานได้รับความร้อนที่เท่ากันและสม่ำเสมอทั้งสองข้างตามรอยตัด ซึ่งสามารถควบคุมและป้องกันการบิดเบี้ยวจากความร้อนได้ดี ดังแสดงวิธีการตัดในรูปที่ 2.19 (ข)

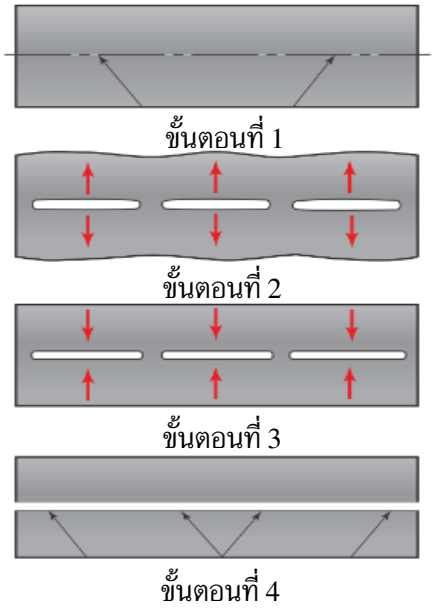
วิธีการที่ 2. อาศัยหลักการตัดเว้นระยะเป็นช่วงเป็นตอนไม่ตัดตลอดแนวอย่างต่อเนื่อง เพื่อใช้ส่วนที่ค้างตัดช่วยยึดแผ่นโลหะไว้ไม่ให้บิดเบี้ยว หลังจากความร้อนลดลงจึงทำการตัดส่วนค้างตัด (ระยะตัดสั้นความร้อนสะสมน้อย) จนได้รอยตัดตลอดแนวชิ้นงานและขาดออกจากกันซึ่งไม่เกิดการบิดเบี้ยว ดังแสดงลำดับวิธีการตัดในรูปที่ 2.19 (ค)



(ก) หัวตัดแบบหัวคู่ขนาน



(ข) วิธีการตัดแบบตัดขนาน 2 รอยตัด



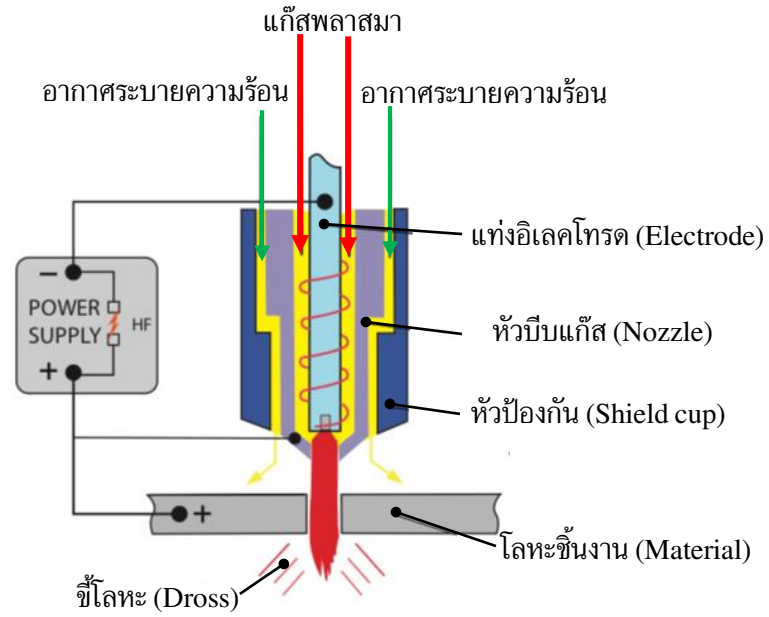
(ค) วิธีการตัดแบบเว้นระยะช่วงตัด

รูปที่ 2.19 เทคนิคป้องกันการบิดเบี้ยวจากการตัดโลหะ (Distortion from cutting)

ที่มา : Larry Jeffus and Laerence Bower, Welding –Skill, Processes and Practices, 2010

2.2 ขบวนการตัดด้วยลำอาร์กพลาสมา (Plasma arc cutting : PAC)

ขบวนการตัดโลหะชนิดนี้อาศัยใช้ลำของแก๊สพลาสมาที่เกิดจากการอาร์กระหว่างแท่งอิเลคโทรด (Non–consumable) กับโลหะชิ้นงานที่ต้องการจะตัด (Metal work) โดยอาศัยหลักการอาร์กของกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความร้อนแก่แก๊สตัวกลาง เมื่อจ่ายแก๊สนั้นให้ไหลผ่านอาร์กไฟฟ้า ความร้อนที่เกิดจากขบวนการอาร์กทำให้แก๊สเปลี่ยนสภาพแตกตัวไปอยู่ในรูปแบบของอิออน (Ionized) กลายเป็นแก๊สพลาสมาซึ่งมีสมบัตินำไฟฟ้าได้ จากนั้นแก๊สพลาสมาก็จะถูกบีบบังคับให้ไหลผ่านช่องแคบ ๆ ที่เรียกว่า Nozzle ส่งผลทำให้พลาสมาแก๊สที่แกนกลางมีความเร็วสูงถึง 6,000 เมตร/วินาที และมีระดับความร้อนเพิ่มสูงขึ้นถึง 10,000–14,000 °C ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในการอาร์กและรูปร่างของลำอาร์ก รวมถึงความเร็วของของแก๊สที่ไหลผ่านลำอาร์กพลาสมา โดยพลังงานจากลำพลาสมาอาร์กนี้จะพุ่งออกสู่ผิวของชิ้นงานจนเกิดการหลอมละลายและมีแรงดันที่จะดันน้ำโลหะเหลวออกไปด้วยแรงดันสูงจนชิ้นงานขาดออกจากกัน หรือในกรณีที่ทำการตัดออกแบบเซาะร่อง (Gouging) แรงดันก็จะเป่าน้ำโลหะให้หลุดออกไปจากส่วนหลอมละลายจนเกิดเป็นร่องลึกตามต้องการ ดังนั้น ไม่ว่าจะเป็นการตัดขาดออกจากกันหรือเซาะร่องโลหะชิ้นงาน กลไกการสร้างแก๊สพลาสมาเพื่อให้ความร้อนแก่โลหะชิ้นงานจะเหมือนกัน การอธิบายดังกล่าวอ้างอิงจาก Plasma Tech. (2017) โดยแสดงถึงองค์ประกอบของการสร้างลำอาร์กพลาสมาภายในหัวตัดพลาสมาในรูปที่ 2.20

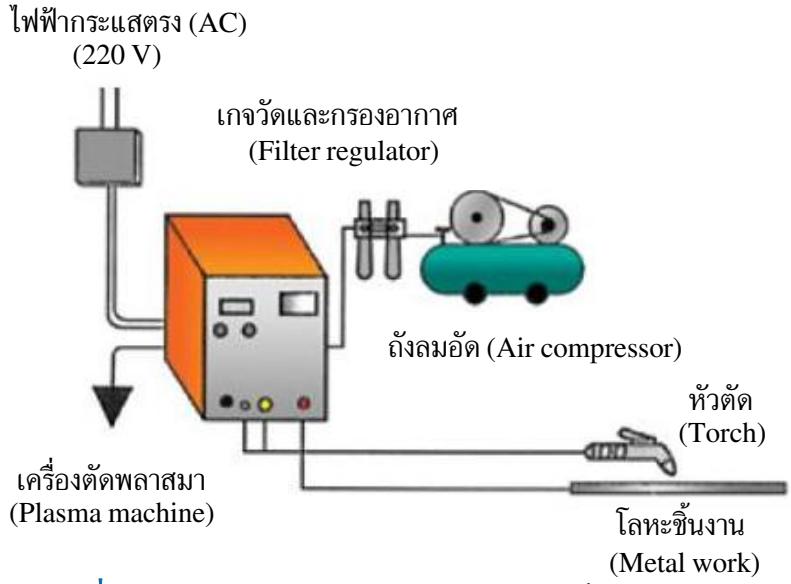


รูปที่ 2.20 องค์ประกอบและกลไกการสร้างแก๊สพลาสมาภายในหัวตัดพลาสมา

ที่มา : JASIC–Guide to Plasma Cutting, 2019

1. องค์ประกอบของกรรมวิธีการตัดพลาสมา (Plasma arc cutting component)

ระบบของขบวนการตัดด้วยลำอาร์กพลาสมาประกอบด้วยส่วนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.21 คือ 1. เครื่องตัดพลาสมา (Plasma cutting) เป็นแหล่งจ่ายพลังงานที่อาศัยกระแสไฟฟ้ากระแสตรง 2. ถังลมอัดอากาศ (Air compressor) ที่จะป้อนอากาศเข้าสู่ระบบ และ 3. หัวตัด (Torch) เป็นส่วนสำคัญในการอาร์กเพื่อสร้างแก๊สพลาสมา ดังแสดงรายละเอียดเพิ่มเติม ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.21 ส่วนประกอบของระบบการตัดด้วยลำอาร์กพลาสมา

ที่มา : JASIC K–ARC CUT , 2012

● เครื่องตัดพลาสมา (Plasma machine) เป็นแหล่งจ่ายพลังงานกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้สำหรับการอาร์กที่ตำแหน่งภายในหัวตัดทำหน้าที่คล้ายกับเครื่องเชื่อม (แต่ไม่สามารถนำเครื่องเชื่อมมาใช้แทนได้) ปัจจุบันผลิตออกมาเป็นเครื่องระบบวงจรอินเวอร์เตอร์ (Invertor system) มีทั้งเครื่องที่มีขนาดใหญ่ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม (Stationary) หรือเป็นเครื่องขนาดเล็กแบบพกพา (Portable) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยหลักการจ่ายปริมาณกระแสขึ้นอยู่กับความเร็วในการตัดและความหนาของโลหะชิ้นงานที่ต้องการตัด ซึ่งปกติการตัดที่ความเร็วสูงกับความหนาชิ้นงานที่มากต้องปรับตั้งกระแสไฟที่จ่ายต้องมีปริมาณสูง และจากประสบการณ์ของผู้เขียนพบว่า เครื่องตัดที่มีขนาดใหญ่จะจ่ายกระแสไฟได้เสถียรมากส่งผลทำให้แก๊สพลาสมาที่พุ่งออกมามีความนิ่งและตัดชิ้นงานได้มีคุณภาพมากกว่าเครื่องที่มีขนาดเล็กหรือแบบพกพา โดยบนแผงชุดควบคุมปัจจัยการตัดของเครื่องจะมีปุ่มหน้าที่ต่าง ๆ ดังแสดงปุ่มสัญลักษณ์ต่าง ๆ ในรูปที่ 2.23



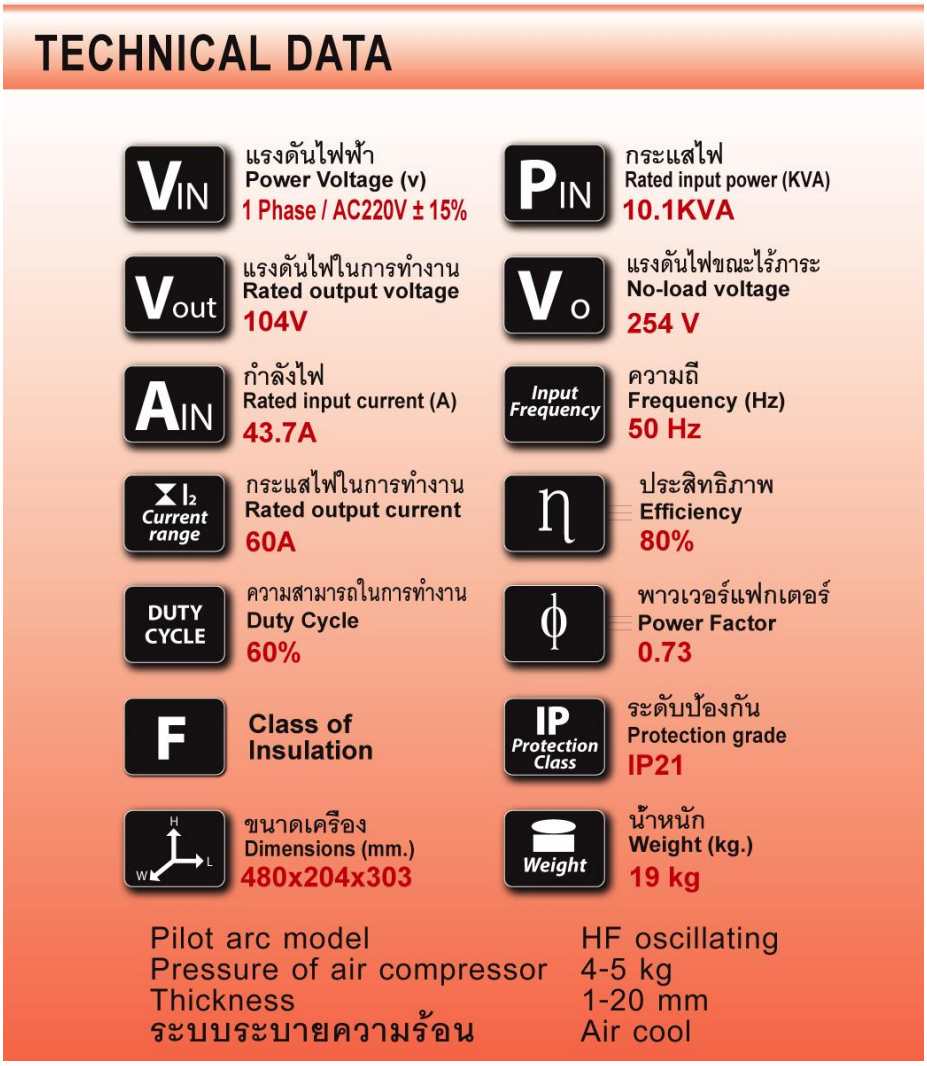
(ก) เครื่องตัดแบบติดตั้งตำแหน่งประจำ
ที่มา : Falcon , 2019.



(ข) เครื่องตัดแบบพกพา
ที่มา : H Powermax , 2014.

รูปที่ 2.22 เครื่องตัดพลาสมา (Plasma machine)

● แหล่งจ่ายอากาศอัด (Air compressor) เป็นแหล่งจ่ายของอากาศออกซิเจน แก๊สเฉื่อย หรือแก๊สอื่น ๆ ที่ผ่านการอัดเพื่อเพิ่มแรงดันที่จะป้อนเข้าสู่ระบบการอาร์กเพื่อสร้างแก๊สพลาสมา ชนิดของอากาศอัดที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุโลหะที่ต้องการตัดเพราะมีผลกระทบต่อคุณภาพของรอยตัด เช่น ความกว้างของร่องตัด (Kerf) หรือคุณภาพผิวของรอยตัด และยังมีผลกระทบต่อสมบัติของเนื้อโลหะในทางโลหะวิทยา ดังนั้น การเลือกใช้อากาศจึงมีผลต่อขบวนการตัด ซึ่งนอกจากอากาศอัดที่สร้างแก๊สพลาสมาที่เรียกว่า Orifice gas/Cutting gas สัมผัสกับแท่งอิเลคโทรดอาร์กโดยตรงที่จำเป็นต้องมีแล้วนั้น ภายในของหัวตัดพลาสมายังได้มีการออกแบบให้มีระบบของการระบายความร้อนที่เกิดขึ้นจากการอาร์กด้วยระบบอากาศ (Air cooling) หรือด้วยระบบน้ำ (Water cooling) ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบหัวตัด โดยคำแนะนำจากผู้ผลิตเครื่องมือและอุปกรณ์การตัดด้วยพลาสมา JASIC (2017)



รูปที่ 2.23 สัญลักษณ์บนแผงชุดควบคุมปัจจัยการตัดบนเครื่องตัดพลาสมา

ที่มา : SUMO Industrial , 2015

● หัวตัดพลาสมา (Torch) เป็นส่วนประกอบสำคัญเพราะเป็นส่วนที่สร้างแก๊สพลาสมาขึ้นภายใน ดังนั้น ตัวของหัวตัดจึงประกอบด้วยชิ้นส่วนที่สำคัญหลายชิ้นและแต่ละชิ้นก็มีหน้าที่แตกต่างกัน ดังแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของหัวตัดพร้อมกับอธิบายถึงตำแหน่งประกอบและหน้าที่ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ในรูปที่ 2.24 ปัจจุบันผู้ผลิตหัวตัดได้ออกแบบลักษณะรูปทรงของหัวตัดที่มีความหลากหลายเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการตัดและคุณภาพของรอยตัด จึงสามารถพบเห็นหัวตัดรูปร่างหน้าตาที่แตกต่างกัน พร้อมกับมีการออกแบบอุปกรณ์เสริมช่วยในการตัด (Accessories torch cutting guide) ที่หลากหลายตามรูปแบบงานที่ตัด ดังแสดงในรูปที่ 2.25 (ก) และ (ข) แต่อย่างไรก็ตาม ระบบกลไกของการสร้างแก๊สพลาสมาภายในหัวตัดจะไม่แตกต่างกัน รูปแบบของหัวตัดที่กล่าวมาข้างต้นนี้จะเป็นหัวตัดที่ใช้กับการตัดด้วยมือคน (Manual plasma cutting)

สำหรับงานตัดที่เป็นแบบอัตโนมัติหรือการตัดที่ใช้ระบบ CNC แทนคนนั่นเอง โดยหลักของขบวนการตัดมีองค์ประกอบของขบวนการตัดที่เหมือนกันต่างกันที่การควบคุมหัวตัดจะถูกสั่งการผ่านระบบคอมพิวเตอร์และต้องปฏิบัติการบนเครื่องจักร ซึ่งจะเหมาะกับการตัดงานในปริมาณมาก ๆ และตัดได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งแท่นหรือฐานปฏิบัติงานจะมีการออกแบบตามสภาพของลักษณะงานที่ทำการตัด เช่น การตัดโลหะแผ่น (Plate cutting) หรือการตัดโลหะท่อ (Pipe cutting) ดังแสดงตัวอย่างของการตัดงานในรูปที่ 2.26 โดยหัวตัดที่ใช้ต้องมีความสามารถในการทนความร้อนได้ดีมีระบบหล่อเย็นที่ดีเพราะเป็นการทำงานแบบต่อเนื่องเป็นเวลานาน เป็นข้อแนะนำของผู้ผลิต Lincoln Electric (2014)



รูปที่ 2.24 ส่วนประกอบของหัวตัดพลาสมา

ที่มา : PT-60 Plasma torch Consumables , 2013

หมายเลข 1 Drag shield : เป็นส่วนปลายสุดของหัวตัดทำหน้าที่ป้องกันส่วนของหัวฉีดหรือ Nozzle ไม่ให้เกิดความเสียหาย

หมายเลข 2 Retaining cap : เป็นส่วนนอกสุดของหัวตัดเพื่อจับยึดส่วนประกอบอื่น ๆ กับส่วนของโครงหลักหัวตัด (Torch head)

หมายเลข 3 Nozzle/Tip : เรียกกันว่าหัวฉีด เป็นชิ้นส่วนใช้ทำหน้าที่บีบลำอาร์กพลาสมาให้มารวมกันแล้วผ่านช่องรูเล็ก ๆ ที่อยู่ตรงปลายของหัวฉีดเพื่อสร้างความเข้นข้นและรวดเร็วของแก๊สพลาสมา

หมายเลข 4 Electrode : เป็นส่วนของตัวนำไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Power supply) เพื่อให้เกิดขบวนการอาร์ก หรือเรียกว่าส่วนของการสร้างความร้อนจากการอาร์กก็ได้

หมายเลข 5 Swirl ring : เป็นส่วนที่อยู่ติดกับอิเลคโทรดทำหน้าที่ในการบีบอัดอากาศที่ไหลผ่านเข้ามาให้ผ่านรูเล็ก ๆ ทางด้านข้างเพื่อไปสร้างเป็นแก๊สพลาสมาที่อิเลคโทรด ซึ่งหัวตัดบางรุ่นจะมีตัวควบคุมการไหลของอากาศให้ไหลอย่างสม่ำเสมอและมีทิศทางที่แน่นอนที่เรียกว่า Gas diffuser ที่ทำมาจากวัสดุทนความร้อนสูง

หมายเลข 6 Torch head : เป็นส่วนอุปกรณ์นอกสุดที่ใช้จับยึดส่วนของ Retaining cap เพื่อยึดส่วนประกอบต่าง ๆ เข้าด้วยกันทั้งหมดของส่วนประกอบของหัวตัด



(ก) ตัวอย่างรูปแบบของหัวตัดพลาสมา (ข) อุปกรณ์เสริมช่วยควบคุมหัวตัดพลาสมา

ที่มา : TRUSOXIN , 2017 *ที่มา : WS-Welding stop , 20174*

รูปที่ 2.25 รูปแบบของหัวตัดพลาสมาและอุปกรณ์เสริมช่วยในการตัด



(ก) การตัดพลาสมาประเภทโลหะแผ่น (ข) การตัดพลาสมาประเภทโลหะท่อ

รูปที่ 2.26 รูปแบบการตัดพลาสมาด้วยระบบการควบคุมหัวตัดแบบอัตโนมัติ

ที่มา : LINCOLN ELECTRIC TORCHMATE, 2016

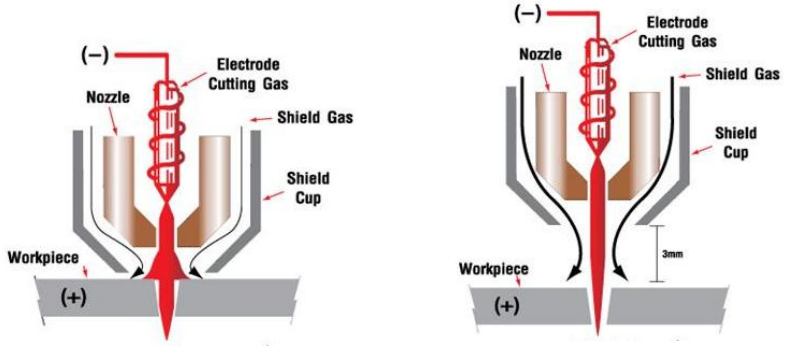
2. เทคนิคของกรรมวิธีการตัดพลาสมา (Technic of plasma arc cutting)

ขบวนการตัดโลหะมีความยุ่งยากและซับซ้อนน้อยกว่าขบวนการเชื่อมโลหะ หรือจะกล่าวว่าทำได้ง่ายกว่าก็ได้ ด้วยเพราะปัจจัยของการตัดน้อยกว่านั่นเอง อย่างไรก็ตาม บุคคลใดที่ต้องการที่จะตัดโลหะด้วยเทคนิคแก๊สพลาสมาก็ต้องรู้และเข้าถึงเทคนิคหรือกลไกอย่างดีเสียก่อน ดังที่จะได้กล่าวถึงเทคนิคต่าง ๆ ของการด้วยแก๊สพลาสมาที่แนะนำโดย John Kechagias et al. (2016) มีดังนี้

2.1 การเลือกระบบการอาร์กหัวตัดพลาสมา (Type of arc torch) การตัดด้วยแก๊สพลาสมาอาศัยหลักของการอาร์ก ปัจจุบันได้มีการพัฒนาถึงเทคนิคของการอาร์กขณะเริ่มตัดชิ้นงานของการตัดพลาสมา 2 เทคนิค คือ

- เทคนิคการอาร์กเริ่มต้นแบบหัวตัดสัมผัสชิ้นงาน (Conventional starting arc) การอาร์กเริ่มต้นแบบนี้เป็นแบบดั้งเดิมที่ต้องให้หัวตัดสัมผัสกับโลหะชิ้นงาน หรือเรียกว่า การเคาะ หรือการเขี่ยหัวตัดนั่นเอง (คล้ายกับวิธีการเชื่อมลวดหุ้มฟลักซ์) ดังนั้น เทคนิคนี้ไม่เหมาะกับผิวชิ้นงานที่มีการเคลือบสี มีสนิม หรือมีสารปนเปื้อนที่ผิวชิ้นงาน เนื่องจากสร้างจุดอาร์กได้ยากและอายุการใช้งานของหัวตัดจะสั้นหรือพังเร็วเพราะต้องเคาะเพื่อการอาร์ก แต่มีข้อดีที่ใช้ลมอัดไม่สูงมากและสามารถเลือกกำลังของลมตามความหนาของโลหะงานได้ (ปรับปัจจัยของการตัดที่เครื่องตัด) ดังแสดงลักษณะของการอาร์กในรูปที่ 2.27 (ก) ปัจจุบันการอาร์กแบบนี้ได้มีการพัฒนาเพิ่มระบบความถี่สูงมาใช้ (High – frequency alternative current) กล่าวคือ ไม่ต้องใช้หัวตัดเคาะแบบเดิมเพียงวางบนชิ้นงานแล้วกดเปิดระบบความถี่ก็จะเกิดการอาร์กที่ง่ายขึ้น (คล้ายกับการเชื่อมทิก) ค่าแรงดันหน้าเครื่องจะต่ำหรือที่เรียกกันว่า ค่า OCV (Open Circuit Voltage) มีความปลอดภัยสูงแต่การเริ่มต้นอาร์กจะค่อนข้างยาก ต้องเคาะหัวตัดกับชิ้นงานเหมาะสำหรับคนที่เริ่มฝึกหัดการใช้เครื่องตัด ระบบอาร์กแบบสัมผัสชิ้นงานด้วยความถี่สูงนิยมใช้งานกันมากในปัจจุบัน
- เทคนิคการอาร์กเริ่มต้นแบบหัวตัดไม่สัมผัสชิ้นงาน (Pilot starting arc) เป็นเทคนิคการตัดด้วยแก๊สพลาสมาที่ทันสมัยกว่า สามารถเริ่มต้นอาร์กโดยไม่ต้องสัมผัสกับโลหะชิ้นงาน (ไม่ต้องมีชิ้นงานก็อาร์กได้) เพียงกดเริ่มอาร์กก็จะมีเปลวอาร์กพุ่งออกมาเป็นลำอาร์ก จากนั้นวางหัวตัดบนผิวชิ้นงานเดินแนวตัดได้ทันที การอาร์กแบบนี้ทำงานได้ง่ายมีความปลอดภัยสูง แต่ต้องมีระดับของแรงดันอากาศมากเพียงพอกลไกการอาร์กถึงจะสมบูรณ์ ถ้าระดับความดันตกหรือต่ำลงระบบจะหยุดทำงานทันที จึงจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายแรงดันลมที่ใหญ่มากพอและป้อนลมเข้าอย่างสม่ำเสมอจะทำให้ประสิทธิภาพในการอาร์กตัดดีมาก การตัดด้วยระบบนี้จะทำงานได้ง่ายไม่ต้องใช้ความชำนาญมากนักก็ตัดได้ หัวตัดไม่ต้องสัมผัสกับผิวชิ้นงานไม่ต้องเคาะ ดังนั้น หัวตัดจะมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ประโยชน์หรือข้อเด่นของระบบนี้ คือ เหมาะที่จะใช้ในการตัดโลหะชิ้นงานที่มีรูปทรงต่าง ๆ ที่หลากหลายที่ไม่ใช่รูปทรงเรขาคณิต เพราะสามารถใช้กับอุปกรณ์เสริมช่วยควบคุมการตัด เช่น วงเวียน หรือล้อเลื่อน ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.25 (ข) อุปกรณ์เสริมดังกล่าวสามารถออกแบบเองได้ตามลักษณะงานที่

ต้องการตัดซึ่งสามารถสร้างต้นแบบงานแล้วตัดงานโลหะได้ตามรูปร่างต้นแบบได้ ลักษณะกลไกของการอาร์กแบบ Pilot starting ดังแสดง ในรูปที่ 2.27 (ข)



(ก) หัวตัดพลาสมาแบบ Cutting arc **(ข)** หัวตัดพลาสมาแบบ Pilot cut

รูปที่ 2.27 ประเภทของรูปแบบของการอาร์กของหัวตัดพลาสมา

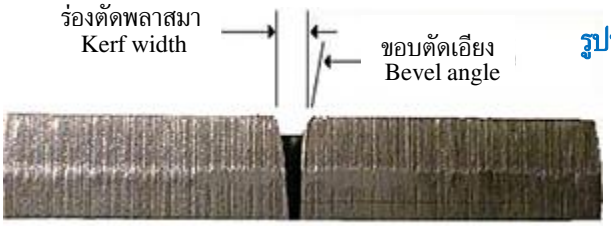
ที่มา : JASIC K–ARC CUT , 2012

การตัดโลหะด้วยพลาสมาถือว่าเป็นกรรมวิธีการตัดที่ดีและทันสมัย นิยมใช้กันมากขึ้นแทนการตัดด้วยแก๊สออกซิอะเซทิลีนเพราะมีข้อดีหลายอย่าง เช่น สามารถตัดโลหะได้ทุกชนิด ตัดได้เร็ว ประหยัด มีความปลอดภัย และสามารถตัดได้ทันที่ไม่ต้องอุ่นงาน มีผลเสียต่อการบิดตัวและผลกระทบต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาน้อย ที่สำคัญร่องหรือรอยตัดราบเรียบมากกว่าที่เรียกกันว่า “Kerf”

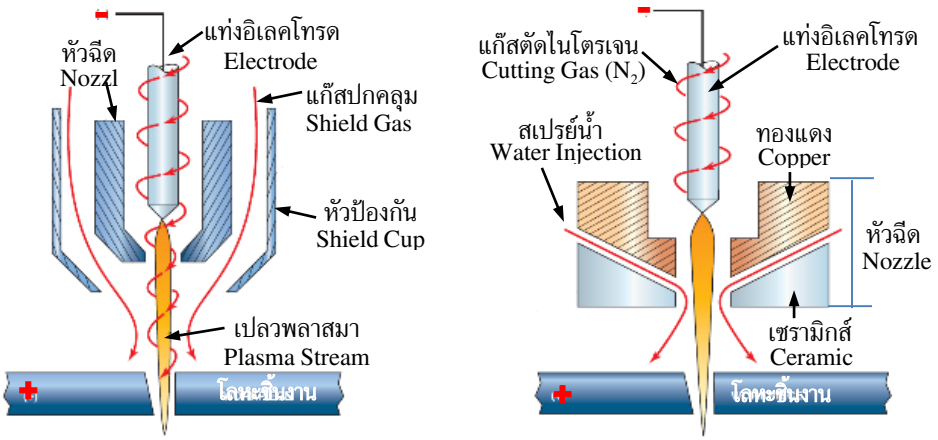
การกำหนดปัจจัยการตัดด้วยพลาสมามีผลกระทบโดยตรงต่อรอยตัดหรือช่องว่างที่เหลืออยู่บนชิ้นงาน เป็นที่ทราบกันดีว่ารอยตัดที่ดีต้องมีความกว้างของรอยตัดน้อยหรือต้องไม่กว้างมากเกินไป โดยช่างตัดต้องควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งอ้างอิงจาก Hypertherm Shaping Possibility (2016) ดังนี้

1. ระยะห่างของปลายหัวตัดกับชิ้นงาน (Standoff distance) หัวตัดต้องไม่ห่างมากเกินไป ถ้าห่างมากความกว้างของร่องตัด (Kerf) จะกว้างมากขึ้น
2. ขนาดของรูตัดเริ่มต้น (Orifice diameter) ต้องควบคุมหรือรักษาขนาดของรูเริ่มต้นตัดให้เล็กที่สุด ซึ่งก็จะส่งผลทำให้ร่องตัดที่ได้มีขนาดที่แคบ
3. การตั้งค่าพลังงานตัด (Power setting) ค่าของพลังงานที่จะใช้ตัดต้องเหมาะสมกับความหนาและชนิดของโลหะชิ้นงาน ซึ่งค่าที่สูงหรือต่ำเกินไปจะมีผลทำให้เพิ่มความกว้างของร่องตัด
4. ความเร็วในการตัด (Travel speed) ถ้าตัดด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดร่องตัดแคบลง แต่มีโอกาสที่ขอบด้านบนของร่องตัดจะเกิดการเอียง (Bevel angle) ดังแสดงในรูปที่ 2.28 และเศษโลหะที่ตัดติดตามขอบชิ้นงานก็มากขึ้น (Dross buildup) ทำให้ผิวงานไม่สมบูรณ์
5. ชนิดของแก๊สตัด (Cutting gas) ชนิดของแก๊สหรือส่วนผสมของแก๊สจะส่งผลต่อความกว้างของร่องตัด เพราะแก๊สตัดเป็นตัวกำหนดความเร็วในการเคลื่อนของหัวตัด กำลังงานตัด และความเข้มของแก๊สพลาสมาตัด

6. ปลายแท่งอิเลคโทรดและหัวฉีด (Electrode and Nozzle tip) อุปกรณ์คู่นี้จะเสื่อมสภาพไปตามการใช้งานหรืออาจเกิดความเสียหายต้องปรับเปลี่ยนให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์ เพราะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการอาร์กตัดและความกว้างของร่องตัด
7. การหมุนของแก๊สพลาสมา (Swirling of plasma gas) ในบางรุ่นของหัวตัดจะมีช่องให้แก๊สเคลื่อนที่เป็นวงกลมพันรอบ ๆ แท่งอิเลคโทรดก่อนที่จะเข้าไปสู่ปากปลายของหัวฉีด การหมุนแบบนี้ทำให้กระแสพลาสมาที่ผลิตขึ้นได้มีความหนาแน่นมากขึ้น และประสิทธิภาพของการตัดก็จะเพิ่มสูงขึ้นและร่องตัดก็จะแคบลง ดังแสดงการหมุนของแก๊สในรูปที่ 2.29 (ก)
8. ระบบฉีดน้ำ (Water injection) ในบางรุ่นของหัวตัดมีระบบการฉีดน้ำเข้าไปสัมผัสกับแก๊สพลาสมาขณะที่ออกมาจากปลายของหัวฉีด เมื่อแก๊สพลาสมาสัมผัสน้ำจะเกิดการปั่นป่วนหรือเกิดการหมุนทำให้แก๊สพลาสมามีความเข้มข้นหรือหนาแน่นมากขึ้น ช่วยทำให้คุณภาพการตัดดีขึ้น ร่องตัดแคบ ขอบงานไม่เอียง และยืดอายุการทำงานของปลายหัวฉีด ดังแสดงการสเปรย์น้ำของหัวตัดในรูปที่ 2.29 (ข)



รูปที่ 2.28 การเกิดมุมตัดเอียง
ที่มา : Hypertherm, 2016



(ก) หัวตัดพลาสมาแบบแก๊สหมุน **(ข)** หัวตัดพลาสมาแบบสเปรย์น้ำ

รูปที่ 2.29 วิธีการเพิ่มความหนาแน่นของแก๊สพลาสมาภายในหัวตัดบางรุ่น
ที่มา : Courtesy of the American Welding Society, 2010

2.2 ความกว้างของร่องตัด (Widths of kerf)

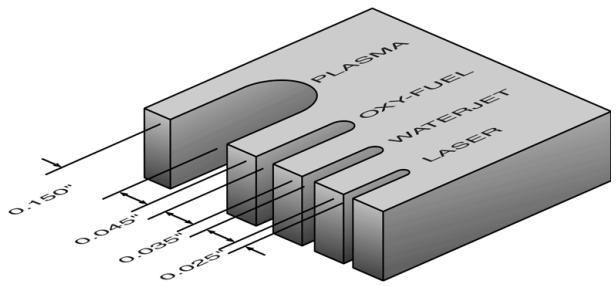
จากปัจจัยที่เกี่ยวข้องของขบวนการตัดพลาสมาที่กล่าวมาข้างต้น ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการตัดด้วยพลาสมาได้มีการสรุปจากผลงานวิจัยมาเป็นข้อแนะนำโดย Larry Jeffus (2010) ดังแสดงใน ตารางที่ 2.6 ที่ระบุมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของโลหะที่ตัดกับความกว้างของร่องตัด (Kerf) ที่ยอมรับได้ ซึ่งมาตรฐานขนาดความกว้างของร่องตัดนี้นำไปใช้ประโยชน์สำหรับการซ้อนโลหะงานที่จะตัดหลาย ๆ ชั้นแล้วตัด ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความกว้างของร่องตัด (Kerf size) เนื่องจากเมื่อชิ้นงานโลหะหนาเพิ่มขึ้นเปลวแก๊สพลาสมาที่ตัดก็จะเกิดมุมเอียงขึ้น ตั้งแต่ 1.5 ถึง 3 องศา ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับความหนาของโลหะงาน ความเร็วตัด ประเภทของแก๊ส ระยะหัวตัด สภาพของหัวฉีดแก๊ส เป็นต้น โดยมุมแก๊สพลาสมาตัดที่เอียงจะมีผลต่อขนาดร่องตัดและสภาพผิวรอยตัดเป็นสำคัญ อย่างไรก็ตาม ปัญหามุมเอียงนี้จะไม่มีผลกระทบหรือเกิดขึ้นน้อยมากสำหรับกรณีตัดโลหะชิ้นงานบาง ๆ

การตัดโลหะด้วยพลาสมาเป็นขบวนการตัดที่มีอัตราการสูญเสียเนื้อโลหะชิ้นงานค่อนข้างมาก และมีขนาดร่องตัดที่ค่อนข้างกว้างมากกว่าเมื่อเทียบกับขบวนการตัดด้วยวิธีการอื่น ๆ ดังแสดงการเปรียบเทียบขนาดร่องตัด (Kerf size) ของการตัดโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนที่ความหนา 1/2 นิ้ว ด้วยขบวนการตัดที่ต่างกันที่ทดลองโดย ESAB knowledge center (2013) ดังแสดงในรูปที่ 2.30 จะเห็นได้ชัดเจนว่าการตัดด้วยด้วยวิธีการตัดด้วยแก๊สพลาสมาจะเกิดร่องตัดใหญ่มากที่สุด (0.150 นิ้ว) ตามมาด้วยวิธีแก๊สออกซิอะเซทิลีน (0.045 นิ้ว) ด้วยวิธีสเปรย์น้ำ (0.035 นิ้ว) และด้วยวิธีลำอาร์กเลเซอร์ (0.025 นิ้ว) ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ก็ยังมีการนิยมเลือกใช้การตัดด้วยแก๊สพลาสมาเพราะตัดได้รวดเร็ว ขั้นตอนการตัดไม่ยุ่งยาก ตัดงานที่หนามากได้ มีผลกระทบต่อสมบัติของผิวรอยตัดน้อย ที่สำคัญมีต้นทุนการตัดที่ค่อนข้างต่ำ

ตารางที่ 2.6 มาตรฐานความกว้างของร่องตัด (Kerf size) ต่อความหนาโลหะชิ้นงาน

ที่มา : Larry Jeffus et. al., Welding –Skill, Processes and Practices. First Edition, 2010

ความหนาโลหะชิ้นงาน (Plate thickness)		ความกว้างของร่องตัด (Kerf allowance)	
นิ้ว (in)	มิลลิเมตร (mm)	นิ้ว (in)	มิลลิเมตร (mm)
1/8 – 1	3.2 – 25.4	+3/32	+2.4
1 – 2	25.4 – 51.0	+3/16	+4.8
2 – 5	51.0 – 175.0	+5/16	+8.0



รูปที่ 2.30 เปรียบเทียบความแตกต่างของขนาดร่องตัดที่ขบวนการตัดต่างกัน

ที่มา : ESAB Knowledge Center– What is Cutting Kerf, 2013

2.3 การเลือกแก๊สตัดพลาสมา (Gases for plasma cutting)

BOC (Plasma tech. & Cutting) (2015) ได้ศึกษาถึงการตัดพลาสมาที่ต้องอาศัยแก๊สที่จะนำมาสร้างเป็นแก๊สพลาสมาซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อขบวนการตัดพลาสมา ปัจจุบันพบว่าแก๊สที่ใช้มีทั้งแก๊สบริสุทธิ์ (แก๊สชนิดเดียว) และแก๊สผสม (แก๊สมากกว่าหนึ่งชนิด) ที่สามารถนำมาใช้สร้างเป็นแก๊สพลาสมาได้ โดยอิทธิพลของแก๊สที่มีผลต่อการตัด ดังนี้

1. แรงกระแทกตัด (Force cutting impact) ชนิดของแก๊สที่มีความหนาแน่นสูงจะมีแรงดันมากพุ่งออกมาเร็วและแรง แรงดันของหัวตัดจะสูงตัดเนื้อโลหะได้เร็วและดีและสามารถตัดโลหะที่มีความหนามากได้ และยังมีผลกับการกระจายของเศษน้ำโลหะ (Dross) ส่วนแก๊สชนิดที่มีความหนาแน่นต่ำจะตรงกันข้าม แต่ก็เหมาะกับการตัดโลหะบาง

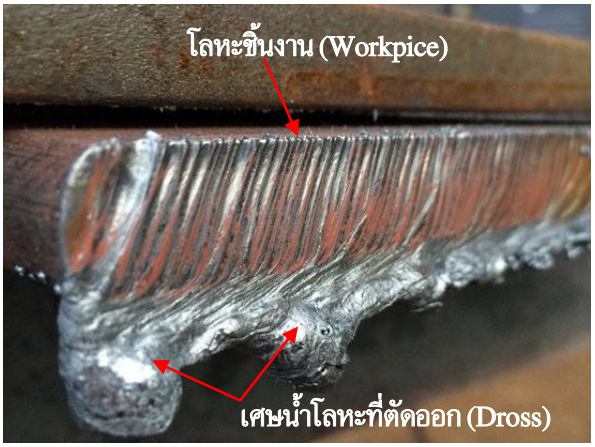
2. ความเข้มของแก๊สพลาสมา (Plasma stream) แก๊สบางชนิดจะมีความเข้มของแก๊สพลาสมาสูงซึ่งส่งผลทำให้ได้ลำอาร์กของแก๊สที่เล็กจะมีผลทำให้ขนาดของร่องตัดแคบและมีความเร็วในการตัดสูง (High cutting speed)

3. ปริมาณความร้อน (Heat content) ความร้อนที่ได้จากอาร์กของกระแสไฟฟ้าที่สูงจะส่งผลทำให้ปริมาณความร้อนของแก๊สพลาสมาที่ได้สูงขึ้นตาม ซึ่งกระแสไฟก็จะมีระดับที่เหมาะสมตามชนิดและความหนาของโลหะชิ้นงาน ดังแสดงในตารางที่ 2.7

4. ความกว้างของร่องตัด (Kerf width) แก๊สแต่ละชนิดจะมีผลต่อขนาดความกว้างของร่องตัดและมีผลต่อความเอียงของเปลวแก๊สพลาสมา

5. รูปแบบของเศษน้ำโลหะ (Dross formation) แก๊สที่เลือกใช้ต่างชนิดกันจะมีผลต่อการกระจายตัวของเศษน้ำโลหะที่ตัดออกไป แก๊สบางชนิดอาจมีเศษโลหะติดอยู่ตามขอบด้านล่างของร่องตัด ดังแสดงในรูปที่ 2.31

6. ชนิดของโลหะชิ้นงาน (Type of metal) แก๊สบางชนิดเหมาะกับโลหะบางชนิดและอาจไม่เหมาะกับโลหะชนิดอื่น ๆ เพราะที่ผิวของโลหะบางชนิดจะมีผลกระทบต่อการทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบของแก๊สพลาสมาจึงต้องเลือกให้ถูกต้องและเหมาะสม



รูปที่ 2.31 การเกิดเศษโลหะติดตามขอบร่องตัดด้านล่าง
ที่มา :My Favorite think about a plasma cutting, 2015

ตารางที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าต่อปัจจัยด้านอื่น ๆ ของการตัดพลาสมา

ที่มา : Dirk Ott. High precision plasma cutting, exactly. May, 2018

ความหนาโลหะ (Thickness : in.)	กระแสไฟฟ้า (Current :A)	แก๊สตัด (Cutting gas)	แก๊สปกคลุม (Shielding gas)	ความเร็วตัด (Cutting speed : IPM)
0.5	250	N_2	None	35
0.5	270	N_2	None	40
0.5	350	N_2 or H_2	H_2O	90
0.5	150	O_2	Air	100
1.0	1,100	N_2 or H_2	None	100
1.0	575	N_2	H_2O	60
1.0	300	O_2	Air	70
1.0	400	O_2	Air	80

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าแก๊สหรือแก๊สผสมที่เลือกนำมาใช้สร้างลำอาร์กของแก๊สพลาสมามีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการตัด ดังนั้น จึงได้มีการแนะนำการเลือกใช้แก๊สที่ถูกต้องและเหมาะสมสำหรับการตัดโลหะแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 การเลือกแก๊สตัดกับชนิดของโลหะชิ้นงานที่เหมาะสม

ที่มา : Larry Jeffus et. Al., Welding –Skill, Processes and Practices. First Edition, 2010

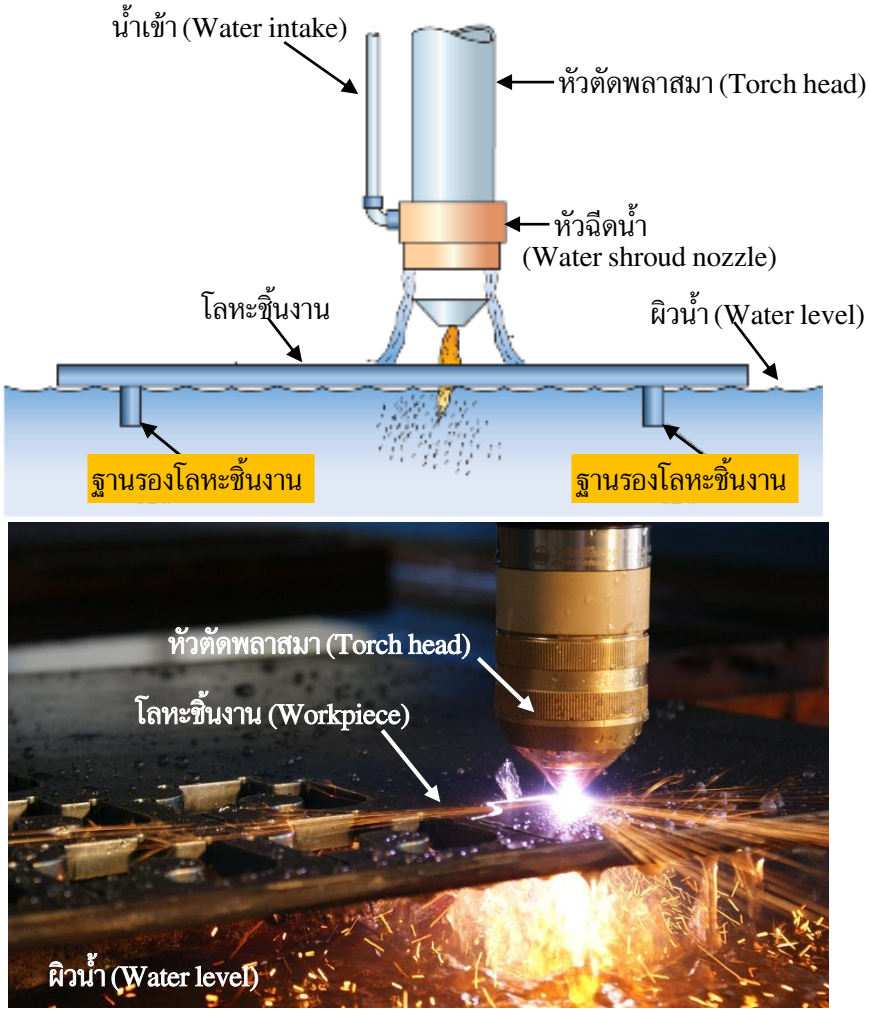
ชนิดของแก๊สตัด (Cutting gases)	ชนิดของโลหะ (Type of metals)
ไนโตรเจน+อาร์กอน กับ 0–35% ไฮโดรเจน	เหล็กกล้าคาร์บอน และเหล็กกล้าผสมต่ำ
ไนโตรเจน+สเปรย์น้ำ (N_2+H_2O)	เหล็กกล้าไร้สนิม
ไนโตรเจน+อากาศ (N_2+Air)	อลูมิเนียม และอลูมิเนียมผสม
อาร์กอน+35–40% ไฮโดรเจน	สำหรับการเชาะร่องทั้งหมด

2.4 ความปลอดภัยจากระบบการอาร์กหัวตัดพลาสมา (Type of arc torch) ข้อมูลจาก Michal Heinrich (2007) ได้ทำการศึกษาการตัดด้วยการลำอาร์กพลาสมาจะสร้างมลภาวะทางเสียง ทางแสง ควัน และเปลวไฟจึงต้องปฏิบัติการในพื้นที่เฉพาะและกรณีตัดด้วยมือก็ต้องสวมอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลอย่างดี มิเช่นนั้นอาจเกิดอันตรายได้ จากปัญหาของผลกระทบที่เกิดจากการตัดดังที่กล่าวมา จึงได้มีการคิดค้นหาวิธีป้องกัน พบว่าการตัดพลาสมาบนพื้นน้ำโดยวางชิ้นงานที่ต้องการตัดบนแอ่งน้ำ ทำให้น้ำโลหะที่เป่าออกมาพร้อมแก๊สตัดและกับประกายไฟต่าง ๆ ตกลงไปในน้ำลดการกระจายของเศษน้ำโลหะบนพื้นที่เป็นอันตราย ซึ่งระบบดังกล่าวช่วยลดปัญหาเสียงดัง (Sound) แสงสว่างที่จ้าเกินไป (Light) ควันพิษ (Fume) และอันตรายจากประกายไฟ (Sparks) ได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในรูปที่ 2.32 นอกจากนี้ ยังมีวิธีที่สามารถขจัดมลภาวะได้ทั้งหมด คือ วางชิ้นงานที่ต้องการตัดไว้ในน้ำแล้วส่งหัวตัดลง

ไป ให้เกิดขบวนการตัดภายในน้ำทำให้มลภาวะที่เกิดจากการตัดถูกควบคุมด้วยน้ำ แต่มีขีดจำกัดสำหรับงานบางชนิดหรือโลหะที่ต้องการตัดบางชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.33

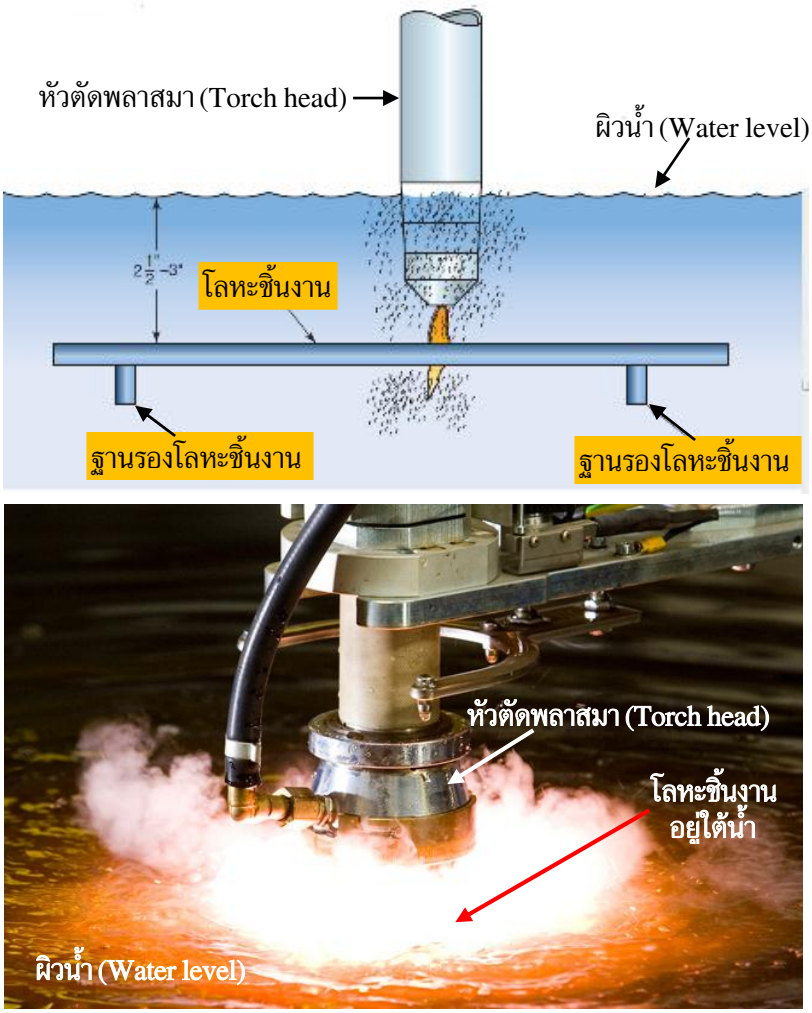
ขบวนการตัดด้วยพลาสมาจะมีแสงสว่างจ้าที่เกิดจากพลาสมาอาร์กซึ่งเป็นอันตรายต่อสายตาเหมือนกับขบวนการเชื่อม จึงต้องสวมแว่นกรองแสงเพื่อป้องกันดวงตา โดยระดับความเข้มของเลนส์ตามเบอร์ของเลนส์ที่เหมาะสมกับกระแสอาร์กพลาสมาดังคำแนะนำในตารางข้างล่างนี้

กระแสไฟอาร์กพลาสมา (A)	เบอร์เลนส์ต่ำสุดที่ใช้ได้ (No.)	เบอร์เลนส์ที่เหมาะสมและถูกต้อง(No.)
น้อยกว่า 300	8	9
300 – 400	9	12
มากกว่า 400	10	14



รูปที่ 2.32 วิธีการตัดพลาสมาโดยการวางชิ้นงานเหนือพื้นน้ำ

ที่มา : Kjellberg Finsterwalde– Underwater Plasma Cutting, 2011



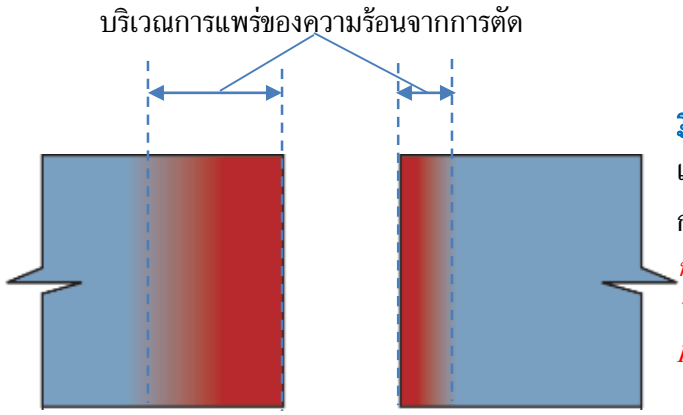
รูปที่ 2.33 วิธีการตัดพลาสมาโดยการวางชิ้นงานใต้น้ำ

ที่มา : Kjellberg Finsterwalde– Underwater Plasma Cutting, 2011

2.5 การบิดตัวจากการตัดพลาสมา (Plasma cutting distortion)

John Kechagias et al. (2016) ได้อธิบายถึงการบิดตัวของชิ้นงานจากการตัดด้วยความร้อน ถือว่าเป็นเรื่องที่เกิดขึ้นอยู่เสมอและเป็นสิ่งที่ต้องป้องกันไม่ให้เกิด เพราะการบิดตัวทำให้ชิ้นงานเสียรูปทรงจนไม่สามารถนำไปใช้งานได้ การบิดตัวจะเกิดขึ้นได้ง่ายสำหรับการตัดโลหะแผ่นบาง หรือมีความหนาเพิ่มขึ้นแต่ความร้อนในการตัดที่สูงมากก็มีโอกาสที่จะเกิดการบิดตัวได้มากเช่นกัน การตัดด้วยแก๊สพลาสมาเมื่อเทียบกับการตัดด้วยแก๊สออกซิอะเซทิลีน (Oxy–fuel) ชิ้นงานโลหะมีโอกาสเกิดการบิดตัวที่น้อยกว่า เพราะการตัดด้วยพลาสมาความพร้อมสูงกว่าและส่งผ่านไปยังชิ้นงานที่รวดเร็วแบบไม่ต้องอุ่นชิ้นงาน จึงเป็นเหตุให้การแพร่กระจายของความร้อนไปในโลหะงานไม่กว้าง ยิ่งตัดด้วยความเร็วสูงความร้อนจะแพร่ได้ต่ำลง ดังแสดงการเปรียบเทียบถึงการแพร่ความร้อนของขบวนการตัดด้วยแก๊สออก

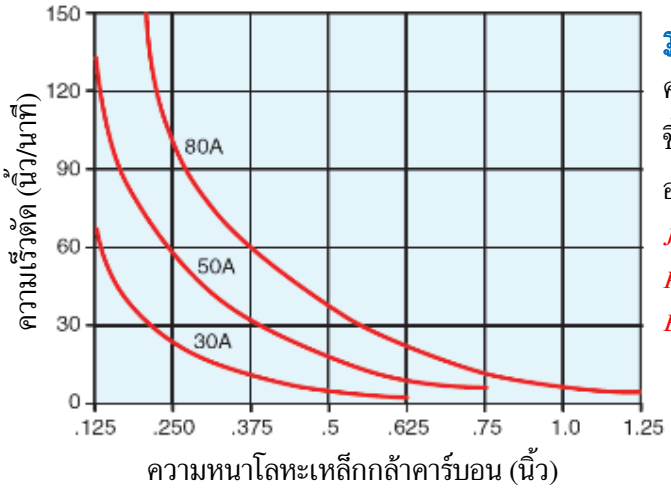
ซิอะเซทิลีนกับแก๊สพลาสมา ในรูปที่ 2.34 จากรูปเห็นได้ชัดเจนว่าการตัดด้วยเปลวแก๊สออกซิอะเซทิลีน ความร้อนแพร่กระจายไปยังเนื้อของโลหะชิ้นงานที่ตัดเป็นพื้นที่กว้าง เมื่อเปรียบเทียบกับการตัดด้วยแก๊สพลาสมา ดังนั้น การตัดด้วยพลาสมาจึงช่วยลดปัญหาการบิดตัวได้ดี และถ้าเลือกชนิดของแก๊สที่อาร์กพลาสมามีความหนาแน่นสูงก็จะตัดได้เร็วและโลหะที่หนาได้มากขึ้น



รูปที่ 2.34 เปรียบเทียบการแพร่ของความร้อนที่เกิดจากการตัด

ที่มา : Larry Jeffus et. Al., Welding –Skill, Processes and Practices. First Edition, 2010

ความเร็วในการตัด (Cutting speed) การตัดที่ระดับความเร็วสูง (High speed cutting) จะช่วยลดปัญหาการบิดตัวได้อีกทาง เพราะการเดินหัวตัดเร็วความร้อนจะสะสมน้อยแพร่กระจายไปได้น้อย โดยต้องเลือกระดับกระแสที่เหมาะสมที่ขึ้นอยู่กับความหนาของโลหะชิ้นงาน ดังแสดงตัวอย่างของความสัมพันธ์ดังกล่าวในการตัดโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนในรูปกราฟที่ 2.35 และในกรณีทำการตัดด้วยอุปกรณ์เสริมที่อาจเป็นเครื่องจักร (CNC) หรือเครื่องควบคุมแบบตัดอัตโนมัติ (Automatic cutting) จะสามารถควบคุมความเร็วได้ดีและมีความต่อเนื่องของการตัด ดังแสดงตัวอย่างอุปกรณ์เสริมช่วยตัดแบบพกพา (Portable plasma cutting) และแบบติดตั้งที่ประจำ (Stationary plasma cutting) ในรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.35 ความสัมพันธ์ของความเร็วตัด ความหนาชิ้นงานและระดับกระแสไฟอาร์กพลาสมา*ที่มา : Larry Jeffus et. Al., Welding –Skill, Processes and Practices. First Edition, 2010*



(ก) อุปกรณ์เสริมช่วยตัดแบบพกพา
ที่มา : Anhui Gusheng, 2018



(ข) เครื่องตัดแบบอัตโนมัติ (CNC)
ที่มา : Micro Step, 2014



(ค) เครื่องตัดแบบอัตโนมัติด้วยหุ่นยนต์ (Robotic plasma cutting)
ที่มา : Industrial Robotics – Robotmaster , 2021

รูปที่ 2.35 อุปกรณ์เสริมช่วยในการควบคุมตัดพลาสมาแทนคน (Automatic cutting control)

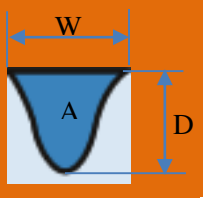
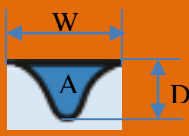
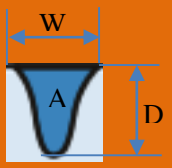
3. การตัดเซาะร่องด้วยพลาสมา (Plasma arc gouging)

ARCAIR–ESAB (2018) ได้กล่าวถึงขบวนการตัดเซาะร่องด้วยพลาสมาว่า เป็นการประยุกต์ขบวนการอาร์กตัดด้วยแก๊สพลาสมาที่ไม่ได้ต้องการตัดโลหะให้ขาดออกจากกัน แต่ต้องการตัดเนื้อโลหะออกเพื่อสร้างร่องลึกที่เป็นรูปตัวยู (U) หรือขจัดเนื้อโลหะออกจากข้อบกพร่องที่เกิดอยู่บนแนวเชื่อมออกไป หรือเพื่อการตกแต่งซ่อมแซมผิวโลหะ เราเรียกกลุ่มงานที่ใช้แก๊สพลาสมานี้ว่า “การตัดเซาะร่องด้วยพลาสมา (Plasma gouging)” แก๊สพลาสมาสำหรับการเซาะร่องมีความหนาแน่นของพลาสมาไม่ต้องสูงมาก หัวตัดเซาะจะออกแบบให้มีรูที่กว้างกว่าเพื่อที่จะทำให้ความเร็วของแก๊สพลาสมาลดลง แก๊สพลาสมาที่นิยมใช้กันเป็นแก๊สอาร์กอนผสมกับไฮโดรเจน 35–40% อาจเป็นถังสำเร็จหรือผ่านอุปกรณ์ผสมแก๊ส สำหรับงานเซาะร่องที่ตื้นอาจเลือกใช้แก๊สฮีเลียมก็ได้ ส่วนแก๊สสำหรับหล่อเย็น (Cooling

gas) สามารถใช้แก๊สอาร์กอน แก๊สไนโตรเจน หรืออากาศธรรมดาก็ได้ วิธีการตัดเชาะร่องมุมของหัวตัดจะต้องเอียงทำมุมอย่างน้อย 30° กับชิ้นงานตอนเริ่มต้น จากนั้นปรับเอียงตามความเหมะสมซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วตัด ความเร็วของการตัดสูงร่องเชาะจะตื้นและตรงกันข้ามร่องเชาะจะลึกเมื่อความเร็วช้า ขบวนการตัดเชาะร่องด้วยแก๊สพลาสมานี้สามารถใช้ได้กับโลหะทุกชนิด แต่จะเหมาะกับโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมและโลหะอลูมิเนียม ซึ่งจะได้ร่องตัดเชาะที่มีคุณภาพดีมาก ดังตัวอย่างแสดงปัจจัยของการตัดเชาะร่องที่ขนาดของร่องตัดต่างกัน ของผลความกว้าง (Width) ความลึก (Depth) และพื้นที่ของร่องเชาะ (Area) ดังแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ปัจจัยที่เหมาะสมของการตัดเชาะร่องด้วยพลาสมา

ที่มา : The Fabricator–Gouging plasma process, 2004

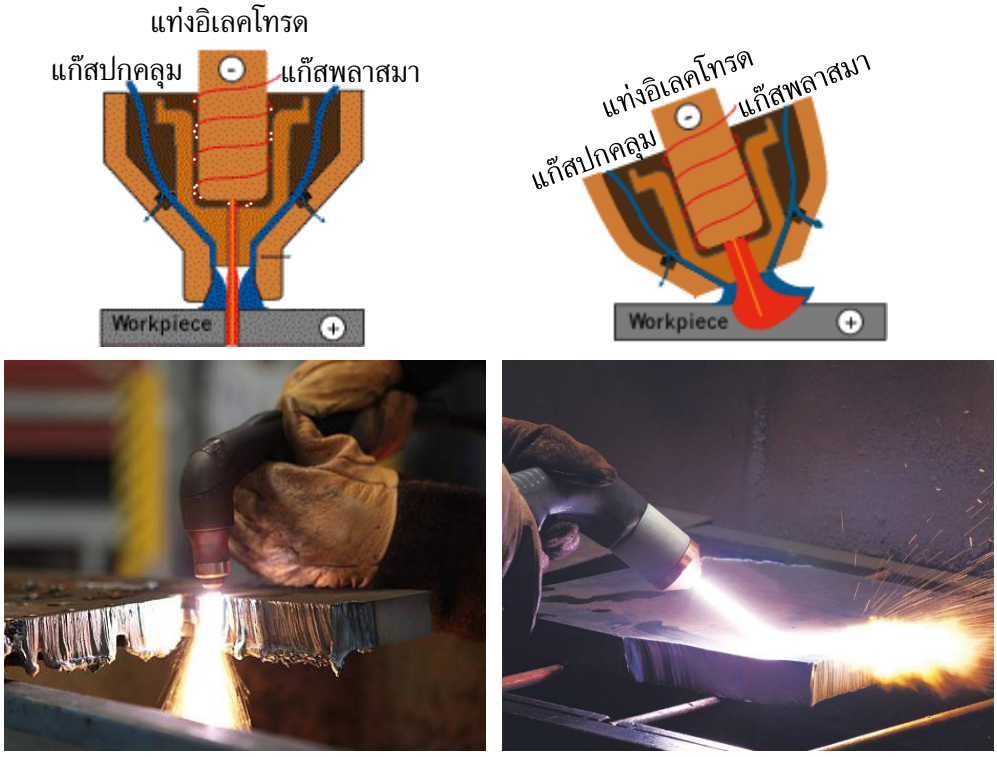
ปัจจัยการตัดแบบเชาะร่อง (Gouge profile)			
ความเร็วตัด (IPM)	24	48	24
มุมหัวตัดเชาะ (°)	45	45	60
ระยะห่างหัวตัด–ชิ้นงาน (in)	0.125	0.125	0.125
แรงดันแก๊ส (PSI)	50	50	50
ความกว้างร่องตัด (in)	0.300	0.260	0.210
ความลึกร่องตัด (in)	0.248	0.131	0.216
พื้นที่ร่องตัด (in^2)	0.040	0.015	0.022
ปริมาณเนื้อโลหะที่ตัด (in^3/hr)	57.6	43.2	31.8

มุมของหัวตัดเชาะร่องด้วยแก๊สพลาสมา (Torch angle) จะแตกต่างกันกับมุมของหัวตัดพลาสมา กล่าวคือ มุมเชาะร่องต้องปรับตั้งมุมของหัวตัดให้เอียง เพราะเป็นการเป่าเศษน้ำโลหะเหลวให้กระจายออกไปด้านข้างจนเกิดร่องลึก ส่วนหัวสำหรับตัดจะวางตรงตั้งฉากกับชิ้นงาน ซึ่งเป่าน้ำโลหะทะลุผ่านลงไปด้านล่าง ดังแสดงเปรียบเทียบการวางมุมของหัวตัดของทั้งสองแบบในรูปที่ 2.36 การปรับมุมของหัวเชาะร่องสามารถปรับได้ทั้งในแนวแกน X แนวแกน Y และ แนวแกน Z ซึ่งส่งทำให้ขนาดของร่องที่เชาะได้มีรูปทรงแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.37 อ้างอิงจาก CANADIAN Fabricating & Welding (2021)

หัวตัดเชาะร่องด้วยแก๊สพลาสมา (Gouging torch) คือ หัวตัดแก๊สพลาสมาที่ใช้ร่วมกัน แต่ต้องมีการเปลี่ยนหัวทิป (Tip) ที่ออกแบบมาสำหรับการเชาะร่อง โดยหัวทิปได้มีการออกแบบไว้ โดยรูของหัว

ทิปจะมีขนาดที่โตกว่ารูของหัวทิปสำหรับการตัด เพราะต้องการความเข้มหรือความหนาแน่นของแก๊สพลาสมาที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ ปลายของหัวตัดจะมีฝาครอบป้องกันความเสียของหัวทิป (Tip) เรียกว่า Shield cap body จะช่วยทำให้หัวทิปมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

ร่องที่ผ่านการเซาะด้วยแก๊สพลาสมาจะราบเรียบและสมบูรณ์ดีถ้าได้ทำการเลือกใช้ปัจจัยการเซาะที่ถูกต้องและเหมาะสม ทั้งมุมตัดเซาะ ความเร็วตัดเซาะ กระแสไฟฟ้าสำหรับอาร์ก ชนิดของแก๊สพลาสมา และระยะห่างของหัวตัดกับชิ้นงาน เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างผิวของร่องเซาะโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน ในรูปที่ 2.38



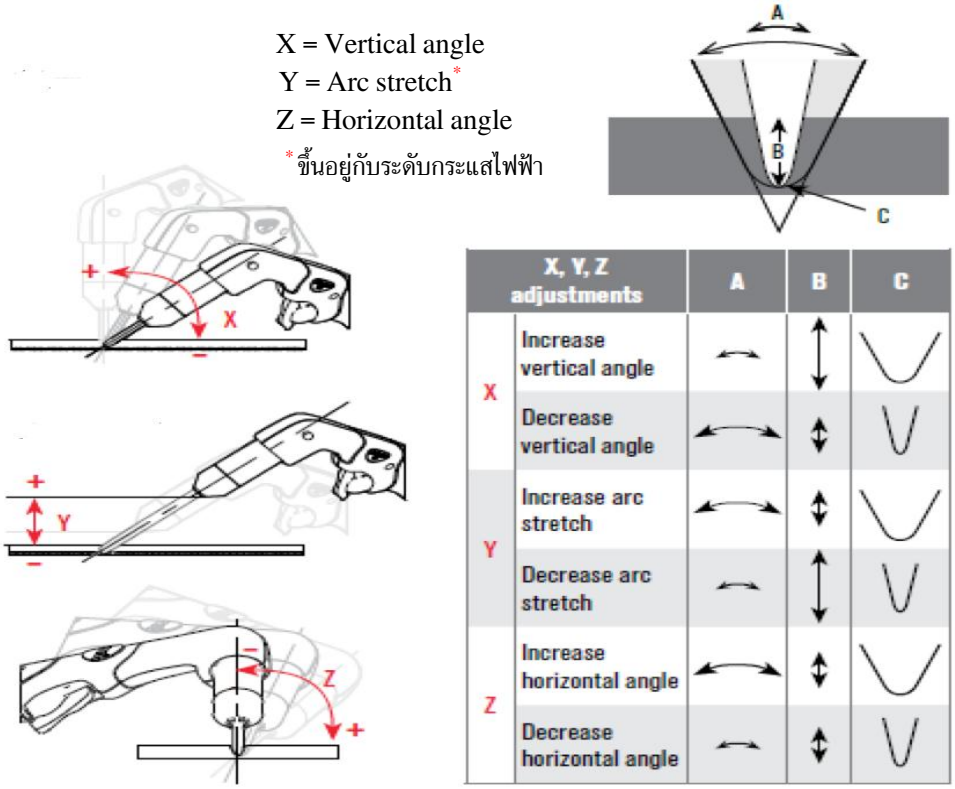
(ก) มุมตัดด้วยแก๊สพลาสมา (Cutting) (ข) มุมเซาะร่องด้วยแก๊สพลาสมา (Gouging)

รูปที่ 2.36 การปรับตั้งมุมของหัวตัดและหัวเซาะร่องด้วยแก๊สพลาสมา

ที่มา : CANADIAN Fabricating & Welding , Update March 23, 2021

ความปลอดภัยของการตัดเซาะร่องด้วยแก๊สพลาสมา ต้องระมัดระวังเหมือนกับขบวนการตัดและขบวนการเชื่อมอื่น ๆ ซึ่งมีทั้งมลพิษทางแสง ทางเสียง ทางความร้อน ควัน และทางด้านรังสีต่าง ๆ ผู้ปฏิบัติงานต้องเตรียมอุปกรณ์ป้องกันอันตรายให้พร้อม เพราะระดับเสียงที่เกิดจากการพุ่งออกมาของแก๊สพลาสมาดังมากถึง 110 dBA ที่ระดับ 400 A ระดับความถี่อยู่ที่ 5,000–20,000 Hz ซึ่งอยู่ในระดับที่อันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน การลดระดับความดังของเสียงนิยมใช้ระบบพ่นน้ำปกคลุม (Water shrouded)

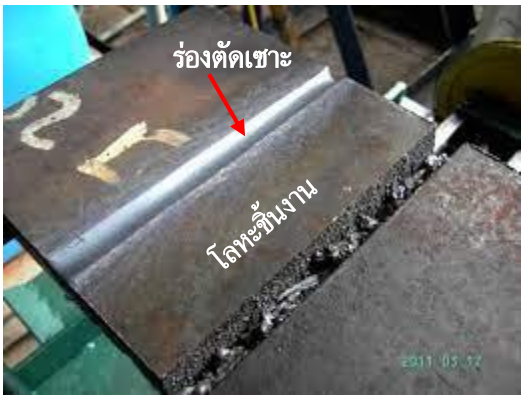
นอกจากนี้ ยังต้องระมัดระวังเรื่องของแก๊สที่มีแรงดันเพราะการเซาะร่องมีการกระจัดกระจายของประกายไฟ ที่อาจก่อให้เกิดการลุกไหม้ได้ หรือเกิดการระเบิดของถังแก๊สได้ รวมถึงต้องคอยตรวจสอบระบบน้ำหล่อเย็นของหัวตัดอยู่เสมอ ๆ ส่วนอันตรายจากแรงดันไฟฟ้าก็ต้องระมัดระวังเพราะมีแรงดันสูงถึง 150–400 VDC เป็นข้อควรระวังที่กล่าวไว้ใน Plams Tech. (2017)



X, Y, Z adjustments		A	B	C
X	Increase vertical angle			
	Decrease vertical angle			
Y	Increase arc stretch			
	Decrease arc stretch			
Z	Increase horizontal angle			
	Decrease horizontal angle			

รูปที่ 2.37 การปรับตั้งมุมของหัวตัดและหัวเซาะร่องด้วยแก๊สพลาสมา

ที่มา : HYPERTHERM –Plasma Cutting Gouging Techniques, 2016

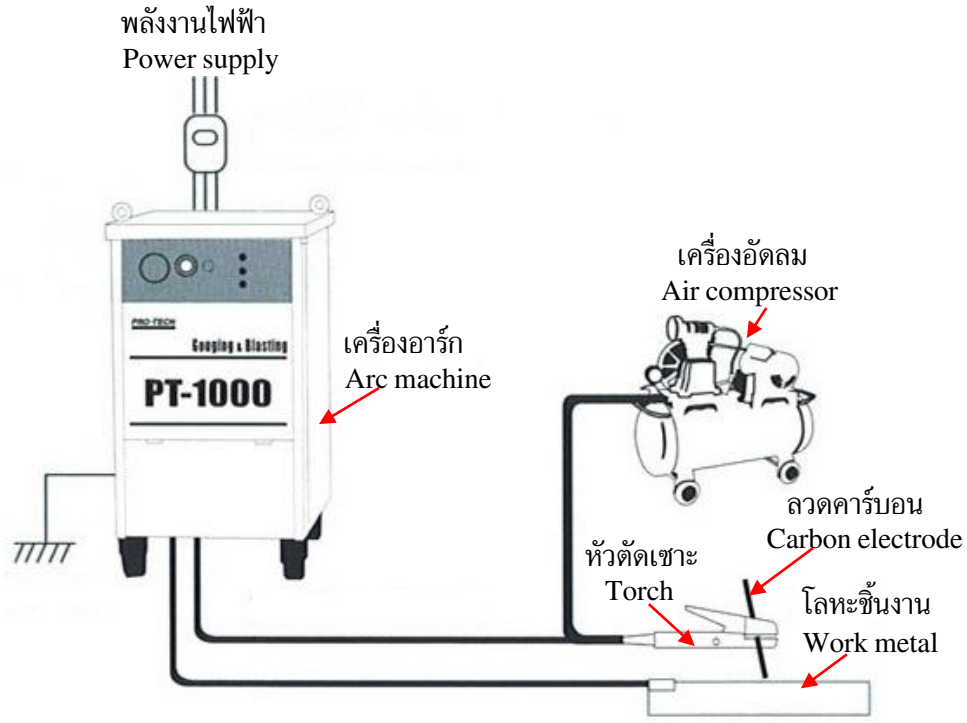


รูปที่ 2.38 การปรับตั้งมุมของหัวตัดและหัวเซาะร่องด้วยแก๊สพลาสมา

ที่มา : Plasma flash remove gouging, 17–03–2011

2.3 ขบวนการตัดและเซาะร่องด้วยอากาศ–คาร์บอนอาร์ก (Carbon arc–air cutting and gouging)

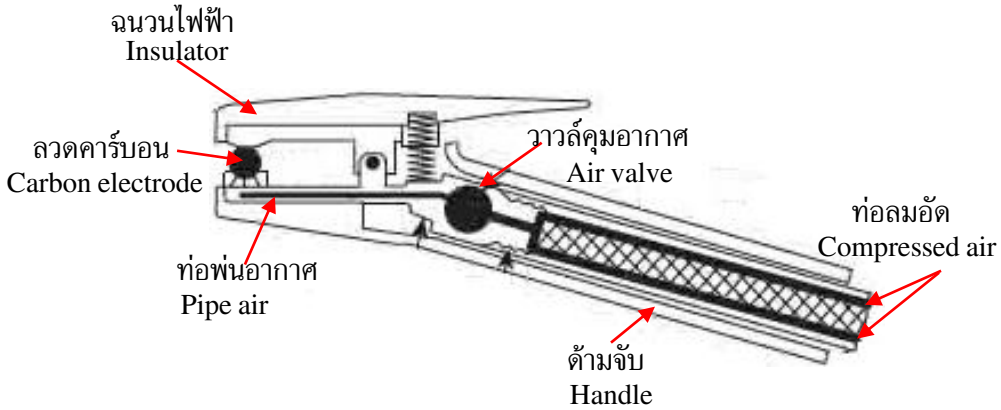
ARCAIR (2010) ได้อธิบายถึงหลักของขบวนการอาร์กไฟฟ้าด้วยแท่งลวดคาร์บอน (Carbon electrode) ร่วมกับการเป่าด้วยอากาศ (Air pressure) นี้ว่าเป็นขบวนการที่อาศัยหลักการอาร์กของกระแสไฟฟ้าได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรง (DC) และไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เพื่อต้องการให้เกิดความร้อนและหลอมละลาย จากนั้นปล่อยแรงดันอากาศ (Air jet) ออกมาเป่าหรือขจัดน้ำโลหะที่หลอมละลายของชิ้นงานออกไปจากบริเวณที่เกิดการอาร์ก โดยองค์ประกอบและระบบการทำงานของขบวนการนี้ดังแสดงในรูปที่ 2.39 ขบวนการอาร์กด้วยแท่งลวดคาร์บอนนี้สามารถใช้ได้ทั้งการอาร์กตัด (Cutting arc) และการอาร์กเซาะร่อง (Gouging arc) ซึ่งทั้งสองลักษณะงานใช้องค์ประกอบชุดเดียวกันทั้งหมด ต่างกันเพียงการวางมุมของหัวตัด ถ้าวางมุมหัวตัดตั้งฉากกับชิ้นงานเมื่อเป่าลมอัดออกมาน้ำโลหะจะพุ่งทะลุลงสู่ด้านล่างทำให้โลหะชิ้นงานขาดออกจากกัน ถ้าวางหัวตัดมุมเอียงเมื่อเป่าลมอัดออกมาน้ำโลหะจะถูกขจัดออกไปด้านหน้าของทิศทางการตัด ทำให้ผิวโลหะชิ้นงานเกิดเป็นร่องลึกที่เรียกว่า ร่องเซาะ (Gouging) แต่ส่วนใหญ่ขบวนการอาร์กด้วยลวดคาร์บอนนิยมใช้สำหรับการเซาะร่องผิวชิ้นงาน ที่ต้องการสร้างร่อง หรือการเตรียมซ่อมแซมแนวเชื่อม เป็นต้น ดังนั้น ในขบวนการนี้เน้นความรู้ความเข้าใจในการประยุกต์ใช้เพื่อการเซาะร่องเป็นสำคัญ



รูปที่ 2.39 องค์ประกอบและระบบของการอาร์กด้วยลวดคาร์บอนและอากาศอัด

ที่มา : Trade KOREA–Air carbon arc gouging, 2014

1. หัวตัดเซาะร่อง (Gouging torch) : เป็นอุปกรณ์ที่ใช้จับลวดคาร์บอนเพื่อการอาร์ก ลักษณะรูปทรงคล้ายกับหัวเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์ แตกต่างกันที่ภายในของหัวตัดเซาะร่องจะมีท่อลมอัดที่ด้ามจับและท่อพ่นลมอยู่ที่ปลายของหัวตัด ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 2.40 การใช้งานค่อนข้างง่ายโดยการนำเอาลวดคาร์บอนไปจับกับหัวตัดที่ตำแหน่งปากจับ แล้วนำไปจ่อที่ชิ้นงานที่ต้องการเซาะร่อง จากนั้นทำการอาร์ก ดังแสดงในรูปที่ 2.41 (ก) เมื่อน้ำโลหะเกิดการหลอมเหลวก็กดเปิดวาล์วแรงอัดอากาศให้ไหลพุ่งไปยังน้ำโลหะเหลว เศษน้ำโลหะทั้งหมดก็จะโดนขจัดออกไปจนเกิดเป็นร่องเซาะดังแสดงในรูปที่ 2.41 (ข) โดยผู้ปฏิบัติงานต้องจัดเตรียมพื้นที่ให้เหมาะสมเพราะขณะที่เป่าน้ำโลหะจะพุ่งกระจายออกไปไกล เพราะใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อการอาร์กถึง 600–2,000 A และแรงดันของอากาศสูงถึง 80–100 psi จะมีเสียงดังมาก



รูปที่ 2.40 ส่วนประกอบของหัวตัดเซาะร่องด้วยการอาร์กลวดคาร์บอน

ที่มา : Weld Guru–Air carbon arc gouging, 2019



(ก) เริ่มอาร์กลวดคาร์บอน (Arc electrode)



(ข) ปล่อยอากาศเป่าน้ำโลหะ (Arc compressed)

รูปที่ 2.41 การจับลวดคาร์บอนของหัวตัดเซาะร่องและการอาร์ก

ที่มา : Welding Productivity–Air carbon arc gouging, 2017

2. เครื่องตัดเซาะร่อง (Gouging machine) : เป็นอุปกรณ์แหล่งจ่ายพลังงาน บางครั้งเรียกว่า “ตู้เก๊าจ์” ทำหน้าที่คล้ายกับเครื่องเชื่อมทั่ว ๆ ไป โดยเครื่องจ่ายพลังงานในการเซาะร่องนี้จะนิยมใช้กับไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่ใช้กับคาร์บอนอิเลคโทรดขั้วบวก (DCEP) ซึ่งใช้งานได้เหมาะสมที่สุด แต่ถ้าจะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ต้องใช้กับคาร์บอนอิเลคโทรดพิเศษ เครื่องตัดเซาะที่ดีต้องสามารถจ่ายกระแสได้คงที่ เพราะถ้าปลายของแท่งลวดคาร์บอนสัมผัสกับชิ้นงานโดยไม่ได้ตั้งใจจะทำให้เกิดไฟกระชากสูง ส่งผลเสียหายต่อปลายของลวดคาร์บอน ซึ่งทำให้การอาร์กเกิดการหยุดชะงักและเกิดการสะสมของคาร์บอนที่ผิวชิ้นงาน เครื่องตัดเซาะร่องที่ดีมีคุณภาพต้องสามารถจ่ายพลังงานที่มีแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่า 60 V ซึ่งอ้างอิงข้อมูลจากผู้ผลิตเครื่องมือตัดเซาะร่อง ARCAIR–carbon arc gouging (2015) ดังแสดงตัวอย่างเครื่องตัดเซาะร่อง หัวตัดเซาะร่องและอุปกรณ์เสริมการตัดแบบอัตโนมัติ ในรูปที่ 2.42



(ก) เครื่องตัดเซาะร่อง (Gouging machine)
ที่มา : ARCAIR–carbon arc gouging, 2015



(ก) สายและหัวตัด (Torch & Cable)
ที่มา : ARCAIR–carbon arc gouging, 2015



(ค) อุปกรณ์เสริมการทำงาน (Accessories)
ที่มา : SYMEX Star–Trac II, 2016

รูปที่ 2.42 เครื่องตัดเซาะ หัวจับลวดคาร์บอน และอุปกรณ์เสริมการเซาะร่อง

3. ปัจจัยการตัดเซาะร่อง (Gouging parameter) : การกำหนดปัจจัยในการตัดเซาะร่องถือว่าเป็นองค์ประกอบหลักและสำคัญที่จะส่งผลต่อคุณภาพของการตัด ปัจจัยดังกล่าว ดังแสดงใน ตารางที่ 2.10 เช่น ความกว้างของร่องตัดเซาะจะถูกกำหนดโดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดอิเลคโทรด

ความลึกของร่องเชาะจะถูกกำหนดโดยความเร็วของการตัด มุมของหัวตัด และระยะห่างของหัวตัดกับชิ้นงาน มีข้อควรระวังเรื่องของมุมอิเลคโทรดต้องไม่สูงเกินไปเพราะมีผลกระทบต่อการปนเปื้อนของคาร์บอนในร่องตัดเชาะได้ง่าย อย่างไรก็ตาม การส่ายหัวตัดเชาะก็สามารถเพิ่มความกว้างของร่องเชาะได้ สำหรับกรณีที่ต้องการขจัดบางอย่างออกจากผิวชิ้นงาน เช่น เนื้อโลหะเชื่อมที่ไม่พึงประสงค์หรือขยายตำแหน่งข้อบกพร่องให้กว้างขึ้น แต่มีข้อกำหนดของการส่ายต้องไม่เกิน 4 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดคาร์บอนอิเลคโทรด ซึ่งเป็นคำแนะนำของ GYS Invest in the future (2017)

ตารางที่ 2.10 ปัจจัยที่เหมาะสมของการตัดเชาะร่องด้วยการอาร์กลวดคาร์บอน

ที่มา : Thermal Mechanics–Welding Cutting Automation, 2017

ขนาด Ø อิเลคโทรด (mm)		กระแสไฟฟ้า DC อิเลคโทรด (A)	ขนาดของร่องเชาะ		อัตราการสิ้นเปลืองของคาร์บอนอิเลคโทรด (mm/min)	ความเร็วของการตัดเชาะ (mm/min)
			ความลึก (mm)	ความกว้าง (mm)		
การตัดเชาะด้วยกำลังคน	6.4	275	6–7	9.10	120	609
	8.0	350	7–8	10–11	114	711
	9.5	425	9–10	12–13	100	660
	13.0	550	12–13	18–19	76	508
การตัดเชาะด้วยเครื่องอัตโนมัติ	8.0	300–400	2.9	3–8	100	1,650–840
	9.5	500	3–12	3–10	142	1,650–635
	13.0	850	3–15	3–13	82	1,830–610
	16.0	1,250	3–19	3–16	63	1,830–710

• กระแสไฟฟ้าของการอาร์กเชาะร่อง (Gouging current) : การอาร์กตัดเชาะเป็นการอาร์กที่ต้องอาศัยกระแสไฟฟ้าที่กำลังสูงมากถึง 2,200 A สามารถใช้ได้ทั้งไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรง ส่วนใหญ่จะเป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรง การเลือกกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมกับขนาดของลวดอิเลคโทรดคาร์บอนเป็นสิ่งที่สำคัญ โดยขนาดของลวดคาร์บอนที่โตขึ้นต้องเลือกใช้ระดับกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นตามอ้างอิงคำแนะนำของผู้ผลิตลวดคาร์บอนในตารางที่ 2.11 โดยมีข้อแม้ว่าลวดต้องปราศจากความชื้นและควรผ่านการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิประมาณ 177 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

ตารางที่ 2.11 กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมกับขนาดของลวดคาร์บอนของการตัดเชาะร่อง

ที่มา : Thermal Mechanics–Welding Cutting Automation, 2017

ไฟฟ้ากระแสไฟตรง	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดอิเลคโทรดคาร์บอน : in (mm)								
	5/32(4)	3/15(4.7)	1/4(6.3)	5/16(8)	3/8(9.5)	1/2(12.7)	5/8(15.8)	3/4(19)	1(25.4)
กระแสไฟฟ้าต่ำสุด (A)	90	150	200	250	350	600	800	1,200	1,800
กระแสไฟฟ้าสูงสุด (A)	150	200	400	450	600	1,000	1,200	1,600	2,200

● มุมของลวดอาร์กเซาะร่อง (Gouging angle) : หมายถึงความเอียงของลวดอาร์กคาร์บอนที่อ้างอิงกับผิวของชิ้นงานตัดเซาะ ซึ่งในที่นี้จะหมายถึงท่าที่ทำการตัดเซาะ (Gouging position) ตำแหน่งท่าตัดเซาะจะเกิดมุมเอียงไม่เท่ากันซึ่งจะอยู่ในช่วงระหว่าง 30–70 องศา โดยมีข้อบังคับต้องให้ท่อลมที่ปลายของหัวตัดอยู่ใต้ลวดคาร์บอนเซาะร่องเสมอ และระยะโผล่ของลวดคาร์บอนจากหัวจับลวด (Stickout) ต้องห่างไม่เกิน 7 นิ้ว มิฉะนั้นแรงลมอาจไม่สามารถที่จะเป่าเอาเศษน้ำโลหะออกไปจากร่องเซาะได้หมด ซึ่งตำแหน่งท่าตัดเซาะร่องที่ใช้กัน มี 4 ท่า ซึ่งอ้างอิงจากข้อมูลของVICTOR –Air carbon arc guide (2013) ดังแสดงในรูปที่ 2.43 โดยมีรายละเอียดของแต่ละตำแหน่งท่าตัดเซาะ ดังต่อไปนี้

1. ท่าตัดเซาะร่องในแนวระดับ (Flat position) : การตัดเซาะท่านี้เป็นตำแหน่งท่าที่ง่ายและได้ผลดีมากที่สุด ควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวตัดอาร์กได้ง่าย โดยท่านี้เมื่อเริ่มต้นอาร์กได้แล้วต้องรักษาระยะอาร์กให้สั้นที่สุดเพื่อให้อัตราการหลอมละลายของชิ้นงานเป็นไปอย่างต่อเนื่อง หากรักษาการอาร์กได้ดีต่อเนื่องแนวตัดเซาะที่ได้จะราบเรียบและสวยงาม

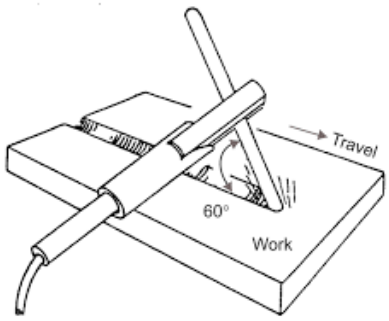
2. ท่าตัดเซาะร่องในแนวตั้ง (Vertical position) : การตัดเซาะท่านี้ไม่มีปัญหาเรื่องของแรงดันอากาศเป่าน้ำโลหะออก เพราะแนวการตัดเซาะเป็นทิศทางแนวลง น้ำโลหะจะถูกเป่าออกได้ง่ายขึ้นเพราะมีแรงโน้มถ่วงช่วยในการขจัด

3. ท่าตัดเซาะร่องในแนวขนานนอน (Horizontal position) : การตัดเซาะในตำแหน่งท่านี้คล้ายกับตำแหน่งท่าแนวระดับ แต่ต้องควบคุมให้แนวลมเป่าลงมาที่ชิ้นงานนั้นอยู่ใต้ลวดเซาะร่องเสมอ การเดินหัวตัดเซาะของท่านี้สามารถเดินไปได้ทั้งด้านซ้ายและด้านขวา

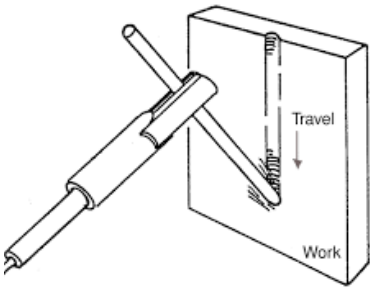
4. ท่าตัดเซาะร่องในแนวเหนือศีรษะ (Overhead position) : การตัดเซาะในตำแหน่งท่านี้ต้องจับลวดคาร์บอนที่เกือบจะขนานกับหัวตัด โดยพยายามจับหัวตัดให้อยู่ในตำแหน่งที่เอียงมากเพียงพอที่สามารถหลบน้ำโลหะที่เป่าออกมาโดนผู้ปฏิบัติงาน

ตำแหน่งท่าตัดเซาะที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าในบางครั้งก็เกิดปัญหาที่เกิดจากความผิดพลาดบางประการที่พบบ่อย พอจะสรุปเป็นตารางได้ ดังนี้ และตัวอย่างของแนวเซาะร่องดังแสดงในรูปที่ 2.44

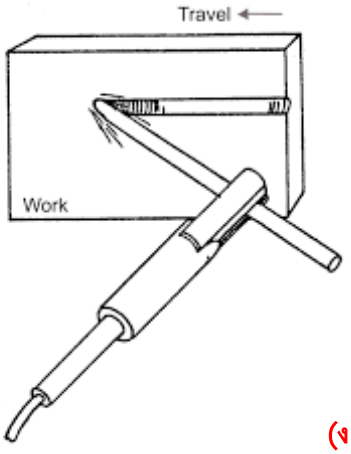
ปัญหา	สาเหตุและแนวทางแก้ไข
• อาร์กไม่สม่ำเสมอเซาะร่องได้ช้าและตื้น	• กระแสต่ำเกินไปหรือขนาดลวดใหญ่เกินไป
• ร่องเซาะเบี่ยงเบนและลวดคาร์บอนร้อนเร็วเกินไป	• ต่อสายผิดขั้ว ต้องต่อให้ลวดคาร์บอนเป็นขั้วบวก
• อาร์กไม่ต่อเนื่องทำให้ร่องเซาะไม่เรียบ	• ความเร็วตัดเซาะต่ำเกินไปหรือระยะห่างของหัวตัดกับชิ้นงานมากเกินไป
• มีเศษน้ำโลหะติดอยู่ตามขอบของร่องเซาะ	• ลมที่ใช้เป่ามีแรงดันไม่เพียงพอ หรือขนาดของสายลมมีขนาดที่เล็กเกินไป



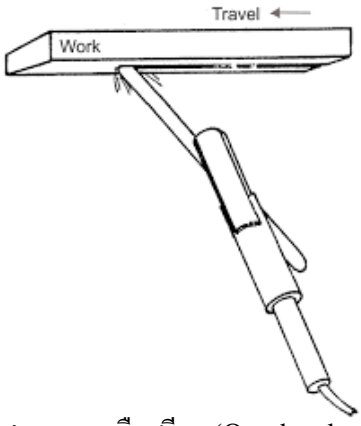
(ก) ท่าตัดเซาะแนวราบ (Flat position)



(ข) ท่าตัดเซาะแนวตั้ง (Vertical position)



(ค) ท่าตัดเซาะแนวขนานนอน (Horizontal position)



(ง) ท่าตัดเซาะแนวเหนือศีรษะ (Overhead position)

รูปที่ 2.43 ตำแหน่งท่าตัดเซาะด้วยอากาศ–ลวดคาร์บอนอาร์ก

ที่มา : VICTOR –Air carbon arc guide, 2013



(ก) แนวตัดเซาะร่องที่ราบเรียบสมบูรณ์



(ข) แนวตัดเซาะร่องที่ผิวขรุขระไม่สม่ำเสมอ

รูปที่ 2.44 ตัวอย่างแนวตัดเซาะด้วยอากาศ–ลวดคาร์บอนอาร์ก

ที่มา : STORM TORCH –Division of Flame Technologies, Inc., 2010

2.4 ขบวนการตัดด้วยลำแสงเลเซอร์ (Laser beam cutting : LBC)

ลำแสงเลเซอร์ (Laser beam) เป็นคำที่บุคคลในกลุ่มวิศวกรรมการเชื่อมได้ยินอยู่บ่อย ๆ ที่อยู่ในกรรมวิธีการเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์ (Laser welding) โดย BOC –Laser cutting line technical (2008) ได้กล่าวถึงคำว่า “LASER” นี้ไว้ว่าเป็นคำย่อมาจาก Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation ที่หมายถึง ขบวนการที่กระตุ้นให้รังสีมีการแผ่ออกไปโดยมีทิศทางในการแผ่ที่แน่นอน และทำให้เกิดการรวมแสงเป็นลำที่มีความเข้มข้นเมื่อวงอิเลคตรอนเคลื่อนที่และถูกเหนี่ยวนำสุดท้ายจะได้ออกมาเป็นคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นที่สามารถสร้างพลังงานความร้อนได้สูงมากในเวลาอันสั้น จากสมบัติที่โดดเด่นในด้านนี้ของลำแสงเลเซอร์จึงนำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ ทางการทหาร และอุตสาหกรรมการเชื่อมโลหะ จนในปัจจุบันได้นำมาประยุกต์ใช้กับขบวนการตัดวัสดุทุกชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะวัสดุประเภทโลหะ

หลักการตัดโลหะด้วยลำแสงเลเซอร์ (LBC) เป็นขบวนการตัดวัสดุโลหะได้ดีและมีคุณภาพสูง รวดเร็ว เหมาะกับงานมีรูปร่างที่สลับซับซ้อน โดยหัวตัดจะปล่อยแสงเลเซอร์ที่มีความร้อนและความเข้มสูงไปบนชิ้นงานจนเกิดการหลอมละลาย จากนั้นก็เป่าน้ำโลหะเหลวออกไปชิ้นงานก็จะขาดออกจากกัน โดยระบบของการตัดด้วยลำแสงเลเซอร์ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.45 คือ

1. แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ (Laser resonator) หน้าที่ผลิตแสงเลเซอร์ที่มีพลังงานสูง มีช่วงความถี่ของคลื่นที่แคบและมีความเข้มสูง วิธีการผลิตแสงเลเซอร์อาศัยหลักการที่ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สฮีเลียม (He) และแก๊สไนโตรเจน (N_2) แล้วปล่อยให้ไหลผ่านเข้าไปในแท่งกระบอกพร้อม ๆ กัน ตามด้วยการกระตุ้นแก๊สด้วยพลังงานไฟฟ้าจนเกิดเป็นพลังงานแสงเลเซอร์ที่ปล่อยออกมา จากนั้นส่งต่อแสงเลเซอร์ไปยังหัวตัดต่อไป

การผลิตแสงเลเซอร์สามารถแยกได้ตามสารกำเนิด ปัจจุบันมี 3 ชนิด คือ

1. CO_2 Laser : แสงเลเซอร์ชนิดนี้เหมาะกับงานตัด งานสลัก งานคว้าน และงานเชื่อม

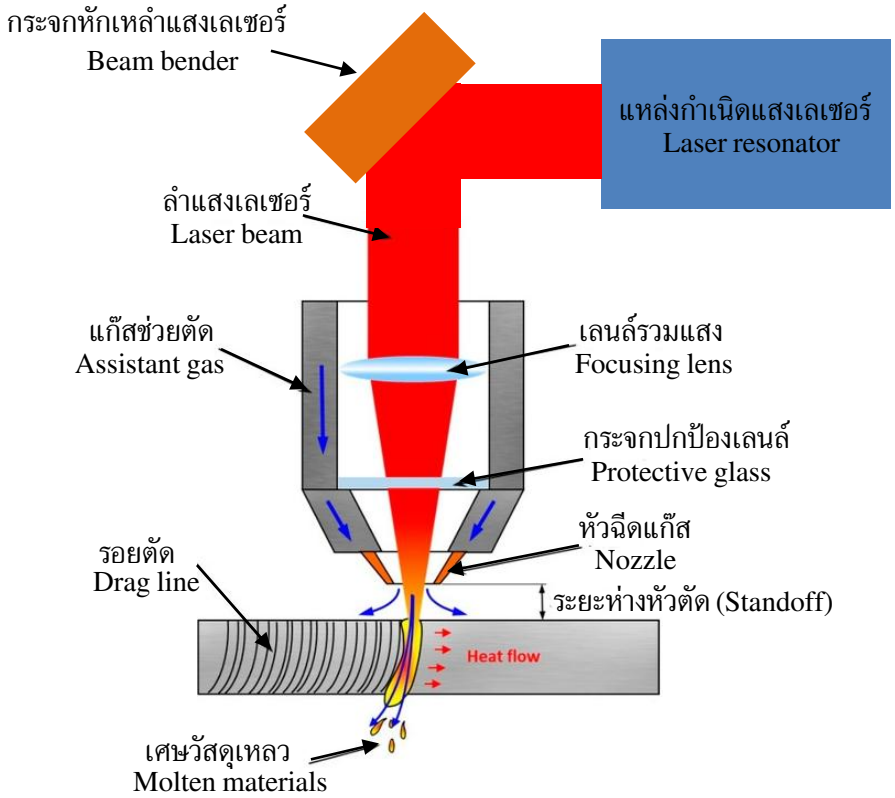
2. Neodynium Laser : แสงเลเซอร์ชนิดนี้เหมาะกับการนำไปใช้ในงานเชื่อม งานคว้าน ซึ่งต้องใช้พลังงานที่สูง

3. Yttrium−Aluminium Garnet (YAG) Laser : แสงเลเซอร์ชนิดนี้เหมาะกับการนำไปใช้ในงานเชื่อม งานคว้าน และงานตัดซึ่งต้องใช้พลังงานที่สูง

2. หัวตัดเลเซอร์ (Laser cutting torch) ภายในของหัวตัดมีส่วนประกอบสำคัญ ที่ทำหน้าที่ในการบีบรวมแสงเลเซอร์ให้เป็นลำที่เล็กลงหรือแคบลงด้วยอุปกรณ์เลนส์รวมแสง (Focusing lens) หรือจะเรียกว่า การกำหนดช่วงของความยาวคลื่นเฉพาะ เพื่อที่จะเพิ่มความหนาแน่นและเข้มข้นของลำแสงเลเซอร์ เพราะจะส่งผลทำให้เกิดพลังงานความร้อนที่สูงและรวดเร็วเมื่อลำแสงตกกระทบลงบนผิวของชิ้นงาน (ลำแสงเลเซอร์ที่เล็กมากจะได้พลังงานความร้อนที่สูงมาก) นอกจากนี้ ภายในหัวตัดยังมีช่องระบบแก๊สช่วยในการตัด (Assistant gas) ซึ่งเป็นแก๊สที่มีแรงดันต่ำมีไว้เพียงทำหน้าที่ในการเป่าดันเศษน้ำโลหะที่หลอมละลายออกไปจากร่องตัด

หัวตัดเลเซอร์ที่ใช้งานกันมี 2 แบบ คือ แบบที่ใช้ตัดด้วยมือคน ดังแสดงในรูปที่ 2.46 (ก) ซึ่งใช้กับการตัดงานที่ไม่หนามากนัก หรืองานตัดที่จำนวนไม่มากโดยควบคุมการตัดด้วยมือ ส่วนอีกแบบจะเป็นหัวตัดที่ใช้กับแขนกลหุ่นยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.46 (ข) จะเป็นหัวตัดที่มีขนาดใหญ่มีน้ำหนักมาก ออกแบบมาให้รองรับกับหัวจับของแขนกล ประสิทธิภาพในการตัดสูงเหมาะกับงานระบบอุตสาหกรรมที่ตัดในปริมาณที่มากและต่อเนื่อง สามารถตัดงานที่หนามาก ๆ ได้ดี ดังแสดงตัวอย่างรูปแบบของขบวนการตัดโลหะแผ่นบางกับโลหะแผ่นหนาในรูปที่ 2.47 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

Catherine Wandera (2020) ได้เขียนบทความการตัดด้วยลำแสงเลเซอร์ว่ามีข้อดีที่สามารถตัดชิ้นงานรูปทรงที่ซับซ้อนได้ดี และเป็นที่นิยมเพราะสามารถนำหัวตัดไปใช้กับระบบควบคุมการเคลื่อนที่ตัดด้วยคอมพิวเตอร์ CAD/CAM โดยสั่งการผ่านระบบบนเครื่องจักรกลอัตโนมัติ CNC ซึ่งมีประสิทธิภาพของการตัดที่สูงมาก มีความแม่นยำและรวดเร็ว ปัจจุบันพบเห็นมากในงานตัดภาคอุตสาหกรรมการผลิต แต่มีข้อจำกัดของการตัดด้วยแสงเลเซอร์สำหรับชิ้นงานที่มีผิวมันวาว เพราะเกิดการสะท้อนของแสงเลเซอร์ ดังนั้น ต้องขจัดความมันวาวออกไปด้วยการพ่นผิวด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น พ่นทรายหรือพ่นเคลือบ



รูปที่ 2.45 หลักการทำงานและองค์ประกอบของหัวตัดด้วยลำแสงเลเซอร์

ที่มา : Silvio Genna et. al. MDPI : Applied Sciences, , 10,4956, 2020



(ก) หัวตัดเลเซอร์สำหรับคนตัด

ที่มา : TRIUMPH–Handheld Laser Welder, 2019



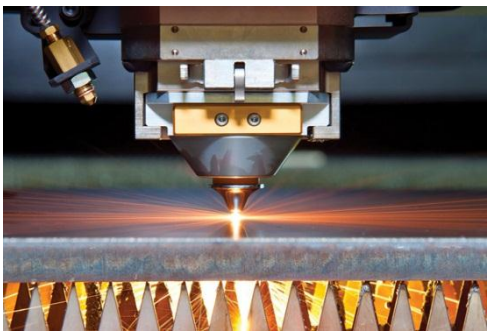
(ข) หัวตัดเลเซอร์สำหรับแขนกลตัด

ที่มา : WSX–Laser Cutting head, 2018

รูปที่ 2.46 ชนิดของหัวตัดด้วยลำแสงเลเซอร์



(ก) การตัดด้วยเลเซอร์โลหะแผ่นบาง



(ข) การตัดด้วยเลเซอร์โลหะแผ่นหนา

รูปที่ 2.47 ตัวอย่างรูปแบบการตัดโลหะแผ่นบางกับแผ่นหนาด้วยลำแสงเลเซอร์

ที่มา : The Fabricator : Perfecting the fiber laser cut edge, 2019

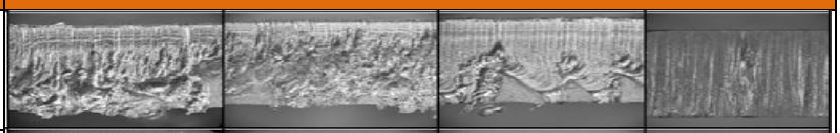
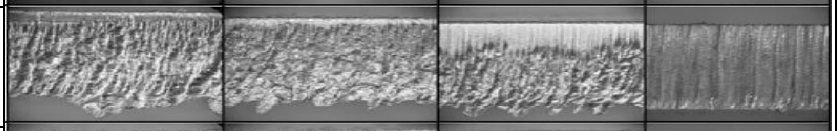
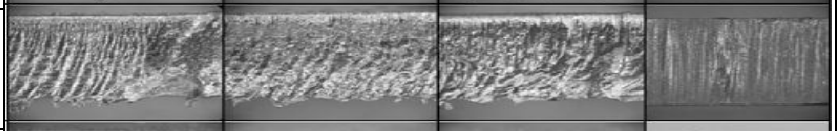
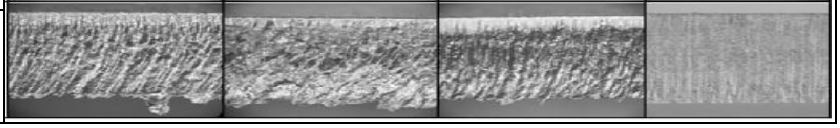
3. ปัจจัยการตัดด้วยลำแสงเลเซอร์ (Parameter of laser cutting) Cristina Anghel et al. (2020) ได้รวบรวมงานวิจัยและได้สรุปถึงคุณภาพของรอยตัดจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่กำหนด (Setting) ซึ่งปัจจัยของการตัดด้วยแสงเลเซอร์นั้นประกอบขึ้น ดังนี้

- พลังงานของแสงเลเซอร์ (laser power) มีหน่วยเป็นวัตต์ (W)
- ความเร็วในการตัด (Cutting speed) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)
- แรงดันแก๊สช่วยตัด (Pressure gas assisted) หน่วยเป็นเมกะปาสคาล (MPa)
- โหมดที่ใช้ตัด (Cutting mode) เช่น โหมดคลื่นที่ต่อเนื่อง (Continuous wave)
- ชนิดของแก๊สช่วยตัด (Type of assisted gas) เช่น แก๊สออกซิเจน อาร์กอน ไนโตรเจน
- ขนาดของหัวฉีดแก๊ส (Nozzle diameter) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)
- ระยะห่างของเลนส์รวมแสง (Focal distance) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)
- ระยะห่างของหัวตัดกับชิ้นงาน (Standoff) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

โดยปัจจัยเหล่านี้จะถูกปรับไปตามการเปลี่ยนแปลงของวัสดุที่ทำการตัด หรือเงื่อนไขอื่น ๆ ตามความเหมาะสม ดังตัวอย่างการทดลองตัดโลหะอลูมิเนียมที่ใช้พลังงานแสงเลเซอร์ต่างกัน (Laser power) และใช้แก๊สช่วยตัดต่างกัน (Assisted gas) ได้ผลของคุณภาพรอยตัดดังแสดงในตารางที่ 2.12 ซึ่งมีความชัดเจนว่าปัจจัยที่ใช้ในการตัดที่ต่างกันจะส่งผลต่อคุณภาพของรอยตัดและในตารางที่ 2.13 เป็นการแนะนำความเหมาะสมของปัจจัยการตัดด้วยแสงเลเซอร์ของผู้ผลิตเครื่องตัดด้วยแสงเลเซอร์แบบอัตโนมัติ (WUHAN Golden Laser) ในรูปที่ 2.48

ตารางที่ 2.12 ปัจจัยของการตัดมีผลกระทบต่อคุณภาพของรอยตัด

ที่มา : A. Riveiro et.al.,Physics Procedia, Vol.12,548–554, 2011

พลังงานแสงเลเซอร์ (Laser power)	ชนิดของแก๊สช่วยตัด (Assisted gas)			
	อากาศ	ออกซิเจน	ไนโตรเจน	อาร์กอน
1,000 W				
1,500 W				
2,500 W				
3,000 W				



รูปที่ 2.48 เครื่องตัดด้วยลำแสงเลเซอร์แบบอัตโนมัติ (Laser cutting machine)

ที่มา : Wuhan Golden Laser, 2020

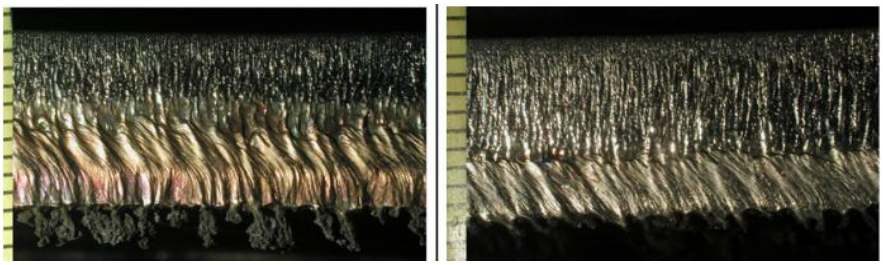
ตารางที่ 2.13 ความเหมาะสมของปัจจัยของการตัดด้วยแสงเลเซอร์

ที่มา : Wuhan Golden Laser– Capacities, 2020

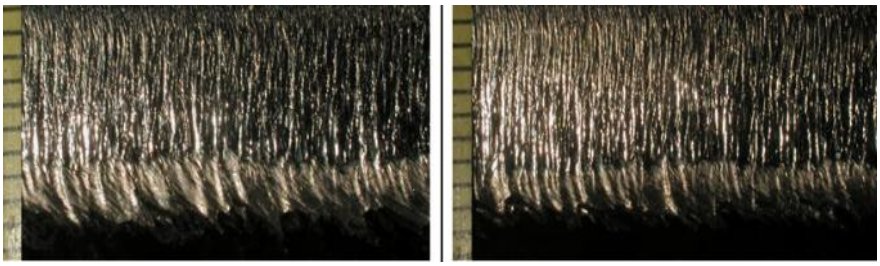
วัสดุโลหะ	700w	1000w	1500w	2000w	2500w	3000w	4000w	6000w
เหล็กกล้าคาร์บอน	8–10mm	10–12mm	12–14mm	14–16mm	18–20mm	20–22mm	20–25mm	22–25mm
เหล็กกล้าไร้สนิม	3–4mm	4–5mm	5–6mm	6–8mm	8–10mm	10–12mm	10–12mm	16–20mm
อลูมิเนียม	2–3mm	3–4mm	4–5mm	5–6mm	6–8mm	8–10mm	10–12mm	12–16mm
ทองเหลือง	2–3mm	3–4mm	4–5mm	5–6mm	6–8mm	8mm	10–12mm	12–14mm
ทองแดง	1–2mm	2–3mm	3–4mm	3–4mm	4–6mm	5–6mm	5–6mm	8–10mm
เหล็กเคลือบ	2–3mm	2–3mm	4–5mm	5–6mm	5–6mm	6–8mm	8–10mm	12–14mm

ความเรียบของรอยตัด (Surface roughness, Ra) เป็นสิ่งที่มีความสำคัญของขบวนการตัด ซึ่งความเรียบนี้อยู่กับปัจจัยของการตัดทั้งกำลังของแสงเลเซอร์ ความหนาของชิ้นงาน ชนิดของแก๊สช่วยตัด และแรงดันของแก๊สช่วยตัด ดังตัวอย่างงานวิจัยของ Catherine Wandera (2016) โดยทำการทดสอบหา

อิทธิพลของการใช้แรงดันแก๊สช่วยตัดต่างระดับต่างกันของการตัดโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สช่วยตัด ดังแสดงผลการทดลองสภาพความเรียบของรอยตัดในรูปที่ 2.49 พบว่าแรงดันแก๊สช่วยตัดที่สูงขึ้นจาก 4 บาร์ ถึง 16 บาร์ ความเรียบของผิวรอยตัดจะเพิ่มมากขึ้น มีคุณภาพผิวตัดสูงขึ้น ดังนั้น สรุปได้ว่าปัจจัยระดับแรงดันของแก๊สช่วยตัดมีอิทธิพลต่อการเพิ่มความเรียบของผิวตัด



4 บาร์ 8 บาร์



12 บาร์ 16 บาร์

รูปที่ 2.49 ผิวรอยตัดเหล็กกล้าไร้สนิมใช้แรงดันแก๊สช่วยตัดระดับต่างกัน (Assisted gas: N_2)

ที่มา : Catherine Wandera. Fiber Lasers in Material Processing, 2016.

นอกจากนี้ ปัจจัยการความเร็วในการตัดก็มีผลต่อผิวของรอยตัด กล่าวคือ ถ้าช้าเกินไปหรือเร็วเกินไปจะทำให้รอยตัดไม่สมบูรณ์ ดังตัวอย่างการทดลองตัดเหล็กกล้าคาร์บอนเปรียบเทียบที่ความเร็วตัด 0.4 เมตร/นาที 0.6เมตร/นาที และ 0.8เมตร/นาที ซึ่งสภาพผิวรอยตัดจะราบเรียบต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 2.50



0.4 เมตร/นาที 0.6 เมตร/นาที 0.8 เมตร/นาที

รูปที่ 2.50 ผิวรอยตัดเหล็กกล้าคาร์บอนใช้ความเร็วตัดที่ระดับต่างกัน

ที่มา : Catherine Wandera. Fiber Lasers in Material Processing, 2015

ดัชนีคำศัพท์บทที่ 2

Accessories torch cutting – อุปกรณ์เสริมช่วยควบคุมการตัดพลาสมา

Air compressor – ถังอัดลมป้อนสู่หัวตัดพลาสมา

Assistant gas – แก๊สช่วยตัดทำหน้าที่พ่นน้ำโลหะออกไปจากร่องตัด

Bevel angle – ขอบเอียงของร่องตัดพลาสมาขอบด้านบน

Bevel cut – รอยตัดเอียง

Carbon electrode – แท่งลวดคาร์บอนสำหรับการอาร์กเชาะร่อง

CNC plasma cutting – การตัดแก๊สพลาสมาควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์

CO_2 Laser– สำแสงเลเซอร์ที่ได้จากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

Conventional starting arc – การเริ่มต้นการอาร์กแบบหัวตัดสัมผัสชิ้นงาน

Cooling gas – แก๊สป้อนสำหรับหล่อเย็นหัวตัด

Cutting arc – การอาร์กเพื่อใช้ในการตัด

Cutting line – ตำแหน่งเส้นกำหนดตัด

Cutting process – ขบวนการตัดเนื้อโลหะ

Cutting surface – ผิวของรอยตัด

Distortion cutting – การบิดเบี้ยวจากการตัด

Drag – ลำของออกซิเจนที่ทะลุด้านล่างชิ้นงาน

Drag shield – ชิ้นส่วนปลายสุดของหัวตัดที่ใช้ป้องกันหัวตัดพลาสมา

Dross – เศษหรือขี้น้ำโลหะที่โดนเป่าออกมาจากร่องตัด

Dross buildup – รอยตัดที่มีเศษโลหะติดอยู่ตามขอบของร่องตัด

Dross formation – รูปแบบการพุ่งกระจายออกไปของเศษน้ำโลหะจากร่องตัด

Filter regulator – อุปกรณ์กรองอากาศที่จะใช้ผลิตแก๊สพลาสมา

Flame cutting – การตัดด้วยเปลวไฟ

Flame cutting hole – การตัดเพื่อใช้รู

Focusing lens – เลนส์รวม/บีบลำแสงเลเซอร์ให้เล็กแคบลง

Gouging arc – การอาร์กเพื่อใช้ในการเชาะร่อง

Gouging machine – เครื่อง/แหล่งพลังงานสำหรับการตัดเชาะร่อง

Gouging position – ตำแหน่งท่าตัดเชาะร่อง

Gouging torch – หัวแก๊สพลาสมาสำหรับเชาะร่อง

Gouging torch – หัวตัดสำหรับการเชาะร่อง

Hard cutting – การตัดด้วยมือคน

Hard slag – สแลกที่ติดแน่นกำจัดออกได้ยาก

Kerf – ร่องที่เกิดจากการตัด

Laser cutting machine – เครื่องตัดด้วยแสงเลเซอร์แบบอัตโนมัติ

Laser power – แหล่งกำลังหรือพลังงานของลำแสงเลเซอร์

Laser surface roughness – ความเรียบผิวของรอยตัดด้วยเลเซอร์

LBC – คำย่อของการตัดด้วยลำแสงเลเซอร์

Longer cuts – การตัดงานระยะตัดยาว

Machine cutting – การตัดด้วยเครื่องจักร

Manual plasma cutting – การตัดแก๊สพลาสมาควบคุมด้วยมือคน

Metal oxidized – การเกิดออกไซด์ในโลหะหลอมเหลว

Move cutting torch – การเคลื่อนหัวตัด

Non–thermal cutting – การตัดที่ไม่ต้องใช้ความร้อน

OCV – วงจรที่แรงดันหน้าเครื่องตัดต่ำมีความปลอดภัยสูง

Orifice diameter – ขนาดของรูตัดพลาสมาตอนเริ่มต้น

Orifice diameter tip – ขนาดปากของหัวทิปตัด

Oxy–fuel gas cutting : OFC – การตัดด้วยแก๊สออกซิเจน

Pilot starting arc – การเริ่มอาร์กแบบหัวตัดไม่ต้องสัมผัสชิ้นงาน

Pipe cutting – การตัดโลหะท่อ

Plasma arc cutting – การตัดแบบอาร์กที่อาศัยลำพลาสมา

Plasma arc gouging – การเซาะร่องด้วยแก๊สพลาสมา

Plasma stream – ความเข้มข้นหรือความหนาแน่นของแก๊สพลาสมา

Portable plasma cutting – การตัดพลาสมาแบบพกพาด้วยมือคน

Power setting – การปรับตั้งค่ากำลังของเครื่องตัดพลาสมา

Preheat – การให้ความร้อนงานก่อนเคลื่อนหัวตัด

Reverse drag – ลำของออกซิเจนที่เกิดจากความเร็วต่ำปริมาณออกซิเจนสูง

Robotic plasma cutting – การตัดพลาสมาแบบอัตโนมัติด้วยหุ่นยนต์/แขนกล

Shielding cup – ฝาครอบป้องกันหัวบีบแก๊สพลาสมา

Short cuts – การตัดงานระยะตัดสั้น

Soft slag – สแลกที่กำจัดออกได้ง่าย

Square cut – รอยตัดรูปทรงสี่เหลี่ยม

Standoff – ระยะห่างของหัวตัดกับชิ้นงาน

Swirl ring – ชิ้นส่วนภายในหัวตัดที่มีรูบีบลำแก๊สพลาสมาให้เล็กลง

Thermal cutting – การตัดโลหะด้วยความร้อน

Tip cleaner – เข็มทำความสะอาดหัวทิป

Torch – ลำตัวของหัวตัด

Torch tip – ปลายหัวตัด

Water shrouded – ระบบพ่นน้ำเพื่อขจัดเสียงดังจากแก๊สพลาสมา

Widths of kerf – ความกว้างของร่องตัดพลาสมา

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 2

ข้อที่ 1. จงอธิบายความแตกต่างของการตัดแบบ Thermal cutting : TC กับ Non–Thermal cutting : N–TC พร้อมยกตัวอย่างประกอบการอธิบาย

ข้อที่ 2. จงอธิบายการเกิดออกซิไดซ์ (Oxidized) ในขบวนการตัดด้วยแก๊สออกซิเจน

ข้อที่ 3. จงบอกชนิดของแก๊สเชื้อเพลิง (Fuel gas) ที่สามารถนำมาใช้ในขบวนการด้วยเปลวไฟ (Flame cutting) พร้อมบอกระดับความร้อนที่ได้ของแก๊สแต่ละชนิด

ข้อที่ 4. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับขบวนการตัดด้วยแก๊สออกซิเจน ท่านคิดว่าประกอบด้วยอะไรบ้าง

ข้อที่ 5. จงอธิบายความสัมพันธ์ของ Kert กับ Drag ในขบวนการตัดด้วยแก๊สออกซิเจน

ข้อที่ 6. จงอธิบายถึงผิวรอยตัดที่ไม่สมบูรณ์ว่า เกิดจากปัจจัยใดบ้างและมีผลอย่างไร พร้อมวาดภาพประกอบการอธิบาย

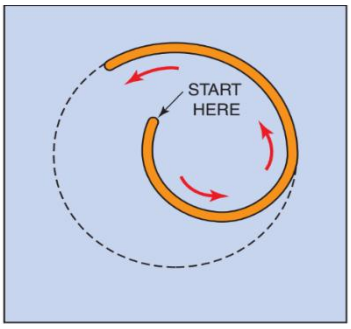
ข้อที่ 7. หัวตัดแก๊ส (Torch) มีกี่ประเภท อะไรบ้าง อธิบายมาพอสังเขป พร้อมเขียนภาพแสดงความแตกต่าง

ข้อที่ 8. จงเขียนภาพแสดงการวางตำแหน่งของหัวทิปตัดแบบ Square cut กับ Bevel cut

ข้อที่ 9. จงอธิบายความแตกต่างของ Soft slag กับ Hard slag พร้อมบอกสาเหตุของการเกิดของแต่ชนิดสแลก

ข้อที่ 10. จงบอกเทคนิคการถือหัวตัดและการเคลื่อนหัวตัด เพื่อตัดงานแนวสั้น (Short cuts) กับตัดงานในแนวยาว (Longer cuts)

ข้อที่ 11. จากรูปข้างล่าง จงอธิบายการตัดโลหะรูไปใช้งานด้วยกรรมวิธีการตัดด้วยแก๊สออกซิอะเซทิลีน (Flame cutting hole)

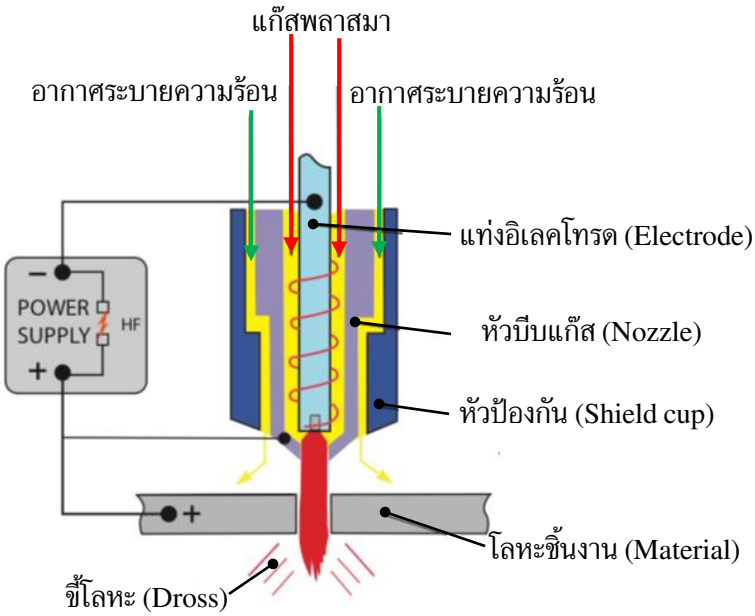


ที่มา : Larry Jeffus, Welding and metal fabrication , 2012

ข้อที่ 12. จงอธิบายเทคนิคการเคลื่อนหัวตัดสำหรับการตัดโลหะท่อ พร้อมวาดภาพประกอบคำอธิบาย

ข้อที่ 13. จงอธิบายเทคนิคการป้องกันการบิดงอหรือการบิดเบี้ยว (Distortion) ที่เกิดจากการตัดด้วยเปลวไฟ พร้อมวาดภาพประกอบคำอธิบาย

ข้อที่ 14. จากรูปจงอธิบายหน้าที่ขององค์ประกอบต่าง ๆ ของหัวตัดแก๊สพลาสมา มาให้สมบูรณ์



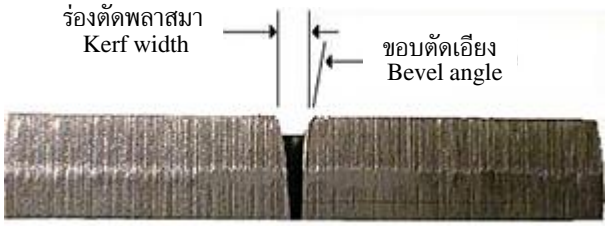
รูปองค์ประกอบและกลไกการสร้างแก๊สพลาสมาภายในหัวตัดพลาสมา

ที่มา : JASIC–Guide to Plasma Cutting, 2019

ข้อที่ 15. จงอธิบายความแตกต่างของระบบกลไกการทำงานของหัวตัดแก๊สพลาสมาแบบสัมผัสชิ้นงาน (Cutting arc) กับแบบไม่สัมผัสชิ้นงาน (Pilot arc)

ข้อที่ 16. จงบอกและอธิบายปัจจัยที่ต้องควบคุมในการตัดโลหะด้วยแก๊สพลาสมามาให้มากที่สุด

ข้อที่ 17. จงอธิบายถึงวิธีการควบคุมขนาดของร่องตัด (Kerf width) และความเอียงของขอบรอยตัด (Bevel angle) จากขบวนการตัดด้วยแก๊สพลาสมา โดยอธิบายอ้างอิงจากรูปข้างล่างนี้



รูปร่องตัดของแก๊สพลาสมา

ที่มา : Hypertherm, 2016

ข้อที่ 18. จงอธิบายบอกวิธีการขจัดมลภาวะทางเสียง แสง ควัน และประกายไฟที่เกิดจากการตัดด้วยแก๊สพลาสมา (ควรวาดภาพประกอบการอธิบาย)

ข้อที่ 19. จงอธิบายหลักการตัดแบบเซาะร่องด้วยแก๊สพลาสมา (Plasma arc gouging)

ข้อที่ 20. จงอธิบายความแตกต่างของกรรมวิธีการตัด (Cutting) กับกรรมวิธีการเซาะร่อง (Gouging) โดยใช้แก๊สพลาสมาอาร์ก

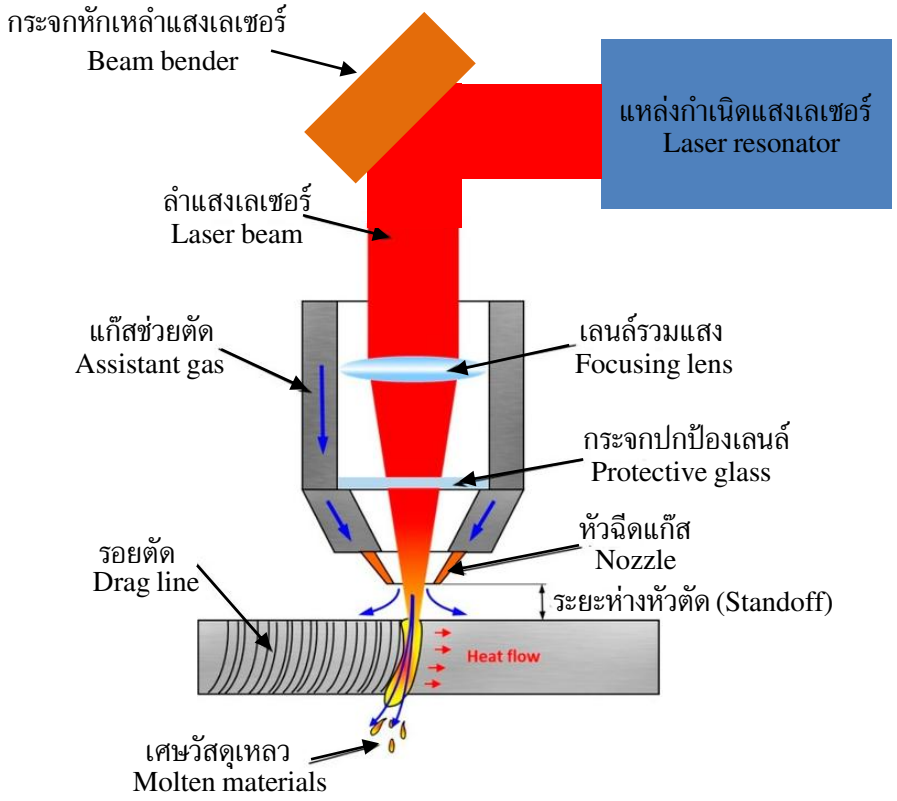
ข้อที่ 21. จากรูปข้างล่างนี้เป็นขบวนการตัดเซาะร่องด้วยอากาศ–คาร์บอนอาร์ก (Carbon arc–air cutting and gouging) จงอธิบายวิธีการตัดเซาะมาพอเข้าใจ



รูปการตัดเซาะร่องด้วยอากาศ–คาร์บอนอาร์ก

ที่มา : Air Carbon Arc Gouging, 2015

ข้อที่ 22. จากรูปข้างล่างนี้ จงอธิบายขบวนการสร้างลำแสงเลเซอร์สำหรับการตัดมาพอเข้าใจ



หลักการทำงานและองค์ประกอบของหัวตัดด้วยลำแสงเลเซอร์

ที่มา : Silvio Genna et. al. MDPI : Applied Sciences, , 10,4956, 2020

บรรณานุกรมบทที่ 2

ABICOR BINZEL. *Plasma Catalog 4.1−Plasma Cutting and Welding Technology for all Metalworking Industries*. 2011.

A. Riveiro, F. Quintero, F. Lusquinos, R. Comesana, J. del Val and J. Pou. *The Role of the Assist Gas Nature in Laser Cutting of Aluminum Alloys*. Physics Procedia, Vol. 12,548−554, 2011.

ARCAIR. *Air Carbon−Arc Guide*. Issue Nov. 4, 2010.

ARCAIR−An ESAB Brand. *Industrial Cutting and Gouging Equipment*. 2018.

BOC− A Member of the Linde Group. *Facts about Plasma Technology and Plasma Cutting*. 2015.

BOC A Member of the Linde Group. *Laser Cutting Laser line Technical*. June 18, 2008.

Canadian Fabricating & Welding. *Plasma Arc Gouging Gains Ground*. 23 March, 2021.

Catherine Wandera. *Reviewed Chapter−Fiber Lasers in Materials Processing*. Fiber Laser, March 2nd, 2016.

Cristina Anghel, Kapil Gupta and Tien−Chien Jen. *A Review on Laser Beam cutting*. Proceedings of the 5th: An International Conference on Industrial Engineering and Operation Management Detroit, UAS, August 10−14, 2020.

ESAB. *Plasma equipment Solutions from ESAB*. *A Full Line of Cutting Equipment for Every Application, Industry and Environment*. 2014.

ESAB. *Precautions and Safe Practices for Arc Welding, Cutting & Gouging*. ESAB Welding & Cutting Products, December, 2009.

GYS Invest in the future. *Gouging Processes – Arc air Gouging and Plasma Gouging*. June, 2017.

Harold Phillips manly. *Oxy−acetylene welding and cutting electric, forge and thermit welding together with related methods and materials used in metal working and the oxygen process for removal of carbon*. Tradition classics, 2013.

Hypertherm−Shaping Possibility. *Plasma Cutting Gouging Techniques*. By Hypertherm, 21−03−2016.

Hypertherm−Shaping Possibility. *Understanding plasma Gouging vs Carbon Arc and Air Arc Gouging*. 21−03−2016.

JASIC−Wilkinson Star. *Guide to Plasma Cutting. Wilkinson Star*, 11−2017.

John Kechagias, Markos Petousis, Nectarios Vidakis and Nikos mastorakis. *Plasma Arc Cutting Dimensional Accuracy Optimization Employing the Parameter Design Approach*. ITM Web of Conferences, AMCSE 2016.

Kashif Chaudhary, Syed Zuhaib Haider Rizvi and Jalil Ali. *Chapter Metrics Overview-Laser Induced Plasma and its Applications*. Published, April 20th, 2016.

Kehl. *Oxy-acetylene welding practice*. American Technical Society, Chicago, USA, 2017

Kevin E. Bowditch and Mark A. Bowditch. *Oxyfuel gas welding*. 7th Edition, Goodheart-wilcox Publisher. 2011

KYZEN. *Gouging with Plasma*. March 22, 2013.

Larry Jeffus and Lawrence Bower. *Welding: Skill, Processes and Practices for Entry-Level Welders.* 1st Edition. Delmar Cengage Learning. Cliftan Park, New York, UAS 2010.

Larry Jeffus, *Welding and Metal fabrication*, 1st Edition Delmar Cengage Learning. Cliftan Park, New York, USA 2012.

Laserfab. *What is laser Cutting?.* September 4, 2019.

Leif Andersen and TE Andersen Consulting. *Plasma Cutting & Gouging*. Technical Update, 2010.

LINCOLN ELECTRIC. *Introduction to CNC Plasma Arc Cutting*. Lincoln Global, 2014.

Michal Heinrich: Ing. *Effect of Plasma Gases on Cut Quality during Plasma Arc Cutting*. Doctoral Thesis. Department of Mechanical Technology. 2007.

Moniz B.J. and Miller R.J. *Welding Skills*. 3rd Edition. American Technical Publisher, Inc., USA, 2004.

Occupational Safety and Health Administration (OSHA), ANSI Z49.1 and 29 CFR 1915.153(a)(4)-*Eye Protection against Radiant Energy during Welding and Cutting in Shipyard Employment*., U.S. Department of Labor, 2005.

OERLIKON. *Welding & Cutting Equipment- Product Catalogue*. 2020.

Plasma Tech. *Plasma Cutting*. CEA Plasma Cutting Division. Plasmatectch. Cat. 09-2017.

PN Rao. *Manufacturing Technology (Foundry, Forming and Welding)*. Vol.1 3th Edition. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, India, 2009.

Prior F. Willis. *A practical manual of oxy-acetylene welding and cutting; with a treatise on*

VICTOR Technologies. *Air Carbon-Arc Guide. ARCAIR Cutting and Gouging Systems*. June 30, 2013.

บทที่ 3

กรรมวิธีการเชื่อม : กลุ่มเติมลวดเชื่อม

Welding Processes : Consumable



ที่มา : MIG Welding Guide, 2020

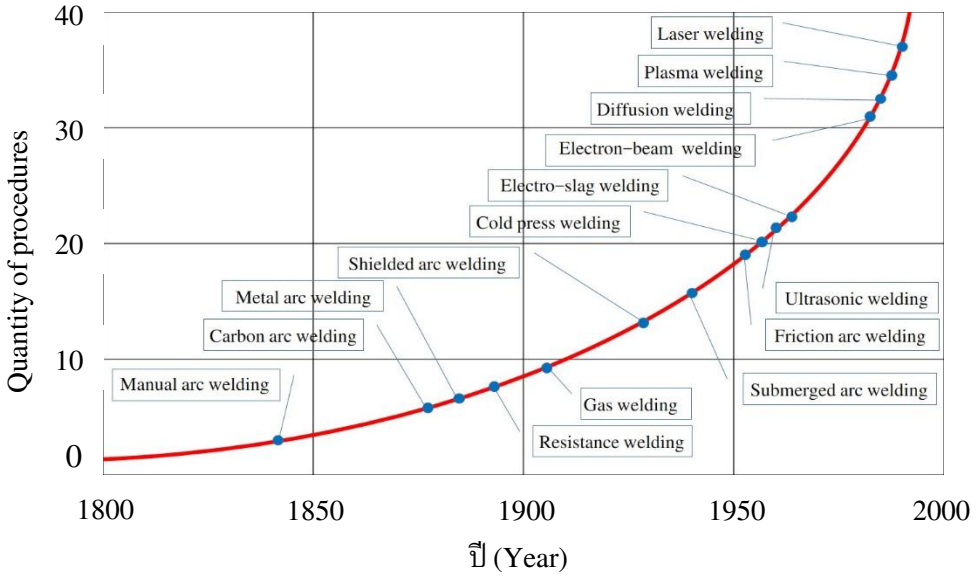


ที่มา : Oerlikon Welding , 2018

จุดประสงค์การเรียนรู้ บทที่ 3 กรรมวิธีการเชื่อม : กลุ่มเติมลวดเชื่อม

- รู้และเข้าใจในหลักเกณฑ์การแยกกลุ่มประเภทของกรรมวิธีการเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อม
- สามารถบอกถึงพัฒนาการปรับปรุงกรรมวิธีการเชื่อมเดิมมาเป็นกรรมวิธีการเชื่อมสมัยใหม่ที่ทันสมัยกับเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าของการเชื่อม
- รู้จักมาตรฐานในการแบ่งประเภทและรหัสหรือโค๊ดของกรรมวิธีการเชื่อม
- รู้และเข้าใจถึงหลักและวิธีการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW)
- รู้และเข้าใจถึงหลักและวิธีการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW)
- รู้และเข้าใจถึงหลักและวิธีการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW)
- รู้และเข้าใจถึงหลักและวิธีการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (SAW)
- รู้และเข้าใจถึงหลักและวิธีการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม (ESW)

"Welding Processes" หมายถึง กรรมวิธีในการต่อโลหะให้ติดกันโดยการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหลอมเหลว หรือจะให้ติดกันโดยใช้แรงกด ซึ่งจะใช้ลวดเชื่อมเติมหรือไม่ใช้ก็ได้ อ้างอิงตามมาตรฐาน American Welding Society : AWS (2001) ซึ่งอาจมีอีกหลายมาตรฐานที่ได้ให้ความหมายของการเชื่อมไว้ โดยมีหลักความหมายพื้นฐานที่เหมือนกันคือการต่อวัสดุต่าง ๆ ให้ติดกัน อาจมีการขยายความเพิ่มเติมเพื่อให้ครอบคุลมถึงทุกกรรมวิธีการเชื่อม ซึ่งด้วยเหตุที่การเชื่อมมีการปรับปรุงพัฒนาเทคนิคการเชื่อมแบบใหม่ ๆ อยู่อย่างต่อเนื่อง โดยที่นำเทคโนโลยีต่าง ๆ เข้ามาช่วยเสริมขีดความสามารถในแต่ละกรรมวิธีการเชื่อมแบบเดิม ๆ ให้ดีขึ้นจนเกิดวิธีการเชื่อมแบบใหม่ ๆ ที่หลากหลายและทันสมัยมากขึ้น จนถึงปัจจุบันมีวิธีการเชื่อมให้เลือกใช้มากมายหลายวิธี ดังแสดงเส้นทางช่วงเวลาการเกิดขึ้นของกรรมวิธีการเชื่อมแบบต่าง ๆ ที่ใหม่ ๆ ที่พัฒนาขึ้นมา ในรูปที่ 3.1



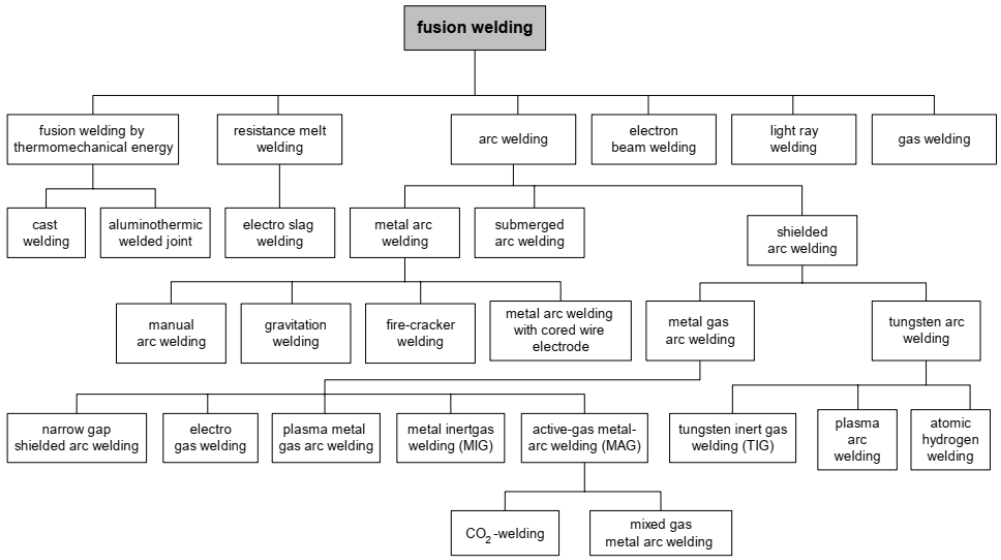
รูปที่ 3.1 ช่วงเวลาของการเกิดกรรมวิธีการเชื่อมแบบต่าง ๆ

ที่มา : IIW – Welding processes and equipment, 2015 (เขียนใหม่)

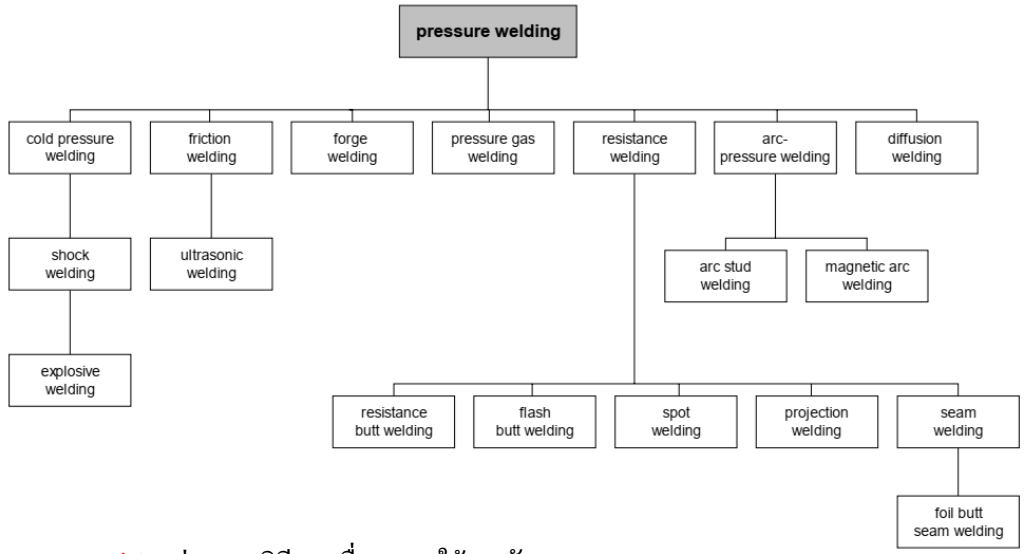
สถาบันการเชื่อมสากล (International Institute of Welding : IIW) เป็นสถาบันการเชื่อมที่อ้างอิงมาตรฐานยุโรป BS EN ISO 4063 : 2010 ได้ทำการจัดแบ่งกลุ่มกรรมวิธีการเชื่อม ออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ ได้แก่

1. กลุ่มกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding processes)
2. กลุ่มกรรมวิธีการเชื่อมแบบใช้แรงอัด (Pressure welding processes)

โดยแต่ละกลุ่มกรรมวิธีจะมีเทคนิคและวิธีการเชื่อมที่แยกย่อยได้อีกหลายวิธีการเชื่อมดังแสดงในแผนผังของรูปที่ 3.2 (ก) และ (ข)



(ก) กลุ่มกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding processes)



(ข) กลุ่มกรรมวิธีการเชื่อมแบบใช้แรงอัด (Pressure welding processes)

รูปที่ 3.2 การแบ่งกลุ่มกรรมวิธีการเชื่อมตามมาตรฐานยุโรป BS EN ISO 4063 : 2015 (IIW)

ที่มา : Guideline document, Welding Processes and Equipment, IIW-IWE, 2015

มาตรฐานสมาคมการเชื่อมแห่งสหรัฐอเมริกา (American Welding Society : AWS) ได้จัดแบ่งหมวดหมู่ของกรรมวิธีการเชื่อมโดยอาศัย 2 หลักการ ดังนี้

1. หลักการของพลังงานที่ใช้กับการถ่ายเทน้ำโลหะเชื่อม (Metal transfer)
2. หลักการของการไหลแทรกซึมของน้ำโลหะลวดเชื่อมสู่รอยเชื่อม (Capillary attraction)

โดยจากหลักการดังกล่าวข้างต้น AWS จึงได้จัดกลุ่มของกรรมวิธีการเชื่อมได้ 6 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 3. 1

ตารางที่ 3.1 การแบ่งกลุ่มกรรมวิธีการเชื่อมตามมาตรฐานสมาคมการเชื่อมอเมริกา (AWS)

ที่มา : Welding Inspection Handbook, 3rd edition. American Welding Society, 2000

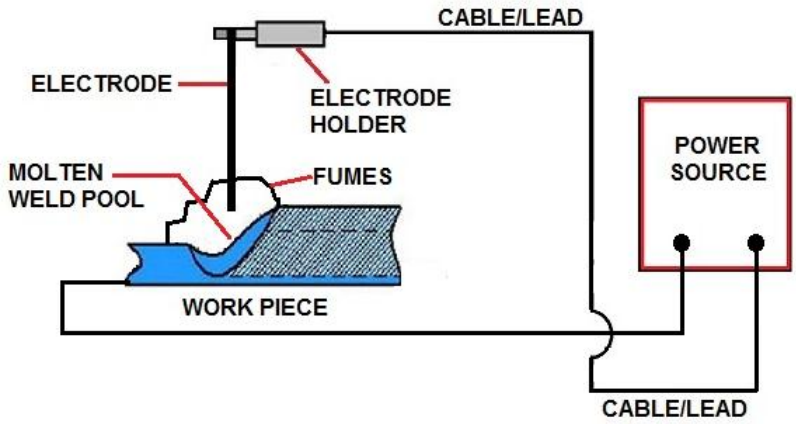
การแบ่งกลุ่มชนิดการเชื่อมที่อ้างอิง มาตรฐานสมาคมการเชื่อมอเมริกา (AWS)	
กรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์ก (Arc Welding)	Manual Metal Arc Welding : MMAW
	Gas Metal Arc Welding : GMAW
	Gas Tungsten Arc Welding : GTAW
	Submerged Arc Welding : SAW
	Flux Cored Arc Welding : FCAW
	Electro Slag Welding : ESW
	Atomic Hydrogen Welding : AHW
	Stud Arc Welding : SW
กรรมวิธีการเชื่อมแก๊ส (Gas Welding)	Air – Acetylene Welding : AAW
	Oxy – Acetylene Welding : OAW
	Oxy – Hydrogen Welding : OHW
	Pressure Gas Welding : PGW
กรรมวิธีการเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance Welding)	Resistance Spot Welding : RSW
	Resistance Seam Welding : RSEW
	Percussion Welding : PEW
	Flash Welding : FW
	Upset Welding : UW
กรรมวิธีการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding)	Cold Welding : CW
	Roll Welding : ROW
	Diffusion Welding : DFW
	Forge Welding : FOW
	Friction Welding : FRW
	Explosion Welding : EXW
	Ultrasonic Welding : USW
กรรมวิธีการเชื่อมอาศัยความร้อนกับสารเคมี (Thermo–Chemical Welding)	Thermit Welding : TW
กรรมวิธีการเชื่อมอาศัยพลังงานสูง (Intense Energy Welding)	Plasma Arc Welding : PAW
	Electron Beam Welding : EBM
	Laser Beam Welding : LBW

ถึงแม้ว่าการจัดแบ่งกลุ่มกรรมวิธีการเชื่อมของแต่ละมาตรฐานอาจมีความแตกต่างกัน แต่โดยรวมต่างก็ได้กล่าวถึงกรรมวิธีการเชื่อมที่มีการใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันอย่างครบถ้วน ซึ่งกรรมวิธีการเชื่อมที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าบางกรรมวิธีรู้จักกันดีและมีการใช้งานกันเป็นประจำ แต่บางกรรมวิธีอาจไม่ค่อยได้พบเห็นเนื่องจากใช้กับงานเฉพาะทางหรือเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีขีดจำกัดในการเชื่อมต่อ ด้วยเหตุที่กรรมวิธีการเชื่อมที่มากหลากหลายวิธีการ ผู้เขียนอาจไม่สามารถกล่าวถึงได้ทุกกรรมวิธี ในบทนี้จะเลือกในบางกรรมวิธีที่มีความต้องการใช้งานกันอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะในงานด้านอุตสาหกรรมการผลิต โดยมุ่งเน้นเสริมสร้างความรู้ความเข้าใจถึงเรื่องของ เครื่องมืออุปกรณ์ วิธีการเชื่อม การกำหนดปัจจัยการเชื่อม รวมไปถึง ข้อควรระวังและความปลอดภัย และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องของแต่ละ กรรมวิธีการเชื่อมสำหรับวิศวกรการเชื่อม (Welding Engineer) เป็นสำคัญ

กลุ่มกรรมวิธีการเชื่อมอาร์ก (Arc Welding Processes Groups)

3.1 การเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding : SMAW)

เป็นกรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กที่อาศัยกระแสไฟฟ้า จนเป็นที่รู้จักกันในชื่อของการเชื่อมไฟฟ้า (Electric arc welding) อาศัยหลักการอาร์กของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างปลายของลวดเชื่อมที่มีฟลักซ์หุ้ม (Covered electrode) กับผิวหน้าของชิ้นงานโลหะเชื่อม (Base metal / Work piece) การอาร์กระหว่างช่องว่างเกิดเป็นความร้อนไปหลอมละลายปลายลวดและชิ้นงานเกิดเป็นบ่อหลอมละลาย (Weld pool) เมื่อบ่อหลอมละลายเย็นตัวลงชิ้นงานก็จะติดกันเป็นแนวเชื่อม ส่วนฟลักซ์ที่หุ้มแกนลวดเชื่อมจะหลอมละลายขณะอาร์ก และทำหน้าที่เป็นแก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลายป้องกันอากาศจากภายนอกเข้ามารวมตัวกับน้ำโลหะ พร้อมทั้งช่วยควบคุมอัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อมได้อีกด้วย ซึ่งเมื่อฟลักซ์แข็งตัวจะแข็งและเปราะที่เรียกว่า สแลก (Slag) จำกัดออกได้ง่ายด้วยการใช้ค้อนเคาะ โดยองค์ประกอบที่กล่าวมาข้างต้นของหลักการเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 องค์ประกอบของการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW)

ที่มา : WWW. Weldingandndt.com. 2018

3.1.1 ชนิดของกระแสไฟเชื่อม (Type of welding current)

เครื่องเชื่อม (Welding machine) ที่นำมาใช้ในการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ทำหน้าที่ผลิตกระแสไฟเชื่อมในวงจร และส่งจ่ายกระแสไฟไปตามสายเชื่อมเพื่อการอาร์กระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน ซึ่งเครื่องเชื่อมมีทั้งเครื่องเชื่อมแบบกระแสตรง (DC) เครื่องเชื่อมแบบกระแสสลับ (AC) และเครื่องเชื่อมที่มีทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ (DC/AC) โดยช่างเชื่อมสามารถเลือกกระไฟเชื่อมได้ตามที่ต้องการ การเลือกกระแสไฟเชื่อมนั้นจะเลือกตามชนิดของลวดเชื่อมที่ใช้งาน ซึ่งกระแสไฟเชื่อมที่ใช้งานกันมี 3 ประเภท คือ

1. กระแสไฟตรงขั้วลบต่อกับลวดเชื่อม (Direct Current Electrode Negative : DCEN)

การต่อขั้วแบบนี้เป็นการเชื่อมต่อขั้วเชื่อมด้วยกระแสตรงขั้วตรง คือ หัวเชื่อม/ลวดเชื่อมจะต่อเป็นขั้วลบ (Negative) ส่วนสายดิน/ชิ้นงานจะต่อเป็นขั้วบวก (Positive) โดยอิเลคตรอนจะวิ่งจากลวดเชื่อม (–) ไปยังชิ้นงาน (+) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ก) การวิ่งของอิเลคตรอนจะวิ่งเข้าชน (Bump) กับชิ้นงาน ผลของการวิ่งชนทำให้ที่ชิ้นงานเกิดความร้อนมากกว่าที่ลวดเชื่อม 2/3 หรือ 70% ส่วนเกิดที่ลวดเชื่อม 1/3 หรือ 30% เหมาะสำหรับการเชื่อมที่ต้องการแนวเชื่อมที่หลอมลึกและแคบ

2. กระแสไฟตรงขั้วบวกต่อกับลวดเชื่อม (Direct Current Electrode Positive : DCEP)

การต่อขั้วแบบนี้เป็นการเชื่อมต่อขั้วเชื่อมด้วยกระแสตรงกลับขั้ว คือ หัวเชื่อมหรือลวดเชื่อมจะต่อเป็นขั้วบวก (Positive) ส่วนสายดิน/ชิ้นงานจะต่อเป็นขั้วลบ (Negative) โดยอิเลคตรอนจะวิ่งจากชิ้นงาน (–) ไปยังลวดเชื่อม (+) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ข) การวิ่งของอิเลคตรอนจะวิ่งเข้าชน (Bump) กับปลายลวดเชื่อม ผลของการวิ่งชนทำให้ที่ลวดเชื่อมเกิดความร้อนมากกว่าที่ชิ้นงาน 2/3 หรือ 70% ส่วนเกิดที่ชิ้นงาน 1/3 หรือ 30% เหมาะสำหรับการเชื่อมที่ต้องการแนวเชื่อมที่กว้างและการหลอมที่ตื้น

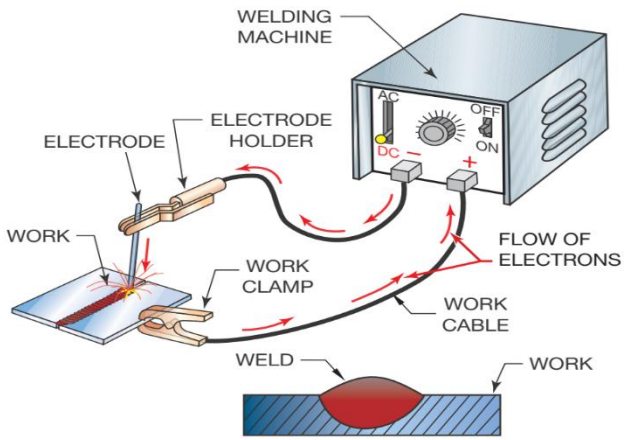
3. กระแสไฟสลับ (Alternative Current : AC)

เป็นกระแสไฟเชื่อมที่มีลักษณะการไหลแบบสลับขั้วจากขั้วบวก (+) ไปยังขั้วลบ (–) ซึ่งเป็นแบบคลื่น SIN WAVE ซึ่งผลการขึ้น–ลงของคลื่นจะมีกระแสผ่านที่ 0 จำนวน 2 ครั้ง ผ่านคลื่นบวก และคลื่นลบ อย่างละ 1 ครั้ง ใน 1 วินาที จะเกิดสลับกันไปแบบนี้จำนวน 50 ครั้ง หรือ 50 เฮิร์ต จึงถือได้ว่ากระแสไฟสลับไม่มีขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ก) และ (ข) ความร้อนที่เกิดขึ้นจะสมดุล คือ เกิดที่ชิ้นงาน 1/2 หรือ 50% และเกิดที่ลวดเชื่อม 1/2 หรือ 50% จากการที่กระแสไฟเคลื่อนที่แบบสลับ จะมีผลทำให้เปลวอาร์กเปลี่ยนขนาดตลอดเวลา การอาร์กจึงไม่สม่ำเสมอขณะเชื่อม ซึ่งช่างเชื่อมสามารถฟังได้จากเสียงของการอาร์กที่เกิดจากการสลับขั้ว ช่างเชื่อมที่เลือกใช้กระแสไฟเชื่อมแบบสลับต้องใช้ทักษะในการควบคุมหัวเชื่อมสูง เมื่อเทียบกับการเลือกใช้กระแสไฟตรง ซึ่งมีทิศทางการไหลไปในทิศทางเดียว ความสม่ำเสมอของการอาร์กจะดีกว่า และควบคุมการเชื่อมได้ง่ายกว่า (เป็นข้อมูลที่อ้างอิงจากความรู้สึกของช่างเชื่อมส่วนใหญ่ ซึ่งบางคนอาจรู้สึกต่างไปจากนี้) ตัวอย่างการเลือกกระแสไฟเชื่อมจากข้อกำหนดของลวดเชื่อม เช่น ลวดเชื่อม AWS A5.1 E6013

AWS หมายถึง มาตรฐานของ American Welding Society

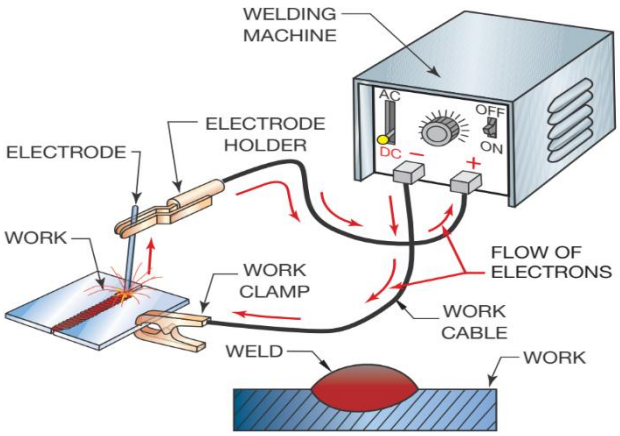
A 5.1 หมายถึง ข้อกำหนดของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน

E6013 หมายถึง ประเภทของลวดเชื่อมชนิดที่อยู่ในกลุ่มของ A 5.1 ที่ลงท้ายด้วยเลข 13 ซึ่งมีความหมายว่า เป็นลวดหุ้มฟลักซ์รูไทล์ เชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม ใช้กระแสไฟเชื่อมได้ทั้ง AC กระแสไฟเชื่อม DCEN และ DCEP โดยเป็นหน้าที่ของช่างเชื่อมที่จะต้องพิจารณาเลือกกระแสไฟเชื่อม ที่ต้องพิจารณาร่วมกับปัจจัยการเชื่อมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น การละลายเจือเข้าด้วยกันของลวดเชื่อมกับชิ้นงานเชื่อม (Dilution) ที่มีผลกระทบโดยตรงกับชนิดของกระแสไฟเชื่อม เป็นต้น



(ก) กระแสไฟตรงขั้วลบต่อกับลวดเชื่อม (Direct Current Electrode Negative : DCEN)

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and metal fabrication, 2012.



(ข) กระแสไฟตรงขั้วบวกต่อกับลวดเชื่อม (Direct Current Electrode Positive : DCEP)

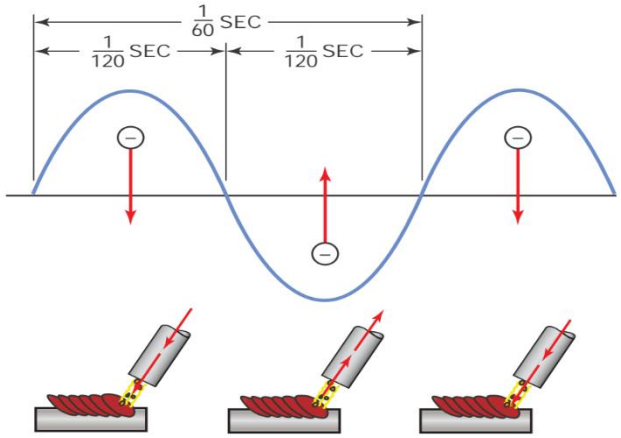
ที่มา : Larry Jeffus, Welding and metal fabrication, 2012.

รูปที่ 3.4 การต่อขั้วกระแสไฟเชื่อมสำหรับกระแสไฟตรง (Direct Current : DC)

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and metal fabrication, 2012.

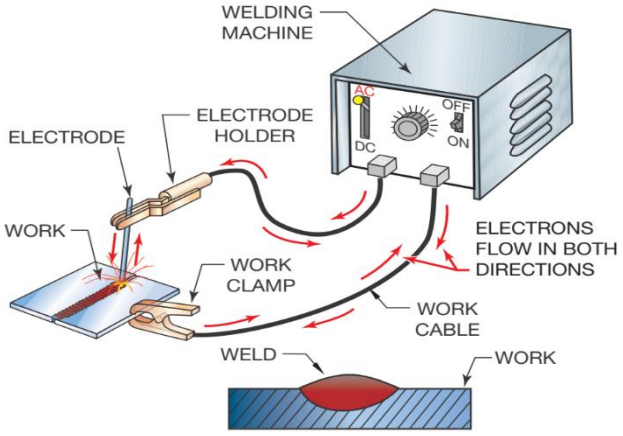
นอกจากการเลือกชนิดของกระแสเชื่อมดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ระดับของกระแสไฟเชื่อม (Welding current) ก็มีบทบาทที่สำคัญต่อการอาร์กที่สร้างขนาดของบ่อหลอมละลาย กล่าวคือ กระแสไฟ (Amperage) จะทำหน้าที่ร่วมกับแรงดัน (Voltage) ตามกฎของโอห์ม ในการป้อนพลังงานเพื่อการอาร์กหลอม ซึ่งก็คือค่าวัตต์ (Wattage) ของพลังงานไฟฟ้า ถ้ากระแสไฟสูงจะทำให้ค่าวัตต์สูงขึ้น

ตามส่งผลให้เกิดการอาร์กหลอมที่เป็นวงกว้าง บ่อหลอมละลายจึงกว้างและลึก และจะตรงกันข้ามกับกรณีที่กระแสต่ำ และวัตต์ต่ำ ดังแสดงการเปรียบเทียบในรูปที่ 3.6



(ก) การไหลแบบสลับขั้วจากขั้วบวก (+) ไปยังขั้วลบ (−) ซึ่งเป็นแบบคลื่น SIN WAVE ของกระแสไฟฟ้าสลับ

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and metal fabrication, 2012.

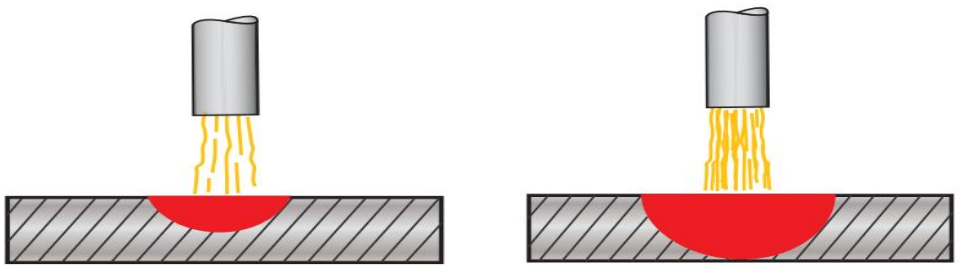


(ข) ทิศทางการไหลของอิเลคตรอนในวงจรกระแสไฟเชื่อม สำหรับกระแสไฟฟ้าสลับ (Alternative Current : AC)

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and metal fabrication, 2012.

รูปที่ 3.5 การต่อขั้วกระแสไฟเชื่อมสำหรับกระแสไฟสลับ (Alternative Current : AC)

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and metal fabrication, 2012.



(ก) บ่อหลอมละลายกระแสไฟเชื่อม/วัตต์ต่ำ **(ข)** บ่อหลอมละลายกระแสไฟเชื่อม/วัตต์สูง

รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบขนาดบ่อหลอมละลายที่กระแสไฟเชื่อม/วัตต์ต่างกัน

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and metal fabrication, 2012.

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเชื่อม (Welding equipment)

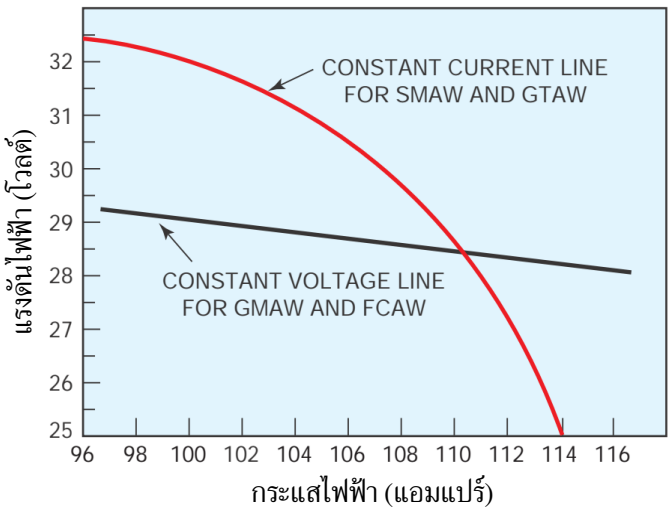
การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มีเครื่องมือที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญคือ เครื่องเชื่อม (Welding machine) ชนิดและประสิทธิภาพของเครื่องเชื่อมจะมีผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมเป็นสำคัญ การแบ่งชนิดของเครื่องเชื่อมไฟฟ้าสามารถแบ่งได้ตามลักษณะของการจ่ายพลังงานเชื่อม กับตามลักษณะต้นกำเนิดของพลังงานเชื่อม ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. การแบ่งตามลักษณะของการจ่ายพลังงานเชื่อม มี 2 แบบ คือ

ก. เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบกระแสคงที่ (Constant Current : CC) ขณะวงจรปิดจะไม่มีกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะสูง จนกว่าจะทำการทำการเปิดวงจร และกระแสไฟเชื่อมที่สูงขึ้นนี้จะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าลดต่ำลง เหมาะสำหรับการเชื่อม SMAW และ GTAW

ข. เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบแรงดันคงที่ (Constant Voltage : CV) ขณะวงจรเปิดจะไม่มีกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าภายในวงจรจะอยู่ที่ค่าใดค่าหนึ่ง และจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก (ค่อนข้างคงที่) เมื่อปิดวงจร จึงเหมาะกับการนำมาใช้ในการเชื่อมแบบอัตโนมัติและกึ่งอัตโนมัติ ได้แก่ การเชื่อม GMAW และ FCAW

โดยเส้นกราฟเปรียบเทียบพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของทั้งสองแบบของการจ่ายพลังงานเชื่อมดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของทั้งสองแบบของการจ่ายพลังงานเชื่อมดัง

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and metal fabrication, 2012

2. การแบ่งตามลักษณะต้นกำเนิดของพลังงานเชื่อม มี 2 ลักษณะ คือ เครื่องเชื่อมแบบกระแสไฟตรง ที่เรียกกันว่า กระแสไฟ DC กับเครื่องเชื่อมแบบกระแสไฟสลับ ที่เรียกกันว่า กระแสไฟ AC ซึ่งพอจะแบ่งเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้

ก. เครื่องเชื่อมชนิดผลิตกระแสไฟตรง (Motor generator welding machine) เป็นเครื่องเชื่อมที่ผลิตกระแสไฟตรงจ่ายให้กับชุดต้นเครื่องเชื่อม โดยชุดต้นกำลังของเครื่องเชื่อม มี 2 ประเภท คือ ถ้าเป็นในโรงงานอุตสาหกรรมจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับต่อจากไฟฟ้าโรงงาน เพื่อขับให้มอเตอร์หมุน

ไปขับชุดเจนเนอเรเตอร์หรือไดนาโม ซึ่งเกิดจากขดลวดหมุนตัดกับสนามแม่เหล็กทำให้เกิดกระแสไหลในขดลวดที่ผลิตกระแสไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ก) ส่วนอีกประเภทเป็นงานภาคสนามหรือนอกสถานที่ซึ่งไม่มีแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า ประเภทนี้จะขับด้วยเครื่องยนต์ (Engine driven generators) ที่ใช้เชื้อเพลิงแก๊สโซลีนหรือดีเซล ดังตัวอย่างเครื่องเชื่อมในดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ข)



(ก) เครื่องเชื่อมขับด้วยมอเตอร์



(ข) เครื่องเชื่อมขับด้วยเครื่องยนต์

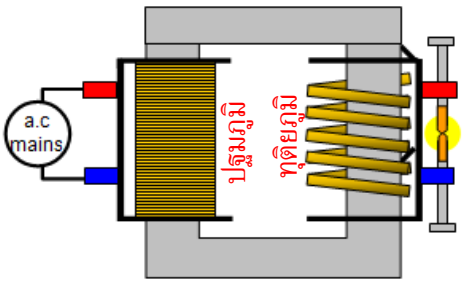
รูปที่ 3.8 ชนิดของเครื่องเชื่อมชนิดกระแสไฟตรงจากมอเตอร์ (Motor generator)

ที่มา : Lincoln Electric. Welding machine. 2016.

ข. เครื่องเชื่อมชนิดหม้อแปลงกระแสไฟสลับ (Transformer welding machine) เป็นเครื่องเชื่อมที่อาศัยหลักการทำงานเหมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้า คือ แปลงแรงเคลื่อนของไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) จาก 220 โวลต์ / 380 โวลต์ ซึ่งเป็น Line Voltage ให้เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าอยู่ที่ 20–40 โวลต์ที่ใช้สำหรับการเชื่อม โดยภายในเครื่องเชื่อมจะมีขดลวดปฐมภูมิ (Primary coil) กับขดลวดทุตยภูมิ (Secondary coil) พันรอบแกนเหล็ก เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ก) และตัวอย่างเครื่องเชื่อมแบบ Transformer ในรูปที่ 3.9 (ข) เครื่องเชื่อมแบบนี้มีจำหน่ายทั่วไป ราคาค่อนข้างถูก แต่กระแสเชื่อมไม่ค่อยจะราบเรียบ สเก็ดโลหะเกิดในปริมาณมาก ใช้กับลวดเชื่อมเกรดพิเศษไม่ได้ สิ้นเปลืองกระแสไฟฟ้าสูง

ค. เครื่องเชื่อมชนิดหม้อแปลงและเรียงกระแสไฟฟ้า (Transformer – rectifiers welding machine) เครื่องเชื่อมชนิดนี้สามารถใช้ได้กับทั้งระบบไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ โดยรับกระแสไฟสลับแล้วแปลงเป็นกระแสไฟตรง ด้วยอุปกรณ์ชุดเรกติฟายเออร์ (Silicon Controlled Rectifier : SCR) ด้วยวิธีการนำวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้ามาซ้อนกันเป็นชั้น ๆ กับโลหะที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านทางเดียวและยังป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับมาในทิศทางชั้นเหล่านั้น โดยยอมให้กระแสไฟสลับคลื่นบวก (+) เพียงครึ่งที่ไหลผ่านได้ การไหลทางเดียวคงที่และสม่ำเสมอของคลื่นบวก จะทำให้เกิดเป็นกระแสไฟตรงที่ไหลผ่านชุดเรกติฟายเออร์ซึ่งนำไปใช้งาน เครื่องเชื่อมแบบนี้จะได้กระแสไฟ

เชื่อมที่นุ่มนวลกว่าแบบหม้อแปลง ใช้เชื่อมได้กับทุกชนิดลวดเชื่อมหุ้มฟลั๊ก แต่สิ้นเปลืองกระแสไฟฟ้าค่อนข้างสูง ดังแสดงหลักการแปลงและเรียงกระแสไฟฟ้าในรูปที่ 3.10 (ก) และ รูปตัวอย่างเครื่องเชื่อมในรูปที่ 3.10 (ข)

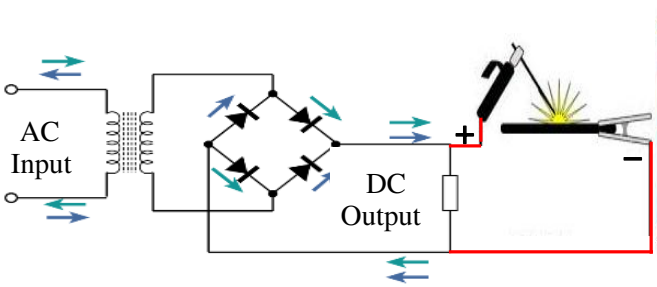


(ก) หลักการของขดลวดแปลงแรงเคลื่อนไฟภายในเครื่องเชื่อม



(ข) เครื่องเชื่อมไฟฟ้าชนิด Transformer

รูปที่ 3.9 หลักของการแปลงแรงเคลื่อนในเครื่องเชื่อม และเครื่องเชื่อมชนิด Transformer *ที่มา : Miller Welding Machine, 2015*



(ก) หลักการแปลงกระแสไฟตรงไปเป็นกระแสไฟสลับภายในเครื่องเชื่อม

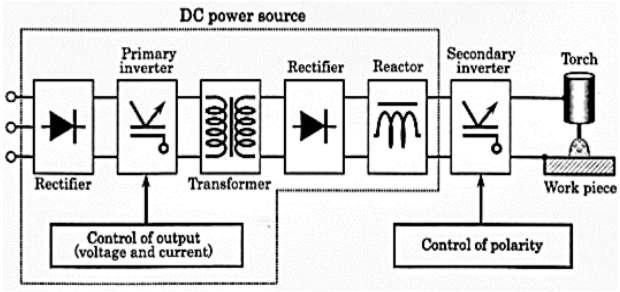


(ข) เครื่องเชื่อมไฟฟ้าชนิด Transformer–rectifier

รูปที่ 3.10 หลักการแปลงกระแสไฟ AC ไปเป็น DC ในเครื่องเชื่อม และเครื่องเชื่อมชนิด Transformer–rectifier *ที่มา : Miller Welding Machine, 2015*

ง. เครื่องเชื่อมชนิดอินเวอร์เตอร์ (Inverter welding machine) เป็นเครื่องเชื่อมชนิดที่สามารถใช้ได้ทั้งระบบไฟฟ้ากระแสสลับและไฟฟ้ากระแสตรง (AC/DC) ซึ่งมีระบบชุดอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่ควบคุมความถี่ให้สูงขึ้น จากคลื่นความถี่ 50 Hz ให้สูงขึ้นถึง 20 kHz ด้วยชุดควบคุมกำลังทรานซิสเตอร์ โดยมีชุดเรกติไฟเออร์ทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าสลับ AC (Input) ไปเป็นกระแสตรง DC จากนั้นก็

เปลี่ยนเป็นกระแสสลับที่ความถี่สูงขึ้น ถัดไปก็จัดเรียงกระแสใหม่อีกครั้งด้วยชุดเรกติไฟเออร์ ส่งผลทำให้เกิดคลื่นความถี่สูงและเรียบด้วยกระแสตรง DC (Output) เพื่อใช้งาน ดังนั้นระบบเครื่องเชื่อมชนิดนี้จะเป็นแบบกระแสคงที่ (Constant Current : CC) เป็นการอธิบายระบบการทำงานจากผู้ผลิตเครื่องเชื่อม Miller welding machince (2015) ดังแสดงหลักการแปลงกระแสไฟฟ้าในรูปที่ 3.11 (ก) และ รูปตัวอย่างเครื่องเชื่อมในรูปที่ 3.11 (ข)



(ก) ระบบวงจรของเครื่องเชื่อมชนิดอินเวอร์เตอร์

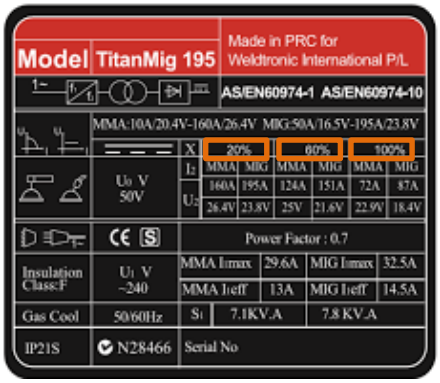


(ข) เครื่องเชื่อมไฟฟ้าชนิด Inverter

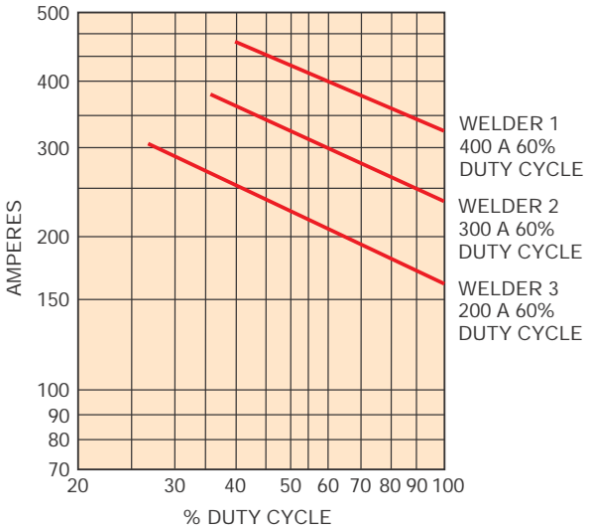
รูปที่ 3.11 ระบบวงจรภายในและเครื่องเชื่อมชนิดอินเวอร์เตอร์ *ที่มา : Miller Welding Machine, 2015*

ประสิทธิภาพของเครื่องเชื่อม (Duty cycle) ช่างเชื่อมสามารถตรวจสอบได้จากป้ายที่แสดงรายละเอียดของเครื่อง (Name plate) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 (ก) ซึ่งหมายถึง ขีดความสามารถในการใช้งานของเครื่องเชื่อม โดยเทียบอัตราส่วนระหว่างเวลาที่ทำการเชื่อมต่อเวลาทั้งหมด ซึ่งเวลาทั้งหมดจะเทียบจาก 10 นาที เช่น ผู้ผลิตเครื่องเชื่อมระบุไว้ที่ Name plate ของเครื่องเชื่อมว่า Duty cycle 60 % นั่นหมายถึง เครื่องเชื่อมนี้สามารถปฏิบัติการเชื่อมงานได้ติดต่อกันได้นาน 6 นาที แล้วหยุดพัก 4 นาที แล้วจึงจะปฏิบัติการเชื่อมงานได้ต่อ จะสังเกตเห็นว่าเวลารวมกันทั้งหมด 10 นาที ถ้าปฏิบัติการเชื่อมงานติดต่อกันเกิน 6 นาที เครื่องเชื่อมจะตัดระบบการใช้งาน และอาจเกิดความเสียหายหรืออายุการใช้งานของเครื่องเชื่อมสั้นลงได้ ประสิทธิภาพของเครื่องเชื่อมจะสัมพันธ์กับระดับปริมาณของกระแสไฟเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.12 (ข) เครื่องเชื่อมประเภทนี้จะเป็นชนิดกระแสคงที่ (Constant Current : CC) ได้แก่ เครื่องเชื่อมของกรรมวิธี SMAW กรรมวิธี CAW และกรรมวิธี Stud arc welding เป็นต้น

โดยเป็นที่ทราบกันดีว่ามีเครื่องเชื่อมบางชนิดที่มี Duty cycle 100 % หมายถึง สามารถปฏิบัติการเชื่อมงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องหยุดพัก ซึ่งจะเป็นเครื่องเชื่อมแบบอัตโนมัติชนิดแรงเคลื่อนคงที่ (Constant Voltage : CV) ได้แก่ เครื่องเชื่อมของกรรมวิธี GMAW กรรมวิธี GTAW กรรมวิธี SAW และกรรมวิธี FCAW เป็นต้น



(ก) Name plate ของเครื่องเชื่อม



(ข) ความสัมพันธ์ของ Duty cycle กับ ปริมาณกระแสไฟเชื่อม

รูปที่ 3.12 ประสิทธิภาพของเครื่องเชื่อม (Duty cycle)

ที่มา : Lincoln Electric, Welding Machine, 2016

นอกจากเครื่องเชื่อมแล้วยังมีอุปกรณ์อื่น ๆ อีกหลายอย่างที่มีความสำคัญที่ต้องใช้สำหรับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) ดังต่อไปนี้

1. หัวจับลวดเชื่อม (Electrode holder) หรือหัวเชื่อม เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้จับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ด้วยปากจับที่ทำด้วยวัสดุโลหะนำไฟฟ้า พร้อมห่อหุ้มด้วยวัสดุเซรามิกส์เพื่อให้ทนต่อความร้อนจากเปลวไฟอาร์ก ส่วนด้ามจับทำด้วยวัสดุพลาสติกชนิดแข็งที่เป็นฉนวนไฟฟ้าและความร้อน หัวจับลวดเชื่อมมีหลายขนาดหลายแบบและหลายหลากสี สามารถเลือกใช้ตามความถนัดของช่างเชื่อมเอง ดังแสดงตัวอย่างหัวจับลวดเชื่อมในรูปที่ 3.13 (ก)

2. หัวจับสายดิน (Ground clamp) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการจับ หรือ เหล็กที่รองรับชิ้นงาน เพื่อต้องการให้ครบวงจรของกระไฟเชื่อม โดยสายดินต้องจับยึดให้แน่นมากเพียงพอต่อการไหลของกระแสในวงจร ถ้าหลอมหรือไม่แน่นมากพอจะมีผลทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน สายเชื่อมจะเกิดความร้อน หรือเกิดการอาร์กได้ ดังแสดงตัวอย่างหัวจับสายดินในรูปที่ 3.13 (ข)

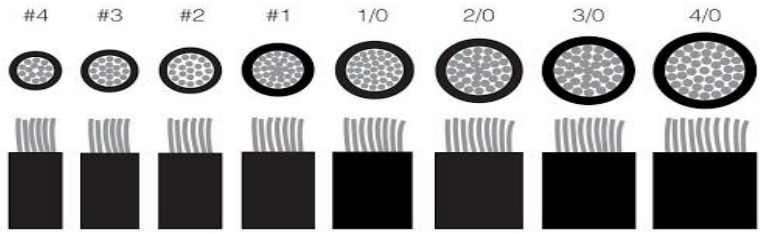
3. สายเชื่อมไฟฟ้า (Welding cable / Welding leads) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทำหน้าที่เป็นสายนำไฟฟ้าหรือทางผ่านของกระแสไฟฟ้าจากขั้วเครื่องเชื่อมไปยังบริเวณที่ต้องการอาร์ก สายเชื่อมในระบบของการเชื่อมมี 2 เส้น คือ เส้นที่ต่อจากเครื่องเชื่อมไปยังหัวเชื่อม ที่เรียกกันว่าสายหัวเชื่อม ส่วนอีกเส้นต่อจากเครื่องเชื่อมไปยังชิ้นงาน ที่เรียกกันว่าสายดิน ซึ่งทั้งสองเส้นเป็นโลหะทองแดงเล็ก ๆ หลายเส้นพันกันอย่างมีระเบียบ และห่อหุ้มด้วยฉนวนป้องกันกระแสไฟฟ้า กันน้ำได้ดี อ่อนตัวสามารถม้วนได้สะดวก โดยทั่วไปมักมีสีดำหรือสีส้ม สายเชื่อมที่ดีต้องมีค่าความต้านทานการไหลของกระแสที่ต่ำ ซึ่งความยาวและขนาดของโลหะทองแดงของสายเชื่อมมีผลต่อปริมาณกระแสที่ไหลผ่านดังแสดง

ความสัมพันธ์ในตารางที่ 3.2 และที่ปลายสายจะย้ำด้วยหางปลาทองแดงเพื่อง่ายในการเชื่อมต่อสายเข้ากับขั่วเครื่องเชื่อม ดังแสดงตัวอย่างสายเชื่อมไฟฟ้าในรูปที่ 3.13 (ค)

ตารางที่ 3.2 ขนาดของสายเชื่อมไฟฟ้าตามมาตรฐานอเมริกา (American Wire Gauge : AWG)

ที่มา : American Wire Gauge standard : AWG, 2015

ความยาวของสายเชื่อมไฟฟ้า		กระแสไฟเชื่อมที่สามารถไหลผ่าน (Welding current flows through) : แอมแปร์								
		100	150	200	250	300	350	400	450	500
ฟุต (ft)	เมตร (m)	ขนาดของลวดทองแดงพันเกลียว (Copper welding cable) : # No								
50	15	2	2	2	2	1	1/0	1/0	2/0	2/0
75	23	2	2	1	1/0	2/0	2/0	3/0	3/0	4/0
100	30	2	1	1/0	2/0	3/0	4/0	4/0		
125	38	2	1/0	2/0	3/0	4/0				
150	46	1	2/0	3/0	4/0					
175	53	1/0	3/0	4/0						
200	61	1/0	3/0	4/0						
250	76	2/0	4/0							
300	91	3/0								
350	107	3/0								
400	122	4/0								



4. เครื่องมือทำความสะอาด (Cleaning tools) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการทำความสะอาดทั้งก่อนและหลังการเชื่อมมีหลายอย่าง ได้แก่ 1. ค้อนเคาะสแลก (Chipping hammer) ใช้สำหรับขจัดแสลกและเม็ดโลหะบนแนวเชื่อมออกไปด้วยการเคาะ ซึ่งออกแบบปลายหัวค้อนให้เล็กแหลม ที่สามารถเคาะตามซอกเล็ก ๆ ได้ถนัด 2. แปรงลวด (Wire brush) ใช้สำหรับแปรงขัดทำความสะอาดแนวเชื่อม มีหลายรูปแบบทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ 3. คีมจับชิ้งาน (Pliers) ใช้สำหรับจับชิ้นงานเชื่อมขณะร้อนเพื่อทำความสะอาดมีหลายขนาดให้สามารถเลือกใช้ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงานเชื่อม ดังแสดงตัวอย่างเครื่องมือทำความสะอาดดังกล่าว ในรูปที่ 3.13 (ง)

5. อุปกรณ์ป้องกันอันตราย (Protective equipment) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญยิ่งที่จะสร้างความปลอดภัยแก่ช่างเชื่อมขณะปฏิบัติงานเชื่อม ซึ่งมีทั้งอุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (Personal protective equipment : PPE) และอุปกรณ์สำหรับเพื่อความปลอดภัยระหว่างปฏิบัติงาน (Operation

protective equipment) อุปกรณ์ทั้งสองส่วนดังกล่าวนี้ ได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 1และตัวอย่างบางชนิดแสดงในรูปที่ 3.13 (จ)

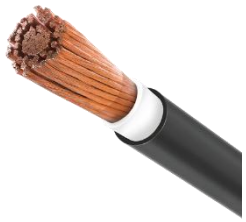
6. ตู้อบลวดเชื่อมและกระบอกอุ่นลวดเชื่อม (Electrode drying oven and portable) เป็นชุดอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกันสำหรับการขจัดความชื้นในลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ โดยตู้อบลวดเชื่อมมีลักษณะเป็นตู้ดังรูปที่ 3.14 (ก) ใช้อบลวดปริมาณครั้งละมาก ๆ ที่อุณหภูมิ 260 ถึง 425 °C เป็นระยะเวลา 1–2 ชั่วโมง มักติดตั้งไว้ประจำที่แน่นอนเพื่อเตรียมให้ช่างเชื่อมมารับไปใช้ ซึ่งช่างก็จะเอาไปใส่ในกระบอกอุ่นลวดเชื่อมของตนเอง ดังแสดงลักษณะของกระบอกอุ่นลวดแบบตั้งตรง และแบบตั้งแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ข) และ (ค) ที่มีอุณหภูมิการอุ่นลวดประมาณ 30 ถึง 140 °C โดยส่วนใหญ่จะอบลวดเชื่อมประเภท Low hydrogen electrode หรือ Basic electrode ที่ซึ่งจำเป็นต้องอบไล่ความชื้นก่อนนำไปเชื่อม



(ก) หัวจับลวดเชื่อม (Electrode holder)



(ข) หัวจับสายดิน (Ground clamp)



(ค) สายเชื่อมไฟฟ้า (Welding cable)



(จ) อุปกรณ์ป้องกันอันตราย (Protective equipment)



(ง) เครื่องมือทำความสะอาด (Cleaning tools)

รูปที่ 3.13 อุปกรณ์สำหรับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW)

ที่มา : Welder Partal, 2020



(ก) ตู้อบลวดเชื่อม



(ข) กระบอกอุ่นลวดเชื่อมแบบตั้งตรง



(ค) กระบอกอุ่นลวดเชื่อมแบบแนวนอน

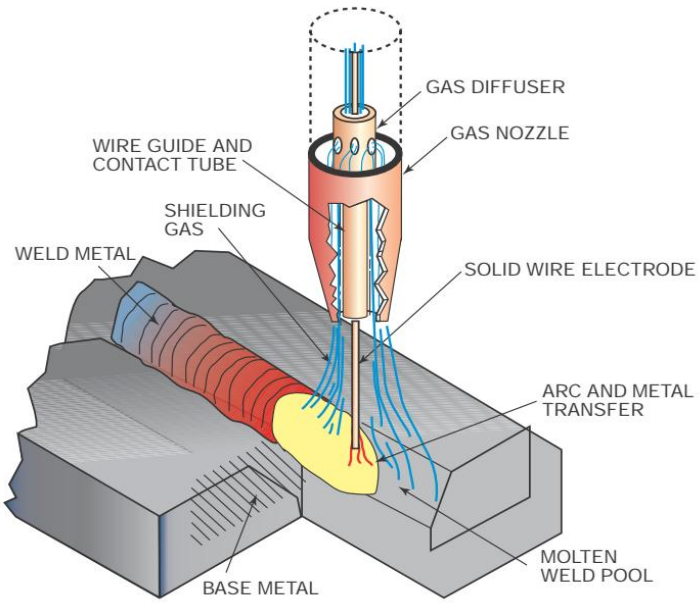
รูปที่ 3.14 อุปกรณ์สำหรับการอบและอุ่นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

ที่มา : Welding equipment, 2019

3.2 การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding : GMAW)

Willian A. Bowditch, et al. (2009) ได้กล่าวถึงกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมไว้ว่า เป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่พัฒนาต่อยอดมาจากการเชื่อมแบบลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์หรือเชื่อมไฟฟ้าที่รู้จักกัน โดยเป็นการเชื่อมที่ใช้ลวดเชื่อมสิ้นเปลืองขนาดเล็ก (Consumable electrode) ป้อนจากล้อม้วนลวด ซึ่งจะถูกป้อนส่งผ่านหัวเชื่อม หรือปืนเชื่อม (Torch / Welding gun) ออกมาอย่างต่อเนื่องผ่านท่อนำลวดและท่อนำกระแส (Contact tip) เส้นลวดเชื่อมจะสัมผัสกับท่อนำกระแส ทำให้กระแสไฟเชื่อมสามารถไหลเข้าสู่เส้นลวดเชื่อมได้ และเมื่อปลายของเส้นลวดที่โผล่ออกมาสัมผัสหรือแตะกับชิ้นงาน (Work / Base metal) ก็จะเกิดการอาร์กขึ้น (Arc) ความร้อนจากการอาร์กนี้จะทำให้โลหะชิ้นงานเกิดการหลอมละลายขึ้น และในขณะเดียวกันที่ปลายของลวดเชื่อมก็จะเกิดการหลอมละลายเช่นกัน โดยเป็นหยดน้ำ

โลหะเหลวที่จะถ่ายโอนสู่บ่อหลอมละลาย (Weld pool) ซึ่งบ่อหลอมละลายดังกล่าวจะถูกปกคลุมด้วยแก๊สเฉื่อยที่ไหลมาจากถังบรรจุผ่านหัวฉีดแก๊ส (Gas Nozzle) เพื่อทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้แก๊สอื่น ๆ จากบรรยากาศภายนอกเข้ามารวมตัวทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะเหลวในบ่อหลอมละลาย ซึ่งแก๊สที่ใช้ในการปกคลุม ได้แก่ แก๊สเฉื่อย (Inert gas) แก๊สแอคทีฟ (Active gas) แก๊สอันรีแอคทีฟ (Unreactive gas) และแก๊สผสม (Mixture gas) เป็นต้น จากหลักของการเชื่อมดังกล่าวข้างต้นสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.14 ถ้าใช้แก๊สเฉื่อยทำหน้าที่ปกคลุมบ่อหลอมละลายจะเรียกขบวนการเชื่อมนี้ว่าการเชื่อมมิก (MIG) ซึ่งมาจากคำย่อของ “Metal Inert Gas” แต่ถ้าใช้แก๊สแอคทีฟทำหน้าที่ปกคลุมบ่อหลอมละลายจะเรียกขบวนการเชื่อมนี้ว่าการเชื่อมแม็ก (MAG) ซึ่งมาจากคำย่อของ “Metal Active Gas” บางครั้งจึงมักจะเรียกชื่อรวมของขบวนการเชื่อมนี้ว่า MIG/MAG



รูปที่ 3.14 หลักการของการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW)
ที่มา : AWS, American Welding Society, 2011

3.2.1 วงจรการเชื่อมและกระแสไฟเชื่อม (Welding circuit and welding current)

กรรมวิธีการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม มีองค์ประกอบของอุปกรณ์และระบบการทำงานที่เกี่ยวข้องและสัมพันธ์กัน ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.15 โดยหลักการเชื่อมของระบบการเชื่อมที่สามารถสรุปเป็นข้อ ๆ ดังนี้ อ้างอิงจากข้อมูลผู้ผลิตเครื่องเชื่อม Lincoln Electric (2015)

1. กรรมวิธีการเชื่อมนี้จะใช้กับไฟกระแสตรง ส่วนกระแสสลับใช้ไม่ได้ และกระแสตรงที่ให้ประสิทธิภาพการเชื่อมดีที่สุด คือ ไฟเชื่อมแบบกระแสไฟตรงกลับขั้ว (Direct Current Reverse Polarity : DCRP) โดยลวดเชื่อมจะเป็นขั้วบวก (Direct Current Electrode Positive : DCEP) ความร้อนจากการอาร์กจะมากที่บ่อหลอมละลาย การถ่ายโอนโลหะเป็นแบบละอองเล็ก ๆ เกิดการซึมลึกมาก ผิวงาน

สะอาดเหมาะกับการเชื่อมงานที่มีออกไซด์บนผิวงานหนา ๆ (Heavy surface oxides) เช่นจำพวกโลหะอลูมิเนียมหรือแมกนีเซียม ดังแสดงระบบของการต่อขั้วเชื่อมแบบ DCRP ในรูปที่ 3.16 (ก) ที่เป็นรายงานในงานวิจัยของ Kailash Chaudhary (2017)

ส่วนการเชื่อมแบบกระแสตรงไม่กลับขั้ว (Straight polarity : DCSP) ลวดเชื่อมจะเป็นขั้วลบ (Direct Current Electrode Negative : DCEN) จะไม่นิยมใช้กับการเชื่อมแบบอาร์กโลหะปกคลุม ด้วยเหตุเพราะระยะซึมลึกตื้น แนวเชื่อมกว้าง และมีประกายไฟเม็ดโลหะกระเด็นออกมามากเกินไป ผิวงานไม่สะอาด และต้องใช้ลวดเชื่อมชนิดพิเศษ คือ ผิวลวดเชื่อมต้องเคลือบด้วยสาร Emissive power เพื่อให้การปลดปล่อยอิเลคตรอนได้ดี ไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้กันเพราะสารเคลือบลวดมีราคาแพง และการถ่ายโอนโลหะจากปลายลวดสู่บ่อหลอมละลายไม่ค่อยจะมีประสิทธิภาพ ด้วยเพราะเป็นหยดขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงระบบของการต่อขั้วเชื่อมแบบ DCSP ในรูปที่ 3.16 (ข)

ส่วนกระไฟฟ้ากระแสสลับจะไม่นำมาใช้ทำการเชื่อมเพราะมีอัตราการสิ้นเปลือง (Burn off rate) ไม่เท่ากันในแต่ละครึ่งวัฏจักร (Half cycle)

สำหรับการถ่ายโอนแบบพัลส์ต้องใช้เครื่องเชื่อมแบบพิเศษ ที่สามารถทำการพัลส์กระแสจากระดับต่ำไปสู่ระดับสูงที่มีความถี่เท่ากับ หรือเป็นสองเท่าของเส้นความถี่ (Line frequency) ซึ่งปกติจะเท่ากับ 50/60 Hz และ 100/120 Hz โดยกระแสเชื่อมจะแปรผันจากค่าต่ำสุด 20 A ที่ แรงดันอาร์ก 17 V ถึงสูงสุด 70 A ที่แรงดันอาร์ก 50 V ซึ่งพิสัยของกระแสและแรงดันระดับนี้จะเกิดขึ้นทุกจังหวะที่มีการถ่ายโอนโลหะของการเชื่อมด้วยกระแสพัลส์

2. กรรมวิธีการเชื่อมนี้จะเป็นระบบแบบแรงดันคงที่(Constant voltage) นั้นคือขณะเชื่อมจะควบคุมด้วยแรงดันให้คงที่ตลอดเวลา และก็จะถูกควบคุมด้วยกระแสอาร์ก (Arc amperage) อีกด้วย

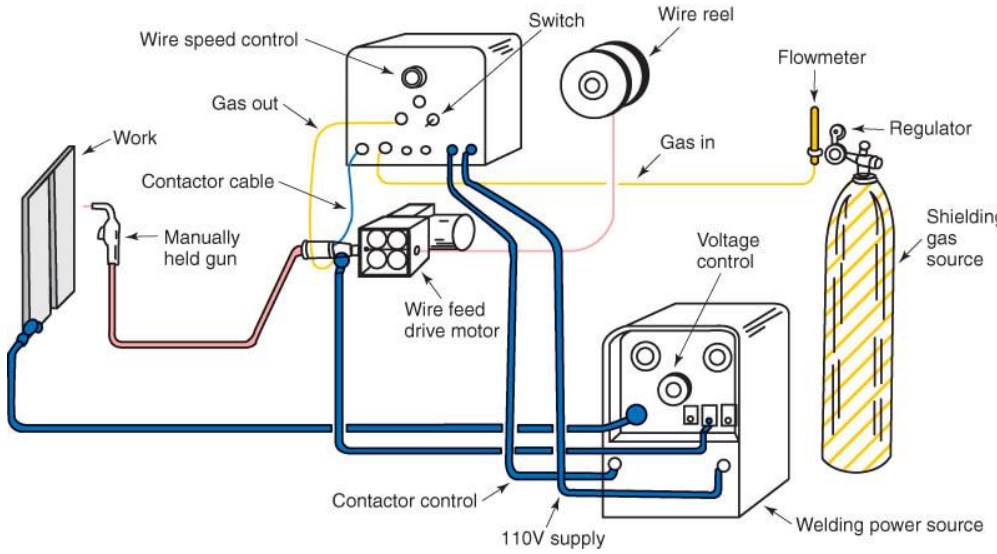
3. กระแสอาร์ก (Arc amperage) ในขณะทำการเชื่อมจะถูกควบคุมด้วยอัตราการป้อนลวดเชื่อม (Electrode wire) ผ่านชุดป้อนลวด (Wire feed drive motor) และสายเชื่อม โดยอัตราการป้อนลวดวัดหน่วยเป็นเมตร/วินาที ซึ่งถ้าอัตราการป้อนลวดสูง กระแสไฟอาร์กก็จะสูงตามโดยอัตโนมัติ

4. แรงดัน (Voltage) จะถูกควบคุมโดยระบบไดแอล (Dial system) ที่อยู่ภายในชุดส่วนประกอบของเครื่องเชื่อม (Welding machine)

5. ขณะทำการเชื่อมบ่อหลอมละลายจะได้รับการปกคลุมด้วยแก๊สเฉื่อยที่ไหลผ่านออกมาจากถังบรรจุผ่านหัวฉีดแก๊ส (Gas nozzle)

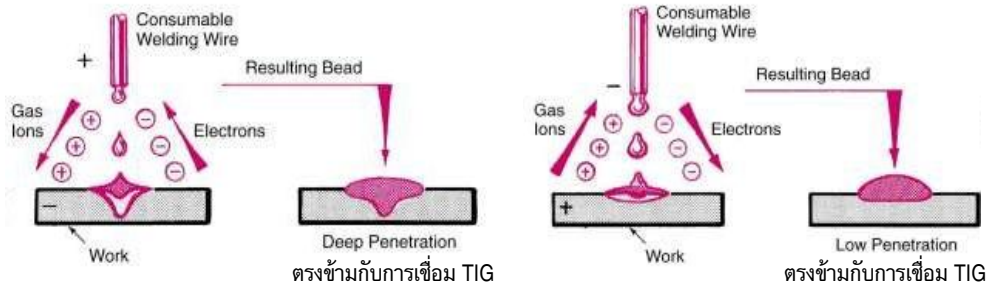
6. การควบคุมหรือการเคลื่อนของหัวเชื่อมจะสามารถใช้มือคนหรือใช้ระบบกลไก ขึ้นอยู่กับว่าเป็นวิธีการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ/อัตโนมัติ

7. การเลือกขนาดของเส้นลวดเชื่อมกับชนิดของแก๊สปกคลุมจะมีผลต่อการถ่ายโอนโลหะ (Metal transfer)



รูปที่ 3.15 อุปกรณ์และระบบวงจรการทำงานของการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW)

ที่มา : The Lincoln Electric Company, 2015



(ก) การต่อขั้วเชื่อมแบบ DCRP **(ข)** การต่อขั้วเชื่อมแบบ DCSP

รูปที่ 3.16 การโอนถ่ายโลหะที่ต่อขั้วเชื่อมต่างกันของการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม

ที่มา : Kailash Chaudhary, A Study on Effect of Various Process Variables in GMAW, 2017

KOBELCO Welding Today (2008) ได้อธิบายเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของขนาดเส้นลวดเชื่อมกับชนิดของแก๊สปกคลุมจะมีผลต่อลักษณะการถ่ายโอนโลหะ (Metal transfer) กล่าวคือ ถ้าช่างเชื่อมเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีขนาดเล็กอยู่ระหว่าง 0.8 – 1.2 มิลลิเมตร คู่กับแก๊สปกคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) การถ่ายโอนโลหะจะเป็นแบบ Short circuiting หรือเรียกอีกอย่างว่า Fine wire welding ซึ่งเชื่อมได้ทุกตำแหน่งท่าเชื่อม แต่ถ้าเลือกใช้ขนาดลวดเชื่อมที่โตขึ้นมากกว่า 1.2 มิลลิเมตร กับแก๊สปกคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ตัวเดิม การถ่ายโอนโลหะจะเป็นแบบหยดขนาดใหญ่ทรงกลมที่เรียกว่า Globular จะมีปริมาณความร้อนจากการอาร์กสูง และขณะเชื่อมการอาร์กค่อนข้างจะรุนแรง เม็ดโลหะกระเด็นออกมามาก ยากต่อการควบคุมหัวเชื่อม ซึ่งต้องเคลื่อนหัวเชื่อมด้วยความเร็วสูง ชิ้นงานเชื่อมมีโอกาสเกิดการบิดงอมาก จึงเหมาะสมกับการเชื่อมในตำแหน่งท่าราบเท่านั้น ในกรณีที่ต้องเชื่อมในตำแหน่งท่าตั้งหรือท่าเหนือศีรษะต้องใช้ลวดเชื่อมที่มีขนาดเส้นเล็ก

ถ้าช่างเชื่อมพิจารณาเลือกใช้แก๊สปกคลุมแบบผสม (Mixture gas) เช่น ผสมกันระหว่าง แก๊สอาร์กอนกับคาร์บอนไดออกไซด์ ($Ar + CO_2$) หรือ แก๊สผสมอาร์กอนกับออกซิเจน ($95\%Ar + 5\%O_2$)/($98\%Ar + 2\%O_2$)/($99\%Ar + 1\%O_2$) บทบาทของแก๊สแบบผสมจะทำให้กลไกการถ่ายโอนโลหะเปลี่ยนไปเป็นแบบละออง ที่สามารถใช้เชื่อมได้กับลวดเชื่อมที่มีขนาดโต ๆ ได้มากขึ้น ซึ่งช่วยให้การควบคุมการอาร์กและการเคลื่อนหัวเชื่อมง่ายขึ้นสม่ำเสมอมากขึ้น ส่งผลทำให้ได้แนวเชื่อมสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ส่วนการถ่ายโอนโลหะแบบ Pulsed transfer จะเป็นแบบวัฏจักร กล่าวคือ เป็นกระบวนการพัลส์กระแสจากระดับต่ำสุดของการถ่ายโอนโลหะแบบหยดขนาดใหญ่ไปถึงระดับสูงสุดเพื่อทำให้เกิดการถ่ายโอนโลหะแบบละอองผ่านการอาร์กสู่บ่อหลอมละลาย

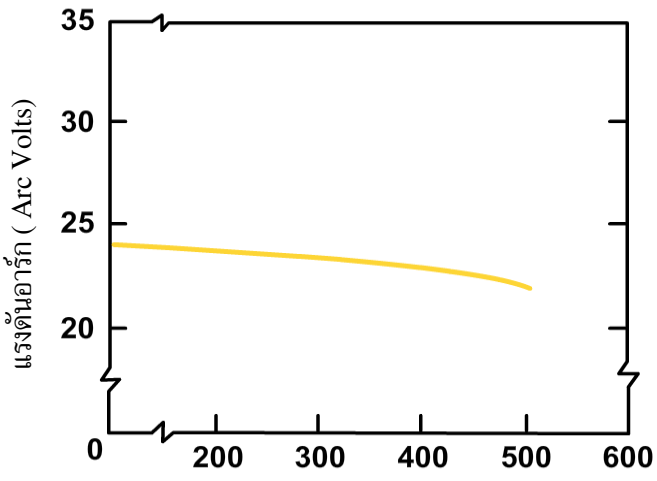
3.2.2 ระบบการอาร์ก (Welding equipment)

B.J. Moniz & R.T. Miller (2004) ได้แสดงหลักของการเชื่อมอาร์กด้วยแก๊สปกคลุมไว้ว่าสามารถสร้างการอาร์กได้ทั้งเครื่องเชื่อมชนิดกระแสคงที่ (CC) และชนิดแรงดันหรือแรงเคลื่อนคงที่ (CV) หรือกับเครื่องเชื่อมบางรุ่นที่มีทั้งสองชนิดในเครื่องเดียวกัน โดยจะเรียก กระแสคงที่ว่า Variable voltage และเรียก แรงดันคงที่ว่า Constant potential ช่างเชื่อมจะนิยมเลือกใช้ชนิดแรงดันคงที่มากกว่า เพราะเมื่อแรงดันที่เครื่องเชื่อมจ่ายออกมาคงที่จะทำให้ระบบการอาร์กสม่ำเสมอตลอดการเชื่อม เห็นได้จากรูปที่ 3.17 อ้างอิงจาก Welding Theory and Application (1976) ที่แสดงเส้นโค้งระดับของแรงดันเกือบจะคงที่ถึงแม้กระแสเชื่อมจะเพิ่มสูงขึ้นก็ตาม และยังเป็นที่ทราบกันดีว่าเครื่องเชื่อมแบบแรงดันคงที่เหมาะกับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมเปลือย (Filler wire) และ ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux core) เพราะเป็นการป้อนลวดเชื่อมอย่างต่อเนื่อง ระยะอาร์กหรือบางครั้งเรียกความยาวอาร์ก (Arc length) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างยิ่งของการเชื่อมอาร์กแบบเติมลวด เช่นเดียวกับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแบบหุ้มฟลักซ์ การเชื่อมด้วยระบบการป้อนลวดด้วยชุดป้อนลวดเชื่อม (Wire feeder) ของเครื่องเชื่อม ที่ป้อนลวดออกมาด้วยอัตราเร็วคงที่ ก็จะสามารถควบคุมระยะอาร์กได้คงที่ แต่อาจเกิดการคลาดเคลื่อนได้บ้างในบางครั้ง ที่อาจเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของผิวชิ้นงาน หรือความผิดผลาดจากการควบคุมด้วยมือของช่างเชื่อม ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยเลือกใช้วิธีการเชื่อมแบบอัตโมมัติ

เส้นโค้งระดับแรงดันอาร์ก–กระแส ยังสามารถบอกถึงอัตราของการเติมลวดเชื่อม โดยจะสัมพันธ์กับปริมาณกระแสเชื่อม ดังข้อมูลของ Lincoln electric (2017) ที่ได้กล่าวไว้ว่า ถ้ากระแสเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นอัตราการหลอมละลายก็จะเพิ่มขึ้นตาม และในทางตรงกันข้ามถ้ากระแสเชื่อมต่ำลงอัตราการหลอมละลายก็จะลดต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 3.18 จุดตำแหน่งหมายเลข 2 เป็นตำแหน่งที่มีระยะอาร์กและแรงดันอาร์กกับกระแสเชื่อมที่เหมาะสม เมื่อเทียบกับจุดตำแหน่งหมายเลข 1 และ 3 ความหมายคือ ตำแหน่งหมายเลข 1 แสดงให้เห็นว่ากรณีมีระยะอาร์กมากขึ้น แรงดันอาร์กจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่กระแสเชื่อมกลับลดลงอย่างมาก ซึ่งทำให้อัตราการหลอมเหลวของลวดเชื่อมลดลง ในกรณีนี้จะเกิดการป้อนลวดที่เร็วกว่าความสามารถในหลอมละลาย ส่วนตำแหน่งหมายเลข 3 แสดงให้เห็นว่าถ้าในกรณีที่มี

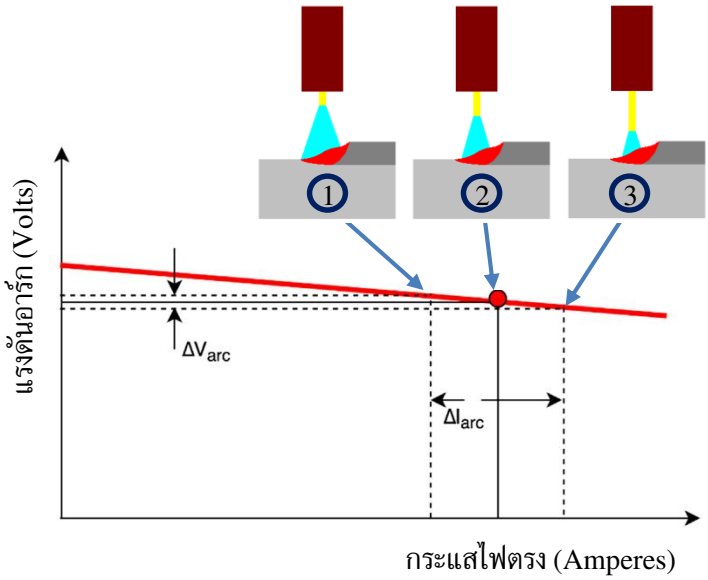
ระยะอาร์กน้อยหรือสั้น แรงดันอาร์กจะลดลงเพียงเล็กน้อย แต่กระแสเชื่อมกลับเพิ่มสูงขึ้นค่อนข้างมาก ส่งผลให้อัตราการหลอมของลวดเชื่อมสูงขึ้นตาม ในกรณีนี้จะเกิดปรากฏการณ์ลวดเชื่อมหลอมได้เร็วกว่าอัตราการป้อนของลวด อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติระบบการทำงานของเครื่องเชื่อมจะปรับสมดุลความสัมพันธ์ของระยะอาร์ก แรงดันอาร์ก กระแสเชื่อม และอัตราความเร็วป้อนลวดให้มีความเหมาะสมเองโดยอัตโนมัติในเวลาเพียงเศษส่วนวินาที โดยไม่ต้องปรับที่มือของช่างเชื่อมแต่ประการใด

ผู้ผลิตเครื่องเชื่อมอาร์กด้วยแก๊สปกคลุมส่วนใหญ่จะสร้างเครื่องเชื่อมให้มีความชันของกระแสอาร์กคงที่ เพื่อให้สามารถปรับระดับความชันของเส้นโค้งแรงดันอาร์ก–กระแสได้ตามต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ความชันของเส้นโค้งจะส่งผลต่อจำนวนกระแสลัดวงจรที่เครื่องเชื่อมจ่ายออกมา ซึ่งเป็นกระแสลัดวงจรระหว่างชิ้นงานกับลวดเชื่อม กระแสลัดวงจรนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงจำนวนแรงกัดลวดที่ปลายลวดเชื่อม (Pinch force) โดยแรงกัดลวดจะเป็นตัวบีบให้ปลายของลวดเชื่อมที่กำลังหลอมเกิดการคอดกิ่วลงกลายเป็นหยดน้ำโลหะแล้วหลุดออกจากปลายของลวดเชื่อมที่ยังไม่หลอม ซึ่งพบว่าถ้าความชันของเส้นโค้งแรงดันอาร์ก–กระแสน้อย ๆ กระแสลัดวงจรและแรงกัดลวดจะสูงกว่าที่ระดับความชันมาก ๆ จะเกิดการอาร์กแบบรุนแรงและมีสะเก็ดโลหะออกมามาก แต่ถ้าความชันของเส้นโค้งมาก กระแสลัดวงจรและแรงกัดลวดจะต่ำ มักเกิดปัญหาลวดเชื่อมแข็งตัวติดอยู่กับบ่อหลอมละลาย ดังนั้นช่างเชื่อมจึงต้องเลือกระดับของเส้นโค้งแรงดันอาร์ก–กระแสให้เหมาะสม เพราะจะช่วยให้การอาร์กจะราบเรียบหรือเสถียรภาพการอาร์ก (Arc stability) และได้แนวเชื่อมที่ปราศจากข้อบกพร่องใด ๆ อ้างอิงข้อมูลจาก TC 9–237 Military Welding Textbook (1993)



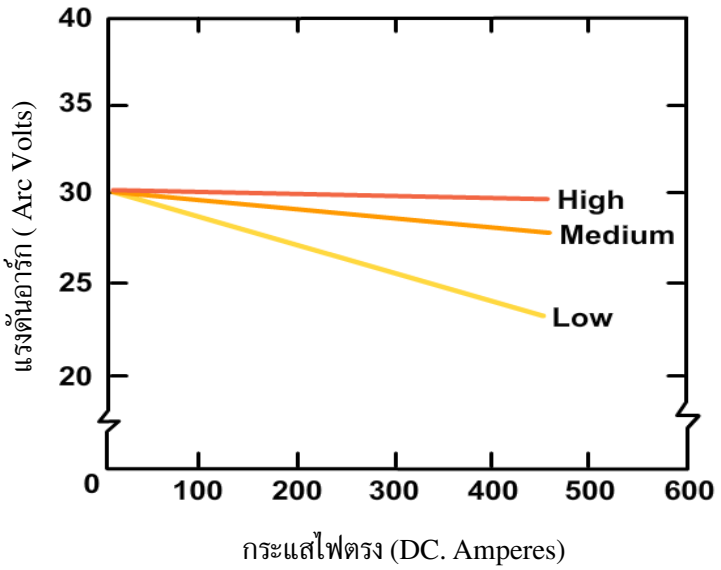
รูปที่ 3.17 เส้นโค้งแรงดันและกระแสของเครื่องเชื่อมชนิดแรงดันคงที่กระแสตรงของการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW)

ที่มา : Welding Theory and Application, TC 9–237, 1993



รูปที่ 3.18 เปรียบเทียบระยะอาร์กที่ต่างกันบนเส้นโค้งแรงดัน–กระแสของเครื่องเชื่อมชนิด CV

ที่มา : LINCOLN ELECTRIC, Process and Theory, 2017



รูปที่ 3.19 ระดับความชันของเส้นโค้งแรงดันและกระแสของเครื่องเชื่อมชนิดแรงดันคงที่กระแสตรงที่ 500 แอมแปร์ของการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW)

ที่มา : Welding Theory and Application, TC 9–237, 1993

3.2.3 การถ่ายโอนน้ำโลหะ (Weld metal transfer methods)

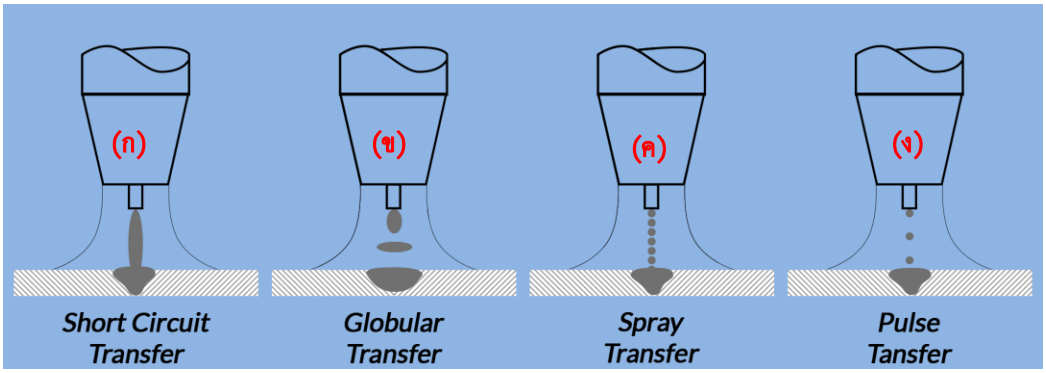
การถ่ายโอนน้ำโลหะของกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กด้วยแก๊สปกคลุม ถือว่าเป็นกลไกและขั้นตอนที่สำคัญในการที่จะนำน้ำโลหะจากการอาร์กที่ปลายของเส้นลวดเชื่อมเป็นหยดหลุดออกไปสู่บ่อหลอมละลายบนผิวชิ้นงาน เพื่อให้เนื้อโลหะติดกันเป็นแนวเชื่อม ซึ่งการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะที่หลุดออกมานี้จะอาศัยปัจจัยของแรงที่มาช่วยกระทำต่อหยดน้ำโลหะที่ปลายของเส้นลวดเชื่อม โดยแรงที่มากระทำดังกล่าว ได้แก่

1. แรงจากความดันพลาสมา (ได้จากความเสียดทานของพลาสมาเจ็ท)
2. แรงกัดที่ปลายเส้นลวดเชื่อม (การทำให้หยดโลหะหลอมเหลวคอดกิ่วลง)
3. แรงจากความดันแก๊สที่ปลายลวดเชื่อม
4. แรงดันจากการที่วัสดุกลายเป็นไอ
5. แรงแม่เหล็กไฟฟ้า
6. แรงโน้มถ่วงของโลก
7. แรงตึงผิว

ซึ่งแรงเหล่านี้จะเป็นปฏิกิริยาสัมพันธ์ร่วมกันกับองค์ประกอบของ ส่วนผสมทางเคมี ชนิดของแก๊สปกคลุม กระแสเชื่อม และรวมถึงขนาดของลวดเชื่อม ซึ่งแสดงไว้ใน BOC. Section 4 (2007)

Zach Guzman (2017) ได้เผยแพร่ข้อมูลรูปแบบวิธีการถ่ายโอนน้ำโลหะของขบวนการเชื่อม GMAW ว่ามีรูปแบบที่แตกต่างกัน 4 แบบ ดังที่กล่าวไว้ข้างล่างนี้ และดังแสดงรูปแบบกลไกการถ่ายโอนในรูปที่ 3.20 ซึ่งแต่ละรูปแบบจะทำการอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อถัดไป

ก. การถ่ายโอนแบบลัดวงจร (Short circuit transfer)
ข. การถ่ายโอนแบบหยดขนาดใหญ่ (Globular transfer)
ค. การถ่ายโอนแบบละออง (Spray transfer)
ง. การถ่ายโอนแบบพัลส์ (Pulsed transfer)

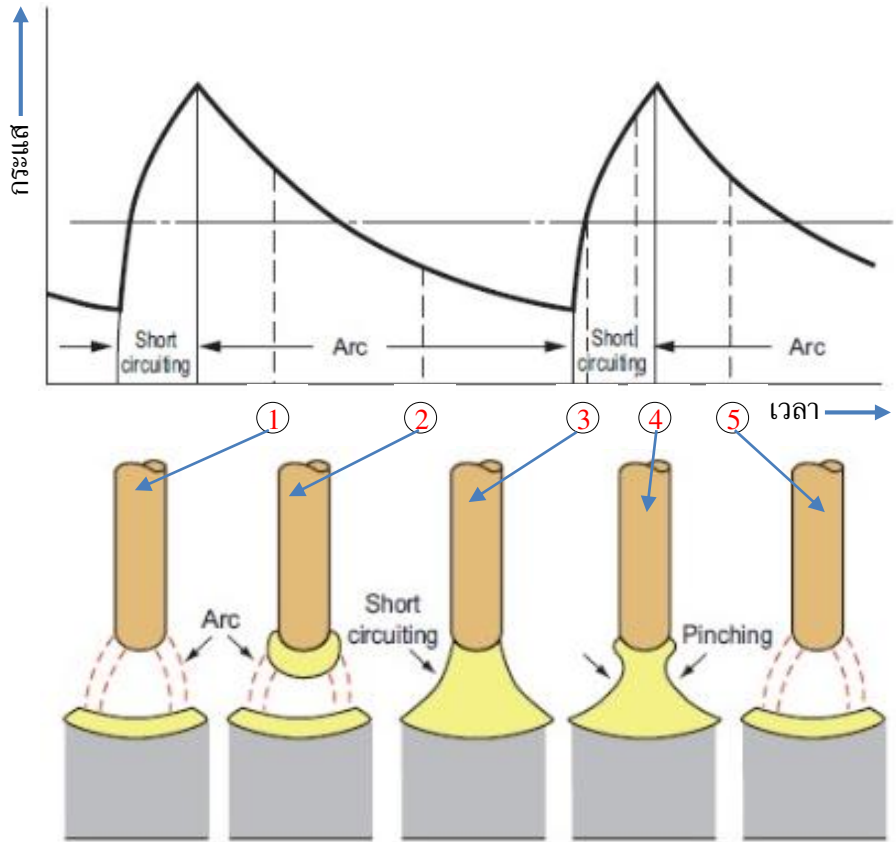


รูปที่ 3.20 ลักษณะรูปแบบการถ่ายโอนน้ำโลหะด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

ที่มา : Zach Guzman, MIG Welding Transfer Method, 2017

ก. การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร (Short circuit transfer)

KOBELCO STEEL (2018) ได้นำเสนอถึงแบบการถ่ายโอนน้ำโลหะที่ช่างเชื่อมนิยมเลือกใช้กัน โดยอาศัยหลักการของการลัดวงจรไฟฟ้า (Short circuit) ซึ่งวัฏจักรการถ่ายโอนจะเริ่มต้นเมื่อปลายลวดเชื่อมกับชิ้นงานเกิดการอาร์กและมีอุณหภูมิที่สูงมากพอที่ทำให้เกิดหยดน้ำโลหะขนาดเล็กที่ปลายลวด ซึ่งเป็นขณะเดียวกันที่ลวดเชื่อมถูกป้อนวิ่งเข้าสู่บ่อหลอมละลายด้วยอัตราความเร็วสูง ส่งผลให้หยดน้ำโลหะที่ปลายของลวดเชื่อมสัมผัสกับบ่อหลอมละลายก่อนที่จะแยกออกจากปลายของลวดเชื่อม ซึ่งเป็นต้นเหตุของการลัดวงจรไฟฟ้า ทำให้การอาร์กดับไปชั่วขณะ และในจังหวะที่ลัดวงจรอยู่นั้นจะเกิดกระแสที่เพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง ปลายของลวดเชื่อมที่กำลังหลอมเป็นหยดน้ำอยู่จะถูกกัดออกแล้วก็ถ่ายโอนหยดโลหะลงสู่บ่อหลอมละลายด้วยอาศัยแรงโน้มถ่วง (Gravity falls) กับแรงตึงผิว (Surface tension) จากกลไกที่เกิดขึ้นดังกล่าว หยดน้ำโลหะที่ปลายของลวดเชื่อมจึงเปรียบเสมือนกับสะพานที่เชื่อมระหว่างช่องว่างของปลายลวดเชื่อมกับบ่อหลอมละลายบนชิ้นงาน เมื่อหยดน้ำโลหะหยดแรกหลุดออกไปจากปลายของลวดเชื่อมแล้ว ก็จะเริ่มต้นอาร์กใหม่อีกครั้งหนึ่ง โดยจังหวะกลไกการถ่ายโอนที่กล่าวมา ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 กลไกการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร

ที่มา : KOBELCO, Fundamental of MAG Welding (CO_2 Arc Welding), 2018

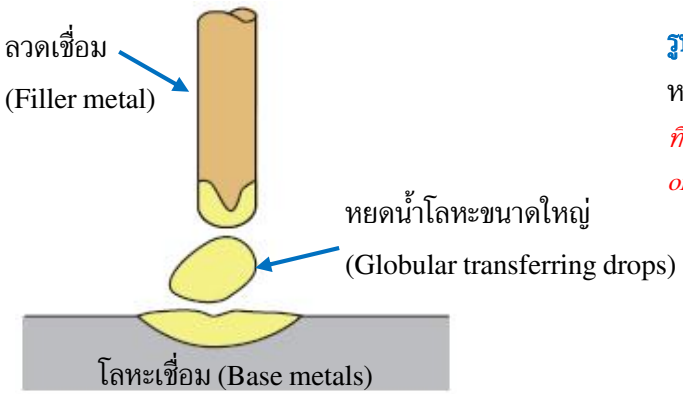
ในขณะที่ปลายของลวดเชื่อมสัมผัสกับบ่อหลอมละลายจะทำหน้าที่สเมือนฟิวส์ไฟฟ้าและเกิดการระเบิดเรียงต่อกันไปด้วยเหตุเพราะกระแสที่เพิ่มสูงขึ้น ผลของการระเบิดก่อให้เกิดช่องว่างอาร์ก (Arc gap) ขึ้นระหว่างปลายของลวดเชื่อมกับผิวของชิ้นงานเพื่อเริ่มต้นการอาร์กใหม่ สภาวะการลัดวงจรแบบนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วมาก ซึ่งมีความถี่สูงถึง 20–200 ครั้ง/วินาที ที่ใช้งานกันจริงอยู่ที่ 10–100 ครั้ง/วินาที โดยวัฏจักรการถ่ายโอนในลักษณะดังที่กล่าวมาจะเกิดขึ้นซ้ำ ๆ กันไปอย่างต่อเนื่องจนกว่าจะสิ้นสุดการเชื่อม การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจรนี้สามารถเชื่อมงานได้หลายขนาดความหนา โดยเฉพาะถ้าใช้กระแสตรงกลับขั้ว (DCRP) และมีผลกระทบกับชนิดของแก๊สปกคลุมน้อยมาก ส่วนใหญ่นิยมใช้กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 100% และแก๊สผสมอาร์กอน 75% + แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 25% แต่สำหรับกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิม แนะนำให้ใช้แก๊สผสมระหว่าง ฮีเลียม 90% + อาร์กอน 7.5% + คาร์บอนไดออกไซด์ 2.5% ซึ่งคงคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนได้ดีและให้เสถียรภาพของการอาร์กที่ดีกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อย่างเดียว

ข. การถ่ายโอนแบบหยดขนาดใหญ่ (Globular transfer)

เป็นรูปแบบการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะขนาดโตหรือมีขนาดใหญ่กว่าทุก ๆ แบบ โดยมีวัฏจักรเริ่มต้นที่เมื่อปลายของลวดเชื่อมถูกหลอมจนเป็นหยดน้ำโลหะ และหยดน้ำโลหะที่เริ่มนี้จะก่อตัวกันจนมีขนาดโตขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งจะโตกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อมประมาณ 1.5 ถึง 2 เท่า ก่อนที่จะหลุดออกไปจากปลายของลวดเชื่อม แล้วถ่ายโอนไปยังบ่อหลอมละลายที่อาศัยแรงโน้มถ่วงและแรงตึงผิว ซึ่งเป็นอัตราการเติมเนื้อโลหะในแนวเชื่อมที่สูงมากบนระดับของความร้อนค่อนข้างสูงเช่นกัน (สูงกว่าการถ่ายโอนแบบลัดวงจร) การถ่ายโอนแบบนี้จะใช้กระแสและแรงดันเชื่อมค่อนข้างต่ำแต่สูงกว่าแบบลัดวงจร คือ กระแสจะไม่เกินระดับของช่วงกระแสเปลี่ยน (Transition current) ซึ่งพิกัดของกระแสช่วงเปลี่ยนจะเพิ่มจากค่ากระแสต่ำสุดที่ขณะปลายของลวดเชื่อมกำลังหลอมไปถึงจุดที่ค่ากระแสสูงสุด โดยอัตราการถ่ายโอนน้ำโลหะที่กระแสต่ำ ๆ หยดน้ำโลหะก็จะใหญ่ ๆ จะมีเพียงประมาณ 2 ถึง 3 หยดต่อวินาทีเท่านั้น ถ้ากระแสเพิ่มสูงขึ้นขนาดหยดน้ำโลหะก็จะมีขนาดที่เล็กลง

การถ่ายโอนน้ำโลหะสู่บ่อหลอมละลายผ่านการอาร์ก รูปร่างของของหยดน้ำโลหะจะมีรูปทรงไม่สม่ำเสมอกันของแต่ละหยดและจะหยดแบบเคลื่อนที่หมุนรอบตัวเอง เพราะด้วยอิทธิพลของแรงพลักจากการอาร์ก ดังแสดงในรูปที่ 3.22 ด้วยสาเหตุจากการที่หยดโลหะกลมไม่เท่ากันจะพบว่า หยดที่มีขนาดใหญ่มากจะไปสัมผัสกับบ่อหลอมละลายก่อนทำให้ไม่เกิดการลัดวงจร การอาร์กจะดับไปชั่วขณะส่งผลให้เสถียรภาพการอาร์กต่ำ ไม่เสม่ำเสมอ เกิดการอาร์กผิดพลาดในบางจังหวะและเกิดคลื่นการอาร์ก (Arc wave) ที่รอบ ๆ หยดน้ำโลหะที่ปลายลวดเชื่อมซึ่งเป็นเหตุทำให้เกิดประกายไฟกระเด็นออกมามาก การถ่ายโอนหยดน้ำโลหะขนาดใหญ่จะอาศัยแรงโน้มถ่วงมากกว่าแรงที่เกิดจากการอาร์ก จึงเหมาะกับงานเชื่อมไม่ต้องการคุณภาพแนวเชื่อมที่สูงมาก และเชื่อมได้ดีกับงานเชื่อมที่อยู่ในแนวราบและแนวระดับ ไม่แนะนำในท่าเชื่อมเหนือศีรษะ สำหรับกระแสและแรงดันเชื่อมจะใช้ในระดับที่สูงกว่า

รูปแบบการถ่านโอนแบบลัดวงจร การถ่ายโอนหยดน้ำโลหะขนาดใหญ่จะนิยมใช้เชื่อมโลหะจำพวกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ คาร์บอนปานกลาง และเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High strength low alloy) โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือผสมกับแก๊สอาร์กอน เป็นผลงานการวิจัยของ Wesley Scott Hunko. Ph.D. (2018)



รูปที่ 3.22 กลไกการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบขนาด ใหญ่
ที่มา : KOBELCO, Fundamental of MAG Welding, 2018

ค. การถ่ายโอนแบบละออง (Spray transfer)

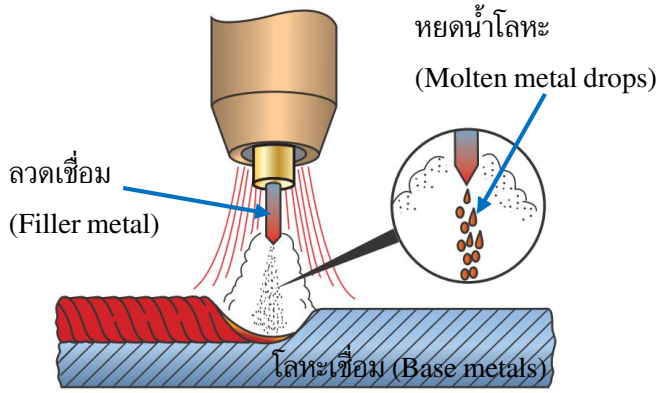
Larry Jeffus (2012) อธิบายไว้ว่ารูปแบบการถ่ายโอนน้ำโลหะที่เป็นหยดโลหะขนาดเล็กโดยวัฏจักรของการถ่ายโอนจะเริ่มต้น เมื่อปลายของลวดเชื่อมถูกหลอมเหลวแล้วเกิดเป็นหยดน้ำเล็ก ๆ ที่เราเรียกว่า ละออง ซึ่งมีขนาดที่เล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อม มีลักษณะเรียวเล็กลงตรงบริเวณส่วนที่ต่ออยู่ระหว่างของปลายลวดเชื่อม จากนั้นหยดโลหะนี้ก็จะถูกกัดให้หลุดออก (Pinched−off) จากปลายของลวดเชื่อมด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic forces) อย่างรวดเร็วผ่านพลาสมาอาร์กสู่บ่อหลอมละลายอย่างคงที่และต่อเนื่องตลอดเวลาที่กระแสไฟเชื่อมยังไหลผ่านลวดเชื่อมอยู่ ดังแสดงกลไกการถ่ายโอนในรูปที่ 3.23

การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละอองนี้จะต้องอาศัยความหนาแน่นของกระแสไฟเชื่อมที่สูง ที่เจตนาต้องการให้เกิดการหลอมของลวดเชื่อมที่รวดเร็วและมีขนาดหยดที่เล็ก ๆ ซึ่งส่งผลดีต่อความสม่ำเสมอของการอาร์ก (แตกต่างจากการถ่ายโอนแบบหยดขนาดใหญ่) ทิศทางการหยดของน้ำโลหะก็มุ่งตรงศูนย์กลางของบ่อหลอมละลาย ควบคุมทิศทางได้ง่ายตามต้องการ ถึงแม้นจะเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีขนาดใหญ่ก็สามารถหลอมเป็นหยดเล็ก ๆ ได้ทันทีและรวดเร็ว เพราะปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่งานค่อนข้างสูง (High heat input) ทำให้การถ่ายโอนแบบนี้เชื่อมแนวซึมลึกได้ดี

แก๊สปกคลุมสำหรับการถ่ายโอนแบบละอองนี้จะนิยมเลือกใช้แก๊สผสมระหว่างแก๊สอาร์กอนกับแก๊สออกซิเจน เช่น 95% Ar + 5%O หรือ 98% Ar + 2%O หรือ 99% Ar + 1%O โดยแก๊สอาร์กอนมีข้อดีช่วยให้หยดน้ำโลหะเกิดเป็นเม็ดกลมและมีขนาดเล็ก ๆ แบบละออง พร้อมกับช่วยเสริมแรงกัดหยดน้ำโลหะให้หลุดออกจากปลายลวดเชื่อมได้ง่ายขึ้น ส่วนแก๊สออกซิเจนส่งเสริมให้การอาร์กเสถียรมากยิ่งขึ้น และลดการเกิดประกายไฟที่กระเด็นออกมา สร้างการซึมลึกได้เป็นวงกว้างพร้อมกับลด

ข้อบกพร่องแบบรอยกัดแหว่งได้ดี (Undercutting) แต่ถ้าผสมในปริมาณที่มากเกินไป (เกิน 5%) จะสร้างปัญหาเกิดรูพรุนในแนวเชื่อมได้

การถ่ายโอนแบบละอองนี้สามารถใช้กับการเชื่อมโลหะทุกชนิดไม่ว่าจะเป็น เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าผสม เหล็กกล้าไร้สนิม รวมถึงโลหะนอกกลุ่มเหล็ก เช่น อลูมิเนียม แมกนีเซียม ไทเทเนียม เป็นต้น แต่ไม่เหมาะกับโลหะแผ่นบางเพราะอาจเกิดการหลอมทะลุได้ง่าย (Burn –through) ต้องหนามากว่า 3.2 มิลลิเมตร และนอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมได้กับทุกชนิดของรอยต่อ สำหรับกรณีที่รอยต่อที่มีช่องห่างของฐานรอยต่อ (Root opening) ที่กว้างมากต้องใช้แผ่นรองเชื่อมด้านหลังช่วยไม่ให้หยดน้ำโลหะไหลทะลุผ่านรอยต่อลงไปด้านล่าง

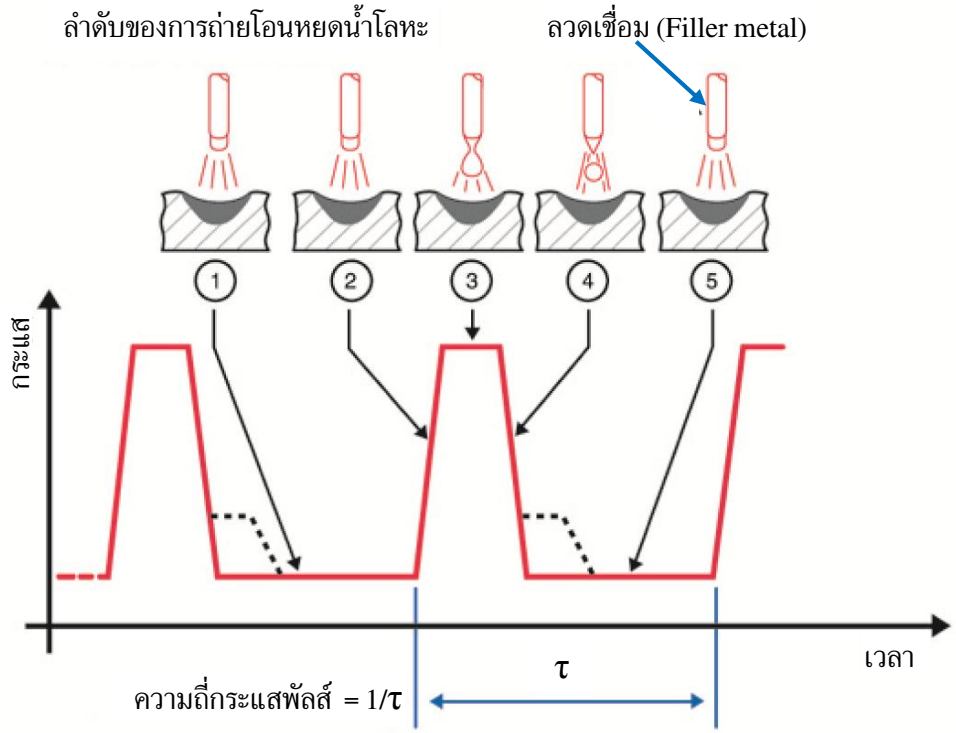


รูปที่ 3.23 กลไกการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบละออง
ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metal Fabrication, 2012

ง. การถ่ายโอนแบบพัลส์ (Pulsed transfer)

Ramesh Singh (2015) อธิบายถึงหลักของการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบพัลส์นี้ว่าเป็นแบบที่พัฒนาขึ้นมาจากรูปแบบการถ่ายโอนแบบละออง โดยนำเอาระบบการเชื่อมแบบพัลส์กระแสเชื่อมมาใช้ร่วมกัน ดังแสดงกลไกการถ่ายโอนในรูปที่ 3.24 เนื่องจากขีดจำกัดของการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบละอองจะไม่สามารถเชื่อมโลหะแบบบางได้ ซึ่งการพัลส์ของกระแสเชื่อมจากระดับต่ำสุดถึงระดับสูงสุดที่ 60 รอบ/วินาที จังหวะการพัลส์แต่ละครั้งจะทำให้ปลายของลวดเชื่อมหลอมละลายเป็นหยดโลหะได้หนึ่งหยด แล้วถ่ายโอนผ่านการอาร์กสู่บ่อหลอมละลายด้วยความถี่ที่สม่ำเสมออย่างต่อเนื่อง โดยการตั้งระบบพัลส์กระแสเชื่อมที่ระดับกระแสต่ำสุดให้อยู่ในช่วงของการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบละออง ส่วนการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหยดจะตั้งไว้ที่ระดับกระแสสูงสุด หลังจากถ่ายโอนแบบหยดแล้ว กระแสก็จะลดต่ำลงสุดถึงระดับที่ตั้งไว้ ซึ่งกระแสต่ำนี้จะช่วยให้การอาร์กยังคงเกิดอยู่ตลอดเวลา ช่วงจังหวะนี้จะไม่มีการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะ ผลของการพัลส์กระแสที่สูงแล้วต่ำลงจะมีผลต่อการควบคุมปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานเชื่อม ด้วยการเฉลี่ยความร้อนให้ต่ำกว่าการถ่ายโอนแบบละออง จึงสามารถนำไปใช้กับการเชื่อมโลหะแผนบางที่เชื่อมแล้วไม่ทะลุ เชื่อมรอยต่อที่มีระยะห่างมาก ๆ ได้ และลดการบิดตัวของชิ้นงานเชื่อม สามารถใช้เชื่อมลวดที่มีขนาดใหญ่ที่มีการถ่ายโอนผ่านอาร์กที่เป็นหยดโลหะขนาดเล็กได้ ซึ่งเป็นการประหยัดลวดเชื่อม

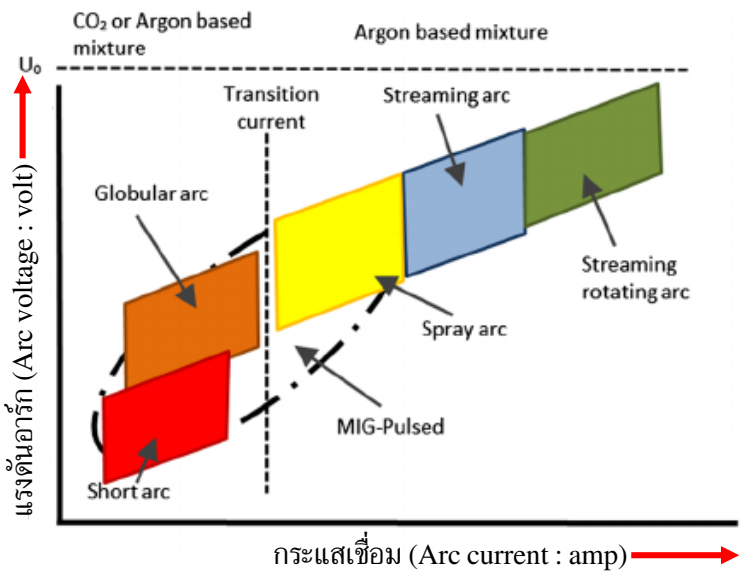
การเชื่อมด้วยกระแสพัลส์ด้วยการถ่ายโอนแบบพัลส์สามารถเชื่อมได้กับโลหะทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็นโลหะจำพวกเหล็กหรือนอกกลุ่มเหล็ก เพราะสามารถควบคุมปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานได้ เชื่อมได้กับทุกชนิดรอยต่อ บ่อหลอมละลายแข็งตัวเร็วเหมาะกับการเชื่อมที่เสี่ยงต่อการทะลุ ส่วนแก๊สสำหรับปกคลุมใช้ได้เฉพาะแก๊สเฉื่อยหรือแก๊สผสมระหว่างอาร์กอนกับฮีเลียม ไม่แนะนำให้ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพราะจะไปทำให้แรงที่จะกัดหยดโลหะให้หลุดออกจากปลายลวดเชื่อมลดน้อยลง แรงตึงผิวจะสูงขึ้นและมีประกายไฟกระเด็นออกมามาก



รูปที่ 3.24 กลไกการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบพัลส์

ที่มา : TELWIN, Easy Welding with Excellent Results, 2018

จากลักษณะรูปแบบการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะทั้ง 4 แบบ ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจะเห็นได้ชัดเจนว่าจะมีความสัมพันธ์กับปัจจัยของกระแสเชื่อม แรงดันเชื่อม ขนาดของลวดเชื่อม และชนิดของแก๊สปกคลุม ซึ่งผู้เขียนได้พยายามสรุปเปรียบเทียบเพื่อให้เห็นภาพความสัมพันธ์ของรูปแบบการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับบทความที่รวบรวมโดย Paul Kah et al. (2014) ดังแสดงในรูปที่ 3.25 ที่ได้ทำการสืบค้นและจัดทำเป็นผลสรุปที่สามารถเห็นภาพโดยรวมว่ากลไกการถ่ายโอนน้ำโลหะจากการหลอมละลายของลวดเชื่อมไปยังบ่อหลอมละลายแต่ละแบบเป็นอย่างไรเมื่อเปรียบเทียบกัน และทำให้ทราบว่าปัจจัยการเชื่อมตัวใดบ้างที่มีอิทธิพลต่อการชนิดของการถ่ายโอนน้ำโลหะ



รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ของรูปแบบการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะกับปัจจัยการเชื่อม

ที่มา : Paul Kah et.al., Usability of arc types in industrial welding, 2014

3.2.4 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเชื่อม (Welding equipment)

กรรมวิธีการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW) เป็นกระบวนการเชื่อมที่พัฒนาขึ้นมาจากการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) โดยได้สร้างชิ้นส่วนและอุปกรณ์ขึ้นมาควบคุมการเชื่อมจำนวนหลายชิ้น เพื่อให้สามารถเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น เชื่อมได้รวดเร็วและต่อเนื่องไม่ต้องหยุดเปลี่ยนลวดเชื่อม ลดปัญหาที่เกิดจากแสลก สามารถเชื่อมด้วยระบบอัตโนมัติได้ ลดต้นทุนการใช้แรงงานช่างเชื่อม ด้วยขีดความสามารถของการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นของกรรมวิธีการเชื่อมวิธีนี้จึงประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญ ๆ ที่จำเป็น ดังต่อไปนี้

ก. เครื่องเชื่อม (Welding machine)

ข. ชุดอุปกรณ์ป้อนลวด (Wire feeder equipment)

ค. หัวเชื่อมและสายเชื่อม (Welding gun and welding cables)

ง. อุปกรณ์ควบคุมแก๊สปกคลุมและอุปกรณ์อื่น ๆ (Shielding gas equipment and other)

โดยอุปกรณ์แต่ละส่วนจะมีระบบหน้าที่การทำงานที่สัมพันธ์ ซึ่งจะได้อธิบายถึงส่วนประกอบและบทบาทหน้าที่ของอุปกรณ์แต่ละส่วน รวมถึงส่วนประกอบย่อยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

ก. เครื่องเชื่อม (Welding machine)

เป็นอุปกรณ์หลักที่สำคัญ ทำหน้าที่เป็นแหล่งต้นกำลัง (Power source) ของการผลิตกระแสและแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้ในการอาร์กเชื่อม ซึ่งมีทั้งรองรับกับระบบไฟฟ้า 200 และ 380 โวลต์ และมีทั้งแบบไฟฟ้าเฟสเดียว และ สามเฟส ที่ความถี่ 50 หรือ 60 เฮิรตซ์ โดยที่ตัวของเครื่องเชื่อมจะมีหน้าปัดชุด

ควบคุมที่ช่างเชื่อมสามารถป้อนข้อมูลปัจจัยการเชื่อมสั่งการผ่านปุ่มต่าง ๆ หรืออาจมีชุดระบบสั่งการผ่านรีโมทควบคุม ขึ้นอยู่กับรุ่นและยี่ห้อของเครื่องเชื่อม เป็นที่ทราบกันดีว่าความสามารถของเครื่องเชื่อมวัดได้จากวัฏจักรทำงาน (Duty cycle) โดยทั่วไปเครื่องเชื่อมแบบกระแสคงที่ (Constant current) จะมีวัฏจักรทำงานทำงานค่อนข้างต่ำ เป็นเครื่องเชื่อมที่ใช้กับการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) และการเชื่อมอาร์กด้วยลวดทังสเตน (GTAW) ส่วนเครื่องเชื่อมสำหรับการเชื่อมแบบอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมนี้จะเป็นเครื่องเชื่อมแบบแรงดันคงที่ (Constant voltage) ซึ่งมีวัฏจักรทำงานที่สูงถึง 100 % นั่นหมายถึงว่า เครื่องเชื่อมสามารถทำการเชื่อมได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องมีเวลาหยุดพัก จะเหมาะกับการนำไปใช้ในระบบการเชื่อมแบบอัตโนมัติ และสามารถใช้เชื่อมกับทุกรูปแบบของการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะ เพราะมีความชันของกระแสน้อย นอกจากนี้เครื่องเชื่อมแบบแรงดันคงที่ยังสามารถทำให้เกิดกระแสลัดวงจรสูง และเป็นไปอย่างสม่ำเสมอเมื่อลวดเชื่อมสัมผัสกับโลหะงาน พร้อมยังช่วยขจัดการหลอมย้อน (Burn back) ของลวดเชื่อมที่จะเกิดการหลอมติดกับปลายท่อนำกระแสในกรณีที่ระยะอาร์กมากเกินไป

Lincoln Electric (2021) นำเสนอข้อมูลผลิตภัณฑ์เครื่องเชื่อมไว้ว่า เครื่องเชื่อมชนิดแรงดันคงที่สำหรับการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมนี้ จะมีความสามารถที่จะปรับระยะอาร์ก ปริมาณกระแส และ อัตราเร็วของการป้อนลวด ให้เหมาะสมได้เองโดยอัตโนมัติ ที่เรียกกันว่า เครื่องสามารถช่วยเหลือตัวเองได้ กล่าวคือ ถ้าขณะทำการเชื่อมระยะอาร์กน้อยเกินไป กระแสจะเพิ่มขึ้นอัตโนมัติ ลวดเชื่อมจะมีอัตราการสิ้นเปลืองที่มากกว่า อัตราการป้อนลวดเชื่อม ซึ่งเครื่องเชื่อมจะปรับพารามิเตอร์เองจนเหมาะสม หรือในทางกลับกันถ้าระยะอาร์กมากเกินไป กระแสไฟจะลดลงเองอย่างอัตโนมัติ อัตราการเร็วป้อนลวดเชื่อมก็จะเร็วกว่าอัตราการสิ้นเปลืองของลวดเชื่อม เครื่องเชื่อมก็จะปรับเองโดยอัตโนมัติเช่นกัน ผู้ผลิตเครื่องเชื่อมได้ออกแบบระบบของเครื่องให้สามารถเลือกกระแสไฟเชื่อมได้ทั้ง ชนิดกระแสตรงขั้วลบต่อกับลวดเชื่อม (DCEN) ชนิดกระแสตรงขั้วบวกต่อกับลวดเชื่อม (DCEP) ไม่แนะนำให้เลือกใช้ระบบไฟฟ้ากระแสสลับเหตุผลเพราะลักษณะการเป็นวัฏจักรของกระแสต่ำ ทำให้อัตราการสิ้นเปลืองของลวดเชื่อมไม่สม่ำเสมอขณะทำการเชื่อม แต่แนะนำให้ใช้ระบบกระแสไฟตรงแบบพัลส์ (Pulsed direct current) ซึ่งปกติเครื่องเชื่อมรุ่นใหม่ออกแบบให้มีระบบพัลส์อยู่แล้วภายในเครื่องเชื่อมเพียงเครื่องเดียว เครื่องเชื่อมสำหรับการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมจะใช้ชนิดกระแสไฟตรง แบบแรงดันคงที่ โดยจะได้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิด 2 แหล่ง คือ

1. แหล่งพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องปั่นไฟที่เรียกกันว่า เครื่องเชื่อมแบบมอเตอร์–เจนเนอเรเตอร์ (Motor–Generator welding machine) เป็นเครื่องเชื่อมที่ได้รับไฟฟ้ากระแสตรงจากการปั่นของมอเตอร์ไฟฟ้า หรือกรณีกับงานภาคสนามในสถานที่ปฏิบัติงานไม่มีระบบไฟฟ้ารองรับ จะได้รับจากเครื่องยนต์ปั่นกระแสไฟตรงที่ติดตั้งไว้ในตัวของเครื่องเชื่อม นิยมและจำเป็นอย่างมากกับงานในงานภาคสนาม แต่มีข้อด้อยที่เครื่องมีเสียงดัง ราคาค่อนข้างแพง ใช้กำลังไฟฟ้ามาก ค่าบำรุงรักษาสูง สามารถเป็นได้ทั้งเครื่องเชื่อมแบบแรงดันคงที่ (Constant– voltage welding machine) และเครื่องเชื่อมแบบ

กระแสคงที่ (Constant– current welding machine) ดังแสดงลักษณะรูปแบบตัวอย่างของเครื่องในรูปที่ 3.26 (ก)

2. แหล่งพลังจากระบบของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่าเครื่องเชื่อมหม้อแปลง (Transformer welding machine) มีทั้งชนิดหนึ่งเฟสและสามเฟส เป็นเครื่องเชื่อมที่นิยมเลือกใช้กับการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม โดยกระแสจะถูกจ่ายตรงเข้าสู่ขบวนการอาร์ก ไม่นิยมเลือกใช้ระบบหนึ่งเฟส เพราะมีวัฏจักรทำงานได้เพียง 60% เท่านั้น และไม่สามารถสร้างรูปแบบการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบลัดวงจรได้ ดังนั้นจึงมักพบเห็นช่างเชื่อมนิยมเลือกใช้งานเครื่องเชื่อมหม้อแปลงระบบสามเฟส ที่มีการป้อนกระแสไฟตรงเข้าสู่การอาร์กอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งระบบหม้อแปลงนี้สามารถเป็นได้ทั้งเครื่องเชื่อมแบบแรงดันคงที่ (Constant– voltage welding machine) และเครื่องเชื่อมแบบกระแสคงที่ (Constant–current welding machine) อยู่ในเครื่องเดียวกัน จึงสามารถใช้เชื่อมกับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ได้ เพียงแค่เปลี่ยนขั้วของสายเชื่อมเท่านั้น การที่มีระบบไฟฟ้าสามเฟสจะมีช่วยส่งเสริมเสถียรภาพการอาร์กสูงกว่าหนึ่งเฟสและสามารถช่วยให้ชุดป้อนลวดมีอัตราการป้อนลวดที่คงที่ เพราะมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสเชื่อมน้อยมาก ดังแสดงลักษณะรูปแบบตัวอย่างของเครื่องในรูปที่ 3.26 (ข)



(ก) เครื่องเชื่อมแบบมอเตอร์–เจนเนอเรเตอร์

ที่มา : Lincoln Electric, Welding Machine, 2018



(ข) เครื่องเชื่อมแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

ที่มา : Laston, Welding Machine, 2019

รูปที่ 3.26 ชนิดเครื่องเชื่อมสำหรับการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW)

การควบคุมระบบการทำงานของเครื่องเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมจะมีปุ่มปรับต่าง ๆ ที่ตำแหน่งตัวเครื่อง บนหัวเชื่อม และบนชุดป้อนลวดเชื่อมหรือกล่องควบคุม (Control box) หรือบางรุ่นของเครื่องสามารถควบคุมด้วยรีโมท (Remote control) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเครื่องเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ ที่ช่างเชื่อมอยู่ในระยะไกล การควบคุมผ่านระบบสั่งการเพื่อต้องการควบคุมปัจจัยการเชื่อมที่สำคัญได้แก่

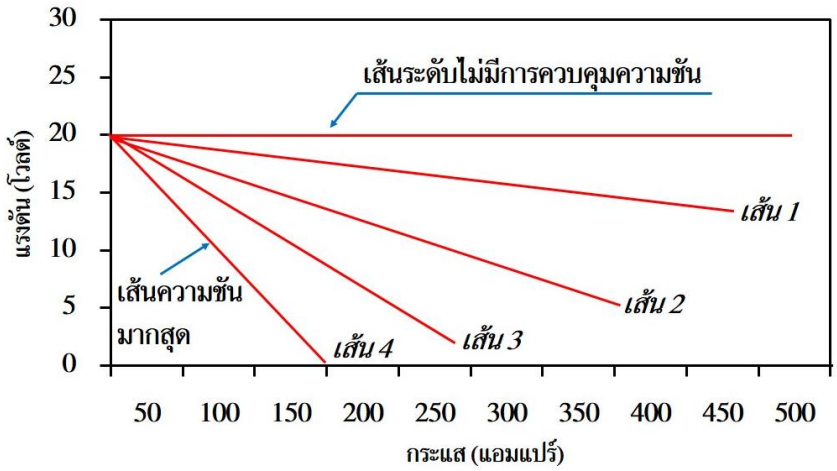
– *การควบคุมแรงดัน* สามารถหมุนปรับเป็นขั้น ๆ (Tapped) ส่วนมาก มีประมาณ 7 ขั้นความละเอียดของการปรับจึงไม่ค่อยละเอียด หรือต่อเนื่องได้จากชุดแผงควบคุมที่อยู่หน้าตัวเครื่องเชื่อมซึ่งจะ

สามารถปรับได้ค่อนข้างละเอียดมากกว่า

– *การควบคุมกระแส* เครื่องเชื่อมแบบแรงดันคงที่ไม่สามารถตั้งปรับกระแสได้โดยตรง แต่จะได้จากการตั้งอัตราความเร็วป้อนลวดเชื่อมจากชุดอุปกรณ์ป้อนลวดได้

– *การควบคุมความชัน* สามารถควบคุมได้จากปุ่มปรับที่หน้าตัวเครื่องเชื่อมจะใช้ควบคุมความชันของเส้นโค้งแรงดัน–กระแส โดยทั่วไปเครื่องเชื่อมมีการควบคุมความชันอยู่ 2 ชนิด คือ

1. เครื่องเชื่อมชนิดที่มีความชันคงที่ (Fixed – slope welding machines) เป็นเครื่องเชื่อมที่จะใช้กับการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม ที่มีการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบละออง นิยมใช้เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน ด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งความชันจะถูกออกแบบไว้คงที่แน่นอนแล้วในตัวเครื่องไม่ต้องปรับแต่งใด ๆ 2. เครื่องเชื่อมชนิดที่มีความชันแปรผัน (Variable – slope welding machines) เป็นเครื่องเชื่อมที่สามารถปรับระดับความชันของเส้นโค้งแรงดัน–กระแสได้ตามต้องการ ทำให้เครื่องเชื่อมชนิดนี้สามารถเชื่อมได้หลากหลายทั้งชนิดของโลหะเชื่อม (Material metals) และขนาดของลวดเชื่อม (Wire electrode diameter) ดังรูปแบบการปรับแสดงในรูปที่ 3.27 โดยมีความหมายดังนี้ ถ้าปรับจากแนวระดับลงมาเป็นขั้น ๆ จะทำให้เกิดการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบลัดวงจรที่มีประสิทธิภาพดีขึ้นและเสถียรมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อลดต่ำลงมามากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซ้ำยังช่วยลดความรุนแรงของการอาร์ก เม็ดโลหะกระเด็นรอบข้างแนวเชื่อมน้อยลง เหมาะสมอย่างยิ่งกับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งได้แสดงไว้ในผลการวิจัยของผู้เขียน วารสาร Advance joining processes : Vol.1, (2020)

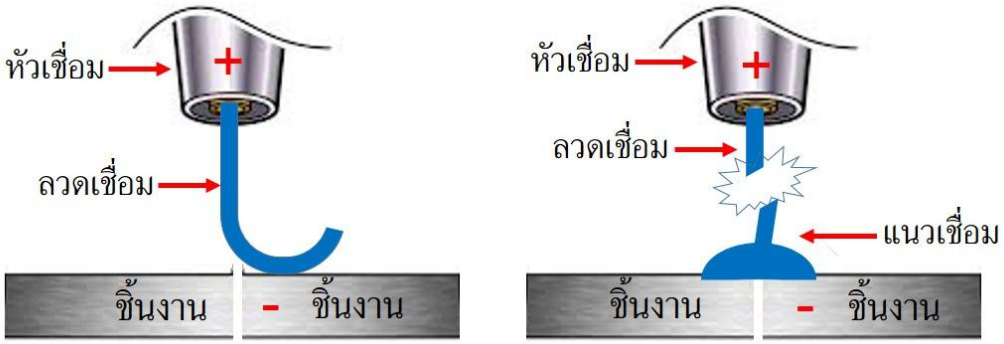


รูปที่ 3.27 รูปแบบการปรับเส้นความชันแรงดัน–กระแสของเครื่องเชื่อมชนิดความชันแปรผัน

ที่มา : Larry Jeffus and Lawrence Bower, 2010 (เขียนใหม่)

จากรูปแบบของการปรับเส้นความชันในรูปที่ 3.27 Larry Jeffus et al. (2010) ได้อธิบายความหมายไว้ว่า เส้นระดับที่ไม่มีความชันเมื่อทำการเชื่อมจะเกิดการอาร์กที่รุนแรง เนื่องจากเกิดการหลอมที่รวดเร็วโดยเฉพาะการเชื่อมด้วยลวดขนาดเล็ก ๆ ซึ่งเครื่องเชื่อมก็จะเพิ่มกระแสสูงขึ้นอย่าง

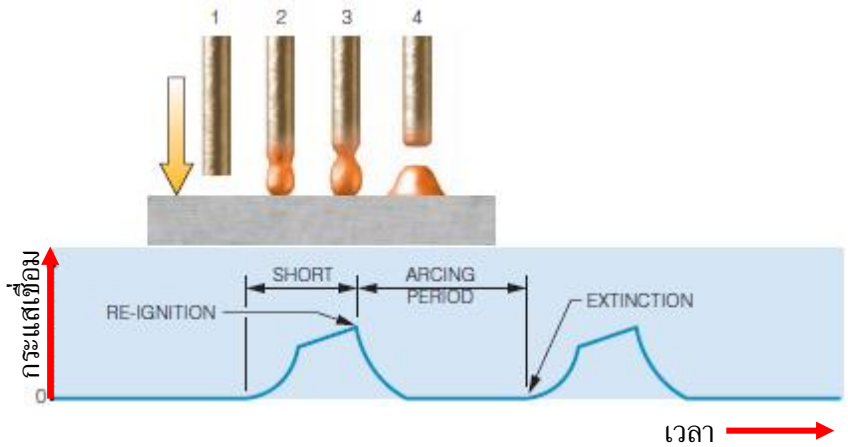
อัตโนมัติ ส่งผลให้เกิดการระเบิดขึ้นที่ปลายของลวดเชื่อมทำให้เกิดมีเม็ดโลหะกระเด็นออกมามากข้างแนวเชื่อม แต่เมื่อทำการปรับเส้นความชันลดลงมาตำแหน่ง เส้น 2 และ 3 จะสามารถช่วยลดปริมาณกระแสไฟเชื่อมลง ประสิทธิภาพของการเชื่อมก็จะดีขึ้นตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามถ้าปรับลดมากเกินไปจนถึง เส้น 4 ที่ความชันมากสุด (Steep slope) ก็ไม่เป็นผลดี เหตุเพราะกระแสไฟเชื่อมจะต่ำมากเกินไปจนไม่มากพอที่จะสร้างหยดน้ำโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการถ่ายโอนแบบลัดวงจรปลายลวดเชื่อมจะติดแข็งกับผิวชิ้นงานเชื่อม โดยปลายของลวดเชื่อมก็เกิดการโค้งงอขณะป้อนออกมาจากชนกับผิวโลหะชิ้นงาน ก่อนที่จะหลอมแล้วขาดออกไปที่ซึ่งยังส่วนที่ยังไม่หลอมละลายติดอยู่กับบ่อหลอมละลายบนชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.28



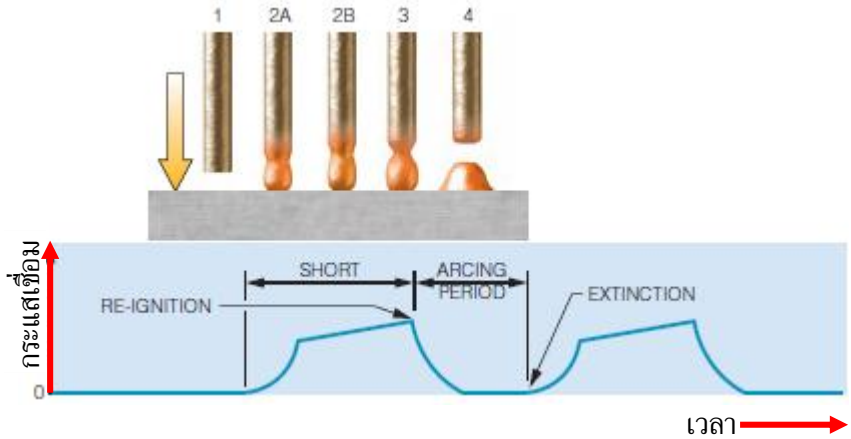
รูปที่ 3.28 ลักษณะพฤติกรรมของลวดเชื่อมที่เกิดจากการปรับเส้นโค้งความชันมากเกินไป

ที่มา : Lincoin Electric , Modes of metal transfer 2015 (เขียนใหม่)

– *การควบคุมความเหนี่ยวนำ* เครื่องเชื่อมมีระบบความเหนี่ยวนำ (Inductance) หรือบางครั้งเรียกว่า การหน่วงกระแส เพื่อใช้ควบคุมอัตราของกระแสที่เพิ่มขึ้น (Rate of current rise) ไม่ให้เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันในขณะลัดวงจร ซึ่งความเหนี่ยวนำนี้จะมีความสำคัญต่อการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบลัดวงจร เพราะจะเป็นตัวเพิ่มเวลาของการอาร์กส่งผลให้การลัดวงจรต่อวินาทีลดลง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ช่วยทำให้ระบบการอาร์กขณะเชื่อมนิ่ง หรือเสถียรมากมากขึ้น (Soft arc)และสามารถสร้างบ่อหลอมละลาย (Weld pool) ได้ง่ายขึ้น การซึมลึกก็ดีขึ้น (Penetration) เม็ดโลหะกระเด็นออกมาน้อย โดยได้แสดงกลไกความเหนี่ยวนำโดยเฉลี่ยดังในรูปที่ 3.29 (ก) ส่วนรูป (ข) เป็นการแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงในกรณีที่มีความเหนี่ยวนำที่เพิ่มสูงขึ้น (Increased inductance) ความเหนี่ยวนำของเครื่องเชื่อมที่กล่าวถึงนี้จะควบคุมชนิดกระแสไฟตรง จึงไม่มีผลต่อการตั้งค่าแรงดันหรือการควบคุมความชันของเครื่องเชื่อมแต่อย่างใด อ้างอิงข้อมูลจาก Michael A. Reeser (2017)



(ก) รูปแบบกลไกความเหนี่ยวนำโดยเฉลี่ย (Average inductance)



(ข) รูปแบบกลไกความเหนี่ยวนำที่เพิ่มขึ้น (Increased inductance)

รูปที่ 3.29 รูปแบบกลไกความเหนี่ยวนำ (Inductance) ของเครื่องเชื่อม

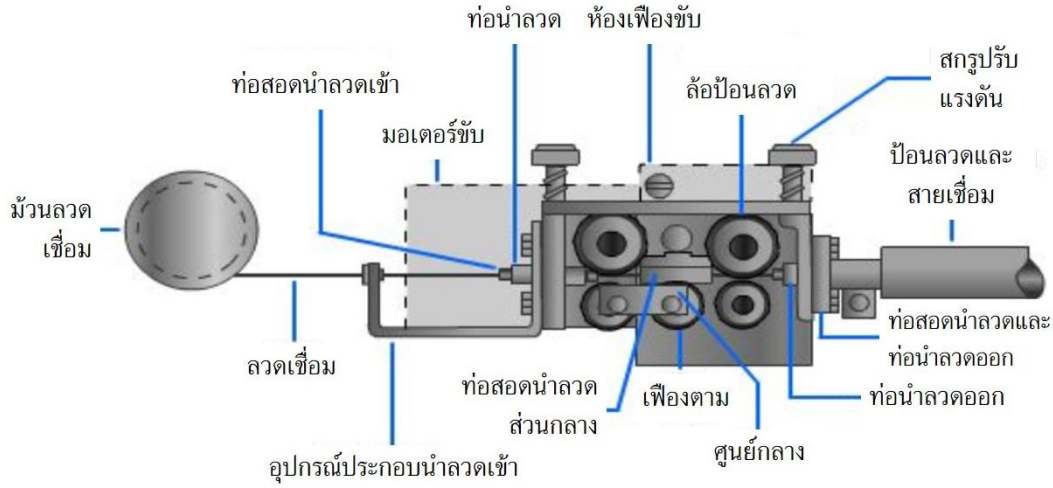
ที่มา : Weld knowledge, 2015

ข. ชุดอุปกรณ์ป้อนลวด (Wire feeder equipment)

กรรมวิธีการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีชุดอุปกรณ์ป้อนส่งลวดเชื่อม โดยลวดเชื่อมจะมีลักษณะเป็นเส้นลวดกลมที่ม้วนบรรจุอยู่ในชุดของล้อม้วนลวดเชื่อม (Wire roll) การดึงเส้นลวดเชื่อมออกจากม้วนลวดอาศัยกำลังจากมอเตอร์ เพื่อขับลวดผ่านท่อนำลวดและหัวเชื่อมออกมาอาร์กกับชิ้นงาน ซึ่งระบบของชุดอุปกรณ์การป้อนลวด ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนของระบบควบคุมการป้อนลวดเชื่อม กับส่วนของชุดล้อขับลวดเชื่อม ซึ่งส่วนประกอบของทั้งสองส่วนดังแสดงในรูปที่ 3.30 ระบบป้อนลวดส่วนใหญ่ที่ใช้กับการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม มักเป็นชนิดอัตราเร็วคงที่ (Constant speed) ซึ่งใช้กับเครื่องเชื่อมแบบแรงดันคงที่ นั่นหมายถึงว่าอัตราความเร็ว

ป้อนลวดเชื่อมจะถูกกำหนดก่อนทำการเชื่อม อัตราเร็วป้อนลวดเชื่อมจะเป็นตัวควบคุมจำนวนกระแสเชื่อม และกระแสเชื่อมจะเป็นตัวกำหนดปริมาณความร้อนที่เกิดจากการอาร์ก

อัตราเร็วของการป้อนลวดเชื่อมที่ดีต้องสม่ำเสมอ ถ้าไม่สม่ำเสมอจะมีผลกระทบต่อการซึมลึก และขนาดของแนวเชื่อม ดังนั้นการออกแบบมอเตอร์จึงต้องให้สามารถควบคุมอัตราความเร็วให้เท่ากันตลอด ถึงแม้จะมีภาระโหลดมากระทำต่อมอเตอร์หรือมีแรงดันกระเพื่อมเข้าสู่มอเตอร์ก็ตาม สำหรับกรณีเลือกใช้เครื่องเชื่อมกระแสคงที่ อัตราเร็วของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงอย่างอัตโนมัติตามการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอัตราเร็วป้อนลวดเชื่อม ขณะที่ความยาวอาร์กเปลี่ยนไปแต่แรงดันยังคงที่ตลอดเวลา

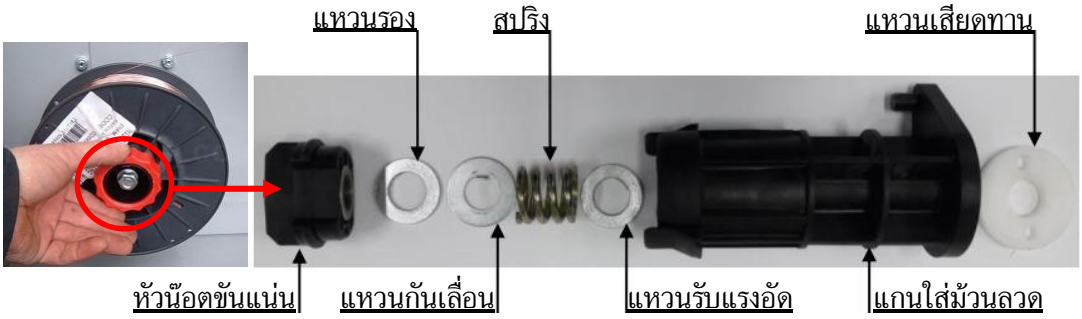


รูปที่ 3.30 ชุดอุปกรณ์ป้อนลวด (Wire feeder equipment)

ที่มา : Welding Theory and Application, TC 9–237, 2013

ชุดอุปกรณ์ป้อนลวด มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ได้แก่

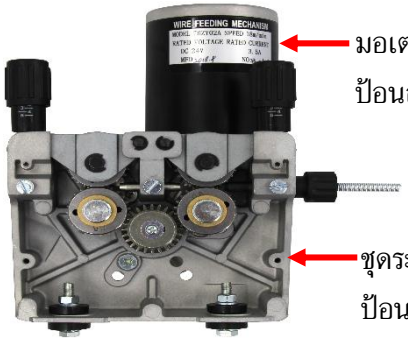
1. ม้วนลวดเชื่อม เป็นส่วนบรรจุเส้นลวดเชื่อมไว้ในล้อม้วนซึ่งมีน้ำหนักในตัวเอง ดังนั้นขณะทำการหมุนเอาปลายลวดเข้าสู่ท่อนำลวดจะเกิดแรงเฉื่อยขึ้น ต้องระวังให้จังหวะการหยุดของม้วนลวดเชื่อมสัมพันธ์กันกับล้อขับลวดเชื่อม เพื่อป้องกันลวดเชื่อมคลี่ออกจากม้วน หรือป้องกันลวดเชื่อมจะยังป้อนต่อไปอีกไม่หยุด จึงจำเป็นต้องมีระบบเบรคไว้สำหรับเบรคแรงเฉื่อยของม้วนลวดเชื่อม ซึ่งระบบเบรคสามารถปรับความฝืดได้โดยอาศัยแรงกดจากสปริงที่ไปดันแหวนเสียดทาน ก็จะทำเกิดสภาพความฝืดขึ้นที่ผิวของเส้นลวดเชื่อม ซึ่งเครื่องเชื่อมทุกเครื่องจะมีชุดอุปกรณ์เบรกนี้อยู่ภายในชุดอุปกรณ์ป้อนลวด ส่วนประกอบของม้วนลวดเชื่อมและระบบเบรกลวดเชื่อมประกอบด้วยชิ้นส่วนเล็ก ๆ หลายชิ้นที่สามารถถอดเปลี่ยนประกอบได้ไม่ยาก ช่างเชื่อมสามารถทำได้เองและไม่เกิดอันตรายใด ๆ ดังแสดงจำนวนชิ้นส่วนและลำดับตำแหน่งของการประกอบชิ้นส่วน ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 ม้วนลวดเชื่อมและระบบเบรก

ที่มา : Welding equipment and application, 2013

2. มอเตอร์ป้อนลวดเชื่อม เป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับการควบคุมอัตราเร็วป้อนลวดเชื่อม โดยจะควบคุมด้วยระบบอิเลคทรอนิกส์ซึ่งติดตั้งอยู่กับชุดระบบล้อขับป้อนลวดเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.32 เพื่อที่จะทำให้อัตราการป้อนลวดคงที่ เพราะถ้าไม่คงที่จะส่งผลให้กระแสไฟเชื่อมไม่คงที่ ภายในระบบของมอเตอร์จะมีอุปกรณ์เบรกไม่ให้ป้อนลวดเชื่อมออกมาโดยไม่จำเป็นขณะสิ้นสุดการเชื่อม และยังมีระบบชุดวงจรหลอมย้อน (Burn back) เพื่อให้กระแสเชื่อมยังคงที่ พร้อมกับช่วยให้ปลายลวดเชื่อมเมื่อหยุดป้อนแล้วมีปริมาณการหลอมย้อนที่แน่นอนปริมาณหนึ่ง ทำให้ง่ายต่อการเริ่มต้นเชื่อม



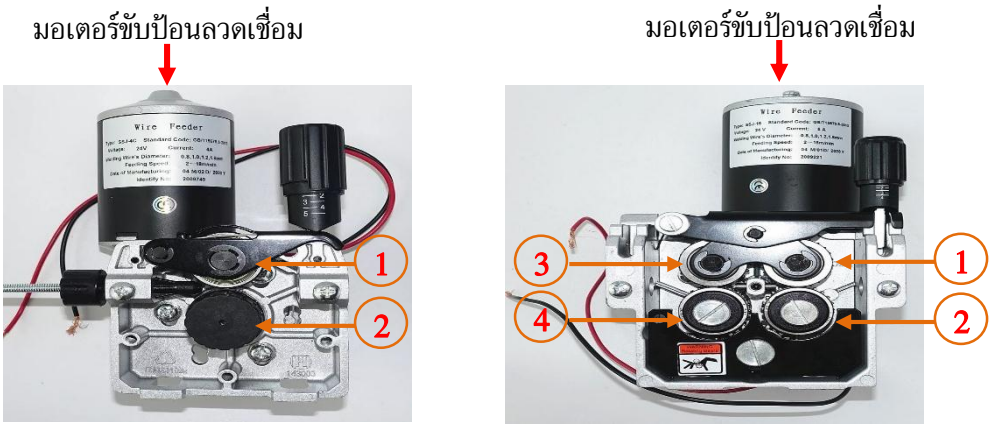
รูปที่ 3.32 มอเตอร์ขับป้อนลวดเชื่อม

ที่มา : Lincoln Electric, Welding Machine, 2016

3. ล้อตัดลวดเชื่อม เป็นส่วนที่ใช้ทำการตัดลวดเชื่อมให้ตรงพร้อมที่จะป้อนเข้าสู่หัวเชื่อม (สำหรับลวดเชื่อมที่อ่อนอาจไม่จำเป็นต้องใช้) ซึ่งอาจเป็นชุดเดียวกันกับล้อขับป้อนลวด ส่วนใหญ่เป็นแบบ 3 ล้อ มีร่องเป็นแบบครึ่งวงกลมตัวยู โดย 2 ล้อจะทำการติดตั้งตายตัว ส่วนอีก 1 จะสามารถปรับขึ้นลงได้ระหว่างล้อทั้งสอง เหมาะสำหรับเส้นลวดเชื่อมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่โตกว่า 1.2 มิลลิเมตร และความฝืดของท่อนำลวดและท่อนำกระแสต้องไม่มากเกินไป

4. ล้อป้อนลวดเชื่อม เป็นส่วนอุปกรณ์ทำหน้าที่ขับดึงลวดเชื่อมออกจากม้วนลวดแล้วผลักดันผ่านท่อนำลวดเข้าสู่หัวเชื่อม ล้อป้อนลวดจะติดอยู่กับมอเตอร์เพื่อหมุนล้อลวดเชื่อม ซึ่งล้อป้อนลวด

เชื่อมนี้จะต้องเปลี่ยนตามขนาดความโตของลวดและชนิดของวัสดุลวดเชื่อม โดยล้อป้อนลวดจะวางเรียงกันเป็นคู่ ซึ่งมีทั้งแบบชนิด 2 ล้อ (1 คู่) และแบบชนิด 4 ล้อ (2 คู่) จะขึ้นอยู่กับแต่ละรุ่นของเครื่องที่ได้ออกแบบใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 3.33 (ก) และ (ข) ตามลำดับ และล้อขับลวดมีหลายรูปแบบจะมีทั้งแบบลักษณะเป็นร่องรูปตัวยู (U) รูปตัววี (V) รูปคางหมูหรือรูปครึ่งวงกลม ซึ่งอาจเป็นร่องผิวเรียบหรือผิวพิมพ์ลายดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.34

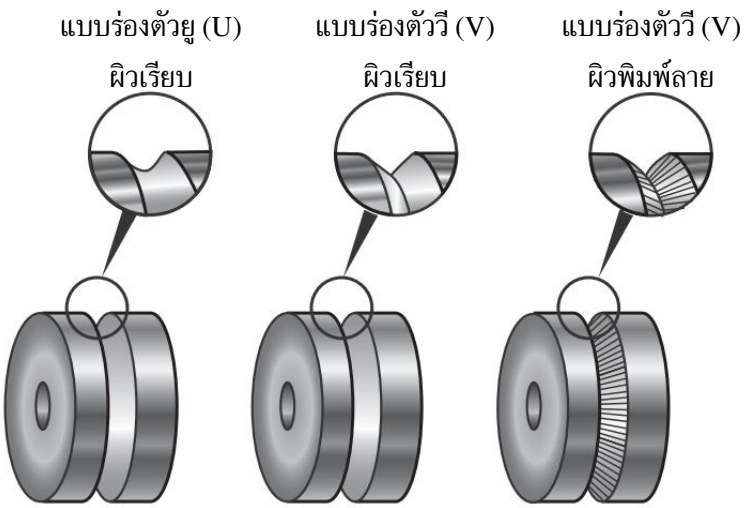


(ก) ชุดระบบล้อขับป้อนลวดเชื่อม แบบชนิด 2 ล้อ (1 คู่)

(ข) ชุดระบบล้อขับป้อนลวดเชื่อม แบบชนิด 4 ล้อ (2 คู่)

รูปที่ 3.33 ชุดระบบล้อขับป้อนลวดเชื่อม

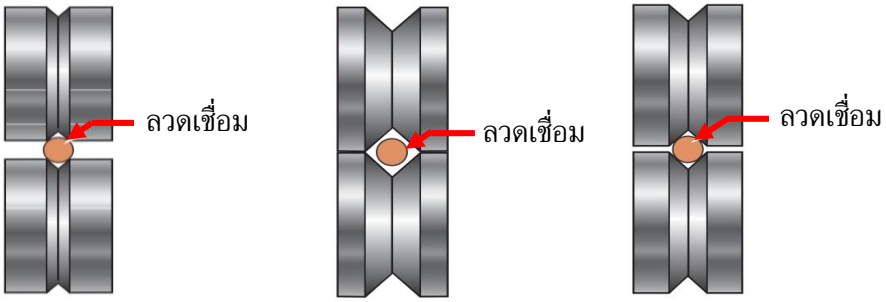
ที่มา : Lincoln Electric, Welding Machine, 2016



รูปที่ 3.34 ตัวอย่างลักษณะรูปแบบของร่องล้อขับป้อนลวดเชื่อม

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metal Fabrication, 2012

นอกจากจะพิจารณาเลือกใช้ชนิดของร่องล้อแล้วนั้น การเลือกขนาดของร่องล้อป้อนลวดก็ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับขนาดและชนิดของวัสดุลวดเชื่อมด้วย ต้องไม่คับหรือหลวมมากเกินไปดังแสดงเปรียบเทียบความเหมาะสมในรูปที่ 3.35



(ก) ร่องล้อเล็กเกินไป **(ข)** ร่องล้อใหญ่เกินไป **(ค)** ร่องล้อถูกต้องเหมาะสม

รูปที่ 3.35 การพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะของร่องล้อขับป้อนลวดเชื่อมที่ถูกต้องเหมาะสม

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metal Fabrication, 2012

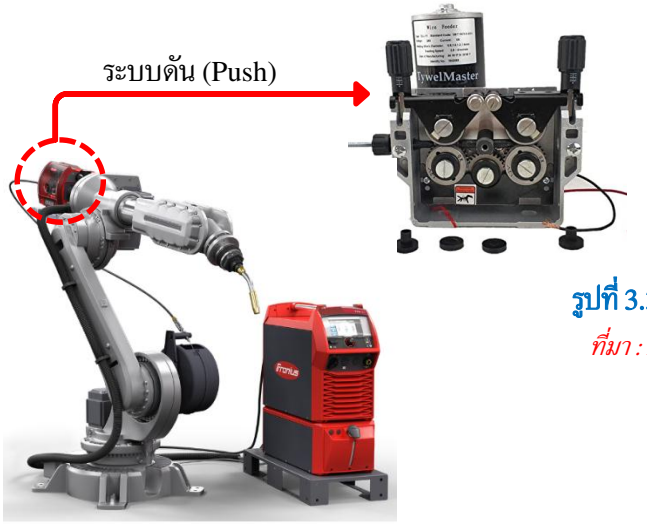
ระบบการป้อนลวดเชื่อมจากม้วนลวดเชื่อมเข้าสู่หัวเชื่อม (Wire feed system)

ระบบการป้อนลวดเชื่อมของกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม ถือว่าเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากต่อคุณภาพของแนวเชื่อม โดยช่างเชื่อมต้องพิจารณาเลือกใช้ระบบให้เหมาะสมด้วยอาศัยการพิจารณาจากปัจจัยของชนิดวัสดุลวดเชื่อม ขนาดของลวดเชื่อม และระยะห่างระหว่างหัวเชื่อมกับม้วนลวดเชื่อม ซึ่งระบบของการป้อนลวดเชื่อมมี 3 วิธีการ อ้างอิงจากการอธิบายไว้หนังสือ Modern Welding โดย Andrew D. Althouse et al. (2018) ได้แก่

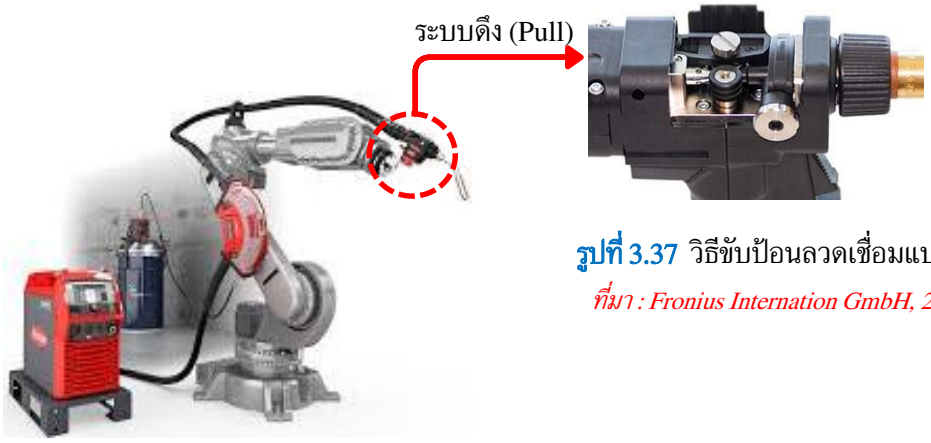
1. วิธีการดันลวดเชื่อม (Push-type wire feed system) เป็นระบบการป้อนลวดเชื่อมด้วยการใช้ชุดเฟืองขับที่ขับด้วยมอเตอร์ ซึ่งอาจเป็นแบบชนิด 2 ล้อ (1 คู่) หรือ แบบชนิด 4 ล้อ (2 คู่) ทำหน้าที่ดันลวดจากม้วนลวดผ่านสายเชื่อมออกไปสู่หัวเชื่อม โดยที่ความยาวของสายเชื่อมสำหรับลวดเชื่อมประเภทเหล็กจะต้องยาวไม่เกิน 10 ฟุตหรือ 3.05 เมตร และสำหรับลวดเชื่อมประเภทอลูมิเนียมสายเชื่อมจะต้องยาวไม่เกิน 6 ฟุต ชุดระบบของวิธีการป้อนลวดแบบดันนี้มีทั้งแบบที่ติดตั้งไว้ภายในตัวของเครื่องเชื่อม และแบบที่แยกออกจากตัวเครื่องเชื่อม ที่รู้จักกันว่า ยูนิเวอร์แซล (Universal unit) ดังแสดงกลไกของระบบในรูปที่ 3.36

2. วิธีการดึงลวดเชื่อม (Pull-type wire feed system) เป็นระบบการป้อนลวดเชื่อมที่มีชุดระบบการดึงลวดเชื่อมจากม้วนลวดเชื่อม ด้วยกำลังของมอเตอร์ซึ่งประกอบติดตั้งไว้ร่วมกันอยู่ภายในหัวเชื่อม ใช้งานได้ดีกับการป้อนลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 0.045 นิ้วหรือ 1.14 มิลลิเมตร เหมาะกับการถือหัวเชื่อมด้วยมือ และเหมาะกับการเชื่อมวัสดุประเภทอลูมิเนียม หรืองานที่เติมลวดเชื่อมน้อย งานบาง ดังแสดงกลไกของระบบในรูปที่ 3.37

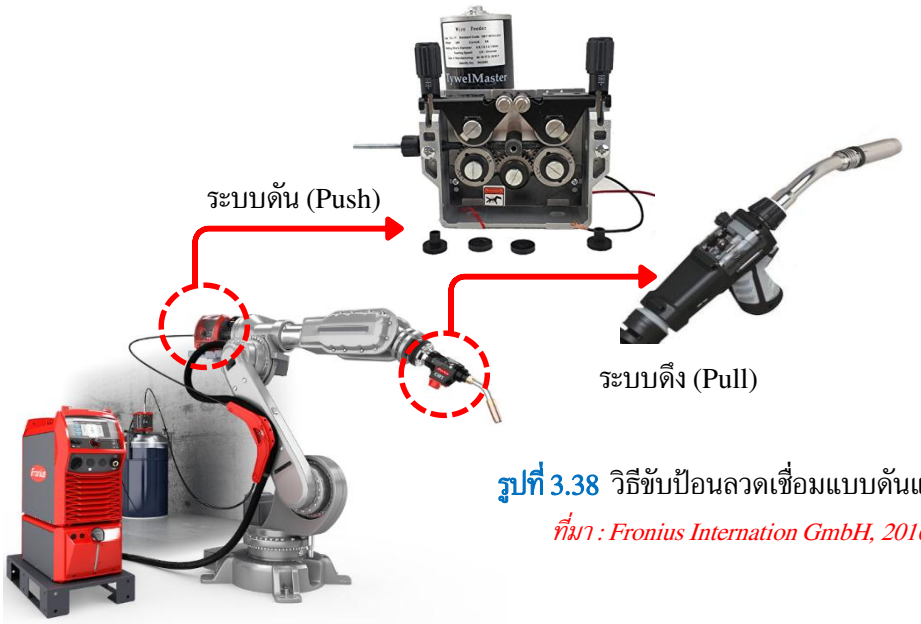
3. วิธีการดันและดึงลวดเชื่อม (Push and pull-type wire feed system) เป็นระบบการป้อนลวดเชื่อมที่อาศัยทั้งการดัน (Push) และการดึง (Pull) นิยมใช้กับลวดเชื่อมที่มีความแข็งแรงต่ำ และสายเชื่อมที่มีความยาวมาก ๆ ซึ่งหัวเชื่อมจะประกอบติดไว้ด้วยมอเตอร์ขับแบบซิงโครนัส และกลไกการป้อนลวด ที่ทำหน้าที่เป็นหน่วยควบคุมความเร็วในการป้อนลวดพร้อมทั้งเป็นตัวป้อนลวดที่ผ่านออกมาทางท่อ (Conduit) ในลักษณะของการดันให้ลวดออกจากหัวเชื่อม โดยระบบป้อนลวดแบบดันนี้จะมีผลต่อไปถึงการควบคุมความเร็วของตัวป้อนลวดแบบดึง ที่ติดตั้งอยู่อีกด้านหนึ่งที่ใกล้กับล้อลวดเชื่อม ความเร็วของตัวป้อนลวดทั้งสองนี้ต้องสัมพันธ์กันโดยใช้หลักการของแรงดึงในเส้นลวด แม้แต่ลวดเชื่อมอลูมิเนียมผสมขนาดเล็ก ๆ ก็สามารถป้อนผ่านสายเชื่อมได้ยาวกว่า 50 ฟุต หรือ 15.24 เมตร โดยในบางครั้งระบบการป้อนวิธีนี้จะมีกล่องดึงลวดแยกออกต่างหาก เพื่อทำหน้าที่ขับลวดจากระบบดันลวดอีกที่หนึ่ง ดังแสดงกลไกของระบบในรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.36 วิธีขับป้อนลวดเชื่อมแบบดัน
ที่มา : Fronius Internation GmbH, 2016



รูปที่ 3.37 วิธีขับป้อนลวดเชื่อมแบบดึง
ที่มา : Fronius Internation GmbH, 2016



รูปที่ 3.38 วิธีขับป้อนลวดเชื่อมแบบดันและดึง
ที่มา : Fronius Internation GmbH, 2016

วิธีการป้อนลวดเชื่อมของชุดล้อขับลวดแต่ละวิธีที่กล่าวมาข้างต้นนั้น จะไม่สามารถใช้ขับป้อนลวดได้กับทุกระยะของความห่างระหว่างชุดป้อนลวดถึงหัวเชื่อม โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดของลวดเชื่อมและชนิดของวัสดุลวดเชื่อม ดังนั้น ช่างเชื่อมต้องมีทักษะในการเลือกวิธีการป้อนลวดที่ถูกต้องและเหมาะสม เช่น สำหรับลวดเชื่อมที่เป็นโลหะอ่อนจำพวกอลูมิเนียมหรือทองแดงที่มีขนาดเล็ก ถ้าเลือกวิธีป้อนแบบดัน–ดึงจะต้องใช้สายเชื่อมที่สั้น ซึ่งผู้ผลิตอุปกรณ์เครื่องเชื่อมได้มีข้อแนะนำไว้ดังแสดงตารางที่ 3.3 ที่แนะนำโดย Fronius International (2016) ผู้ผลิตเครื่องมือและอุปกรณ์การเชื่อม และการไหลตัวของลวดเชื่อมต้องไม่คับหรือแน่นเกินไป เพราะขณะดึงหรือดันลวดอาจเกิดการยืดออกและเกิดการขาดขึ้นภายในของสายเชื่อมได้

ตารางที่ 3.3 ข้อแนะนำสำหรับการเลือกวิธีขับป้อนลวดเชื่อมที่เหมาะสมกับความยาวของสายเชื่อม
ที่มา : Fronius International GmbH, 2016

ความยาวของสายเชื่อม (Welding cable)	วิธีการขับป้อนลวดเชื่อม (Wire feed system)
ความยาว 3 – 4 เมตร	เลือกป้อนลวดวิธี ดันลวดเชื่อม (Push)
ความยาว 5 – 7 เมตร	เลือกป้อนลวดวิธี ดึงลวดเชื่อม (Pull)
ความยาว 8 – 12 เมตร	เลือกป้อนลวดวิธี ดันและดึงลวดเชื่อม (Push – Pull)

ค. หัวเชื่อมและสายเชื่อม (Welding gun and Welding cables)

อุปกรณ์ชุดนี้มีหน้าที่นำส่งลวดเชื่อม กระแสไฟเชื่อม และแก๊สปกคลุม เข้าสู่ท่อนำลวดไปยังตำแหน่งที่ต้องการเชื่อม โดยทั้งหมดจะเคลื่อนไปพร้อมกันเมื่อเกิดการอาร์กเชื่อม ซึ่งขณะทำการเชื่อมผลของการอาร์กจะทำให้หัวเชื่อมเกิดความร้อนสะสมมากขึ้นเรื่อย ๆ จึงจำเป็นต้องมีระบบการหล่อเย็น

เพื่อระบายความร้อนสำหรับป้องกันความร้อนเกินกับหัวเชื่อม ซึ่งปกติจะนิยมใช้เป็นระบบที่ระบายด้วยอากาศ และระบบที่ระบายด้วยน้ำ หรือใช้ทั้งสองระบบร่วมกัน ดังนั้น จึงได้มีการจัดแบ่งชนิดของหัวเชื่อมตามชนิดของการระบายความร้อนได้ 2 ชนิด คือ

1. หัวเชื่อมชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air cooling gun)
2. หัวเชื่อมชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water cooling gun)

การเลือกใช้งานของทั้งชนิดหัวเชื่อมนี้พิจารณาจากระดับของปริมาณกระแสไฟเชื่อมที่ใช้และชนิดของแก๊สปกคลุม กล่าวคือ หัวเชื่อมชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ จะเลือกใช้กับการเชื่อมที่กระแสต่ำกว่า 200 แอมแปร์ด้วยแก๊สอาร์กอนปกคลุม และที่กระแสเชื่อมที่ไม่เกิน 300 แอมแปร์ ด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปกคลุม ด้วยเหตุเพราะแก๊สปกคลุมนี้มีส่วนช่วยในการหล่อเย็นหัวเชื่อม สำหรับหัวเชื่อมชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ จะเหมาะกับการเชื่อมที่กระแสไฟเชื่อมที่สูงกว่า 300 แอมแปร์ แต่ไม่เกิน 700 แอมแปร์ หรือเป็นงานที่ต้องการเชื่อมอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน

นอกจากนี้ยังเป็นที่พบเห็นกันทั่วไปว่า หัวเชื่อมที่ระบายด้วยความร้อนทั้งสองระบบนั้น จะออกแบบลักษณะรูปทรงและลักษณะการใช้งานของหัวเชื่อมที่แตกต่างกันตามความเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน โดยจะแบ่งได้เป็น 4 ลักษณะของหัวเชื่อม ตาม Miller Electric Catgories (2016) ดังนี้

1. หัวเชื่อมแบบคอห่าน (Goose neck type) ลักษณะของหัวเชื่อมมีรูปทรงคล้ายกับคอของห่าน เป็นที่นิยมใช้งานกันมาก สามารถเชื่อมได้ดีกับทุกลักษณะรอยต่อ เพราะเข้าถึงส่วนที่โค้ง หรือมุมแคบ ๆ ได้สะดวกเป็นหัวเชื่อมที่ใช้กับระบบการป้อนขับลวดเชื่อมด้วยวิธีดันลวด ซึ่งสามารถใช้กับสายเชื่อมยาวได้ประมาณ 3–3.6 เมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดที่ 0.6–1.2 มิลลิเมตร คู่กับระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ แต่ถ้าใช้ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำจะสามารถเชื่อมลวดได้ขนาดโตขึ้นถึงเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร ดังแสดงลักษณะรูปทรงของหัวเชื่อมแบบคอห่านในรูปที่ 3. 39 (ก)

2. หัวเชื่อมแบบปืน (Pistol type) ลักษณะของหัวเชื่อมมีรูปทรงคล้ายกับปืน ระบบการขับป้อนลวดเป็นแบบดันลวดเชื่อมเหมือนกับแบบคอห่าน จุดประสงค์หลักออกแบบไว้สำหรับเชื่อมการเชื่อมงานเป็นจุดหรือเชื่อมงานแนวสั้น ๆ ไม่เหมาะกับงานเชื่อมที่แคบ ๆ หรือชิ้นงานที่มีพื้นที่เข้าเชื่อมยาก ดังแสดงลักษณะรูปทรงของหัวเชื่อมแบบปืนในรูปที่ 3. 39 (ข)

3. หัวเชื่อมแบบมีระบบป้อนลวดในตัว (Spool type) ลักษณะของหัวเชื่อมมีด้ามจับและที่ด้ามจับมีมอเตอร์ขับลวดพร้อมล้อป้อนลวดประกอบกันกันพอยู่ โดยมีม้วนลวดเชื่อมขนาดน้ำหนัก 1–2 ปอนด์ หรือประมาณ 453–907 กรัม ประกอบติดกับหัวเชื่อม ระบบการขับลวดใช้วิธีการดึงลวด ซึ่งเหมาะกับงานที่ต้องใช้สายเชื่อมยาว ๆ อัตราเร็วป้อนลวดถูกควบคุมด้วยหัวเชื่อม โดยทั่วไปนิยมใช้กับลวดวัสดุประเภทโลหะอลูมิเนียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 มิลลิเมตร แต่ก็สามารถใช้กับการป้อนลวดเหล็ก หรือลวดโลหะแข็งอื่น ๆ ได้เช่นกัน ดังแสดงลักษณะรูปทรงของหัวเชื่อมแบบที่มีระบบป้อนลวดในตัวในรูปที่ 3. 39 (ค)

4. หัวเชื่อมแบบดึงลวดเชื่อม (Pull type) ลักษณะของหัวเชื่อมจะมีด้ามจับและมีมอเตอร์ไฟฟ้าหรืออาจเป็นระบบแรงดันลม (Pneumatic) ประกอบอยู่ซึ่งต่อเข้ากับระบบกลไกของการป้อนลวด โดยม้วนลวดเชื่อมจะอยู่แยกต่างหาก ทำให้สามารถใช้กับสายเชื่อมงานที่ไกล ๆ ได้ถึง 15 เมตร ดังแสดงลักษณะรูปทรงของหัวเชื่อมแบบดึงลวดเชื่อมในรูปที่ 3. 39 (ง)



(ก) หัวเชื่อมแบบคอห่าน



(ข) หัวเชื่อมแบบปืน



(ค) หัวเชื่อมแบบมีระบบป้อนลวดในตัว



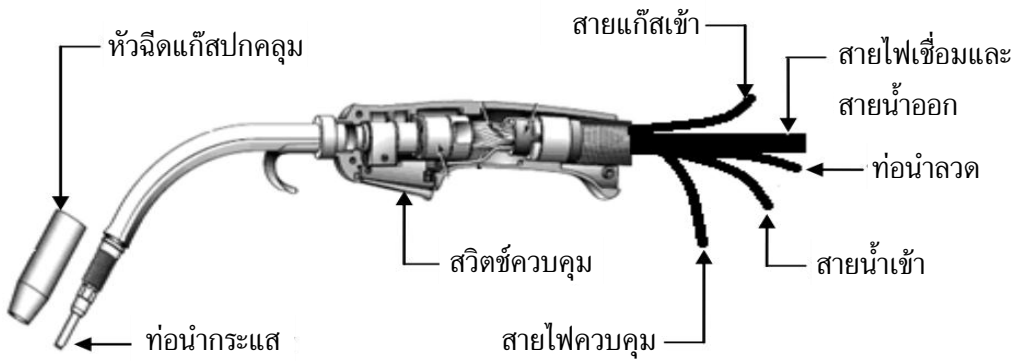
(ง) หัวเชื่อมแบบดึง

รูปที่ 3.39 ชนิดของหัวเชื่อมที่นิยมใช้งานของกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม

ที่มา : Miller Electric Mfg., Guns & Torches, 2016

ส่วนประกอบของหัวเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (Component of torches)

ถึงแม้ว่ารูปแบบหรือหลักการทำงานของหัวเชื่อม ของกรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW) จะมีความแตกต่างกัน แต่จะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ๆ ในการทำหน้าที่ต่าง ๆ ของหัวเชื่อมที่มีเหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.40 ซึ่งอาจจะมีลักษณะรูปร่างหรือรูปทรงของบางชิ้นส่วนที่อาจแตกต่างกันจากผู้ผลิตที่ออกแบบให้มีความสะดวกและเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน โดยส่วนประกอบหลักของหัวเชื่อมประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 3.40 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของหัวเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม

ที่มา : Miller Electric Mfg., Guns & Torches, 2016

● สวิตช์ควบคุม (Torch switch) ทำหน้าที่เป็นตัวปิด–เปิดกระแสไฟเชื่อมเพื่อการอาร์ก พร้อมกับเริ่มหรือหยุดการป้อนลวดเชื่อม ซึ่งตัวของสวิตช์จะติดอยู่กับหัวเชื่อม เมื่อต้องการใช้งานก็ทำการกดสวิตช์

● ท่อนำกระแส (Contact tube) เป็นส่วนประกอบที่อยู่ส่วนปลายสุดของหัวเชื่อม มักจะทำจากวัสดุทองแดงหรือทองแดงผสม เหตุผลเพราะต้องทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟเชื่อมให้ไหลผ่านเข้าไปสู่ลวดเชื่อม ในขณะที่ลวดเชื่อมกำลังเคลื่อนที่ออกไปยังบ่อหลอมละลายในรูปแบบของการไหลแบบมีแรงเสียดทาน (Friction) โดยที่แรงเสียดทานต้องไม่มากหรือน้อยจนเกินไป ดังนั้นระยะของช่องห่างระหว่างท่อนำกระแสกับเส้นลวดเชื่อมก็ต้องไม่มากหรือน้อยจนเกินไป ซึ่งผู้ผลิตได้แนะนำความเหมาะสมในการเลือกใช้ดังในตารางที่ 3.4 เมื่อใช้งานไปนาน ๆ รูของท่อนำกระแสจะเกิดการสึกหรอ ซึ่งบางครั้งสึกหรอมากจนรูมีลักษณะเป็นวงรี ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการนำกระแสระหว่างท่อนำกระแสกับลวดเชื่อมลดลง การอาร์กไม่สม่ำเสมอจึงควรต้องเปลี่ยนท่อนำกระแสอันใหม่ ลักษณะของชิ้นส่วนท่อนำกระแสดังแสดงในรูปที่ 3.41

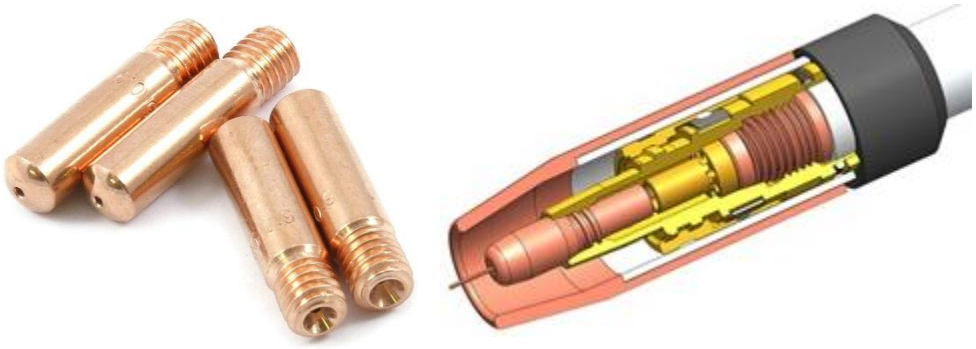
ตารางที่ 3.4 ข้อแนะนำการเลือกขนาดลวดเชื่อมที่เหมาะสมกับขนาดของรูท่อนำกระแส

ที่มา : Fronius Internation GmbH, 2016

ขนาดเส้นลวดเชื่อม (มม.)	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
ขนาดรูของท่อนำกระแส (มม.)	0.65	0.90	1.10	1.35	1.75

● หัวฉีดแก๊ส (Nozzle) เป็นส่วนประกอบที่ทำหน้าที่บังคับทิศทางของแก๊สให้ไหลพุ่งออกไปสู่บ่อหลอมละลาย มักทำด้วยวัสดุทองแดงหรือนิโครม โดยหัวฉีดขนาดเล็กใช้กับการเชื่อมกระแสไฟต่ำ ส่วนหัวฉีดขนาดใหญ่จะใช้กับการเชื่อมกระแสไฟที่สูง บ่อหลอมละลายกว้าง ปริมาณแก๊สไหลออกมามาก ลักษณะของหัวฉีดแก๊สดังแสดงในรูปที่ 3.42 (ก) ในสภาพปกติหัวฉีดแก๊สจะไม่มีกระแสไฟไหลผ่าน

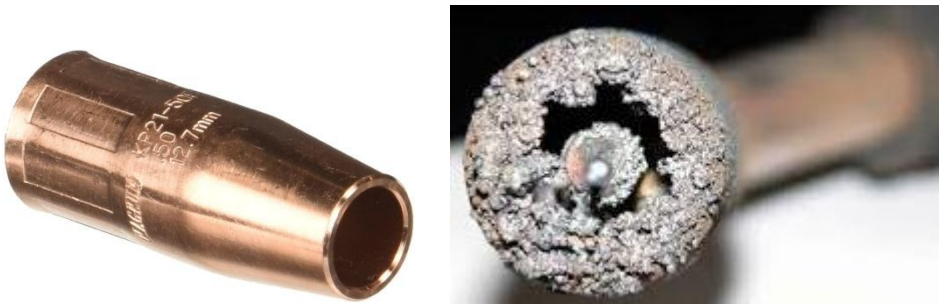
เพราะมีฉนวนกั้นไว้ แต่บางครั้งอาจมีกระแสไฟผ่านซึ่งเกิดจากสะเก็ดโลหะกระเด็นไปเกาะติดกับท่อนำกระแสดังแสดงในรูปที่ 3.42 (ข) ดังนั้น ช่างเชื่อมจะต้องหมั่นตรวจเช็คและทำความสะอาดอยู่เสมอ ๆ เพื่อป้องกันการสร้างสะพานไฟมาสู่หัวฉีดแก๊ส และทำการฉีดสเปรย์เพื่อช่วยลดการเกาะติดของสะเก็ดโลหะเป็นอย่างดี



(ก) ลักษณะของท่อนำกระแส **(ข)** ส่วนประกอบภายในของท่อนำกระแส

รูปที่ 3.41 ลักษณะของท่อนำกระแสและส่วนประกอบภายใน

ที่มา : Miller Electric Mfg., Guns & Torches, 2019



(ก) ลักษณะของหัวฉีดแก๊ส **(ข)** ลักษณะสะเก็ดโลหะเกาะรูหัวฉีดแก๊ส

รูปที่ 3.42 ลักษณะของหัวฉีดแก๊สและสะเก็ดโลหะเกาะรูหัวฉีดแก๊ส

ที่มา : Miller Electric Mfg., Guns & Torches, 2019

- สายไฟเชื่อมและสายน้ำ (Welding cable and water hoes) เป็นส่วนประกอบที่มักประกอบไว้ติดกัน โดยสายไฟเชื่อมจะทำด้วยวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดี ส่วนใหญ่เป็นโลหะทองแดงหรือโลหะอลูมิเนียม และหุ้มด้วยฉนวน ดังแสดงลักษณะของสายไฟเชื่อมในรูปที่ 3.43 (ก) ซึ่งสายเชื่อมต้องแข็งแรงและมีความอ่อนตัวโค้งงอได้ดี เพราะจะช่วยให้ลวดเชื่อมไหลผ่านง่ายไม่ติดขัดเมื่อขณะสายเชื่อมไม่อยู่ในแนวเส้นตรง แต่ก็ไม่โค้งงอมากจนเกิดปัญหาต่ออัตราเร็วในการป้อนลวดที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลกระทบ

โดยตรงต่อประสิทธิภาพในการเติมลวดเชื่อมในแนวเชื่อมได้ ส่วนสายน้ำหล่อเย็นหรือบางครั้งผู้ผลิตอาจใช้เป็นระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ ทำหน้าที่ระบายความร้อนสายเชื่อมและหัวเชื่อมที่เกิดจากการอาร์ก แบบระบายด้วยอากาศจะเหมาะกับหัวเชื่อมขนาดเล็กที่ใช้กระแสไฟเชื่อมอยู่ระหว่าง 80–350 แอมแปร์ ส่วนแบบระบายด้วยน้ำจะเหมาะกับหัวเชื่อมขนาดใหญ่ที่ใช้กระแสไฟเชื่อมระหว่าง 80–500 แอมแปร์ ดังแสดงลักษณะของหัวเชื่อมทั้งสองแบบในรูปที่ 3.43 (ข) และ (ค) ตามลำดับ



(ก) ลักษณะของสายไฟเชื่อม

(ข) หัวเชื่อมแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ **(ค)** หัวเชื่อมแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

รูปที่ 3.43 ลักษณะของสายไฟเชื่อม และหัวเชื่อมที่ระบายความร้อนด้วยระบบน้ำและระบบอากาศ

ที่มา : Bernard Welding Equipment., Guns & Torches, 2017

- ท่อนำลวด (Wire conduit) เป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่เป็นท่อทางเดินของลวดเชื่อมจากชุดล้อขับป้อนลวดไปยังหัวเชื่อม โดยมีลักษณะเป็นลวดสปริงขดเป็นท่ออยู่ภายในตลอดความยาวของสายเชื่อม ซึ่งผิวภายในของท่อมีทั้งแบบเคลือบผิวและแบบไม่เคลือบผิว ท่อนำลวดมีความอ่อนตัวแต่ไม่บีบรัดลวดเชื่อมที่เคลื่อนที่ผ่านอยู่ภายใน ขณะปฏิบัติงานท่อนำลวดจึงสามารถโค้งงอได้ แต่ต้องไม่มากจนเกิดผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการไหลตัวของลวดเชื่อม สำหรับลวดเชื่อมประเภทโลหะเหล็กแนะนำให้ใช้ท่อนำลวดที่ทำด้วยเหล็กสปริง แต่สำหรับลวดเชื่อมประเภทวัสดุอ่อน เช่น อลูมิเนียม หรือทองแดง แนะนำให้ใช้ท่อนำลวดที่เคลือบผิวภายในด้วยพลาสติกไนลอนหรือเทปลอน ดังแสดงลักษณะของท่อนำลวดทั้งสองแบบในรูปที่ 3.44 ตามลำดับ



(ก) ท่อนำลวดแบบโลหะสปริง (ข) ท่อนำลวดแบบพลาสติก

รูปที่ 3.44 ลักษณะของท่อนำลวดเชื่อมแบบโลหะสปริงและแบบพลาสติก

ที่มา : Welding Direction, Miller & Hobart Replacement MIG Conduit Liners, 2019

● ท่อนำแก๊สปกคลุม (Shielding gas hose) เป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่ในการลำเลียงหรือส่งแก๊สปกคลุมไปสู่บ่อหลอมละลายโดยผ่านช่องทางหัวฉีดแก๊ส ถ้าเป็นหัวเชื่อมที่มีขนาดเล็ก ๆ หรือเชื่อมงานที่กระแสไฟต่ำ ๆ มักจะใช้ระบบท่อนำแก๊สร่วมกันกับท่อนำลวด เช่น หัวเชื่อมแบบคอห่านขนาดเล็ก แต่ถ้าเป็นหัวเชื่อมขนาดใหญ่ที่ต้องใช้ปริมาณแก๊สปกคลุมในปริมาณมาก เช่น การเชื่อมที่กระแสไฟสูงถึง 500 แอมแปร์ ต้องใช้ท่อนำแก๊สแยกออกต่างหากที่จะต่อท่อแก๊สจากชุดป้อนลวดไปยังหัวเชื่อมโดยตรง หรืออาจจะต่อจากท่อรวมแก๊สในกรณีที่เป็นระบบศูนย์เชื่อมขนาดใหญ่ที่ใช้แก๊สร่วมกัน (Manifold supply) ซึ่งต้องมีชุดอุปกรณ์ควบคุมความดันและอัตราการไหลของแก๊ส ดังแสดงท่อนำแก๊สทั้งสองระบบในรูปที่ 3.45 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) ท่อนำแก๊สแบบใช้ร่วมกับท่อนำลวด (ข) ท่อนำแก๊สแบบแยกจากสายเชื่อม

รูปที่ 3.45 ลักษณะของท่อนำแก๊สปกคลุม (Shielding gas hose)

ที่มา : Welding Direction, Miller & Hobart Replacement MIG Conduit Liners, 2019

ง. อุปกรณ์ควบคุมแก๊สปกคลุมและอุปกรณ์อื่น ๆ (Shielding gas equipment and other)

กรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม เมื่อเริ่มปฏิบัติการเชื่อมก็จะต้องมีแก๊สไหลออกมาปกคลุมบ่อหลอมละลายตลอดเวลา ระบบการทำงานของแก๊สปกคลุมจะต้องมีองค์ประกอบของถังบรรจุแก๊สปกคลุม (Shielding gas cylinder) อุปกรณ์วัดปริมาณความดันแก๊ส (Gas regulator) วาล์วควบคุมการไหลของแก๊ส (Control valves) และมาตรวัดอัตราการไหลของแก๊ส (Flow meter) โดยอุปกรณ์ดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 3.46

● ถังบรรจุแก๊สปกคลุม (Shielding gas cylinder) เป็นถังความดันที่บรรจุแก๊สภายใน มีแรงอัดสูงจนมีสถานะเป็นของเหลว ซึ่งสีของถังและตัวอักษรข้างถังเป็นตัวบ่งชี้ชนิดของแก๊สที่บรรจุอยู่ภายใน ระดับความดันภายในถังตรวจสอบวัดได้จากวาล์วหัวถังหรือวาล์ววัดความดันถังแก๊ส เมื่อเปิดวาล์วปล่อยแรงดันออกแก๊สเหลวภายในถังก็จะมีความดันลดลงเปลี่ยนสถานะกลายเป็นแก๊สไหลผ่านวาล์วควบคุมออกมาใช้งาน

● อุปกรณ์วัดปริมาณความดันแก๊ส (Gas regulator) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการตรวจสอบปริมาณความดันทั้งภายในถังและความดันที่ไหลออกมา ซึ่งมักจะติดตั้งคู่กันอยู่ที่หัวถังแก๊ส

● วาล์วควบคุมการไหลของแก๊ส (Control valves) เป็นส่วนหนึ่งของชุดอุปกรณ์วัดความดันปริมาณแก๊ส จะสามารถเปิดและปรับปริมาณแก๊สให้ไหลออกมาใช้งานในปริมาณที่ต้องการ เพื่อที่จะลดความดันจากถังบรรจุลงให้พอเหมาะกับการใช้งานและมีการไหลออกของแก๊สคงที่สม่ำเสมอ

● มาตรวัดอัตราการไหลของแก๊ส (Flow meter) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดปริมาณหรืออัตราการไหลของแก๊สจากวาล์วควบคุมการไหลของแก๊สไปยังหัวเชื่อม ซึ่งมาตรวัดจะอ่านได้จากการลอยตัวของลูกบอลในมาตรวัด ที่มีวาล์วที่สามารถปรับปริมาณแก๊สตามความต้องการใช้งาน ส่วนจังหวะของการปิด–เปิดแก๊สขณะทำการเชื่อมจะมีระบบของโซลินอยด์วาล์ว (Solenoid valve) ในชุดป้อนลวดเชื่อม ซึ่งแก๊สจะถูกเปิดออกเมื่ออาร์กและปิดทันทีเมื่อหยุดอาร์ก

นอกจากนี้ในขบวนการเชื่อมแบบอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมยังมีอุปกรณ์เสริมอื่น ๆ ที่ต้องใช้ร่วมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเชื่อม ได้แก่

● อุปกรณ์ผสมแก๊ส (Gas mixer equipment) ที่ใช้สำหรับกรณีต้องการผสมแก๊สปกคลุมที่ยังแยกกันอยู่คนละถัง เช่น ผสมแก๊สอาร์กอนกับแก๊สฮีเลียม (Ar + He) หรือผสมแก๊สอาร์กอนกับแก๊สไนโตรเจน (Ar + N_2) หรือ ผสมแก๊สอาร์กอนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Ar + CO_2) เป็นต้น ซึ่งที่นิยมนำมาใช้กันจะมีทั้งเป็นแบบชุดอุปกรณ์ที่นำเข้ามาต่อเข้ากับระบบ และเป็นแบบเครื่องผสมแก๊สสำเร็จรูป ดังแสดงในรูปที่ 3.47 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

● อุปกรณ์หมุนเวียนน้ำหล่อเย็น (Water circulator) เป็นอุปกรณ์ใช้ทำหน้าที่หมุนเวียนน้ำหล่อเย็นในระบบของการเชื่อม โดยการนำน้ำที่ผ่านหล่อเย็นมาแล้วกลับมาระบายความร้อนออกแล้ววนกลับเข้าไปใช้งานหล่อเย็นอีกครั้ง ลักษณะของอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.48



(ก) ถังบรรจุแก๊สปกคลุม (ข) ชุดอุปกรณ์ควบคุมแก๊สปกคลุม

รูปที่ 3.46 ถังแก๊สปกคลุมและอุปกรณ์ควบคุม

ที่มา : Bernard Welding Equipment., Guns & Torches, 2017



(ก) แบบชุดอุปกรณ์ผสมแก๊สปกคลุม (ข) แบบเครื่องผสมแก๊สปกคลุม

รูปที่ 3.47 แบบชุดอุปกรณ์ผสมและแบบเครื่องผสมสำหรับแก๊สปกคลุมการเชื่อม

ที่มา : Miller Electric Mfg., Welding Equipment, 2018

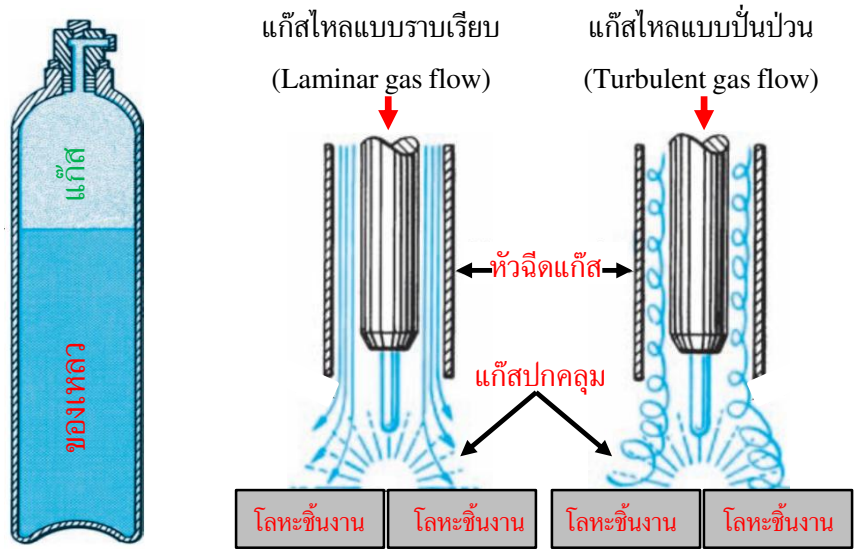


รูปที่ 3.48 อุปกรณ์หมุนเวียนน้ำหล่อเย็น (Water circulator)

ที่มา : Airgas, TEC Welding Products, Inc. 2016

3.2.5 แก๊สปกคลุม (Shielding gases)

กรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม เป็นขบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) จึงจำเป็นต้องใช้แก๊สเฉื่อยช่วยในการปกคลุมบ่อหลอมละลายเพื่อป้องกันไม่ให้แก๊สจากบรรยากาศบริเวณรอบ ๆ ที่มีส่วนประกอบของ แก๊สไนโตรเจน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไอน้ำความชื้นเข้ามารวมตัวกับเนื้อโลหะในแนวเชื่อมขณะแข็งตัว ที่ซึ่งเป็นต้นเหตุของการเกิดข้อบกพร่องของแนวเชื่อม โดยเฉพาะข้อบกพร่องแบบรูพรุน (Porosity defect) และการแตกร้าวขณะเย็น (Cold crack) นอกจากนี้แก๊สปกคลุมยังมีผลต่อพฤติกรรมการเชื่อมอาร์ก เช่น การเกิดสะเก็ดโลหะมากน้อย ขนาดบ่อหลอมละลาย ระยะการซึมลึก รวมถึงประสิทธิภาพของการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะของลวดเชื่อมไปยังบ่อหลอมละลาย แก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลายจะถูกบรรจุไว้ภายในถังความดัน ที่มีระดับความดันสูงมากจนสถานะจากที่เป็นแก๊สกลายเป็นสถานะของเหลว โดยภายในถังบรรจุแก๊สที่บริเวณก้นถังจะเป็นของเหลว และบริเวณหัวถังจะเป็นแก๊สเพราะมีความดันต่ำกว่า ซึ่งพร้อมที่ไหลออกมาใช้งาน ดังแสดงสัดส่วนของสถานะแก๊สภายในถังในรูปที่ 3.49 (ก) และพบว่าการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สมีความสำคัญอย่างยิ่ง กล่าวคือ ถ้าอัตราการไหลที่ถูกต้องแก๊สจะไหลออกมาในรูปแบบที่ราบเรียบ (Laminar gas flow) แต่ถ้าอัตราการไหลมากเกินไปแก๊สจะไหลออกมาแบบปั่นป่วน (Turbulent gas flow) ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อบ่อหลอมละลายและแนวเชื่อมที่สมบูรณ์หลังการแข็งตัว โดยได้แสดงลักษณะการไหลของแก๊สทั้งสองแบบในรูปที่ 3.49 (ข) อ้างอิงจาก Edward R. Bohbart (2017)



(ก) สถานะของแก๊สปกคลุมภายในถัง (ข) ลักษณะการไหลของแก๊สปกคลุม

รูปที่ 3.49 สถานะของแก๊สปกคลุมภายในถังและลักษณะการไหลของแก๊สปกคลุม

ที่มา : Edward R. Bohbart, Welding Principles and Practices. 2017

ในทางปฏิบัติช่างเชื่อมจะเลือกใช้แก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลายที่ใช้กันปัจจุบันแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ซึ่งได้สรุปไว้ในหนังสือของ Edward R. Bohbart (2017) ดังนี้

1. ประเภทแก๊สเฉื่อย (Inert gases) เป็นกลุ่มแก๊สที่มีอะตอมเสถียรภาพในตัวเอง ไม่ทำปฏิกิริยากับอะตอมของธาตุอื่น จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นแก๊สปกคลุมบ่อโลหะหลอมเหลวขณะเชื่อม โดยแก๊สเฉื่อยที่นำมาใช้กัน คือแก๊สอาร์กอน (Argon inert gas : Ar) กับแก๊สฮีเลียม (Helium inert gas : He) โดยช่างเชื่อมจะเรียกขบวนการเชื่อมที่ใช้แก๊สประเภทนี้ว่า การเชื่อมมิก (MIG)

● แก๊สอาร์กอน (Ar) เป็นแก๊สเฉื่อยชนิดที่นิยมเลือกใช้งานกันมาก ด้วยเพราะเป็นแก๊สที่หนักกว่าอากาศถึง 1.4 เท่า ปกคลุมได้ดีใช้ในปริมาณที่น้อยในการปกคลุมบ่อหลอม มีความศักย์ของการเกิดอิออนต่ำ (Low ionization potential) จึงมีความเสถียรในการอาร์กสูง ปฏิกิริยาสะอาดเหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะที่มีผิวเป็นออกไซด์ จำพวกอลูมิเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม นอกจากนี้ยังช่วยให้การเริ่มต้นอาร์กง่ายและคงที่ พร้อมยังมีข้อดีที่มีการนำความร้อนต่ำ เปลวขณะอาร์กแคบแต่มีความร้อนสูง ทำให้ชิ้นงานหลอมง่ายและลึกดังแสดงในรูปที่ 3.50 (ก) แต่ราคาค่อนข้างแพงเมื่อเปรียบเทียบกับแก๊สชนิดอื่น ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับเกรดความบริสุทธิ์ของแก๊ส ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นเกรด ได้ 3 เกรด คือ

– เกรดสำหรับงานเชื่อมทั่ว ๆ ไป (Welding grade) มีอาร์กอน 99.99%

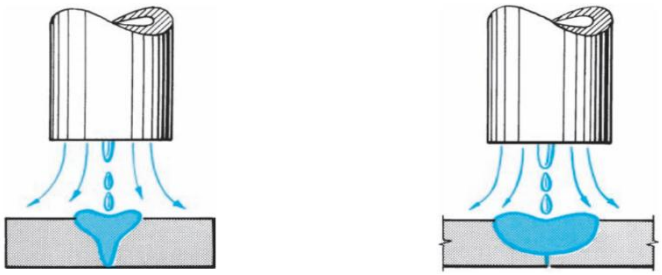
– เกรดความบริสุทธิ์สูง (High purity grade) มีอาร์กอน 99.993%

– เกรดพิเศษ (Ultra purity grade) มีอาร์กอน 99.999%

อย่างไรก็ตามการใช้แก๊สอาร์กอนปกคลุมเพียงชนิดเดียวก็เกิดปัญหาความไม่สมบูรณ์ของแนวเชื่อมได้เช่นกัน เพราะบ่อหลอมละลายที่แคบน้ำโลหะเหลวจะแข็งตัวเร็ว การหลอมเข้าด้วยกันของเนื้อโลหะเชื่อมกับขอบแนวเชื่อมไม่ค่อยดีทำให้เกิดรอยกัดแหว่ง (Undercut) ที่ขอบแนวเชื่อมโดยเฉพาะกับการเชื่อมโลหะจำพวกนอกกลุ่มเหล็ก (Non–ferrous) เช่น อลูมิเมียม ทองแดง ทองเหลือง นิกเกิล และไทเทเนียม เป็นต้น ดังนั้นจึงมีการใช้แก๊สอื่นเข้ามาผสม ได้เป็นแก๊สปกคลุมแบบผสมขึ้นที่ออกแบบการผสมให้เหมาะกับวัสดุโลหะเชื่อมแต่ละชนิดซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

● แก๊สฮีเลียม (He) เป็นแก๊สเฉื่อยอีกชนิดที่นิยมใช้ปกคลุมบ่อหลอมละลาย มีความศักย์ของการเกิดอิออนค่อนข้างสูง ที่ 24.5 eV จึงมีความโดดเด่นเรื่องการนำความร้อนได้ดี จึงเหมาะกับการเชื่อมงานที่หนามากกว่า 4.8 มิลิเมตร และโลหะที่ทนต่อความร้อนสูง ขณะอาร์กเปลวของการอาร์กแผ่กระจายเป็นวงกว้าง การถ่ายโอนความร้อนสู่ชิ้นงานสูง แต่เมื่อใช้แก๊สฮีเลียมปกคลุม ขณะเชื่อมแรงดันอาร์กจะค่อย ๆ ลดลง (Voltage gradient) แต่ระยะอาร์กจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนทำให้พลังอาร์ก (Arc energy) จำนวนมากสูญเสียไปกับการอาร์กตัวมันเอง ซึ่งไม่มีการถ่ายโอนความร้อนสู่ชิ้นงาน ดังนั้น ความเข้มข้นของการอาร์กจึงลดลง ส่งผลทำให้ได้แนวเชื่อมที่กว้างและตื้นกว่าการใช้แก๊สอาร์กอนปกคลุมแสดงในรูปที่ 3.50 (ข) ด้วยเหตุนี้เองการเลือกใช้แก๊สฮีเลียมปกคลุมช่างเชื่อมจะต้องใช้แรงดันอาร์กที่สูงกว่าแก๊สอาร์กอน ทั้ง ๆ ที่ระยะอาร์กเท่ากัน กรณีที่ต้องการเชื่อมวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวสูง หรือวัสดุที่นำความร้อน

สูง มีข้อแนะนำให้ใช้แก๊สฮีเลียมที่ผสมกับแก๊สอื่น เพื่อลดขั้นตอนที่ต้องอุ่นงานก่อนเชื่อม (Preheating) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเชื่อมโลหะทองแดง เป็นต้น อย่างไรก็ตามสมบัติของแก๊สฮีเลียม มีน้ำหนักประมาณ 1/7 เท่าของอากาศ จึงมีโอกาสลอยตัวออกจากบริเวณปกคลุมได้รวดเร็ว จึงเกิดความสิ้นเปลืองปริมาณแก๊สมากขณะเชื่อม



(ก) บ่อหลอมละลายของแก๊สอาร์กอน **(ข)** บ่อหลอมละลายของแก๊สฮีเลียม

รูปที่ 3.50 เปรียบเทียบพฤติกรรมของการหลอมละลายที่ใช้แก๊สอาร์กอนและฮีเลียมปกคลุม

ที่มา : Edward R. Bohbart, Welding Principles and Practices. 2017

2. ประเภทแก๊สทำปฏิกิริยา (Active gas) แก๊สประเภทนี้ด้วยหลักการทางเคมีสามารถทำปฏิกิริยากับธาตุอื่นได้ ซึ่งต่างจากประเภทแก๊สเฉื่อย แต่ด้วยการเกิดปฏิกิริยาช้ามากคุณสมบัติจึงเสมือนแก๊สเฉื่อยจึงนำใช้เป็นแก๊สปกคลุมได้ ที่รู้จักกันดีคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือที่เรียกกันในหมู่ช่างเชื่อมว่า แก๊ส CO_2 ราคาค่อนข้างถูกหาซื้อได้ง่าย มีสภาพเป็นของเหลวอยู่ภายในถังที่ความดัน 7.53 MPa และเมื่อความดันลดลงจะไหลออกมาเป็นแก๊สจะไม่ทำปฏิกิริยาใด ๆ แต่เมื่อได้รับความร้อนจากการอาร์กจะเกิดการแตกตัวเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) กับออกซิเจน (O) โดยที่ระยะอาร์กสั้นจะเกิดแตกตัวน้อยกว่าระยะอาร์กยาว ดังนั้น จึงมีข้อแนะนำว่าการเชื่อมด้วยแก๊สปกคลุม CO_2 ควรเชื่อมด้วยระยะอาร์กสั้น ๆ ซึ่งจะให้ความร้อนออกมามากเป็นการช่วยเพิ่มพลังการอาร์ก (Arc energy) โดยสามารถเทียบได้กับประเภทแก๊สเฉื่อย 91%Ar + 9%O แต่ราคาถูกกว่ามาก โดยช่างเชื่อมจะเรียกขบวนการเชื่อมที่ใช้แก๊สประเภทนี้ว่า การเชื่อมแม็ก (MAG)

แก๊สปกคลุมคาร์บอนไดออกไซด์จะให้ปฏิกิริยาการอาร์กที่รุนแรงจึงมักเกิดสะเก็ดโลหะออกมามาก และการออกซิเดชั่นของแก๊สกับออกไซด์ของโลหะที่ผิวทำให้เกิดเป็นควัน (Fumes) จึงมักพบเห็นเสมอว่าการใช้แก๊สปกคลุมคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดควันปริมาณมากมองเห็นบ่อหลอมละลายยากขึ้น ซึ่งพบว่าควันที่เกิดจากการออกซิไดซิ่งนี้จะมีปริมาณของออกซิเจนปะปนอยู่ประมาณ 20–30% ซึ่งจำเป็นต้องกำจัดออกไปจากบ่อหลอมละลาย ด้วยวิธีการใช้ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของธาตุที่รวมตัวกับออกซิเจนแล้วกลายเป็นแสลกออกไซด์ได้ดีแล้วลอยอยู่ผิวน้ำโลหะไม่เกิดขอบกพร่องกับแนวเชื่อม ธาตุเหล่านั้นได้แก่ ธาตุซิลิกอน (Si) แมงกานีส (Mn) อลูมิเนียม (Al) ไทเทเนียม (Ti) และ วาเนเดียม (V)

เป็นต้น ดังตัวอย่างสมการดีออกซิไดเซอร์ของซิลิกอน $Si + 2FeO \leftrightarrow SiO_2 + Fe$ ซึ่งเมื่อซิลิกอนรวมตัวกับออกซิเจนจะกลายเป็นสนิมเหล็กในรูปของซิลิกอนออกไซด์ลอยอยู่บนผิวน้ำโลหะในบ่อหลอมและกลายเป็นสแลกที่โดนกำจัดออกไปเมื่อเย็นตัวลง อย่างไรก็ตามธาตุที่เป็นตัวออกซิไดเซอร์ก็ต้องมีในปริมาณที่ไม่มากจนเกินไปเพราะอาจเกิดปัญหาอื่น เช่นเกิดการแตกร้าวขณะร้อน (Hot crack) ถ้ามีแมงกานีสและซิลิกอนมากเกินไป เป็นต้น

ถังบรรจุแก๊สปกคลุมคาร์บอนไดออกไซด์เป็นของเหลวอยู่ประมาณ 2 ใน 3 ของท่อ นับจากก้นท่อขึ้นมาถึงช่องว่างด้านบนจะเป็นแก๊ส มักเกิดปัญหาขณะปล่อยไหลออกมาจะเกิดความเย็นเป็นน้ำแข็งเกาะที่ชุดอุปกรณ์ควบคุมการไหล อาจทำให้เกิดรูอุดตันหรือเล็กลง จึงต้องมีการติดตั้งชุดอุปกรณ์ขดลวดความร้อนคู่ไว้เพื่ออุ่นแก๊สก่อนไหลไปหัวเชื่อม ไม่เช่นนั้นแก๊สปกคลุมก็จะมีทั้งที่เป็นแก๊สและเป็นของเหลว ซึ่งส่งผลต่อการนำความร้อนที่ลดลงโดยเฉพาะที่มีสถานะเป็นของเหลว การใช้แก๊สปกคลุมชนิดคาร์บอนไดออกไซด์จะใช้ได้กับการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบลัดวงจร ไม่สามารถใช้ได้กับการถ่ายโอนแบบละออง นอกจากจะผสมกับแก๊สอาร์กอนในสัดส่วนของ CO_2 ไม่เกิน 15%

3. ประเภทแก๊สผสม (Mixing gas) การใช้แก๊สปกคลุมเพียงชนิดเดียวไม่สามารถที่จะรองรับการทุกแบบการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะ ทุกชนิดของโลหะเชื่อมและทุกชนิดของการเชื่อมต่อ ดังนั้นจึงได้มีการค้นคว้าวิจัยเพื่อที่เพิ่มประสิทธิภาพของการเชื่อมด้วยการผลิตแก๊สปกคลุมแบบแก๊สผสมขึ้น ซึ่งการผสมนั้นมีวัตถุประสงค์การนำไปใช้งานค่อนข้างเฉพาะเจาะจง จึงทำให้เกิดชนิดของแก๊สผสมมากมายหลายชนิด โดยจะได้กล่าวถึงเป็นตัวอย่างบางชนิดที่นิยมใช้งานกัน ดังต่อไปนี้

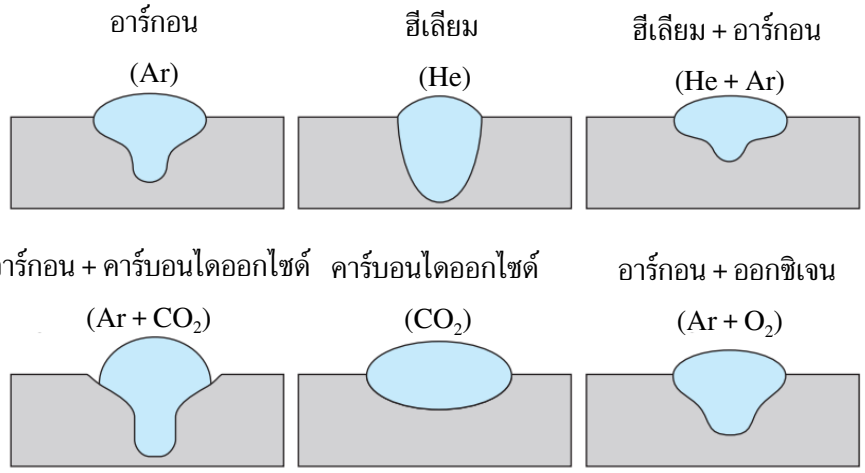
- ชนิดแก๊สผสมฮีเลียม + อาร์กอน (He + Ar) เป็นการผสมที่เป็นแก๊สเฉื่อยทั้งคู่ โดยแก๊สฮีเลียมช่วยเพิ่มความร้อนในการอาร์ก ส่วนแก๊สอาร์กอนช่วยให้การถ่ายโอนแบบละอองและการอาร์กมีความนิ่งหรือเสถียรใกล้เคียงกับการใช้แก๊สอาร์กอนอย่างเดียว อย่างไรก็ตามสัดส่วนการผสมก็มีหลากหลายเกรดขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะเชื่อม เช่น 80% He + 20% Ar และปรับส่วนผสมไปจนสูงถึง 50% He + 50% Ar ซึ่งโดยทั่วไปแก๊สผสมฮีเลียมกับอาร์กอน จะนิยมใช้กับการเชื่อมโลหะอลูมิเนียม ทองแดง แมงกานีส รวมถึงโลหะผสมอื่น ๆ ถ้าเชื่อมโลหะที่มีความหนาจะมีสัดส่วนแก๊สฮีเลียมที่เพิ่มขึ้น
- ชนิดแก๊สผสมอาร์กอน + ออกซิเจน (Ar + O) เป็นแก๊สผสมที่ต้องการบทบาทของแก๊สออกซิเจน โดยเฉพาะในการเชื่อมโลหะเหล็ก ถ้าเชื่อมด้วยแก๊สอาร์กอนอย่างเดียวประสิทธิภาพของการอาร์กจะต่ำ ลวดเชื่อมที่หลอมเหลวจะมีการไหลพุ่งที่ไม่เป็นเส้นตรง แต่เมื่อผสมแก๊สออกซิเจนในปริมาณเพียง 1–5% ก็จะช่วยให้การอาร์กเสถียรมากขึ้น สะเก็ดโลหะน้อยลง แนวเชื่อมซึมลึกได้มากขึ้นและไม่เกิดรอยกัดแหว่งบริเวณขอบแนวเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าผสมสูงและเหล็กกล้าไร้สนิม จะนิยมใช้แก๊สผสมที่สัดส่วนแก๊ส Ar + 1–2% O ส่วนจำพวกเหล็กกล้าคาร์บอนหรือเหล็กกล้าผสมต่ำจะใช้แก๊สผสมสัดส่วน Ar + 5% O อย่างไรก็ตามการใช้แก๊สออกซิเจนร่วมผสมเป็นแก๊สปกคลุมจะต้องเลือกลวดเชื่อมที่มธาตุดีออกซิไดเซอร์ เพื่อขจัดออกซิเจนออกจากบ่อหลอมละลาย เลี่ยงความพรุนที่จะเกิดกับเนื้อเชื่อม เช่น โลหะทองแดง เป็นต้น

● ชนิดแก๊สผสมอาร์กอน + คาร์บอนไดออกไซด์ ($Ar + CO_2$) เป็นแก๊สผสมระหว่างแก๊สเฉื่อยกับแอคทีปแก๊ส (Active gas) โดยต้องการบทบาทของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อช่วยให้การอาร์กเสถียร การถ่ายโอนหยดน้ำโลหะจากลวดเชื่อมไปยังชิ้นงานดี และช่วยลดสะเก็ดโลหะที่กระเด็นออกมา โดยเฉพาะกับการเชื่อมวัสดุจำพวกโลหะเหล็ก ซ้ำยังช่วยลดการเกิดรอยกัดลึกที่ขอบของแนวเชื่อม เพราะขณะเชื่อมบ่อหลอมละลายจะขยายออกไปถึงขอบรอยต่อ คุณสมบัติของแก๊สปกคลุมดังกล่าวจะเป็นเกรดส่วนผสมที่ $Ar + 3–10\% CO_2$ และเป็นระบบการถ่ายโอนแบบละออง ถ้าเป็นเกรดส่วนผสม $Ar + 20–30\% CO_2$ แก๊สผสมเกรดนี้จะใช้เชื่อมเหล็กกล้าโดยจะเกิดระบบการถ่ายโอนเป็นแบบลัดวงจร แต่ถ้าเชื่อมชิ้นงานที่หนาด้วยกระแสเชื่อมสูงการถ่ายโอนจะเป็นแบบหยดขนาดใหญ่ทันที สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมจะไม่แนะนำให้ใช้แก๊สผสมเกรดที่มีคาร์บอนไดออกไซด์มากเกินไป เพราะคาร์บอนจะไปเพิ่มในเนื้อเชื่อมส่งผลให้ไปรวมตัวกับโครเมียมทำให้ปริมาณโครเมียมลดลง ซึ่งมีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อนที่ต่ำลง นอกจากนี้ยังไม่แนะนำให้ใช้กับ การเชื่อมโลหะที่ไม่ใช่เหล็กเพราะคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นสาเหตุของการปนเปื้อนของเนื้อโลหะเชื่อม

● ชนิดแก๊สผสมฮีเลียม + อาร์กอน + คาร์บอนไดออกไซด์ ($He + Ar + CO_2$) เป็นแก๊สผสมที่อาศัยบทบาทความโดดเด่นของแก๊สแต่ละตัว เกรดผสม $90\% He + 7.5\% Ar + 2.5\% CO_2$ นิยมใช้เชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ส่วนเกรด $60–70\% He + 25–35\% Ar + 5\% CO_2$ นิยมใช้กับการเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำ โดยจะเป็นระบบการถ่ายโอนแบบลัดวงจร แต่ถ้าต้องการความเหนียวของเนื้อเชื่อมสูงแนะนำให้ลดคาร์บอนไดออกไซด์ แนวเชื่อมมักจะไม่นูนเหมาะกับงานที่ไม่ต้องการเจียระไนตกแต่งผิวงาน เช่นจำพวกงานเชื่อมท่อ เป็นต้น

● ชนิดแก๊สผสม อาร์กอน + ไนโตรเจน ($Ar + N_2$) เป็นแก๊สผสมที่อาศัยบทบาทความโดดเด่นของแก๊สไนโตรเจนที่ให้ความร้อนสู่ชิ้นงานเชื่อมที่สูงจึงเหมาะกับการเชื่อมโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีจุดหลอมเหลวสูง เช่น ทองแดง หรือทองแดงผสม ซึ่งให้ความร้อนดีคล้ายกับฮีเลียม แต่การซึมลึกคล้ายกับแก๊สอาร์กอน และมีระบบการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะเป็นแบบหยดขนาดใหญ่ เกรดผสมที่นิยมกันคือ $70\% Ar + 30\% N_2$ การอาร์กเสถียรสูงราบเรียบ ไม่เกิดการปั่นป่วนในบ่อหลอมละลายขณะทำการเชื่อม เกรดผสมนี้ยังสามารถใช้เชื่อมโลหะอลูมิเนียมผสมได้เช่นกัน

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นเกี่ยวกับแก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลายสำหรับกรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมนั้น จะเห็นได้ว่าการคิดค้นแก๊สประเภทต่าง ๆ นั้นเกิดจากการวิจัยเพื่อแก้ปัญหาขบวนการเชื่อมที่ประสบปัญหา รวมไปถึงการสร้างคุณภาพของแนวเชื่อมที่ดีขึ้น ดังนั้น แก๊สปกคลุมแต่ละชนิดอาจจะเหมาะสม หรือไม่เหมาะสมกับวัสดุโลหะบางชนิด บางขนาด บางชนิดรอยต่อ หรือบางท่าเชื่อม นั่นหมายถึงว่าช่างเชื่อมต้องมีความรู้ความเข้าใจในการเลือกใช้ให้เหมาะสมและถูกต้อง ไม่เช่นนั้นอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดและเสียหายต่อการเชื่อมงานที่ตนเองรับผิดชอบได้ ดังแสดงเปรียบเทียบลักษณะและรูปร่างของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยแก๊สปกคลุมต่างชนิดกันในรูปที่ 3.51 และในตารางที่ 3.5 เป็นคำแนะนำการเลือกใช้แก๊สที่เหมาะสมกับชนิดของโลหะของผู้ผลิต Lincoln Electric



รูปที่ 3.51 เปรียบเทียบลักษณะและรูปร่างของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยแก๊สปกคลุมต่างชนิด

ที่มา : Edward R. Bohbart, Welding Principles and Practices. 2017

ตารางที่ 3.5 คำแนะนำในการเลือกใช้แก๊สปกคลุมที่เหมาะสมกับชนิดของโลหะงานของผู้ผลิต

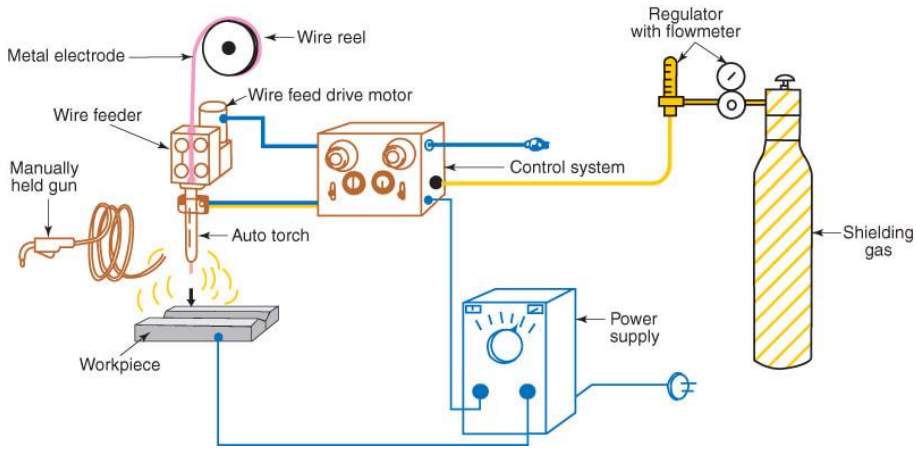
ที่มา : Lincoln Electric, Gas Metal Arc Welding Guidelines, 2014

ชนิดของแก๊สปกคลุม (Shielding gases)	ชนิดโลหะงาน (Metals)									
	อลูมิเนียมและผสม		ทองแดงและผสม		เหล็กกล้าไร้สนิม	เหล็กกล้าคาร์บอน		แมกนีเซียมและผสม	นิกเกิลและผสม	
Ar	✓		✓					✓	✓	
He	✓							✓		
CO_2					✓	✓				
Ar + 1% O_2					✓	✓				
Ar + 2% O_2					✓	✓				
Ar + 5% O_2					✓	✓				
Ar + 5% CO_2						✓				
Ar + 10% CO_2						✓				
Ar + 25% CO_2					✓	✓		✓		
Ar + 25% He	✓		✓			✓		✓	✓	
Ar + 50% He	✓		✓					✓	✓	
Ar + 75% He	✓		✓		✓			✓	✓	
Ar + CO_2 + O_2					✓	✓				
Ar + CO_2 + N					✓					
Ar + CO_2 + He	✓				✓					

ข้อมูลที่ผู้เขียนได้นำมาเสนอไว้ข้างต้นนั้น บางส่วนได้จากการค้นคว้าและรวบรวมมาจากงานวิจัยต่าง ๆ แต่ส่วนใหญ่เป็นข้อมูลของการศึกษาวิจัยของผู้เขียนเองที่ได้ทำการวิจัยมาตั้งแต่ต้น ในเรื่องของการใช้แก๊สปกคลุมสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิติก (นิกเกิลต่ำ) Series 200 Wichan chuaiphan et al. (2020) และ Wichan Chuaiphan et al. (2014)

3.3 การเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux Cored Arc Welding : FCAW)

เป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่ใช้หลักการเชื่อมแบบการอาร์ก ซึ่งมีระบบกลไกของการเชื่อมที่เหมือนกับการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (MIG/MAG) โดยต่างกันที่ลักษณะของลวดเชื่อมเท่านั้น กล่าวคือ ลวดเชื่อมจะมีลักษณะเป็นรูท่อซึ่งบรรจุผงฟลักซ์ไว้ภายใน ดังนั้น จึงเรียกกรรมวิธีนี้ว่า การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ หรืออีกชื่อที่นิยมเรียกกันคือ การเชื่อมฟลักซ์คอร์ เป็นการเชื่อมอาร์กที่ได้รับความร้อนจากการอาร์กระหว่างปลายลวดเชื่อมกับผิวชิ้นงาน โดยลวดเชื่อมจะถูกส่งออกไปจากล้อม้วนลวดไปยังหัวเชื่อมด้วยระบบกลไกการป้อนลวด ขณะอาร์กลวดเชื่อมโลหะก็จะหลอมละลายพร้อมกับฟลักซ์ภายในแล้วฟลักซ์ก็จะลอยตัวขึ้นไปทำหน้าที่เป็นแก๊สมาปกคลุมบ่อหลอมละลายทันที ดังแสดงถึงอุปกรณ์และระบบวงจรการทำงานของการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ในรูปที่ 3.52 ระบบการป้อนลวดเชื่อมเป็นระบบอัตโนมัติ ซึ่งช่างเชื่อมสามารถเลือกใช้ได้ทั้งวิธีการเชื่อมด้วยระบบอัตโนมัติ (Full Automatic operation) และวิธีการเชื่อมด้วยระบบกึ่งเครื่องอัตโนมัติ (Semi Automatic operation)



รูปที่ 3.52 อุปกรณ์และระบบวงจรการทำงานของการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW)

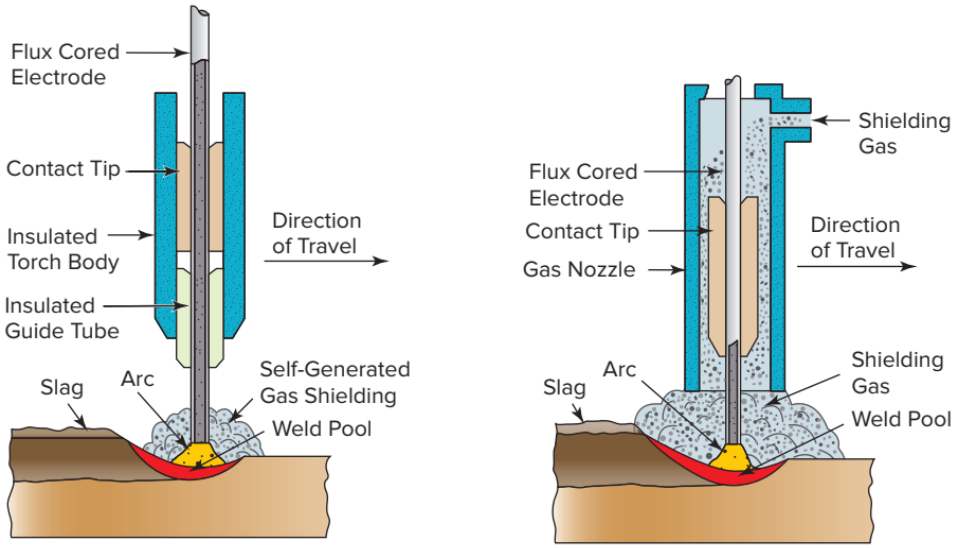
ที่มา : The Lincoln Electric Company, 2015

ก. วิธีการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์หรือฟลักซ์คอร์นี้ มี 2 แบบตามชนิดของลวดเชื่อม คือ

1. การเชื่อมแบบชนิดใช้แก๊สปกคลุมที่เกิดจากฟลักซ์ภายในท่อลวดเชื่อม (Self–shielding gas flux cored arc welding) หรือที่รู้จักกันในชื่อย่อว่า FCAW–S การเชื่อมแบบนี้ไม่ต้องใช้แก๊สปกคลุมจากถังบรรจุ แต่จะอาศัยแก๊สปกคลุมที่เกิดจากการหลอมละลายของผงฟลักซ์ที่สำเร็จรูปอยู่ภายในกับ

ลวดเชื่อมมาเรียบร้อยแล้ว และไม่ต้องมีอุปรณ์หัวฉีดแก๊ส (Gas Nozzle) ดังแสดงระบบกลไกของการอาร์กในรูปที่ 3.53 (ก)

2. การเชื่อมแบบชนิดใช้แก๊สปกคลุมที่เกิดจากฟลักซ์ภายในท่อลวดเชื่อมและแก๊สปกคลุมร่วมภายนอกจากถังบรรจุ (Gas–shielding gas flux cored arc welding) หรือที่รู้จักกันในชื่อย่อว่า FCAW–G การเชื่อมแบบนี้จะได้แก๊สปกคลุมจากสองแหล่งบางทีเรียกว่า Dual – shielding gas flux cored arc welding กล่าวคือ ได้แก๊สปกคลุมจากผงฟลักซ์ในไส้ของลวดเชื่อมเหมือนกับแบบแรก และที่เพิ่มเติมได้จากการป้อนเข้าไปจากถังบรรจุ ซึ่งต้องมีชุดอุปกรณ์หัวฉีดแก๊สร่วมด้วย ดังแสดงระบบกลไกของการอาร์กในรูปที่ 3.53 (ข) ซึ่งได้ก่ลาวไว้โดย Edward R. Bohbart (2017)



(ก) การเชื่อมแบบ FCAW–S (ข) การเชื่อมแบบ FCAW–G

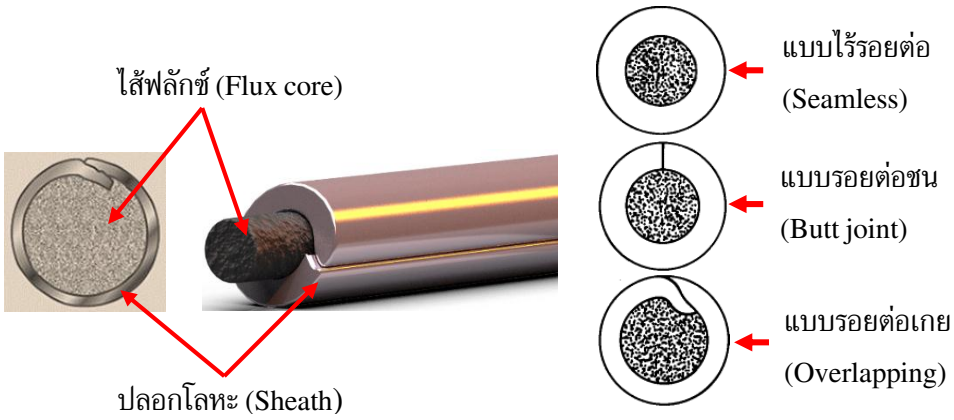
รูปที่ 3.53 ระบบของการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์แบบ FCAW–S และแบบ FCAW–G

ที่มา : Edward R. Bohbart, Welding Principles and Practices. 2017

ข. ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux cored electrode)

ลวดเชื่อมแบบไส้ฟลักซ์หรือลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์แตกต่างจากลวดเชื่อมชนิดอื่นที่ส่วนใหญ่เป็นโลหะเส้นลวดตัน (Solid wire) เปลือย หรือไม่ก็มีฟลักซ์หุ้ม แต่ลวดเชื่อมแบบไส้ฟลักซ์นี้เป็นลวดเชื่อมที่มีลักษณะเป็นโลหะท่อหรือที่เรียกว่าปลอก (Sheath) แล้วบรรจุผงฟลักซ์ไว้ภายใน ซึ่งประกอบไปด้วยผงโลหะและอโลหะ (Metallic & Non–metallic powers) และผงฟลักซ์ (Fluxes power) ที่ผสมกันอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.54 (ก) ซึ่งวิธีการสร้างปลอกโลหะที่ใช้หุ้มฟลักซ์มีทั้งแบบท่อไม่มีตะเข็บ (Seamless cored wire) แบบมีตะเข็บต่อชน (Butt joint cored wire) และแบบมีตะเข็บต่อเกย (Overlapping

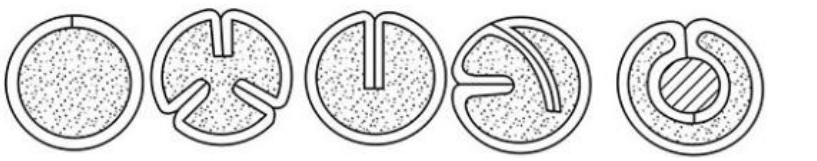
cored wire) ดังแสดงรูปที่ 3.54 (ข) โดยมีรูปทรงหน้าตัดของปลอกที่หลากหลายที่บีบอัดผงฟลักซ์ไว้ภายใน เช่น รูปทรงหน้าตัดแบบอักษรตัวโอ (O) ตัวที (T) หรือ ตัวอี (E) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.55



(ก) ส่วนประกอบของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (ข) วิธีการสร้างปลอกโลหะที่ใช้หุ้มฟลักซ์

รูปที่ 3.54 ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux core electrode)

ที่มา : Weld Notes. FCA Welding 2018



รูปที่ 3.55 ลักษณะรูปทรงหน้าตัดของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

ที่มา : KOBELCO, Flux cored wires. 2015

บทบาทหน้าที่ของผงฟลักซ์ที่บรรจุอยู่ภายในลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ต่อการเชื่อม พอจะสรุปได้ดังนี้

1. เป็นตัวกำหนดสมบัติของแนวเชื่อม เช่น สมบัติทางกล ทางเคมี ทางโลหะวิทยา และสมบัติด้านอื่น ๆ ที่มีต่อแนวเชื่อมต่อ

2. เป็นตัวการสร้างแก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลายขณะเชื่อมจากแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจนในสภาพแวดล้อมที่จะเข้ามารวมตัวในเนื้อโลหะเชื่อม

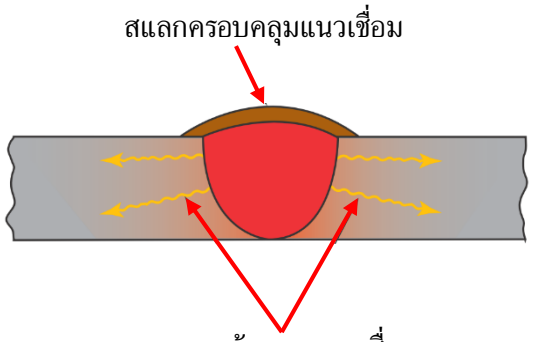
3. เป็นตัวทำปฏิกิริยากับสารมลทินที่มีอยู่ในบ่อหลอมละลายที่ขณะหลอมเหลวเพื่อให้แยกออกมาเป็นสแลกลอยขึ้นสู่ผิวของแนวเชื่อม

4. เป็นตัวผลิตสแลกเพื่อปกคลุมแนวเชื่อมขณะแข็งตัว และช่วยในการควบคุมขนาดและกำหนดรูปร่างของแนวเชื่อม

5. เป็นตัวช่วยในการควบคุมเปลวอาร์กให้เกิดความเสถียร ซึ่งช่วยลดการเกิดสะเก็ดโลหะ และช่วยให้อัตราการเติมลวดคงที่สม่ำเสมอ ทำให้ได้แนวเชื่อมที่มีขนาและรูปร่างตามต้องการ

3.3.1 ระบบการอาร์กของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux core electrode arc system)

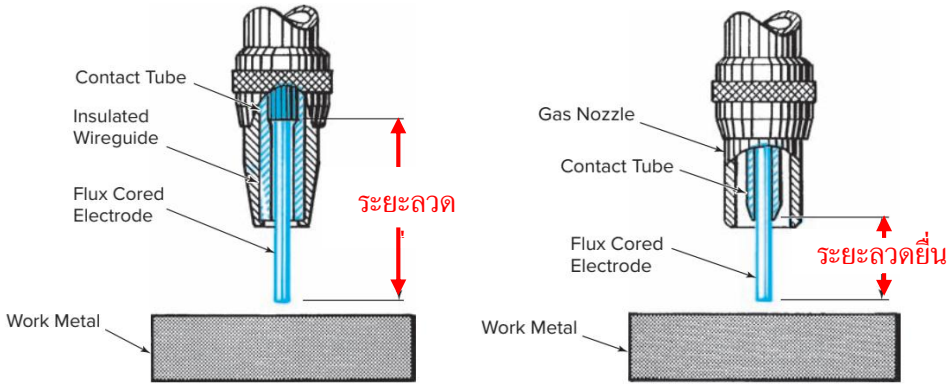
Larry Jeffus (2012) ได้อธิบายถึงระบบการอาร์กของขบวนการเชื่อมแบบลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ไว้ว่าเป็นการเชื่อมที่อาศัยแหล่งพลังงานจากเครื่องเชื่อมที่จะทำให้เกิดการอาร์กขึ้นระหว่างปลายลวดกับชิ้นงานเหมือนกันกับการเชื่อมอาร์กของกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยเนื้อโลหะเชื่อมจะได้จากการหลอมละลายของลวดที่เป็นท่อโลหะที่มีผงฟลักซ์บรรจุอยู่ภายใน ซึ่งผงฟลักซ์นี้นอกจากจะทำหน้าที่เป็นแก๊สปกคลุมในหน้าที่หลักแล้วนั้นยังเป็นตัวช่วยกำจัดออกซิเจน (Deoxidizer) ที่ปะปนอยู่ในบ่อหลอมละลายได้ดี อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะเป็นการเชื่อมด้วยลวดแบบ FCAW–S หรือ ด้วยลวดแบบ FCAW–G หลังจากที่บ่อหลอมละลายแข็งตัวก็จะเกิดสแลกแข็งตัวอยู่บนแนวเชื่อม ต้องทำการเคาะหรือหรือกำจัดออกซึ่งต่างจากการเชื่อมแบบ GMAW ดังแสดงในรูปที่ 3.56 นอกจากนี้สแลกที่ครอบคลุมบ่อหลอมละลายอยู่นั้นยังส่งผลทำให้อัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อมช้าลง เพราะความร้อนระบายออกไปได้ไม่ทุกทิศทาง



รูปที่ 3.56 ลักษณะแนวเชื่อมของการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and metal fabrication, 2012.

การเลือกใช้ชนิดของลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมแบบลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์จะขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่ต้องการเชื่อม ซึ่งลวดเชื่อมทั้งสองแบบจะมีการตั้งระยะยื่นของลวดเชื่อม (Electrode extension or Stick out) แตกต่างกัน ดังแสดงเปรียบเทียบความแตกต่างในรูปที่ 3.57 โดยลวดเชื่อมแบบ FCAW–S ในรูปที่ 3.57 (ก) เป็นชนิดที่สร้างแก๊สปกคลุมได้ด้วยตัวเอง จะมีความพิเศษที่สามารถปล่อยระยะลวดยื่นออกมาได้มากกว่าปกติ ซึ่งปลายของลวดเชื่อมยื่นเลยปลายท่อนำกระแส (Contact tube) ได้มากถึง 15–25 มม. โดยเหมาะกับการเชื่อมโลหะที่บาง เนื่องจากปลายลวดที่ห่างจะเกิดความร้อนสูง เพราะเกิดความต้านทานกระแสที่ปลายลวด กระแสก็จะลดลงส่งผลทำให้การสร้างบ่อหลอมละลายเล็กและตื้น วิธีนี้มักนิยมใช้ในการอุ่นลวดให้ร้อนก่อนอาร์ก นอกจากนี้ยังพบว่าลวดแบบสร้างแก๊สปกคลุมได้เองควรเลือกขั้วเชื่อมแบบ DCEN ซึ่งก็มีผลที่จะทำให้บ่อหลอมละลายตื้น และควรเลือกขนาดลวดที่เล็ก เช่น ขนาด 0.8 – 1.2 มม. สำหรับโลหะแผ่นบางในอุตสาหกรรมผลิตตัวถังรถยนต์



(ก) การเชื่อมแบบ FCAW–S **(ข)** การเชื่อมแบบ FCAW–G

รูปที่ 3.57 ระยะลวดยื่นของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์แบบ FCAW–S และแบบ FCAW–G

ที่มา : Edward R. Bohbart, Welding Principles and Practices. 2017

สำหรับลวดเชื่อมแบบอาศัยแก๊สปกคลุมจากถังบรรจุร่วมด้วยจะต้องตั้งระยะลวดยื่นที่น้อยกว่า ดังใน รูปที่ 3.57 (ข) จะไม่เกิดแรงดันตกคร่อมที่เปลวอาร์กทำให้เกิดกระแสที่สูงขึ้น จึงเป็นลวดเชื่อมที่เหมาะกับการเชื่อมโลหะงานหนา ที่มีรอยซึมลึกมาก สามารถใช้ได้กับขนาดลวดที่ใหญ่ ๆ ได้ดี

ระยะยื่นของลวด Edward R. Bohbart (2017) ได้ระบุไว้ว่า มีผลกระทบต่อการปรับค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง จึงมีความจำเป็นที่ช่างเชื่อมต้องพิจารณาปรับค่าต่าง ๆ ให้เหมาะสม ตัวอย่างเช่น การหลอมของลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ ทั้งในปลอกโลหะและสารผสมของฟลักซ์ที่อัดอยู่ภายใน ซึ่งขณะอาร์กต้องไม่เกิดการสูญเสียหรือสูญเสียน้อยที่สุดของธาตุผสมอยู่จึงต้องตั้งระยะยื่นลวดให้เหมาะสม เป็นต้น ถ้ากรณีที่ช่างเชื่อมตั้งระยะลวดยื่นยาวออกมามากเกินไป (Too long extension) ก็จะทำให้เกิดสะเก็ดโลหะกระเด็นออกมามาก เปลวอาร์กไม่คงที่ส่งผลต่อขนาดของบ่อหลอมละลายที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้ผิวและขนาดของแนวเชื่อมจึงมีขนาดไม่แน่นอน ในทางกลับกันถ้ากรณีปรับตั้งระยะยื่นลวดสั้นเกินไป (Too short extension) ขณะอาร์กจะเกิดระยะอาร์กที่สูงมากเกินไป ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อแรงดันเชื่อม ยิ่งถ้าเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแบบ FCAW–G ที่ต้องใช้แก๊สจากถังบรรจุก็จะยิ่งทำให้เกิดสะเก็ดโลหะมากยิ่งขึ้น และมักจะไปเกาะติดอยู่ที่ปากของปลายของหัวฉีดแก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 3.58 ถ้าเกาะติดมากขึ้นก็จะอุดรูฉีดแก๊สทำให้แก๊สไหลออกมาปกคลุมบ่อหลอมละลายได้ไม่เพียงพอและทั่วถึง ก็จะส่งผลต่อแนวเชื่อมเมื่อแข็งตัวจะเกิดรูพรุนหรือเกิดปฏิกิริยาออกไซด์อยู่ภายในเนื่อโลหะเชื่อม ดังนั้น ผู้ผลิตลวดเชื่อมมักมีข้อแนะนำต่อช่างเชื่อมถึงระยะยื่นของปลายลวดเชื่อมที่เหมาะสมไว้คู่กับลวดเชื่อม โดยทั่วไปจะกำหนดค่าระยะยื่นลวดอยู่ในพิกัด 20 ถึง 40 มม. สำหรับลวดเชื่อมแบบ FCAW–G และพิกัด 20 ถึง 40 มม. สำหรับลวดเชื่อมแบบ FCAW–S แต่ทั้งนี้ก็ต้องพิจารณาร่วมกับปัจจัยการเชื่อมด้านอื่น ๆ ประกอบการตัดสินใจกำหนดระยะยื่นลวด โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสูงของหัวฉีดแก๊สต้องมีความสูงจากปลายลวดเชื่อมให้น้อยที่สุดเท่าที่จะสามารถปฏิบัติการได้ เพราะมีผลกระทบต่อการฉีดหรือส่งแก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลาย ซึ่งได้มีการรวบรวมข้อมูลจากการทดลองของ

ผู้ผลิตลวดเชื่อมได้เสนอแนะถึงความเหมาะสมของระยะยื่นลวด(Electrode extension) กับความสูงของหัวฉีดแก๊ส (Gas nozzle height) ดังแสดงในตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.58 ลักษณะของสะเก็ดโลหะ (Spatter) เกาะที่หัวฉีดแก๊สและท่อนำกระแส

ที่มา : Edward R. Bohbart, Welding Principles and Practices. 2017

ตารางที่ 3.6 การเลือกระยะยื่นลวดกับความสูงของหัวฉีดแก๊สและขนาดลวดเชื่อมที่เหมาะสม

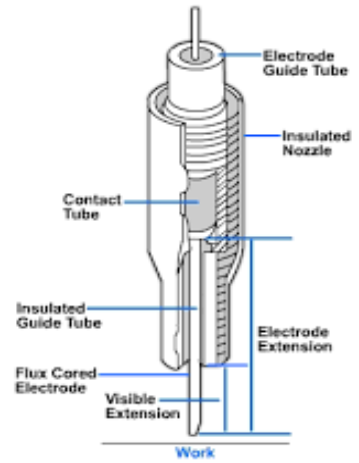
ที่มา : KOBELCO, Welding Handbook, 2008

ขนาดลวด (Wire size) มม.	กระแสไฟเชื่อม (Welding current) แอมแปร์	ระยะยื่นลวด (Electrode extension) มม.	ความสูงหัวฉีดแก๊ส (Nozzle gas height) มม.
1.2	100–200	10–15	10–15
	200–300	16–25	15–20
1.6	200–300	15–25	15–20
	300–450	20–25	20–25

หมายเหตุ

– ความสูงของหัวฉีดแก๊สควรจะเท่ากับหรือน้อยกว่าระยะยื่นลวด

– ความโตของหัวฉีดแก๊สถ้าเล็กลง ก็ต้องลดระยะยื่นลวดและลดความสูงของหัวฉีดแก๊สลงอย่างเป็นสัดส่วน



จากที่ผู้เขียนได้กล่าวมาข้างต้นถึงเหตุผลของการเลือกชนิดของลวดเชื่อมที่เหมาะสมนั้น ก็เพื่อต้องการให้ช่างเชื่อมลดข้อบกพร่องที่จะเกิดขึ้นกับแนวเชื่อม และลดปัญหาในการแก้ไขงานเชื่อม พร้อมกับเป็นการบ่งชี้ถึงข้อจำกัดของการเชื่อมแบบลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ที่ช่างเชื่อมควรทราบและทำความเข้าใจ

3.3.2 กระแสไฟ แรงดันอาร์ก และ อัตราการป้อนลวด (Current, Voltage and Deposition rate)

กระแสไฟเชื่อม (Welding current) สำหรับการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์จะใช้เครื่องเชื่อมที่ผลิตกระแสไฟตรงชนิดแรงดันคงที่ (Constant Voltage : CV) โดยส่วนใหญ่จะเป็นระบบการต่อขั้วเชื่อมแบบลวดเชื่อมเป็นขั้วบวก (Direct Current Electrode Positive : DCEP) และสำหรับลวด

เชื่อมไส้ฟลักซ์บางเกรดก็มีการใช้ระบบ การต่อขั้วเชื่อมแบบลวดเชื่อมเป็นขั้วลบ (Direct Current Electrode Negative : DCEN) ดังแสดงในตารางที่ 3.7 โดยข้อมูลจากการทดลองของผู้ผลิตลวดเชื่อม KOBELCO Welding Handbook (2008) แต่มีในบางครั้งสำหรับลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ชนิดพิเศษ จะใช้เครื่องเชื่อมที่ผลิตกระแสไฟสลับชนิดกระแสคงที่ (Constant Current : CC) ซึ่งลวดเชื่อมจะมีสมบัติที่ไวต่อแรงดัน โดยใช้กระแสอยู่ในช่วง 50 ถึง 750 แอมแปร์

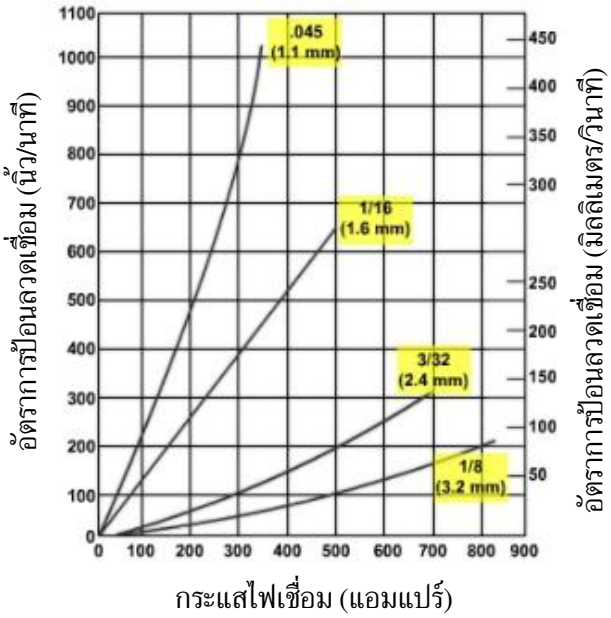
การปรับตั้งค่ากระแสไฟเชื่อมจะต้องสัมพันธ์กับอัตราการป้อนลวด ขนาดของลวด ตำแหน่งท่าเชื่อมและระยะยื่นลวด ซึ่งจะมีผลต่อความสม่ำเสมอของการอาร์ก การซึมลึก รวมไปถึงเกล็ดและรูปร่างของแนวเชื่อม ซึ่งถ้าลวดเชื่อมมีขนาดเล็กอัตราเร็วของการป้อนลวดจะสูงกระแสจะต้องต่ำ เมื่อขนาดของลวดโตมากขึ้นอัตราเร็วการป้อนลวดก็จะลดลงกระแสไฟเชื่อมจะเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ที่กล่าวมาผู้เขียนได้อ้างอิงจากข้อมูลของการทดลองเชื่อมลวดไส้ฟลักซ์ชนิด E 70T−1ในรูปที่ 3.59 และได้แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ของขนาดลวดเชื่อม ท่าเชื่อม กับกระแสเชื่อมและแรงดันอาร์กที่เหมาะสมของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.7 การเลือกกระแสไฟเชื่อมที่สัมพันธ์กับชนิดของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์เหล็กกล้าคาร์บอน

ที่มา : KOBELCO, Welding Handbook, 2008

ชนิดลวดเชื่อม (Electrode):AWS	กระแสไฟเชื่อม (Welding Current)	แก๊สปกคลุม (Shielding Gas)	แนวเชื่อม (Single or Multiple Pass)
EXXT−1	DCEP	Ar−CO_2	Multiple Pass
EXXT−2	DCEP	Ar−CO_2	Single Pass
EXXT−3	DCEP	None	Single Pass
EXXT−4	DCEP	None	Multiple Pass
EXXT−5	DCEP หรือ DCEN	Ar−CO_2	Multiple Pass
EXXT−6	DCEP	None	Multiple Pass
EXXT−7	DCEN	None	Multiple Pass
EXXT−8	DCEN	None	Multiple Pass
EXXT−10	DCEN	None	Single Pass
EXXT−11	DCEN	None	Multiple Pass
EXXT−G	DCEP หรือ DCEN	Ar−CO_2 or None	Multiple Pass
EXXT−GS	DCEP หรือ DCEN	Ar−CO_2 or None	Single Pass

หมายเหตุ – การใช้แก๊สปกคลุม Ar−CO_2 หมายถึง เชื่อมด้วยลวดเชื่อมแบบ FCAW−G
– การไม่ใช้แก๊สปกคลุม None หมายถึง เชื่อมด้วยลวดเชื่อมแบบ FCAW−S



รูปที่ 3.59 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟเชื่อมกับอัตราเร็วการป้อนลวดชนิด FCAW-G

ที่มา : Welding Theory and Application, TC 9-237. 2017

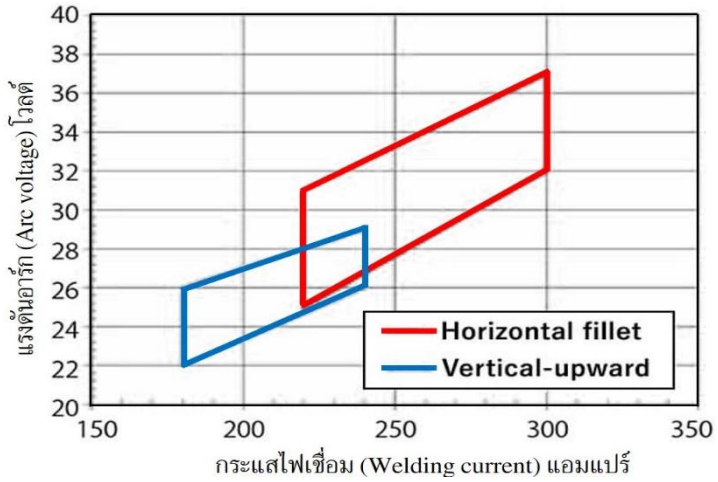
ตารางที่ 3.8 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งท่าเชื่อมกับกระแสเชื่อมและแรงดันเชื่อม

ที่มา : KOBELCO, Welding Handbook, 2008

ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้า (Flux cored electrode)						
ขนาดลวดเชื่อม (Electrode size) (mm)	ตำแหน่งท่าเชื่อม (Welding position)					
	ท่าราบ (Flat position)		ท่าขนานนอน (Horizontal position)		ท่าตั้ง (Vertical position)	
	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	แรงดัน (V)
1.143	150–225	22–27	150–225	22–26	125–200	22–25
1.587	175–300	24–29	175–275	25–28	150–200	24–27
1.727	175–325	24–26	175–325	24–26	–	–
1.828	200–400	25–30	200–375	26–30	175–225	25–29
1.984	225–350	23–25	175–315	22–24	175–225	23–25
2.381	300–500	25–32	300–450	25–30	–	–
2.778	400–525	26–33	–	–	–	–
3.175	450–650	28–34	–	–	–	–

แรงดันอาร์ก (Arc voltage) เป็นค่าที่ใช้บอกระยะห่างระหว่างปลายลวดเชื่อมกับชิ้นงาน ซึ่งก็คือระยะอาร์ก (Arc length) สามารถอ่านได้จากหน้าปัดชุดแผงควบคุมของเครื่องเชื่อม สำหรับขบวนการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ แรงดันอาร์กจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมสูงมาก กล่าวคือ ถ้าแรงดันอาร์กมีค่าที่สูงมากเกินไป จะพบว่าระยะห่างของเปลวอาร์กก็จะสูงขึ้น เกิดสะเก็ดโลหะกระเด็น

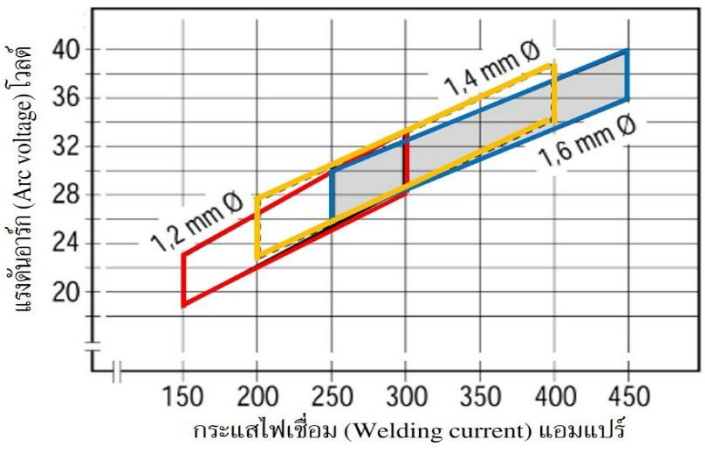
ออกมามากและเป็นวงกว้าง ขนาดแนวเชื่อมที่ได้ก็ไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการเชื่อมด้วยลวดชนิดที่สร้างแก๊สปกคลุมขึ้นเอง (FCAW–S) จะเปิดโอกาสให้แก๊สจากสภาพแวดล้อมภายนอกเข้ามารวมตัวกับน้ำโลหะในบ่อหลอมละลายได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้แนวเชื่อมเกิดรูพรุนมากขึ้น หรือถ้าเป็นชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมก็จะเกิดการลดลงของเฟสเฟอร์ไรต์ และเกิดแตกร้าวได้ง่าย แต่ถ้ามีการปรับค่าแรงดันอาร์กให้ลดต่ำลงระยะห่างของเปลวอาร์กก็จะชิดกับชิ้นงานมากขึ้น จะทำให้บ่อหลอมละลายเล็กและก็จะได้แนวเชื่อมที่นูนและแคบระยะการซึมลึกก็จะน้อย สอดคล้องกับผลการวิจัย Wichan Chuaiphan et al. (2012) อย่างไรก็ตามการปรับค่าแรงดันอาร์กก็ต้องพิจารณาร่วมกันกับปัจจัยการเชื่อมด้านอื่น ๆ เช่น ตำแหน่งท่าเชื่อมแนวขนานนอนจะต้องตั้งค่าระยะอาร์กที่สูงกว่าตำแหน่งท่าตั้งแบบเชื่อมขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.60 (ก) นอกจากนี้ระยะอาร์กยังขึ้นอยู่กับขนาดของลวดที่เชื่อม ซึ่งโดยปกติลวดเชื่อมที่มีขนาดโตจะต้องตั้งระยะอาร์กที่สูง ดังแสดงในรูปที่ 3.60 (ข)



รูปที่ 3.60 ความสัมพันธ์ของแรงดันอาร์กที่มีต่อตำแหน่งท่าเชื่อมและขนาดของลวดเชื่อมของการเชื่อม FCAW

ที่มา : Elgacore MXA 100 , FCAW. 2013

(ก) ความสัมพันธ์ของแรงดันอาร์กกับตำแหน่งท่าเชื่อม

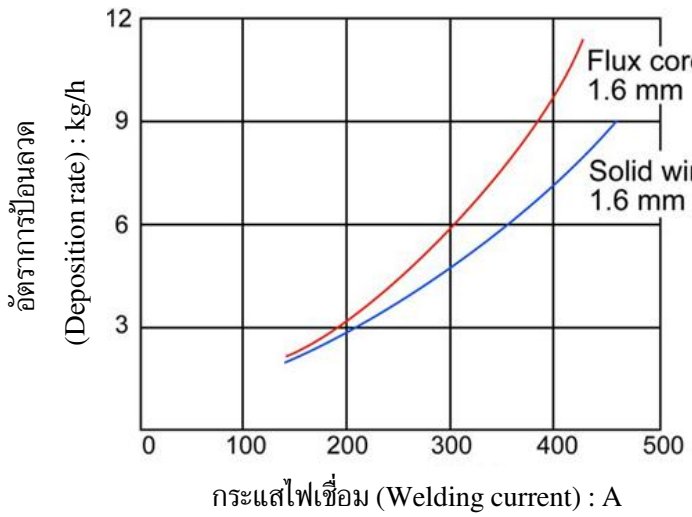


(ข) ความสัมพันธ์ของแรงดันอาร์กกับขนาดลวดเชื่อม

อัตราการป้อนลวด (Deposition rate) เป็นค่าที่ใช้บ่งชี้ถึงปริมาณการเติมของเนื้อโลหะลวดเชื่อมลงในบ่อหลอมละลายในหนึ่งเวลา ซึ่งส่วนใหญ่จะบอกหน่วยวัดเป็น กิโลกรัม/ชั่วโมง (kg/h) อัตราการป้อนลวดเชื่อมจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อกระแสไฟเชื่อมสูงขึ้นโดยมีแนวโน้มที่เป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน ดังแสดงใน รูปที่ 3.61 และยังแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นด้วยว่าอัตราการป้อนลวดเชื่อมของลวดเชื่อมแบบไส้ฟลักซ์ (Flux cored wire) จะมีอัตราป้อนที่สูงกว่าลวดเชื่อมแบบเส้นลวดตัน (Solid wire) ที่ขนาดลวดเชื่อมเท่ากันและค่ากระแสไฟเชื่อมเท่ากันกล่าวโดย Moniz B.J. & Miller R.J. (2004)

อัตราการป้อนลวดถูกควบคุมด้วยชุดป้อนลวด โดยมีข้อควรระวัง ดังต่อไปนี้

- ชุดล้อขับป้อนลวดต้องปรับตั้งให้ถูกต้องและเหมาะสม โดยต้องไม่ใช้แรงกดบนลวดที่มากเกินไป เพราะจะทำให้ลวดเสียรูปทรง และเกิดการเคลื่อนที่ไปแบบไม่สม่ำเสมอ
- เลือกใช้ขนาดความโตของร่องนำลวดที่เหมาะสมกับขนาดความโตของลวดเชื่อม
- ท่อนำลวด (Conduit tube) จะต้องไม่อยู่ในลักษณะที่โค้งงอมากเกินไป เพราะจะทำให้เกิดการเสียดสีกับผิวของลวดเชื่อม ทำให้อัตราการป้อนลวดต่ำลง และขนาดของท่อนำลวดต้องมีขนาดรูที่เหมาะสมกับขนาดของลวดเชื่อม
- ขนาดความโตของท่อนำกระแส (Contact tip) จะต้องมีขนาดที่เหมาะสมและต้องสัมพันธ์กับขนาดความโตของลวดเชื่อม เพราะส่งผลกระทบต่อความราบเรียบของการป้อนลวดขณะเชื่อม



รูปที่ 3.61 ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนลวดกับกระแสไฟเชื่อมของการเชื่อม FCAW *ที่มา : TWI. World Center for materials joining technology. 2005*

3.3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์การเชื่อม (Welding equipment)

เครื่องเชื่อม (Welding machine) ที่ใช้สำหรับเป็นแหล่งของพลังงานการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ ทั้งชนิดลวดเชื่อมแบบ FCAW–S และชนิดแบบ FCAW–G เป็นเครื่องเชื่อมชุดเดียวกันหรือเหมือนกันซึ่งก็คือ เครื่องเชื่อมที่ใช้กับกรรมวิธีการเชื่อมแบบ MIG/MAG โดยส่วนใหญ่เป็นเครื่องเชื่อมชนิดกระแสไฟตรง ค่าแรงดันคงที่ (DC–Constant Voltage) แต่ก็ยังมีการเลือกใช้เครื่องเชื่อมชนิด

กระแสตรง ค่ากระแสคงที่ (DC–Constant Current) สำหรับลวดเชื่อมชนิดพิเศษ จะมีชุดป้อนลวดที่พิเศษเพิ่มเติม ซึ่งเครื่องเชื่อมกระแสไฟตรงมีทั้งที่เป็นแบบหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformers) และแบบมอเตอร์–เจนเนอเรเตอร์ (Motor–Generators) อ้างอิงตามผู้ผลิตเครื่องเชื่อม Miller Electric (2013) ดังแสดงในรูปที่ 3.62 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองแบบช่างเชื่อมสามารถเลือกใช้ตามความเหมาะสม เช่น การเชื่อมภาคสนามที่ไม่มีกระแสไฟฟ้ารองรับก็จะใช้แบบมอเตอร์–เจนเนอเรเตอร์ ซึ่งปัจจุบันมีทั้งประเภทที่ใช้พลังงานน้ำมันและแก๊สเป็นเชื้อเพลิง บางรุ่นออกแบบให้มีล้อเข็นเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย เป็นต้น





(ก) เครื่องเชื่อมแบบหม้อแปลงไฟฟ้า **(ข)** เครื่องเชื่อมแบบมอเตอร์–เจนเนอเรเตอร์

รูปที่ 3.62 เครื่องเชื่อมสำหรับการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

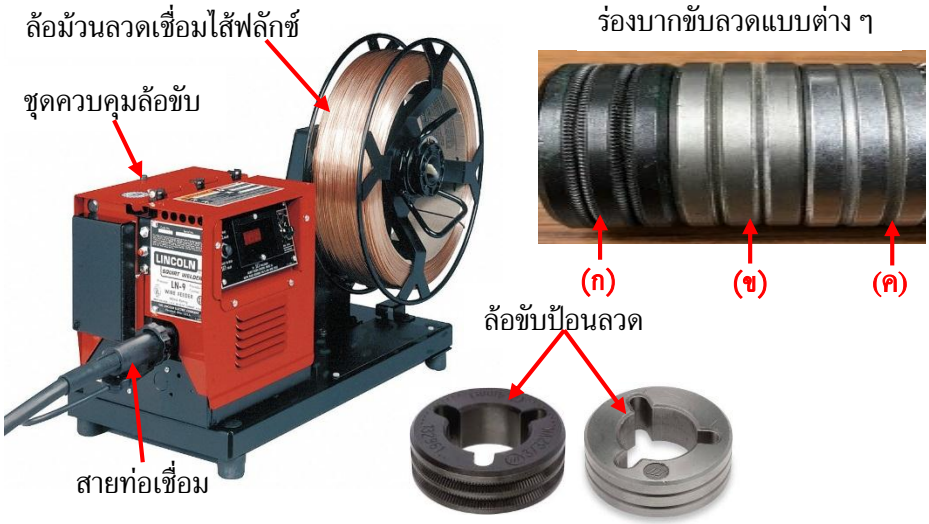
ที่มา : Miller Electric Mfg., Welding Machine, 2013

ชุดป้อนลวด (Wire feed units) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญซึ่งทำหน้าที่ป้อนส่งลวดเชื่อมเพื่อไปอาร์กกับผิวชิ้นงานตลอดเวลาในขณะที่ทำการเชื่อม โดยมีระบบของล้อขับลวดหรือดึงลวดออกจากล้อม้วนลวด (Wire reel) ที่ถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ แล้วส่งผ่านชุดสายเชื่อมไปยังหัวเชื่อม ดังแสดงระบบกลไกการป้อนลวดในรูปที่ 3.63 สำหรับในกรณีการเชื่อมแบบระบบอัตโนมัติ (Automatic welding process) ระบบการป้อนลวดจะมีชุดขับลวดเพิ่มเติมอีกตำแหน่ง ที่ติดตั้งไว้ก่อนที่ลวดจะเข้าถึงหัวนำลวด (Guide nozzle) จะเรียกตำแหน่งขับนี้ว่า Intermediate relay unit ทำหน้าที่ปรับดัดความตรงของลวดเชื่อมที่อาจเกิดการหงิกงอจากการม้วนลวดเข้าล้อ

ระบบการขับป้อนลวดที่นิยมใช้กันมี 3 วิธี ซึ่งจะมีกลไกการป้อนลวดที่เหมือนกันกับระบบการป้อนลวดเชื่อมของการเชื่อม MIG/MAG ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อชุดอุปกรณ์การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW) แต่มีข้อที่พึงระมัดระวังในการเลือกล้อขับป้อนลวด (Wire feed roller) เพราะลวดเชื่อมมีลักษณะเป็นท่อบางที่มีฟลักซ์บรรจุอยู่ภายในถ้าบีบอัดแน่นมากเกินไปจะทำให้ลวดเสียรูปทรง ซึ่งจะมีผลต่ออัตราการป้อนลวดสู่การอาร์ก โดยเฉพาะอย่างยิ่งลวดไส้ฟลักซ์ประเภทโลหะอ่อน ๆ จึงมีได้มีข้อแนะนำจากผู้ผลิตลวดเชื่อมให้เลือกใช้ล้อขับลวดแบบร่องตัววี (V) สำหรับลวดเชื่อมประเภทโลหะ

เหล็ก และล้อขับลวดแบบร่องครึ่งวงกลมหรืออาจมีผิวร่องที่มีผิวหยาบ ๆ สำหรับลวดเชื่อมอลูมิเนียม ดังตัวอย่างร่องบากของล้อขับลวดในรูปที่ 3.63 แบบ (ก) เป็นร่องบากแบบตัววีมีร่องฟัน แบบ (ข) เป็นแบบร่องตัววี (V) และ แบบ (ค) เป็นแบบร่องโค้งครึ่งวงกลมอ้างอิง Miller Electric (2013)

การป้อนแรงบีบกดลวดผ่านชุดล้อขับไม่ว่าจะเป็นแบบชุดล้อขับ 2 ล้อ หรือ 4 ล้อ ก็ตามจะต้องใช้แรงบีบที่ไม่มากหรือน้อยจนเกินไป หมายถึง แรงมากเกินไปจนลวดเสียรูปทรง (Deformation) หรือแรงน้อยเกินไปจนเกิดการลื่น (Slipping) ของลวด ทั้งนี้ก็ต้องเลือกชนิดของร่องบากล้อขับให้เหมาะสมกับชนิดของโลหะลวดและขนาดของลวด เป็นต้น



รูปที่ 3.63 ชุดระบบป้อนลวดและล้อขับของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

ที่มา : Tools Working, Welding Machine, 2013

ชุดสายเชื่อมและหัวเชื่อม (Welding cable units and welding torch)

ชุดสายเชื่อม (Welding cable units) เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบกันอยู่เป็นชุดเดียวกันหัวเชื่อม โดยปลายของสายเชื่อมจะต่อเข้ากับเครื่องเชื่อม ส่วนปลายสายอีกข้างต่อเข้ากับหัวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.64 โดยส่วนของสายเชื่อมหรือบางครั้งเรียกว่า ชุดสายท่อเชื่อม (Tube package) ภายในประกอบไปด้วย สายท่อแก๊สปกคลุม (Shielding gas tube) ท่อนำป้อนลวด (Wire feed tube) ชุดสายควบคุม (Control lead) รวมถึง ท่อระบายความร้อนจากการเชื่อม และชุดสายไฟเชื่อม ระบบระบายความร้อนถ้ากรณีใช้น้ำระบาย จะต้องมีท่อน้ำไป–กลับอยู่ภายใน ดังนั้น สายเชื่อมชนิดนี้จะมีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ มีน้ำหนักมากช่างเชื่อมจะไม่นิยมใช้ แต่ถ้าเครื่องเชื่อมใช้ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศสายเชื่อมจะเบากว่าเคลื่อนไหวสะดวกไม่ยุ่งยากเหมือนระบบใช้น้ำ

สายเชื่อมที่ดีต้องคล่องตัวในการใช้งาน โค้งงอได้ไม่เสียรูป (Flexible) ท่อนำลวดภายในจะทำจากเหล็กกล้าที่ขดเป็นม้วนเกลียว (Spiral) เพื่อที่จะบิดตัวโค้งงอได้มากไม่เป็นอุปสรรคต่อการไหลของลวด

เชื่อม และบางครั้งก็ทำจากพลาสติกชนิดเทฟลอน ใช้สำหรับลวดเชื่อมบางชนิด ซึ่งท่อนำแบบพลาสติกจะทนต่อการสึกหรอได้ดี ส่วนชุดสายควบคุม จะเป็นตัวนำสัญญาณที่ส่งมาจากตัวสวิตช์ควบคุมที่หัวเชื่อม สายส่งสัญญาณจะต้องมีประสิทธิภาพสูงเพราะจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความละเอียดและแม่นยำในการควบคุมระบบการเชื่อมข้อมูลจาก Miller Electric (2013)



รูปที่ 3.64 ชุดสายเชื่อมของขบวนการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์
ที่มา : TWI. World Center for materials joining technology. 2005

หัวเชื่อม (Welding torch) หรือบางครั้งก็นิยมเรียกกันว่า ปืนเชื่อม (Welding gun) ซึ่ง Lincoln Electric (2018) ได้ให้คำอธิบายไว้ว่าขบวนการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์จะมีทั้งหัวเชื่อมที่ออกแบบเพื่อรองรับกับการเชื่อมด้วยระบบกึ่งอัตโนมัติ (Semi–automatic welding) และการเชื่อมด้วยระบบอัตโนมัติ (Automatic welding) โดยหัวเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัตินั้นจะมี 2 แบบ ที่แบ่งตามลักษณะชนิดของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.65 (ก) และ (ข) หัวเชื่อมจะมีด้ามมือจับ (Gun handle) การ์ดป้องกันความร้อน (Guard shileld) และสวิตช์ควบคุม (Gun trigger) โดย รูป (ก) เป็นหัวเชื่อมที่ใช้สำหรับการเชื่อมด้วยลวดชนิดที่สามารถสร้างแก๊สปกคลุมขึ้นมาจากฟลักซ์ของตัวลวดเอง (FCAW–S) ซึ่งสังเกตที่ปลายของหัวเชื่อมจะไม่จำเป็นต้องมีหัวฉีดแก๊ส (Gas nozzle) ส่วนรูป (ข) เป็นหัวเชื่อมที่ใช้สำหรับการเชื่อมด้วยลวดชนิดที่ต้องใช้แก๊สปกคลุมจากถังบรรจุ (FCAW–G) ซึ่งสังเกตที่ปลายของหัวเชื่อมจำเป็นต้องมีหัวฉีดแก๊ส (Gas nozzle) ที่ทำหน้าที่ส่งป้อนแก๊สปกคลุมที่จ่ายผ่านท่อนำแก๊สไปสู่บ่อหลอมละลาย ซึ่งจะมีลักษณะที่เหมือนกันกับหัวเชื่อมของขบวนการเชื่อม MIG/MAG สำหรับรูป (ค) และ (ง) เป็นหัวเชื่อมสำหรับการเชื่อมอัตโนมัติ จะไม่มีด้ามมือจับและการ์ดป้องกันความร้อน แต่จะมีส่วนของหัวเชื่อมที่ต่อเข้ากับระบบแขนกล (Robotic arm) และมีระบบการควบคุมสั่งการด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ หรือระบบควบคุมแบบไร้สาย (Remote control) โดยรูป (ค) ใช้กับลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ชนิด FCAW–S และรูป (ข) ใช้กับลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ชนิด FCAW–G มีความแตกต่างกันที่มีหัวฉีดแก๊สกับไม่มีหัวฉีดแก๊สที่ปลายของท่อนำกระแส (Contact tip) ดังแสดงความแตกต่างของปลายท่อนำกระแสในวงกลมเส้นประของรูปที่ 3.65



(ก) หัวเชื่อมสำหรับลวดเชื่อมแบบ FCAW–S



(ข) หัวเชื่อมสำหรับลวดเชื่อมแบบ FCAW–G



(ค) หัวเชื่อมสำหรับการเชื่อมอัตโนมัติ สำหรับลวด FCAW–S



(ง) หัวเชื่อมสำหรับการเชื่อมอัตโนมัติ สำหรับลวด FCAW–G

รูปที่ 3.65 หัวเชื่อมสำหรับขบวนการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

ที่มา : Lincoin Electric, Welding guns and Torches. 2018

ระบบการระบายความร้อนของหัวเชื่อมทุกชนิดจะมี 2 แบบ คือ แบบที่มีระบบระบายความความร้อนด้วยน้ำ (Water cooling) กับระบบที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ (Gas cooling) โดยแบบแรกจะเป็นแบบที่ระบายความร้อนได้ดี สามารถเชื่อมได้ที่กระแสสูง ๆ และนานอย่างต่อเนื่อง การบำรุงรักษาก็ง่ายและคงทนแต่มีน้ำหนักค่อนข้างมาก เพราะจะต้องมีระบบของท่อน้ำเข้า (Water In) และท่อน้ำออก (Water Out) ส่วนแบบหลังจะนิยมใช้กันมากเพราะน้ำหนักเบาเคลื่อนตัวสะดวกไม่ยุ่งยาก แต่จะทำการ

เชื่อมที่กระแสสูง ๆ และเป็นเวลานานต่อเนื่องได้ไม่ดี เพราะประสิทธิภาพของการระบายความร้อนด้วยอากาศด้อยกว่าน้ำ

อุปกรณ์สำหรับระบบแก๊สปกคลุม (Gas shield equipment) แก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลายสำหรับลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์แบบ FCAW–G ซึ่งต้องอาศัยแก๊สปกคลุมจากแหล่งถังภายนอก (Shielding gas cylinder) ดังนั้น จึงต้องชุดอุปกรณ์ควบคุมระบบแก๊สปกคลุม ซึ่งประกอบไปด้วยชุดควบคุมอัตราการไหล ชุดเกจความดัน ชุดผสมแก๊ส รวมไปถึงท่อส่งแก๊สและอุปกรณ์อื่น ๆ ซึ่งคล้ายกับชุดอุปกรณ์ของระบบแก๊สปกคลุมในขบวนการเชื่อม MIG/MAG ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้น แต่มีชุดอุปกรณ์ที่ต้องให้ความสำคัญเป็นพิเศษสำหรับการเชื่อมแบบลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ คือ ชุดกำจัดควัน (Fume extractors) ด้วยเหตุที่การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์จะเกิดควันในปริมาณที่มากจากการถูกเผาไหม้ของฟลักซ์ในไส้ลวด ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพ อ้างอิงผลการวิจัยของ Jerome E. Spear (2011) จึงต้องมีรูปแบบระบบการกำจัดควันที่ดีและมีประสิทธิภาพ ซึ่งที่นิยมใช้กันมี 2 แบบ คือ

1. แบบชุดระบบเครื่องดูดควัน (Fume extractors welding) เป็นเครื่องดูดควันที่มีหัวดูดอยู่ที่ตำแหน่งเหนือหัวเชื่อมขึ้นไปดังแสดงในรูปที่ 3.66 (ก) ซึ่งสามารถปรับสูงต่ำตามต้องการ ถ้าสูงมากเกินไปอาจดูดควันได้ไม่หมด แต่ถ้าต่ำมากเกินไปก็จะดูดเอาแก๊สปกคลุมบ่อหลอมปะปนเข้าไปด้วย จึงต้องมีระดับความสูงที่เหมาะสม ดังนั้น จึงได้มีการทดลองหาปริมาณลมดูดที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 3.9 ปกติชุดดูดควันแบบนี้มีทั้งที่เป็นระบบที่ต่อกันหลาย ๆ หัวดูด ส่วนใหญ่เป็นระบบในโรงงานอุตสาหกรรมและแบบเดี่ยวสำหรับงานเชื่อมทั่ว ๆ ไป ที่เรียกกันว่า ชุดดูดควันเอนกประสงค์

2. แบบชุดดูดควันที่หัวเชื่อม (Fume extraction gun) เป็นระบบการดูดควันที่ประกอบติดตั้งไว้เป็นชุดเดียวกันกับหัวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 3.66 (ข) จะสะดวกในการกำจัดควันเพราะดูดได้ทันทีเมื่อเกิดการอาร์ก เป็นที่นิยมใช้กันในงานภาคสนามแต่หัวเชื่อมจะมีน้ำหนักค่อนข้างมาก และต้องปรับแรงดูดที่เหมาะสมเพราะมีโอกาสที่จะสูญเสียแก๊สปกคลุมที่จำเป็นไปกับแรงดูดค่อนข้างง่าย เหตุด้วยเพราะหัวดูดอยู่ติดกับหัวเชื่อม เป็นเหตุให้มีปริมาณแก๊สปกคลุมไม่เพียงพอที่จะปกป้องบ่อหลอมละลาย จะมีผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อม

ตารางที่ 3.9 ความสัมพันธ์ของระยะห่างหัวดูดควันต่อบริเวณเชื่อมกับอัตราการไหลของลมดูด

ที่มา : ยุคคล จุลอุถัย หนังสือเทคโนโลยีขบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์ เล่ม 2, 2554

ระยะห่างระหว่างหัวดูดควันกับบริเวณอาร์กเชื่อม	อัตราไหลของลมดูดต่ำสุด	
	ลูกบาศก์เมตร/นาที	ลูกบาศก์ฟุต/นาที
15 ซม. (6 นิ้ว)	7	250
23 ซม. (9 นิ้ว)	11.3	400
30 ซม. (12 นิ้ว)	28.3	1000

หมายเหตุ ถ้าระยะห่างระหว่างหัวยิ่งมาก อัตราการไหลของลมดูดจะยิ่งลดต่ำลง



รูปที่ 3.66 ระบบการดูดควันที่เกิดจากการเผาไหม้ของฟลักซ์ในการเชื่อมลวดไส้ฟลักซ์

ที่มา : Forster Welding Systens. 2013

3.3.4 แก๊สปกคลุมสำหรับการเชื่อมลวดไส้ฟลักซ์ (Shielding gas)

LINCOLN ELECTRIC (2016) ได้กล่าวถึงการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ว่าจะอาศัยแก๊สเฉื่อยเพื่อปกคลุมบ่อหลอมละลายจากการเผาไหม้ของผงฟลักซ์ที่อัดบรรจุอยู่ในตัวของลวดเชื่อมเองเป็นสำคัญ ซึ่งเป็นจุดเด่นของบขวนการเชื่อมนี้ ที่ไม่ต้องยุ่งยากหาแก๊สปกคลุมจากภายนอกเข้าไปปกคลุม เราจึงเรียกลวดเชื่อมที่สามารถสร้างแก๊สปกคลุมขึ้นได้ด้วยตัวเองนี้ว่า “Self–shielded flux cored wire” ซึ่งพบว่าเป็นที่นิยมกันมาก ได้มีการนำไปใช้เชื่อมโลหะงานที่หลากหลายชนิด หลากหลายเกรดวัสดุ โดยโลหะเชื่อมบางชนิดหรือบางเกรดมีความจำเป็นที่จะต้องใช้แก๊สปกคลุมมากกว่าที่มีอยู่ในไส้ฟลักซ์ จึงมีการนำแก๊สปกคลุมจากภายนอกเข้าช่วยปกคลุม จึงเกิดเป็นลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ที่ใช้ร่วมกับแก๊สปกคลุมจากถังบรรจุที่เรียกกันว่า “Gas–shielded flux cored wire” โดยแก๊สที่นำมาใช้ร่วมกันนี้จะเป็นแก๊สกลุ่มเดียวกันกับการเชื่อมแบบ MIG/MAG ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า การเชื่อมแบบลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์นี้จะคล้าย ๆ กัน ซึ่งมีทั้งชนิดที่เป็นแก๊สเฉื่อย (Inert gas) แอคทีฟแก๊ส (Active gas) และแก๊สผสม (Mixing gas) โดยผู้เขียนได้นำเสนอในรายละเอียดของแก๊สแต่ละชนิดไว้แล้วในหัวข้อของการเชื่อมแบบอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW) จากการค้นคว้า พบว่ามีงานวิจัยจำนวนมากที่กล่าวถึงการเชื่อมด้วยเชื่อมไส้ฟลักซ์ที่ใช้แก๊สปกคลุมจากภายนอกเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon

dioxige) ที่มักเรียกกันว่าแก๊ส CO_2 ซึ่งเป็นแก๊สที่นิยมใช้กันมากในการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ เป็นแก๊สที่มีราคาถูก ให้ความร้อนแก่บ่อหลอมละลายสูงถึงแม้จะเป็นการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบหยดขนาดใหญ่ก็ตาม แต่ก็มีผงไส้ฟลักซ์พิเศษบางตัวที่สามารถช่วยให้การถ่ายโอนหยดน้ำโลหะมีลักษณะคล้าย ๆ แบบสเปรย์อาร์ก ส่วนที่เป็นแก๊สกลุ่มแก๊สเฉื่อยชนิดอาร์กอน (Ar) กับฮีเลียม (He) ก็มีการเลือกใช้ตามชนิดของโลหะที่เป็นลวดเชื่อม

แก๊สปกคลุมชนิดแก๊สผสม (Mixing gas) เป็นกลุ่มแก๊สปกคลุมที่นิยมเลือกใช้สำหรับการเชื่อมลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ โดยจะใช้แก๊สเฉื่อยเป็นแก๊สตัวหลัก ซึ่งปกติทีใช้ก็คือ แก๊สอาร์กอนและก็จะมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มาผสม หรือบางเกรดก็มีแก๊สออกซิเจนผสม โดยออกแบบแก๊สผสมแต่ละชนิดออกมาเพื่อให้เหมาะสมกับชนิดของโลหะลวดไส้ฟลักซ์ เกรดของแก๊สผสมที่ช่างเชื่อมนิยมใช้กันมาก คือ 75% Ar + 25% CO_2 คุณภาพของแนวเชื่อมจะดีกว่าการใช้แก๊ส CO_2 100% ยิ่งโดยเฉพาะการนำไปใช้กับขบวนการเชื่อมที่ถ่ายโอนน้ำโลหะแบบสเปรย์แนวเชื่อมจะมีคุณสมบัติทางกลที่สูงขึ้น และยังเป็นแก๊สปกคลุมที่ใช้ได้กับทุกตำแหน่งท่าเชื่อม ที่สำคัญที่สุดควันของการอาร์กมีความเป็นพิษอันตรายต่อสุขภาพช่างเชื่อมน้อยมากเมื่อเทียบกับแก๊สปกคลุมเกรดอื่น ๆ อย่างไรก็ตามแก๊สผสมที่มีแก๊สอาร์กอนผสมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไม่แนะนำให้ไปใช้กับลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ชนิดที่ผลิตมาใช้สำหรับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อย่างเดียว เพราะจะเป็นการเพิ่มธาตุแมงกานีส (Mn) ซิลิกอน (Si) และออกไซด์ของธาตุอื่น ๆ ในเนื้อโลหะเชื่อม จากคำกล่าวข้างต้นถึงความเหมาะสมของแก๊สปกคลุมกับชนิดของลวดดังแสดงเป็นตัวอย่างในตารางที่ 3.10 เป็นข้อมูลทางเทคนิคของบริษัท Lincin Electric Company

ตารางที่ 3.10 ความเหมาะสมของแก๊สปกคลุมกับชนิดของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ต่อสมบัติแนวเชื่อม

ที่มา : Lincoln Electric. Choosing a Shielding Gas for Flux Cored Welding. 2016

MECHANICAL PROPERTIES[1] – As Required per AWS A5.20/A5.20M: 2005

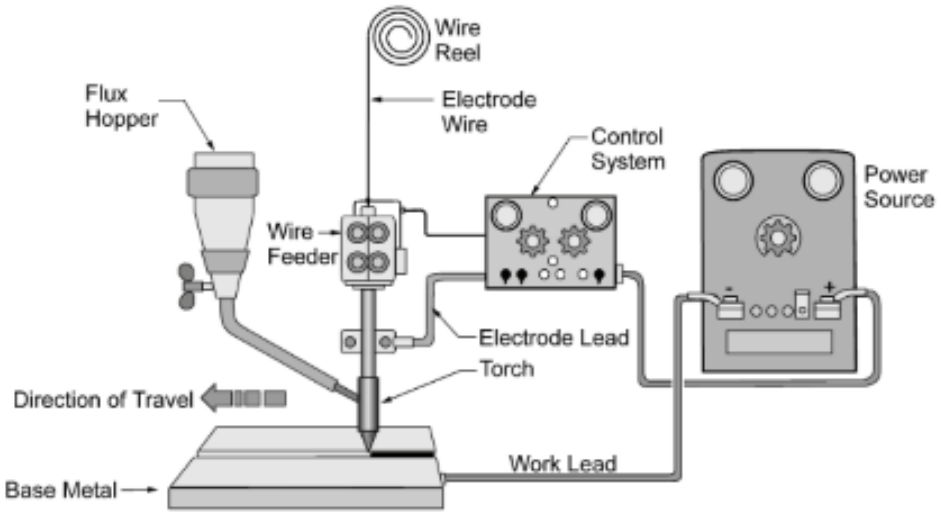
	Yield Strength[2] MPa (ksi)	Tensile Strength MPa (ksi)	Elongation %	Charpy V-Notch J (ft•lbf) @ -18°C (0°F)	Charpy V-Notch J (ft•lbf) @ -29°C (-20°F)
Requirements[4]					
AWS E71T-1C H8, E71T-1M H8	400 (58) min.	480 - 655 (70 - 95)	22 min.	27 (20) min.	Not Specified
AWS E71T-9C H8, E71T-9M H8				Not Specified	27 (20) min.
Typical Performance[5]					
As-Welded with:					
100% CO_2	510 - 550 (73 - 79)	570 - 600 (82 - 87)	26 - 28	38 - 95 (28 - 70)	27 - 65 (20 - 48)
75% Ar/25% CO_2	570 - 610 (82 - 88)	620 - 660 (89 - 95)	24 - 26	62 - 111 (46 - 82)	39 - 85 (29 - 63)

DEPOSIT COMPOSITION[1] – As Required per AWS A5.20/A5.20M: 2005

	%C	%Mn	%Si	%S	%P	Diffusible Hydrogen (mL/100g weld deposit)
Requirements[4]						
AWS E71T-1C H8, E71T-1M H8	0.12 max.	1.75 max.	0.90 max.	0.03 max.	0.03 max.	8 max.
AWS E71T-9C H8, E71T-9M H8						
Typical Performance[5]						
As-Welded with:						
100% CO_2	0.03 - 0.04	1.28 - 1.41	0.42 - 0.49	0.01	0.01 - 0.02	3 - 8
75% Ar/25% CO_2	0.03 - 0.04	1.45 - 1.60	0.54 - 0.62	0.01	0.01 - 0.02	4 - 8

3.4 การเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding : SAW)

การเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ หรือที่เรียกกันว่า “การเชื่อมซับเมิร์จ” เป็นการเชื่อมแบบอาร์กอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้งานกัน อุปกรณ์และระบบวงจรการทำงานของการเชื่อมอาร์กนี้มีระบบคล้าย ๆ กับขบวนการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ ต่างกันที่มีระบบการป้อนผงฟลักซ์แยกออกจากลวดเชื่อมเปลือยตัน (Wire rod) การเชื่อมอาศัยความร้อนจากการอาร์กระหว่างปลายของลวดเชื่อมที่เปลือยกับชิ้นงานโลหะ โดยลวดเชื่อมจะถูกดึงออกจากล้อม้วนลวด (Wire reel) มาป้อนเพื่อการอาร์กอย่างต่อเนื่องด้วยชุดอุปกรณ์ป้อนส่งลวด (Wire feeder) ซึ่งในขณะอาร์กนั้นก็จะมีผงฟลักซ์ที่บรรจุอยู่ในถังฟลักซ์ (Flux hopper) ไหลลงมาปกคลุมบริเวณอาร์กอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาในขณะที่กำลังทำการอาร์ก โดยที่มีเครื่องเชื่อมเป็นแหล่งพลังงาน (Power source) และควบคุมปัจจัยการเชื่อมด้วยชุดควบคุมระบบ (Control system) ดังแสดงอุปกรณ์และระบบวงจรการทำงานของการเชื่อมในรูปที่ 3.67



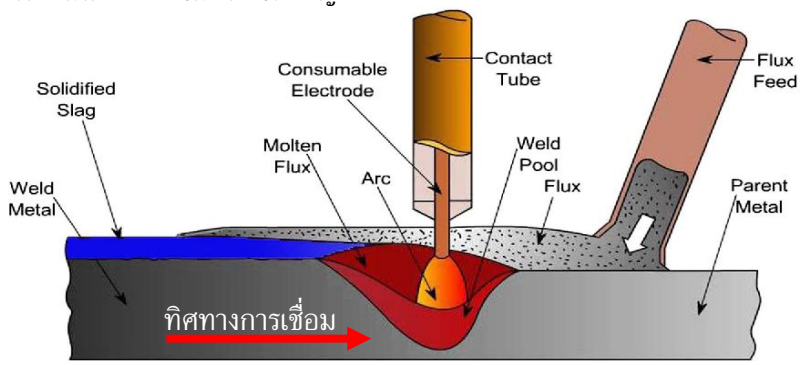
รูปที่ 3.67 อุปกรณ์และระบบวงจรการทำงานของการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (SAW)

ที่มา : BMT Eleet Technology Limited, 2006

ระบบการอาร์ก (Arc system) Mohit Sharma et al. (2019) ได้อธิบายไว้ว่าการอาร์กของขบวนการเชื่อมนี้เป็นการอาร์กที่เกิดขึ้นใต้ผงฟลักซ์ซึ่งจะมีทั้งผงฟลักซ์แบบ Agglomerated powdered flux และผงฟลักซ์แบบ Fused powdered flux ขณะทำการอาร์กจะมองไม่เห็นแสงของการอาร์ก ไม่เห็นบ่อหลอมละลาย และจะไม่มีสะเก็ดโลหะกระเด็นออกจากบริเวณการอาร์ก โดยความร้อนจากการอาร์กจะหลอมละลายผงฟลักซ์จนกลายเป็นแก๊สเฉื่อยที่ช่วยปกคลุมแนวเชื่อมจากบรรยากาศภายนอก เมื่อแนวเชื่อมเย็นตัวลงฟลักซ์ก็จะกลายเป็นสแลกของแข็งบนแนวเชื่อมที่ต้องทำการเคาะออกไป ผงฟลักซ์อาร์กบางส่วนที่ไม่ได้รับความร้อนจะไม่หลอมละลายจึงสามารถนำกลับมาใช้ได้อีก ดังแสดงรายละเอียดของระบบการอาร์กในรูปที่ 3.68 ระบบการป้อนของผงฟลักซ์จะอาศัยหลักการแรงโน้มถ่วงและน้ำหนักของเม็ดผง จึงเป็นการเชื่อมที่เหมาะกับการเชื่อมในตำแหน่งท่าราบเป็นสำคัญ การเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ โดยส่วน

ใหญ่จะใช้กับการเชื่อมโลหะงานที่มีความหนาตั้งแต่ 5 มิลลิเมตรขึ้นไป ประเภทงาน ภาชนะรับแรงดัน ท่อ เรือ โครงเหล็กใหญ่ หรืองานที่มีแนวเชื่อมยาวมาก ๆ เป็นต้น ซึ่งจะเหมาะสำหรับวัสดุโลหะจำพวกเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steels) เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low alloy steels) เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steels) เหล็กกล้าผสมนิกเกิล (Nickel allous steels) รวมไปถึงงานเชื่อมพอก (Cladding) ที่ต้องการผิวทนการสึกหรอหรือทนการกัดกร่อน

ระบบการเชื่อมสามารถเชื่อมได้ทั้งแบบระบบเชื่อมกึ่งอัตโนมัติ (Semi–Automatic Welding) และแบบระบบเชื่อมอัตโนมัติ (Automatic Welding) แบบระบบกึ่งอัตโนมัติจะเหมาะกับการเชื่อมด้วยลวดขนาดเล็กความเร็วในการเชื่อมปานกลาง เพราะการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมและการปิด–เปิดระบบอาจควบคุมด้วยมือคนเชื่อมหรือมอเตอร์ ส่วนแบบอัตโนมัติจะเป็นการเชื่อมที่ใช้เครื่องจักรควบคุมทั้งหมด ซึ่งส่วนใหญ่เน้นงานเชื่อมที่มีความหนามาก ๆ และมีแนวเชื่อมที่ยาว การเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์นี้จะนิยมใช้กับระบบการเชื่อมแบบอัตโนมัติเป็นสำคัญ



รูปที่ 3.68 หลักการของการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding : SAW)

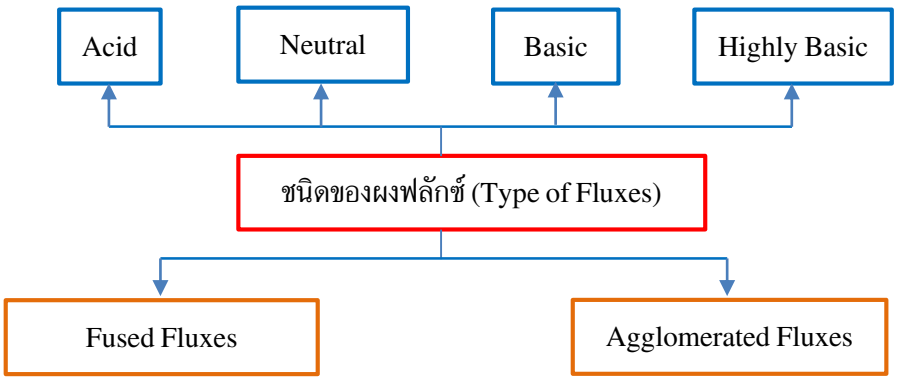
ที่มา : M.R. Nezamdost et. al.,Submerged arc welding 2016

3.4.1 ผงฟลักซ์เชื่อมและลวดเชื่อม (Welding flux powder and Solid wire)

ผงฟลักซ์เชื่อม (Welding flux powder) ฟลักซ์สำหรับการปกคลุมในการเชื่อมแบบอาร์กใต้ฟลักซ์มีลักษณะเป็นผง (Powder) ที่บรรจุอยู่ในถังฟลักซ์ (Flux hopper) แบ่งเป็นชนิดดังในรูปที่ 3.69 โดยสามารถแบ่งตามความเป็นกรด–ด่างของผงฟลักซ์ได้ 4 ชนิด แต่ถ้าแบ่งตามวิธีการผลิตผงสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด ในที่นี้จะขอกล่าวถึงชนิดของผงฟลักซ์ตามวิธีการผลิต โดยอ้างอิงตามข้อมูลของ LINCOLN ELECTRIC– Modern SAW (2019) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ก. ผงฟลักซ์ชนิดหลอม “Fused powdered fluxes” เป็นผงฟลักซ์ที่ผลิตโดยการนำส่วนผสมของสสารทางเคมีทั้งหมด เข้ามาหลอมรวมเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิประมาณ 1500 –1700 ^{o}C จากนั้นก็นำออกมาปล่อยให้เย็นตัวในน้ำหรือแผ่นรองเพื่อให้เย็นตัวทันทีแล้วนำมาบดให้เป็นผง คัดแยกขนาดตามต้องการ อบไล่ความชื้น ก็จะได้ผงฟลักซ์ที่มีลักษณะคล้ายกับผงแก้วพร้อมบรรจุถุง ดังแสดงลักษณะของถุงบรรจุผงฟลักซ์และขนาดรูปทรงผงฟลักซ์ในรูปที่ 3.70 (ก) ผงฟลักซ์ชนิดหลอมนี้มีทั้งข้อดีและข้อเสียดังแสดงในตารางที่ 3.11

ข. ผงฟลักซ์ชนิดตัวประสาน “Agglomerated powdered fluxes” เป็นผงฟลักซ์ที่ผลิตโดยการนำเอาสสารทางเคมีมีที่ต้องผสมทั้งหมดมีคลุกเคล้ากับตัวประสาน ได้แก่ ไทเทเนียม เฟอร์โรซิลิกอน เฟอร์โรแมงกานีส โพแตสเซียม หรือโซเดียมซิลิเกต จากนั้นก็นำไปอบที่อุณหภูมิ 800 –1000 ^{o}C จนเกิดการเกาะติดกันเป็นก้อน ๆ ต่อด้วยการบดและคัดแยกขนาดก็จะได้ผงฟลักซ์พร้อมบรรจุถุง ดังแสดงลักษณะของถุงบรรจุผงฟลักซ์และขนาดผงฟลักซ์ในรูปที่ 3.70 (ข) ผงฟลักซ์ชนิดหลอมนี้มีทั้งข้อดีและข้อเสีย ดังแสดงในตารางที่ 3.11



รูปที่ 3.69 การแบ่งชนิดของผงฟลักซ์ปกคุลมแนวเชื่อมสำหรับการเชื่อม SAW

ที่มา : CSWIP 3.1 Welding inspector WISS Training and Examination Services Granta Park 2011



(ก) ผงฟลักซ์ชนิดหลอม “Fused powdered fluxes”



(ข) ผงฟลักซ์ชนิดตัวประสาน “Agglomerated powdered fluxes”

รูปที่ 3.70 ตัวอย่างผงฟลักซ์ปกคุลมแนวเชื่อมสำหรับการเชื่อม SAW

ที่มา : รูป (ก) ESAB, Welding Flux 2014. รูป (ข) Laiwu Hulin Welding Materials CO.,LTD. 2016

ตารางที่ 3.11 ข้อดี–ข้อเสียและการเก็บรักษาผงฟลักซ์สำหรับการเชื่อมใต้ฟลักซ์

ที่มา : Welding & NDT, Submerged arc welding, 2019

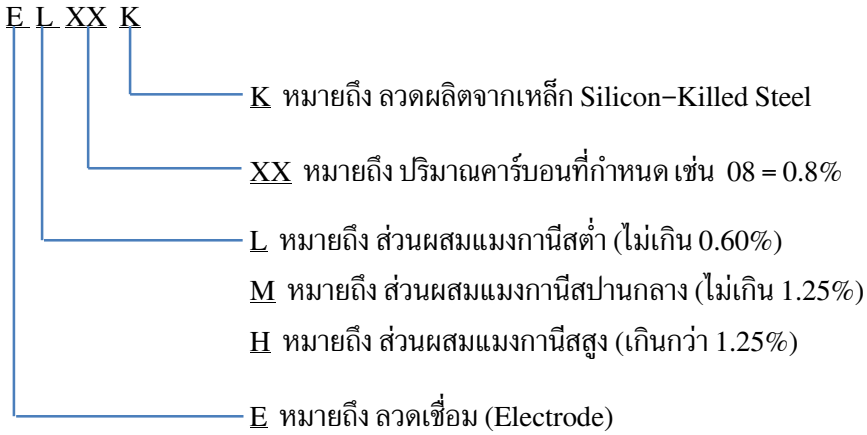
ชนิดของผงฟลักซ์	ข้อดี (Advantage)	ข้อเสีย (Disadvantage)
ชนิดหลอม (Fused fluxes)	● ส่วนผสมของฟลักซ์มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน ● ฟลักซ์ไม่ดูดความชื้น ● ฟลักซ์ที่ใช้แล้วสามารถนำกลับมาบดใช้ใหม่ได้ ● เหมาะกับการเชื่อมด้วยความเร็วสูง	● ไม่สามารถเติม Deoxidizer และ Ferro alloys ลงในฟลักซ์ได้เนื่องจากการผลิตฟลักซ์ใช้อุณหภูมิที่สูง ซึ่งจะทำให้ธาตุที่ผสมดังกล่าวเกิดการสูญเสียและแยกตัวในระหว่างการผลิตฟลักซ์
ชนิดตัวประสาน (Agglomerated fluxes)	● ฟลักซ์ชนิดนี้ผลิตด้วยอุณหภูมิต่ำ จึงสามารถเติมตัวลดออกซิเจนและธาตุผสมลงในฟลักซ์ได้ ● ฟลักซ์มีความหนาแน่นต่ำจึงสามารถใช้ปกคลุมรอยเชื่อมได้หนากว่า ● ฟลักซ์ที่หลอมเหลวเป็นสแลกสามารถเคาะออกได้ง่าย	● ฟลักซ์เมื่อใช้แล้วไม่สามารถนำกลับมาบดใช้ใหม่เพราะส่วนผสมทางเคมีเปลี่ยนไป ● ฟลักซ์ดูดเก็บความชื้นได้ง่าย ต้องระมัดระวังในการจัดเก็บ

การเก็บรักษาฟลักซ์

- ฟลักซ์ต้องเก็บไว้ในที่มีความชื้นต่ำถ้าฟลักซ์เปียกชื้น จะต้องนำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 400 ^{o}C
- ถ้านำฟลักซ์ที่มีความชื้นไปใช้ จะทำให้แนวเชื่อมเกิดรูพรุนหรือเกิดการแตกร้าวได้
- การเก็บฟลักซ์ที่ใช้แล้วมาใช้ใหม่ ต้องระวังสารมลทินที่เจือปนมากับฟลักซ์ เช่น สนิมเหล็กหรือคราบน้ำมัน

ลวดเชื่อม (Solid wire) HOBART Filler Metals (2018) ได้กล่าวถึงการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์นิยมใช้เชื่อมโลหะที่มีความหนา และต้องการอัตราการเติมเนื้อเชื่อมที่มาก โดยลวดเชื่อมมีทั้งที่เป็นลักษณะเส้นตัน (Solid wire) และเป็นลวดไส้ผงโลหะ (Metal–cored wire) และค่อนข้างจะมีขนาดใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 3.71 ซึ่งจัดเก็บบรรจุไว้ในรูปแบบที่สะดวกในการที่จะใช้กับอุปกรณ์ป้อนลวดโดยมีทั้งที่เป็นแบบม้วน (Coil) และแบบถัง (Drum) ดังแสดงในรูปที่ 3.72 (ก) และ (ข) ตามลำดับ มีขนาดเล็กและใหญ่วัดได้จากน้ำหนักของลวด มีตั้งแต่ 11–454 กิโลกรัม และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 1.6–6.4 มิลลิเมตร โลหะลวดเชื่อมส่วนใหญ่จะเป็นชนิดโลหะเหล็ก (Ferrous electrodes) มักจะทำการเคลือบผิวด้วยทองแดงเพื่อเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้า ป้องกันการเกิดสนิม และลดอัตราการเสียดทานกับท่อนำกระแส และชนิดโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel electrodes) ซึ่งการที่ช่างเชื่อมจะเลือกใช้ต้องทำความเข้าใจถึงรหัส (Code) ตามมาตรฐาน เช่น ตัวอย่างดังต่อไปนี้

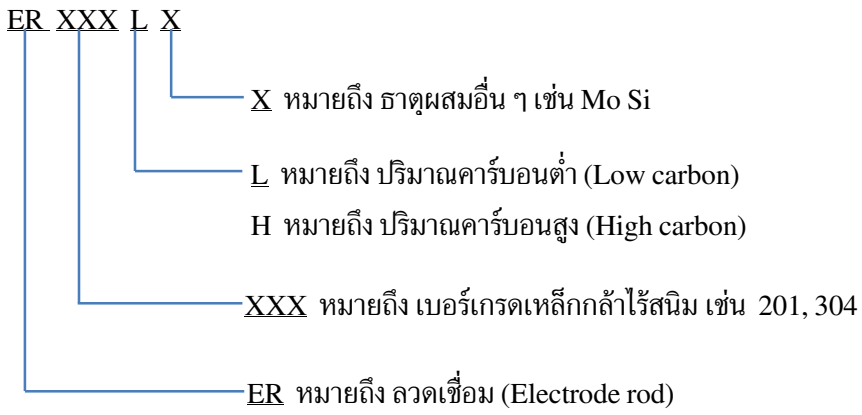
มาตรฐาน AWS (American Welding Society) ได้กำหนดมาตรฐานของลวดเชื่อมใต้ฟลักซ์ *สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน ตามรหัส AWS A 5.17–89*



แบ่งได้ มี 3 กลุ่ม คือ

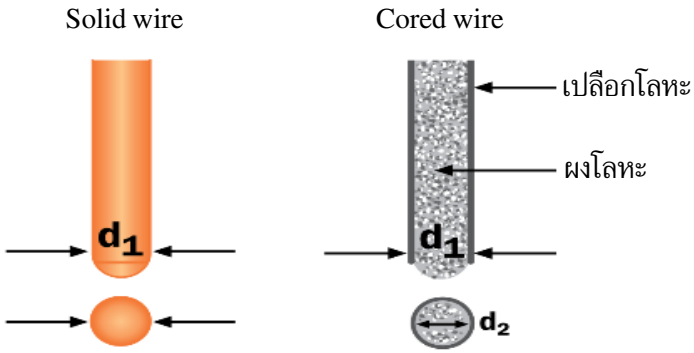
- กลุ่มส่วนผสมแมงกานีสต่ำ (Low Manganese) ได้แก่ EL8 EL8K และ EL12
- กลุ่มส่วนผสมแมงกานีสปานกลาง (Medium Manganese) ได้แก่ EM12 EM12K EM13K EM14K และ EM15K
- กลุ่มส่วนผสมแมงกานีสสูง (High Manganese) ได้แก่ EH11K EH12K และ EH14

สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม ตามรหัส AWS A 5.9–92



แบ่งได้เป็นกลุ่มหลัก คือ

- กลุ่ม E 2XX ได้แก่ E 201 E 202 E 204 E 216 และ E 209
- กลุ่ม E 3XX ได้แก่ E 304 E 306L E 309L และ E 316Mo
- กลุ่ม E 4XX ได้แก่ E 409 E 410NiMo E 420 และ E 430
- กลุ่ม E 5XX ได้แก่ E 500 E 501 E 505 E 520 และ E 550
- กลุ่ม E 6XX ได้แก่ E 600 E 601 E 620 E 625 และ E 660



รูปที่ 3.71 ลวดเชื่อมใต้ฟลักซ์ชนิดเส้นตัน (Solid wire) และชนิดลวดไส้ผงโลหะ (Cored wire)

ที่มา : ITW Welding, HOBART Filler Metals, 2018



(ก) ลวดเชื่อมใต้ฟลักซ์แบบม้วน (Coil) **(ข)** ลวดเชื่อมใต้ฟลักซ์แบบถัง (Drum)

รูปที่ 3.72 ลวดเชื่อมใต้ฟลักซ์แบบม้วน (Coil) และแบบถัง (Drum)

ที่มา : LINCOLN ELECTRIC, Submerged Arc Welding Wire, 2019

3.4.2 องค์ประกอบการเชื่อม (Welding parameter)

1. เครื่องเชื่อมและกระแสไฟเชื่อม (Welding machince and welding current) เครื่องเชื่อมหรือแหล่งจากพลังงานในการอาร์กสามารถใช้ได้ทั้งเครื่องเชื่อมระบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC) และกระแสสลับ (AC) ซึ่งเป็นเครื่องเชื่อมแบบเดียวกันกับการเชื่อมแบบ GMAW หรือการเชื่อมแบบ MMAW ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ โดยจะมีส่วนของชุดป้อนลวดที่แตกต่างกันที่การเชื่อมแบบอาร์กใต้ฟลักซ์มีถังป้อนผงฟลักซ์ปกคลุม (Flux hopper) และบางรุ่นของเครื่องมีระบบดูดฟลักซ์ที่

ยังไม่หลอมละลายกลับไปเก็บในถังฟลักซ์เพื่อสำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่ ดังแสดงชุดเครื่องเชื่อมและอุปกรณ์ป้อนลวดกับฟลักซ์ในรูปที่ 3.73



รูปที่ 3.73 เครื่องเชื่อมและชุดป้อนลวดกับป้อนฟลักซ์

ที่มา : Miller Electric Mfg. LLC. Welding equipment, 2019

สำหรับกระแสไฟเชื่อม (Welding current) สามารถใช้ได้ทั้งระบบไฟฟ้ากระแสตรงและระบบไฟฟ้ากระแสสลับ คือ อ้างอิงตาม HOBART Filler Metals (2018)

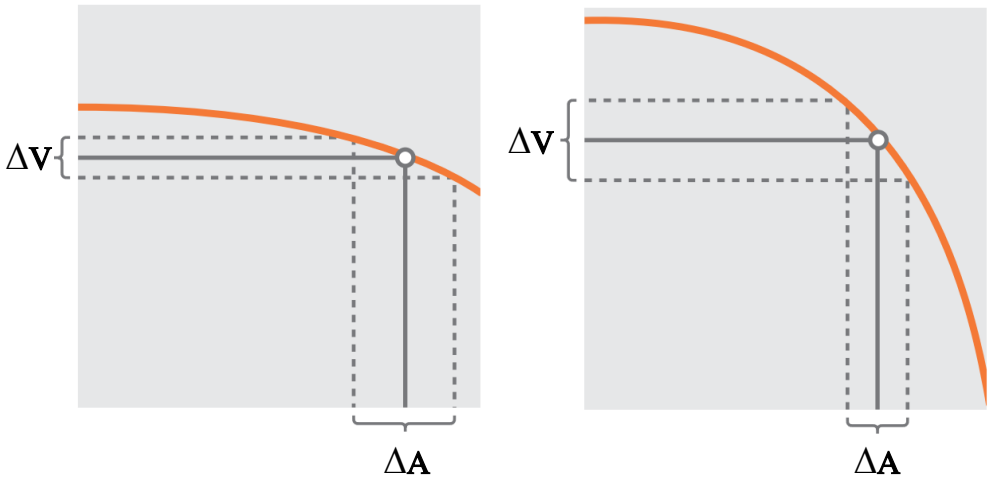
- ระบบไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current : DC) มี 2 แบบ ดังนี้

– ระบบการเชื่อมแบบแรงดันคงที่ (Constant Voltage : CV) เป็นการเชื่อมที่ปรับปัจจัยของการเชื่อมที่กระแสดังแสดงในรูปที่ 3.74 (ก) ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ชัดว่า ΔA จะกว้างกว่า ΔV เหมาะสำหรับการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติที่ช่วงของกระแสไฟประมาณ 300–600 แอมแปร์ ด้วยลวดเชื่อมขนาด 1.6–2.4 มิลลิเมตร และสำหรับการเชื่อมแบบอัตโนมัติ จะเหมาะที่กระแสไฟประมาณ 300–1000 แอมแปร์ด้วยลวดเชื่อมขนาด 2.4–6.4 มิลลิเมตร เหตุผลที่ระบุว่าไม่ควรเชื่อมที่กระแสสูงเกินกว่า 1000 แอมแปร์ เพราะจะเกิดสภาพของการอาร์กที่รุนแรงหรือเบี่ยงเบน (Arc blow) โดยทั่วไปการเชื่อมแบบแรงดันอาร์กคงที่นี้จะเหมาะสมกับการเชื่อมโลหะงานที่บางและต้องการความเร็วในการเชื่อมที่สูง

– ระบบการเชื่อมแบบกระแสคงที่ (Contant Current : CC) เป็นการเชื่อมที่ปรับปัจจัยของการเชื่อมที่แรงดันอาร์กดังแสดงในรูปที่ 3.74 (ข) ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ชัดว่า ΔV จะกว้างกว่า ΔA การปรับแรงดันเป็นการควบคุมอัตราเร็วของการป้อนลวดในขณะอาร์ก ซึ่งจะเป็นตัวช่วยควบคุมให้ระยะอาร์กคงที่ แต่อย่างไรก็ตามระบบการเชื่อมกระแสคงที่นี้ (CC) จะมีการอาร์กที่ไม่เสถียรเท่ากับการเชื่อมแบบแรงดันคงที่ (CV)

โดยได้แสดงข้อมูลเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะที่สำคัญระหว่างระบบการเชื่อมแบบแรงดันคงที่ กับระบบการเชื่อมแบบกระแสคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 3.12

- ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current : AC) เป็นระบบการเชื่อมที่สามารถเชื่อมได้กับลวดเชื่อมหลายชนิด ระบบการอาร์กจะไม่รุนแรงมาก เพราะระยะอาร์กชิดกับชิ้นงาน มีสะเก็ดโลหะกระเด็นออกมาน้อยและการหักเหของแนวอาร์กก็น้อย (Arc blow) ซึ่งก็จะได้แนวเชื่อมที่นูนอัตราการซึมลึกต่ำ การควบคุมสัดส่วนกระแสที่สลับกันจะมีผลต่อแนวเชื่อม ดังแสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 3.75 (ก) และเปรียบเทียบกับสภาพขั้วที่เหมือนกันของการเชื่อมด้วยกระแสไฟตรงในรูปที่ 3.75 (ข)



(ก) ลักษณะของแรงดันคงที่ (CV) (ข) ลักษณะของกระแสคงที่ (CC)

รูปที่ 3.74 เปรียบเทียบความแตกต่างของระบบ CV และ CC ของไฟฟ้ากระแสตรง

ที่มา : ITW Welding, HOBART Filler Metals, 2018

ตารางที่ 3.12 เปรียบเทียบลักษณะของการเชื่อมแบบ CV กับแบบ CC ของการเชื่อมใต้ฟลักซ์

ที่มา : ITW Welding, HOBART Fillrr Metals, 2018

ลักษณะเฉพาะ (Feature)	การเชื่อมแบบแรงดันคงที่ (CV)	การเชื่อมแบบกระแสคงที่ (CC)
Open circuit voltage	25–55 V	60–80 V
Parameter setting	กำหนดด้วยแรงดันอาร์ก	กำหนดด้วยกระแสเชื่อม
Polarity	AC/DC	AC/DC
Arc stability	การอาร์กเสถียร	การอาร์กไม่เสถียร
Arc regulation	ควบคุมด้วยคนเชื่อม	ควบคุมด้วยความเร็วป้อนลวด
Application	เหมาะทั้งลวดขนาดเล็กและใหญ่	เหมาะสำหรับลวดขนาดใหญ่



(ก) แนวเชื่อมด้วยกระแสไฟสลับ (ข) แนวเชื่อมด้วยกระแสไฟตรง

รูปที่ 3.75 ลักษณะของแนวเชื่อมด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงกับกระแสสลับที่ต่างสภาพขั้ว

ที่มา : Welding & NDT, Submerged arc welding, 2019

2. องค์ประกอบการเชื่อมอื่น ๆ (Other welding parameters) นอกจากองค์ประกอบหลักของเครื่องเชื่อมและชนิดของกระแสไฟเชื่อมแล้วนั้น ยังมีปัจจัยการเชื่อมอื่นที่จะเกิดการปรับเปลี่ยนไปตามความเหมาะสมของการเชื่อม ซึ่งอาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ขึ้นอยู่กับการควบคุมของช่างเชื่อม โดยการเชื่อมใต้ฟลักซ์จะมีองค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อแนวเชื่อมซึ่งอ้างอิงตามข้อมูลของ HOBART Filler Metals (2018) ที่ได้กล่าวไว้ในคู่มือการเชื่อม ได้แก่

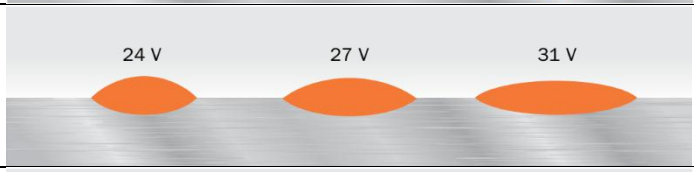
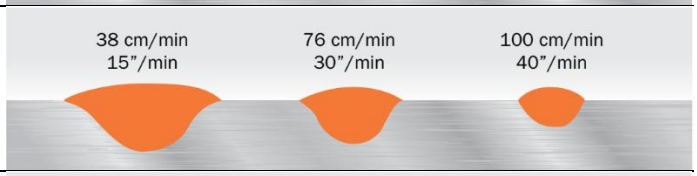
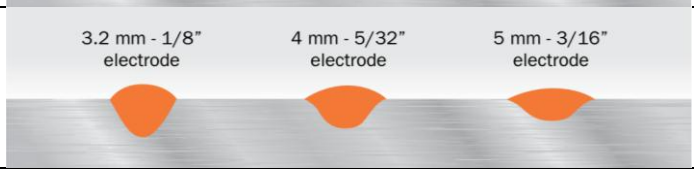
- การเพิ่มขึ้นของปริมาณกระแสไฟเชื่อม (Increased welding current)
- การเพิ่มขึ้นของแรงดันอาร์ก (Increased arc voltage)
- การเพิ่มขึ้นของความเร็วเชื่อม (Increased weding speed)
- การเพิ่มขึ้นของระยะปลายลวดกับหัวเชื่อม (Increased stick-out)
- การเพิ่มขึ้นของขนาดลวดเชื่อม (Increased wire diameter)

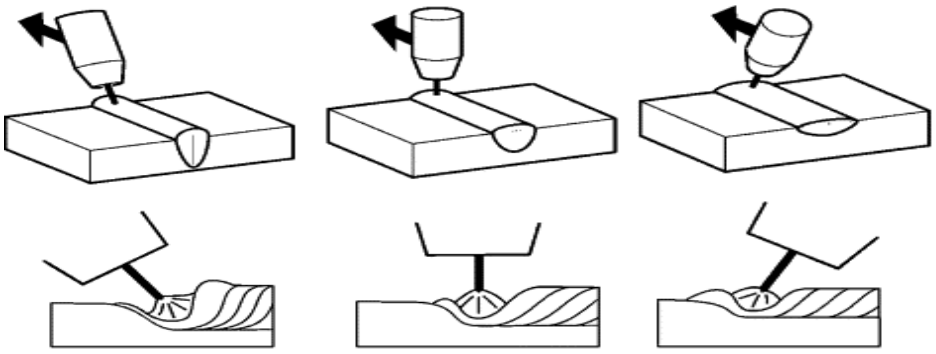
โดยผลกระทบที่มีต่อแนวเชื่อมขององค์ประกอบการเชื่อมต่าง ๆ ข้างต้นได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.13 นอกจากนี้พบว่าการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (SAW) ยังมีองค์ประกอบที่สำคัญอีกอย่างคือ มุมของลวดเชื่อม (Electrode angle) ซึ่งมีทั้งมุมลวดเชื่อมแบบดึง (Pulling angle) มุมลวดเชื่อมแบบกึ่งกลาง (Neutral angle) และมุมลวดเชื่อมแบบพลัก (Pushing angle) ซึ่งแต่ละแบบของมุมลวดจะให้ขนาดและการซึมลึกที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 3.76

การเชื่อมใต้ฟลักซ์เป็นที่ทราบกันว่าจะนิยมใช้เชื่อมโลหะที่มีความหนา เหตุผลเพราะขบวนการเชื่อมมีอัตราการป้อนเติมลวดในปริมาณที่มาก ที่ซึ่งหลายคนเข้าใจว่าเกิดจากการใช้ลวดเชื่อมที่มีขนาดใหญ่อาจถูกต้องในยุคสมัยก่อนหน้านี้ แต่ปัจจุบันได้มีการพัฒนาสร้างหัวเชื่อมแบบพิเศษมาใช้งานที่มีมากกว่าหนึ่งหัว ดังแสดงในรูปที่ 3.77 ซึ่งแต่ละแบบจะมีความสามารถในการป้อนลวดในอัตราที่แตกต่างกัน นอกจากการออกแบบของหัวเชื่อมป้อนลวดแล้ว พบว่าระดับปริมาณกระแสไฟเชื่อมก็มีผลต่ออัตราการเติมเนื้อโลหะ กล่าวคือ กระแสไฟเชื่อมที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการเติมเนื้อโลหะได้มากขึ้นที่ขนาดของลวดเชื่อมเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 3.78 แต่ถ้าลวดเชื่อมขนาดต่างกัน ลวดเชื่อมที่มีขนาดเล็กจะมีความหนาแน่นของกระแสและอัตราการเติมเนื้อโลหะที่สูงกว่าลวดเชื่อมที่มีขนาดใหญ่ แต่ลวดเชื่อมขนาดใหญ่จะสามารถเพิ่มกระแสได้มากกว่า ดังนั้น จึงพบว่าลวดเชื่อมขนาดใหญ่จะมีอัตราการเติมเนื้อโลหะให้แก่บ่อหลอมละลายของแนวเชื่อมได้มากกว่าลวดเชื่อมขนาดเล็ก โดยมีข้อแนะนำปริมาณกระแสไฟเชื่อมที่เหมาะสมกับขนาดของลวดเชื่อมของการเชื่อมใต้ฟลักซ์ดังในตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.13 องค์ประกอบการเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อลักษณะของแนวเชื่อมเชื่อมใต้ฟลักซ์

ที่มา : ITW Welding, HOBART Fillrr Metals. 2018

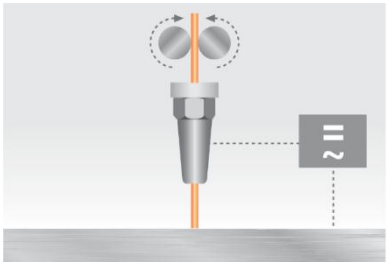
องค์ประกอบการเชื่อม	อิทธิพลต่อลักษณะของแนวเชื่อมใต้ฟลักซ์
การเพิ่มขึ้นของกระแส (Increased welding current)	
การเพิ่มขึ้นของแรงดันอาร์ก (Increased arc voltage)	
การเพิ่มขึ้นของความเร็วเชื่อม (Increased travel speed)	
การเพิ่มขึ้นของระยะปลายลวดกับหัวเชื่อม (Increased stick–out)	
การเพิ่มขึ้นของขนาดลวดเชื่อม (Increased wire diameter)	



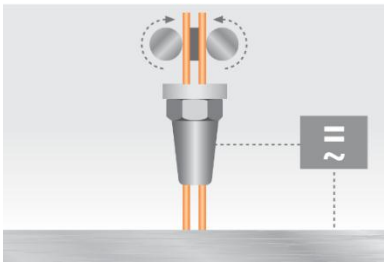
(ก) มุมลวดเชื่อมแบบดึง (Pulling angle) **(ข)** มุมลวดเชื่อมแบบกึ่งกลาง (Neutral angle) **(ค)** มุมลวดเชื่อมแบบพลัก (Pushing angle)

รูปที่ 3.76 องค์ประกอบของมุมลวดเชื่อมของการเชื่อมใต้ฟลักซ์

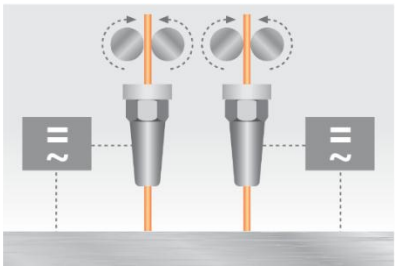
ที่มา : CRUXWELD, Submerged Ars Welding (SAW) 2020



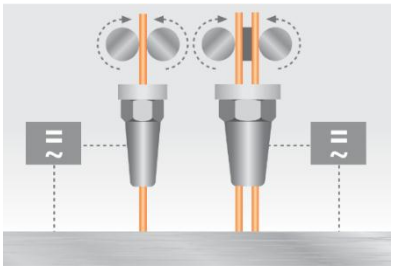
แบบ Single wire



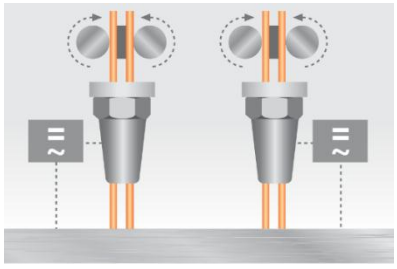
แบบ Twin wire



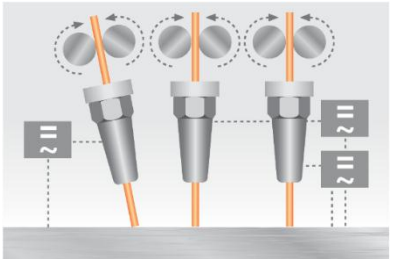
แบบ Tandem wire



แบบ Tandem Single–Twin wire



แบบ Tandem Twin wire

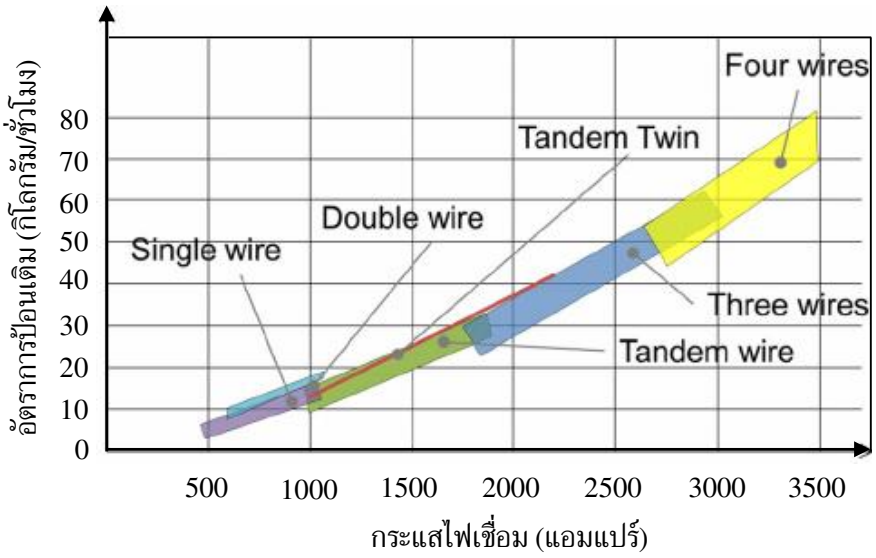


แบบ Multi wire

รูปที่ 3.77 รูปแบบการป้อนลวดเชื่อมของการเชื่อมใต้ฟลักซ์

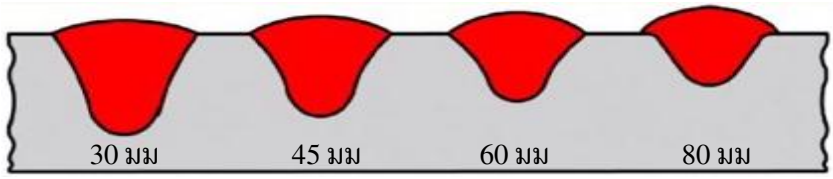
ที่มา : ITW Welding, HOBART Fillrr Metals. 2018

นอกจากองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับการเชื่อมใต้ฟลักซ์ที่กล่าวมาข้างต้นแล้วนั้น ยังมีองค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อรูปทรงและขนาดของแนวเชื่อมที่ช่างเชื่อมต้องปรับตั้งเอง ที่ Klas Weman (2012) ได้กล่าวไว้ก็คือ ระยะความยาวของลวดเชื่อมจากปลายท่อนำกระแส (Contact tip) ถึงปลายของลวดเชื่อม (End of electrode) ซึ่งจะเรียกระยะความยาวนี้ว่า “Electrode extension” โดยที่ถ้าระยะความยาวน้อยความร้อนจากการอาร์กจะหลอมลึก บ่อหลอมละลายไม่กว้างแนวเชื่อมที่ได้จะแคบ แต่ถ้าเมื่อระยะความยาวเพิ่มขึ้น ความร้อนจากการอาร์กก็จะเพิ่มสูงขึ้นบ่อหลอมละลายกว้างขึ้น การหลอมลึกกลับลดลง แนวเชื่อมที่ได้จึงเป็นแนวเชื่อมแบบที่ซึมลึกน้อยแต่ขนาดแนวเชื่อมกว้าง ดังแสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของขนาดแนวเชื่อมที่ระยะความยาวของปลายลวดเชื่อมที่ต่างกันในรูปที่ 3.79



รูปที่ 3.78 อัตราการป้อนเติมเนื้อโลหะที่กระแสไฟเชื่อมต่างกันของการเชื่อมใต้ฟลักซ์

ที่มา : Pavel Layus et.al., Multi-wire SAW of 640 MPa Arctic shipbuilding steel plates, 2014



รูปที่ 3.79 ความแตกต่างของแนวเชื่อมที่ระยะความยาวของปลายลวดเชื่อมต่างกัน

ที่มา : CSWIP 3.1 Welding inspector WISS Training and Examination, 2015

ตารางที่ 3.14 ความสัมพันธ์ของขนาดลวดเชื่อมกับปริมาณกระแสไฟของการเชื่อมใต้ฟลักซ์

ที่มา : ANSI/AWS A5.17 . 2019

ขนาดของลวดเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน		ปริมาณช่วงกระแสไฟเชื่อม (A)
มิลลิเมตร (mm)	นิ้ว (in)	
2.3	5/64	200–500
2.4	3/32	300–600
3.2	1/8	300–800
4.0	5/32	400–900
4.8	3/16	500–1200
5.6	7/32	600–1300
6.4	1/4	600–1600

3.5 การเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม (Electro Slag Welding : ESW)

การเชื่อมอาร์กด้วยไฟฟ้าที่อาศัยสแลกปกคลุมนี้มีชื่อเรียกทับศัพท์ภาษาอังกฤษอีกชื่อว่า การเชื่อมอิเล็กโทรสแลก ซึ่ง Klas Weman (2012) ได้อธิบายไว้ว่าเป็นหลักของขบวนการเชื่อมที่เกิดจากการที่สแลกหลอมละลายแล้วแผ่ความร้อนไปทำให้ลวดเชื่อม (Electrode)และผิวของโลหะชิ้นงาน (Base metals) เกิดการหลอมละลายติดกัน ถูกนำมาใช้ในการเชื่อมต่อชนชิ้นงานที่มีความหนามาก ๆ วิธีการเชื่อมจะกระทำได้เฉพาะการเชื่อมในตำแหน่งท่าตั้งหรือใกล้เคียงท่าตั้ง และมีทิศทางของการเชื่อมเริ่มจากล่างขึ้นสู่ด้านบนเสมอ ดังแสดงถึงรายละเอียดของอุปกรณ์พร้อมวงจรและระบบของการเชื่อมหลอมละลายในรูปที่ 3.79 โดยมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ๆ ได้แก่

1. เครื่องเชื่อม (Power source) ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในการเชื่อม

2. ชุดควบคุม (Control panel) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการป้อนลวดเชื่อมและปัจจัยในการเชื่อม (Welding parameter) บนเครื่องเชื่อม

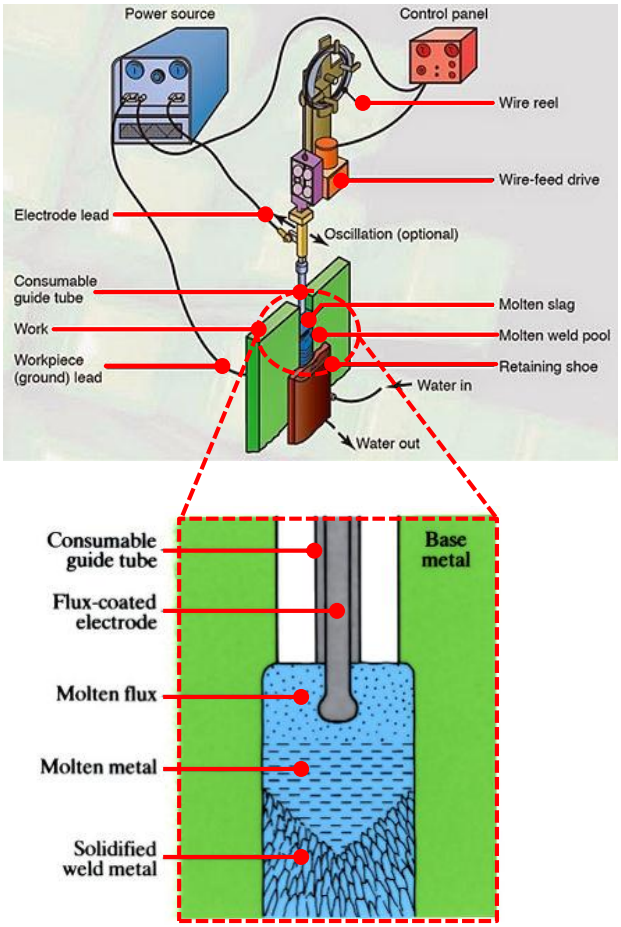
3. ชุดแผ่นทองแดงประกบ (Retaining shoe) พร้อมระบบน้ำหล่อเย็น (Water–in and Water–out) ทำหน้าที่เป็นเสมือนแบบหล่อที่ประกบปิดช่องว่างด้านข้างเพื่อป้องกันการไหลทะลักของฟลักซ์และน้ำโลหะเหลวขณะเชื่อม โดยภายในแผ่นทองแดงต้องมีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเพื่อที่จะป้องกันแผ่นประกบหลอมละลายไปกับน้ำโลหะเหลว ซึ่งแผ่นประกบนี้ต้องติดตั้งอยู่กับอุปกรณ์ที่สามารถปรับเลื่อนขึ้นตามความสูงของแนวเชื่อมที่สูงขึ้นได้ อาจเป็นชุดอุปกรณ์เสริมที่ควบคุมการเคลื่อนด้วยระบบนิวเมติก/ไฮดรอลิก

4. ชุดควบคุมการป้อนลวด (Wire feed drive) ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วของการป้อนลวดเชื่อมเข้าสู่การหลอมละลายภายในบ่อหลอมละลาย

ขั้นตอนการเชื่อม เริ่มต้นด้วยการบรรจุฟลักซ์ที่มีสมบัตินำกระแสไฟฟ้าลงในช่องว่างที่ต้องการเชื่อมต่อระหว่างชิ้นงานทั้งสอง จากนั้นก็เคลื่อนลวดเชื่อมเข้าหาฟลักซ์แล้วทำการอาร์ก ความร้อนจากการอาร์กจะทำให้ผงฟลักซ์หลอมละลายกลายเป็นของเหลวที่ท่วมปลายลวดเชื่อม ต่อจากนั้นการอาร์กก็จะดับลงโดยขณะที่ยังมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านฟลักซ์เหลวอยู่อย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ซึ่งสมบัติฟลักซ์เหลวจะมีความต้านทานกระแสสูงมากจนเกิดเป็นความร้อนขึ้น และความร้อนที่เกิดนี้เองเป็นตัวช่วยทำให้ลวดเชื่อมและผิวชิ้นงานเกิดการหลอมละลายอย่างต่อเนื่อง จนสามารถเติมเนื้อโลหะเต็มช่องว่างของรอยต่อให้ติดกันได้อย่างสมบูรณ์ โดยแนวเชื่อมจะสูงขึ้นในแนวดิ่ง ดังแสดงตัวอย่างการเชื่อมการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุมในรูปที่ 3.80

การเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุมนี้ การเตรียมรอยต่อจะไม่ต้องบากหน้างาน แต่จะเป็นเพียงการเตรียมผิวหน้าเรียบต่อชน (Square groove) แล้วนำมาประกอบเข้ากับแผ่นประกบแล้วเริ่มต้นการอาร์ก ซึ่งจะมีการอาร์กเพียงเริ่มต้นครั้งเดียวจากนั้นก็จะดำเนินการเชื่อมไปอย่างต่อเนื่องจนเสร็จสมบูรณ์ ขณะเชื่อมจะไม่มีเสียงดังเหมือนการเชื่อมอาร์กแบบอื่น ๆ ไม่มีสะเก็ดเชื่อมกระเด็นออกมา โดยทั่วไปมักนิยมใช้กับการเชื่อมต่อโลหะแท่งหนาชิ้นเดียว มีอัตราการป้อนเติมลวดสูงมาก อุณหภูมิของน้ำโลหะเหลวที่

ผสมอยู่กับฟลักซ์เหลว ประมาณ 1,925 °C ส่วนที่ผิวชิ้นงาน (Base metals) ประมาณ 1,650 °C แนวเชื่อมจะเริ่มแข็งตัวจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน โดยด้านล่างสุดจะมีแผ่นรองเชื่อมที่เรียกว่า Run–off tabs ทำหน้าที่รองรับไม่ให้สแลกหลอมเหลวและเนื้อโลหะเชื่อมไหลออกด้านล่าง

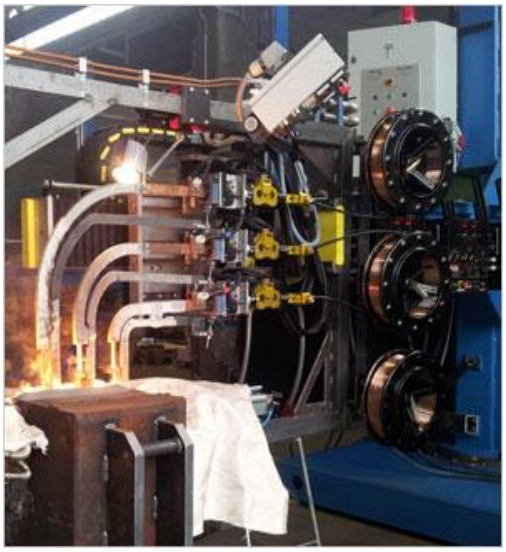


รูปที่ 3.79 อุปกรณ์พร้อมวงจรและระบบการหลอมละลายของการเชื่อมอิเล็กโทรสแลก (ESW)
ที่มา : Electroslag welding ESW. Accessed, 2017

วิธีเติมเนื้อโลหะของการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม มี 2 แบบ อ้างอิงจาก W.G. Bacon et al. (2013) ดังนี้

1. การเชื่อมแบบที่ท่อนำลวดเชื่อมไม่เกิดการหลอมละลาย (Non–consumable guide tube method) หรือ (Conventional method) นั่นหมายถึง จะอาศัยการเติมเนื้อโลหะในแนวเชื่อมด้วยการหลอมละลายของลวดเชื่อม โดยลวดเชื่อมอาจมีมากกว่าหนึ่งเส้นป้อนสู่การหลอมละลายพร้อมกัน (ตัวอย่างลวดป้อน 3 เส้นในรูปที่ 3.80)

2. การเชื่อมแบบที่ท่อนำลวดเชื่อมและลวดเชื่อมเกิดการหลอมละลาย (Consumable guide tube method) วิธีแบบนี้จะได้เนื้อเชื่อมจากการที่เกิดการหลอมละลายพร้อมกันทั้งคู่ โดยที่ลวดเชื่อมได้ถูกป้อนลงไปถึงด้านล่างสุดของบ่อหลอมละลาย และท่อนำลวดเชื่อมจะมีความยาวตลอดความสูงของลวดเชื่อม เมื่อน้ำฟลักซ์เหลวสูงขึ้นจนสัมผัสกับท่อนำลวดก็จะเกิดการหลอมละลายรวมไปกับลวดเชื่อม



(ก) องค์ประกอบของระบบของการเชื่อม



(ค) ระบบการประคองน้ำโลหะเหลว



(ข) ระบบขณะทำการเชื่อม



(ง) ระบบการเชื่อมสิ้นสุดสมบูรณ์

รูปที่ 3.80 ตัวอย่างของขบวนการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม (ESW)

ที่มา : Steel mec sald Welding Equipments, 2012

3.5.1 องค์ประกอบที่สำคัญของการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม (ESW)

กรรมวิธีการเชื่อมนี้มีองค์ประกอบที่เหมือนกันกับการเชื่อมอาร์กไฟฟ้า คือ มีเครื่องเชื่อมที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อการอาร์ก มีลวดเชื่อมสำหรับป้อนเติมเนื้อโลหะและมีฟลักซ์ที่คอยปกคลุมบ่อหลอมละลายจากแก๊สในบรรยากาศภายนอก แต่จะมีความแตกต่างของขบวนการเชื่อมที่ไม่จำเป็นต้องอาร์กตลอดการเชื่อม อาร์กครั้งเดียวตอนเริ่มต้นและดับไป การเชื่อมเติมลวดก็ดำเนินการต่อไปเรื่อย ๆ จนเสร็จสิ้น ดังนั้น การพิจารณาเลือกใช้ฟลักซ์และลวดเชื่อมจึงต้องมีความเหมาะสมกัน ซึ่งรวมไปถึงปัจจัยการเชื่อมอื่น ๆ ที่อ้างอิงจาก UTP Maintenance (2019) ดังจะได้กล่าวต่อไปนี้

1. ลวดเชื่อม (Electrodes) สำหรับการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุมหรืออิเล็กโทรสแลกนั้น โดยทั่วไปจะใช้ลวดเชื่อม 2 ประเภท ได้แก่ ลวดเชื่อมเส้นลวดตัน (Solid wire) กับลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux core wire) ดังแสดงในรูปที่ 3.81 (ก) และ (ข) ตามลำดับ มักนิยมใช้ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดตันมากกว่าเพราะมีอัตราการเติมเนื้อโลหะได้สูงกว่า เชื่อมได้เร็วกว่า แต่ถ้าเป็นงานเชื่อมที่ต้องการควบคุมส่วนผสมทางเคมีในเนื้อเชื่อมของจำพวกกลุ่มเหล็กกล้าผสม (Alloy steels) จะนิยมเลือกใช้ลวดเชื่อมแบบไส้ฟลักซ์เพราะสามารถเติมธาตุผสมจากไส้ฟลักซ์ได้ เช่น เฟอร์ไรแมงกานีส เฟอร์ไรซิลิกอน เป็นต้น และยังเป็นการช่วยเติมฟลักซ์ในบ่อหลอมละลายได้อีกด้วย

สำหรับลวดเชื่อมประเภทเส้นลวดตันที่เป็นลวดเหล็กกล้าคาร์บอน กับเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรง (HSLA) จะแบ่งเกรดลวดเชื่อมตามปริมาณแมงกานีสผสม ได้ 3 ระดับ ได้แก่ 1. ผสมแมงกานีสปานกลาง (ประมาณ 1 % Mn) 2. ผสมแมงกานีสสูง (ประมาณ 2 % Mn) และ 3. ผสมแมงกานีสพิเศษ (ประมาณมากกว่า 2 % Mn) โดยจะสัมพันธ์กับฟลักซ์ที่เลือกใช้

สำหรับการเชื่อมชิ้นงานโลหะกลุ่มของเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) และเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (HSLA) ลวดเชื่อมต้องมีคาร์บอนผสมที่ต่ำกว่าคาร์บอนในโลหะชิ้นงาน เพื่อเป็นการป้องกันการแตกร้าวของแนวเชื่อม แต่สำหรับโลหะชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าผสมสูงจะต้องเลือกลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมที่เหมือนกันหรือใกล้เคียงที่สุด และโดยทั่วไปพบว่าแนวเชื่อมจะต้องทำการอบด้วยความร้อนเพื่อให้ปรับคุณสมบัติของแนวเชื่อมให้ทัดเทียมกับโลหะพื้นฐาน (Base metals) นอกจากนี้ยังพบข้อดีของแนวเชื่อมของขบวนการเชื่อมนี้ว่า มีอัตราการเจือจาง (Dilution rangging) ที่สูงตั้งแต่ 25 – 50 % ก็ด้วยเหตุเพราะกลไกการหลอมละลายของลวดเชื่อมกับโลหะงานที่อยู่ภายใต้ฟลักซ์หลอมเหลวมีขนาดใหญ่และจะผสมผสานกันอย่างทั่วถึง



(ก) ลวดเชื่อมชนิดเส้นลวดตัน (Solid wire) **(ข)** ลวดเชื่อมชนิดไส้ฟลักซ์ (Core wire)

รูปที่ 3.81 ตัวอย่างลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมไฟฟ้าแสลกคลุม (ESW)

ที่มา :CAI–WESTWARD Electrode product, 2020

ลวดเชื่อมอิเล็กโทรสแลกปกติมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 1.6 ถึง 4.0 มิลลิเมตร แต่ที่นิยมใช้งานกันมีขนาดอยู่ที่ 2.4 ถึง 3.2 มิลลิเมตร โดยมีลักษณะเป็นลวดที่มีน้ำหนักแตกต่างกัน ซึ่งน้ำหนักมากที่สุด 350 กิโลกรัม แต่ที่นิยมกันจะหนักประมาณ 25 กิโลกรัม

2. ฟลักซ์เชื่อม (Flux welding) เป็นวัสดุสิ้นเปลืองที่สำคัญที่สุดก็ว่าได้ของกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม (ESW) ในสภาพหลอมเหลวฟลักซ์จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งช่วยในการหลอมเหลวลวดเชื่อมและชิ้นงานโลหะเชื่อมเพื่อสร้างแนวเชื่อม นอกจากนี้ฟลักซ์ยังต้องทำหน้าที่ปกป้องน้ำโลหะเหลวในบ่อหลอมละลายจากสภาพบรรยากาศ สมบัติที่ดีของฟลักซ์ในสภาพหลอมเหลวต้องนำไฟฟ้า และต้องมีความต้านทานต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าที่มากเพียงพอที่จะสร้างความร้อนในการหลอมละลาย หากความต้านทานต่ำจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการสร้างบ่อหลอมละลายและจะเกิดประกายไฟ และค่าความหนืดไหลตัวของฟลักซ์เหลวก็ต้องเหมาะสมไม่หนืดหรือเหลวเกินไป เช่น ถ้าหนืดมากหรือหนามากเกินไปจะขัดขวางการไหลเวียนของโลหะเหลว จะทำให้เกิดตะกรันรวมตัวขึ้น ส่วนถ้ากรณีที่เหลวมากหรือบางมากเกินไปจะเกิดการรั่วไหลของน้ำโลหะเหลว

อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของฟลักซ์ที่ดีต้องต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะชิ้นงานเชื่อม และจุดเดือดต้องสูงกว่าอุณหภูมิของบ่อหลอมละลาย เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียที่ไม่จำเป็น ซึ่งอาจส่งผลต่อการควบคุมคุณสมบัติของการหลอมละลาย ปกติอุณหภูมิการเชื่อมเหล็กกล้าจะอยู่ที่ประมาณ 1,650°C ฟลักซ์หลอมเหลวที่ดีต้องมีความหนืดหรือเฉื่อยที่เหมาะสมกับโลหะชิ้นงานและควรมีความเสถียรที่กว้างเพื่อรองรับกับปัจจัยการเชื่อมที่หลากหลาย

องค์ประกอบของฟลักซ์สำหรับการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม จะเป็นออกไซด์เชิงซ้อน (Complex oxides) ของซิลิกอน (Si) แมงกานีส (Mn) ไทเทเนียม (Ti) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) อลูมิเนียม (Al) และ อาจเพิ่มเติมแคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF_2) โดยออกแบบส่วนผสมตามคุณสมบัติของแนวเชื่อมที่ต้องการ ซึ่งจะเป็นไปตามมาตรฐานต่าง ๆ เช่น ตามมาตรฐาน ISO 14174 (2019) ได้กำหนดมาตรฐานส่วนผสมทางเคมีของฟลักซ์และสัญลักษณ์สำหรับการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม (ESW) ดังแสดงในตารางที่ 3.15

ฟลักซ์ที่ใช้งานสำหรับขบวนการเชื่อมนี้จะมี 2 ประเภท ประเภทที่ 1. ฟลักซ์เริ่มต้น (Starting flux) เป็นฟลักซ์ประเภทที่ใช้สำหรับการเริ่มต้นอาร์ก ซึ่งมีสมบัติที่อาร์กง่าย จุดหลอมเหลวต่ำและมีความหนืดสูง ส่วนประเภทที่ 2. ฟลักซ์เชื่อมต่อเนื่อง (Running flux) หรือที่เรียกกันว่า ฟลักซ์ทำงาน จะเป็นฟลักซ์ที่รับหน้าที่ต่อหลังจากฟลักซ์เริ่มต้น ทำหน้าที่ให้ความร้อนหลอมละลายลวดเชื่อมที่สูงและรวดเร็ว พร้อมกับการควบคุมบ่อหลอมละลายตลอดการเชื่อม ปกติจะใช้ในปริมาณฟลักซ์ไม่มาก ฟลักซ์ทำงานที่ดีจะต้องมีสมบัติที่สามารถรองรับกับการปรับเปลี่ยนปัจจัยการเชื่อมที่หลากหลาย ซึ่งผู้ผลิตจะบรรจุไว้ทั้งแบบเป็นถุงและแบบถังดังแสดงตัวอย่างบรรจุภัณฑ์ของผงฟลักซ์ในรูปที่ 3.82

ตารางที่ 3.15 สัญลักษณ์และส่วนผสมทางเคมีของฟลักซ์สำหรับเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม

ที่มา : International Standard ISO 14174 . 2019

สัญลักษณ์ (ความหมาย)	ส่วนผสมทางเคมี	ปริมาณส่วนผสม (%)
MS (Manganese−Silicate)	$MnO + SiO_2$	≥ 50
	CaO	≤ 15
CS (Calcium−Silicate)	$CaO + MgO + SiO_2$	≥ 55
	$CaO + MgO$	≥ 15
CG (Calcium−Magnesium)	$CaO + MgO$	5 ถึง 50
	CO_2	≥ 2
	Fe	≤ 10
CB (Calcium− Magnesium basic)	$CaO + MgO$	30 ถึง 80
	CO_2	≥ 2
	Fe	≤ 10
CG−I (Calcium− Magnesium with Iron)	$CaO + MgO$	5 ถึง 45
	CO_2	≥ 2
	Fe	15 ถึง 60
CB−I (Calcium− Magnesium basic with Iron)	$CaO + MgO$	10 ถึง 70
	CO_2	≥ 2
	Fe	15 ถึง 60
GS (Magnesium −Silicate)	$MgO + SiO_2$	≥ 42
	Al_2O_3	≤ 20
	$CaO + CaF_2$	≤ 14
ZS (Zirconium−Silicate)	$ZrO_2 + SiO_2 + MnO$	≥ 45
	ZrO_2	≥ 15
RS (Rutile−Silicate)	$TiO_2 + SiO_2$	≥ 50
	TiO_2	≥ 20
AR (Aluminate−Rutile)	$Al_2O_3 + TiO_2$	≥ 50
BA (Basic−Aluminium)	$Al_2O_3 + CaF_2 + SiO_2$	≥ 55
	CaO	≥ 8
	SiO_2	≤ 20
AAS (Acid−Aluminium−Silicate)	$Al_2O_3 + SiO_2$	≥ 50
	$Ca F_2 + MgO$	≥ 20

ตารางที่ 3.15 (ต่อ) สัญลักษณ์และส่วนผสมทางเคมีของฟลักซ์สำหรับเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม

ที่มา : International Standard ISO 14174 . 2019

สัญลักษณ์ (ความหมาย)	ส่วนผสมทางเคมี	ปริมาณส่วนผสม (%)
AB (Aluminate–Basic)	$Al_2O_3 + CaO + MgO$	≥ 40
	Al_2O_3	≥ 20
	CaF_2	≤ 22
AS (Aluminate–Silicate)	$Al_2O_3 + SiO_2 + ZrO_2$	≥ 40
	$CaF_2 + MgO$	≥ 30
	ZrO_2	≥ 5
AF (Aluminate–Fluoride–Basic)	$Al_2O_3 + CaF_2$	≥ 70
FB (Fluoride–Basic)	$CaO+ MgO + CaF_2 + MnO$	≥ 50
	SiO_2	≤ 20
	CaF_2	≥ 55

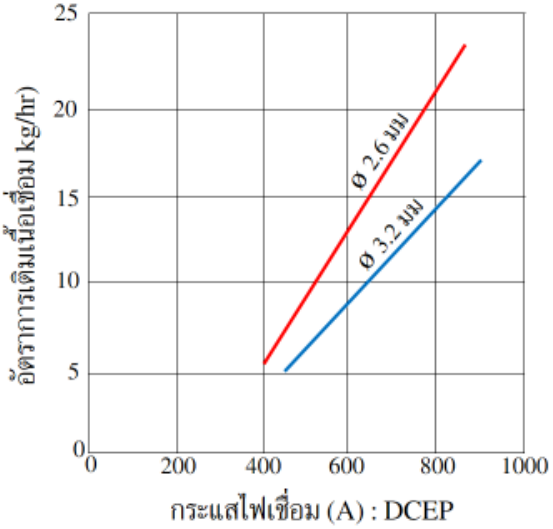


รูปที่ 3.82 บรรจุภัณฑ์ผงฟลักซ์สำหรับการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม (ESW)

ที่มา Voestalpine BOhler Welding, 2020

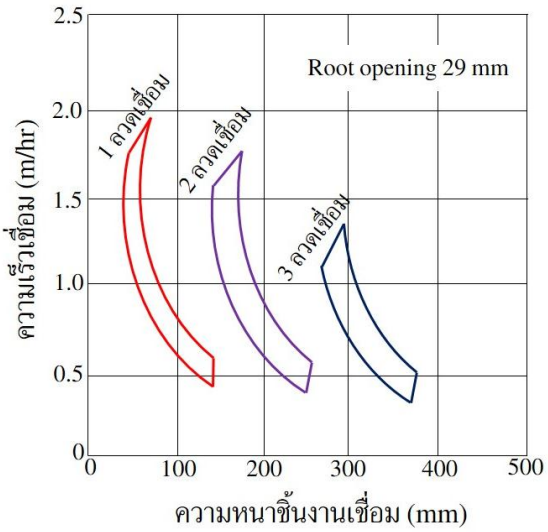
3. อัตราการป้อนเติมเนื้อเชื่อม (Deposition rates) การเชื่อมอาร์กไฟฟ้าสแลกคลุมหรือที่เรียกว่า การเชื่อมอิเล็กโทรสแลก เป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่ได้ชื่อว่า มีอัตราการเติมเนื้อเชื่อมในระดับที่สูงมากวิธีหนึ่ง ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับระดับของกระแสไฟเชื่อม โดยกระแสที่เพิ่มขึ้นก็จะสามารถเติมเนื้อโลหะในแนวเชื่อมได้มากขึ้น และลวดเชื่อมขนาดเล็กจะมีอัตราการเติมเนื้อโลหะได้สูงกว่าลวดเชื่อมขนาดใหญ่ ดังแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการเติมเนื้อเชื่อมกับกระแสไฟเชื่อมในรูปที่ 3.83 ซึ่งอ้างอิงข้อมูลจาก G. Shrijit (2017) นอกจากนี้อัตราการป้อนเติมเนื้อเชื่อมยังขึ้นอยู่กับจำนวนของหัวเชื่อม ซึ่งกรรมวิธีการเชื่อมวิธีนี้สามารถเชื่อมได้มากกว่าหนึ่งลวดเชื่อมพร้อม ๆ กัน โดยหัวเชื่อมที่มากขึ้นจะมีอัตราการเติมเนื้อเชื่อมที่สูงขึ้นแต่ต้องควบคุมความเร็วของแต่ละหัวเชื่อม และต้องพิจารณาความสัมพันธ์กับความ

หนาของชิ้นงานเชื่อม ซึ่งจำนวนของหัวเชื่อม ความหนาของโลหะงานและความเร็วในการเชื่อม ต้องสัมพันธ์กัน ดังแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 3.84



รูปที่ 3.83 ความสัมพันธ์ของกระแสเชื่อมต่ออัตราการเติมเนื้อโลหะที่ขนาดของลวดแตกต่างกัน

ที่มา : G. Shrijit. ESW : Introduction, Setup and Applications / Metallurgy, 2017 (เขียนใหม่)



รูปที่ 3.84 ความสัมพันธ์ของความหนาชิ้นงานต่ออัตราความเร็วในการเชื่อมที่จำนวนลวดเชื่อมต่างกัน

ที่มา : G. Shrijit..ESW : Introduction, Setup and Applications / Metallurgy, 2017 (เขียนใหม่)

คุณภาพของแนวเชื่อมอาร์กไฟฟ้าสแลกคลุมนี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

- สัดส่วนความกว้างและความลึกของบ่อหลอมละลาย
- กระแสไฟเชื่อมและแรงดันอาร์กเชื่อม
- ระดับความลึกของสแลก
- จำนวนของลวดเชื่อมและระยะห่างของรอยต่อ

โดยจะขอยกตัวอย่างข้อมูลจากการทดลองหาปัจจัยการเชื่อมที่ต้องสัมพันธ์กันเมื่อความหนาของชิ้นงานเชื่อมเปลี่ยนแปลงของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กไฟฟ้าสแลกคลุม ที่ช่างเชื่อมต้องศึกษาและทำความเข้าใจ ดังแสดงใน**ตารางที่ 3.16**

ตารางที่ 3.16 ปัจจัยการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม

ที่มา : G. Shrijit. ESW : Introduction, Setup and Applications / Metallurgy, 2017

ความหนาชิ้นงาน (mm)	ปัจจัยการเชื่อม (Welding variables)							
	ระยะห่างชิ้นงาน (mm)	ขนาด Ø ลวดเชื่อม (mm)	จำนวนลวดเชื่อม	กระแสแต่ละลวดเชื่อม (A)	แรงดันอาร์ก (V)	อัตราป้อนลวด (m/hr)	ความเร็วเชื่อม (m/hr)	อัตราการส่ายลวดเชื่อม (mm/sec)
30	30	2.4	1	325–350	32–34	3	0.1	–
70	26–30	3.2	1	650–700	46–48	6–7	1.0	8.5
90	24–27	3.2	2	625–650	42–46	5	1.5–1.75	7.9
150	25–28	3.2	2	475–525	45–50	3.75–4.25	0.9–1.0	7–8.5

จากข้อมูลรายละเอียดที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะมีความชัดเจนว่า การเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุมเหมาะกับการเชื่อมโลหะงานที่หนาและต้องเชื่อมในตำแหน่งท่าตั้งเชื่อมขึ้นที่สามารถเอียงได้ 45 องศาจากแนวตั้ง จะเชื่อมแบบแนวเดียว (Single pass) เป็นการเชื่อมที่ต้นทุนการเชื่อมต่ำ พร้อมกันนี้ยังมีข้อดีและข้อจำกัดอีกหลายประเด็นพอจะสรุปเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

ข้อดี (Advantages)	ข้อเสีย (Disadvantage)
– อัตราการเติมเนื้อเชื่อมสูง	– ไม่สามารถเชื่อมได้กับโลหะทุกชนิด
– เชื่อมโลหะหนามาก ๆ ด้วยแนวเชื่อมเดียว	– เชื่อมได้เฉพาะท่าตั้งหรือใกล้เคียงท่าตั้ง
– ไม่ต้องอุ่นงานก่อนเชื่อม	– การเชื่อมเริ่มต้นแนวเชื่อมต้องสมบูรณ์
– เนื้อเชื่อมมีคุณภาพสูง	– ไม่เหมาะกับงานที่บางน้อยกว่า 19 มม.
– ไม่ต้องเตรียมรอยบากหน้างานก่อนเชื่อม	– การเชื่อมที่ไม่เหมาะกับรูปร่างที่ซับซ้อน
– การเชื่อมเป็นแบบอัตโนมัติต่อเนื่อง	– การเชื่อมที่มีปริมาณความร้อนสะสมสูง
– การเชื่อมไม่มีสะเก็ดโลหะกระเด็นออกมา	– เนื้อเชื่อมจะมีขนาดเกรนที่ค่อนข้างโต
– การเชื่อมไม่เกิดการบิดงอ	

ดัชนีคำศัพท์บทที่ 3

Air cooling gun – หัวเชื่อมที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ

Agglomerated powdered fluxes – ผงฟลักซ์ชนิดตัวประสานของการเชื่อมใต้ฟลักซ์

Alternative current welding – การเชื่อมด้วยระบบกระแสไฟสลับ

Arc stability – การอาร์กเชื่อมที่ราบเรียบและสม่ำเสมอ

Arc welding – การเชื่อมที่อาศัยการอาร์กด้วยไฟฟ้า

AWG (American wire gauge) – เกจวัดขนาดสายไฟเชื่อมมาตรฐานอเมริกา

Butt joint cored wire – ท่อลวดไส้ฟลักซ์แบบตะเข็บต่อชน

Capillary attraction – การไหลแทรกซึมของน้ำโลหะไปยังบ่อหลอมละลาย

Consumable guide tube method – การเชื่อม ESW ที่ท่อนำลวดเกิดการหลอมละลาย

Contact tube – ท่อนำกระแสที่ประกอบอยู่ปลายหัวเชื่อม

Content current : CC – เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบกระแสคงที่

Content voltage : CV – เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบแรงดันคงที่

Conventional method – การเชื่อม ESW ที่ท่อนำลวดไม่เกิดการหลอมละลาย

Deposition rates – อัตราการป้อนเติมเนื้อเชื่อม

Direct current electrode negative : DCEN – การต่อกระแสไฟตรงลวดเชื่อมเป็นขั้วลบ

Direct current electrode positive : DCEP – การต่อกระแสไฟตรงลวดเชื่อมเป็นขั้วบวก

Direct current reverse polarity : DCRP – การเชื่อมแบบกระแสไฟตรงกลับขั้ว

Direct current straight polarity : DCSP – การเชื่อมแบบกระแสไฟตรงขั้วตรง

Dum core wire – ลวดเชื่อมม้วนแบบบรรจุถัง

Duty cycle – ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องเชื่อม

Electric arc welding – การเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดหุ้มฟลักซ์

Electro slag welding : ESW – การเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุมบ่อหลอม

Electrode extension – ระยะยื่นของปลายลวดเชื่อม

Engine driven generators – เครื่องเชื่อมที่ใช้เครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า

Flux hopper – ถังบรรจุผงฟลักซ์สำหรับเชื่อมใต้ฟลักซ์

Fume extractors welding – ชุดดูดควันเชื่อม

Fused powdered fluxes – ผงฟลักซ์ชนิดหลอมของการเชื่อมใต้ฟลักซ์

Fusion welding processes – การเชื่อมแบบหลอมละลายเนื้อโลหะ

Gas welding – การเชื่อมที่อาศัยความร้อนจากแก๊สที่ติดไฟ

Globular metal transfer – การถ่ายโอนน้ำโลหะเป็นหยดขนาดใหญ่

Gun trigger – สวิตช์ควบคุมที่หัวเชื่อม

Heavy surface oxide – โลหะชิ้นงานที่มีออกไซด์บนพื้นผิว

Intense energy welding – การเชื่อมที่อาศัยแหล่งพลังงานสูง

Intermediate relay unit – อุปกรณ์ปรับดัดความตรงของเส้นลวดเชื่อม

International Institute of Welding : IIW – สถาบันการเชื่อมที่อ้างอิงมาตรฐานยุโรป (BS EN ISO)

Inverter welding machine – เครื่องเชื่อมที่มีทั้งระบบไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ

Ionization potential – ความต่างศักย์ของแก๊สปกคลุม

Laminar gas flow – การไหลของแก๊สปกคลุมที่เหมาะสม

Metal active gas : MIG – การเชื่อมใช้แก๊สแอคทีฟปกคลุม

Metal inert gas : MIG – การเชื่อมใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุม

Metal transfer – การถ่ายโอนน้ำโลหะไปยังบ่อหลอมละลาย

Molten drops – น้ำโลหะที่หยดลงในบ่อหลอมละลาย

Overlapping cored wire – ท่อลวดไส้ฟลักซ์แบบตะเข็บต่อเกย

Pinch force – แรงกัดลวดที่ตำแหน่งปลายลวดเชื่อม

Pressure welding processes – การเชื่อมแบบใช้แรงอัดให้โลหะติดกัน

Pull wire feed – วิธีการป้อนลวดแบบดึงเส้นลวด

Pulsed transfer – การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบพลัสจากหยดถึงระดับละออง

Push wire feed – วิธีการป้อนลวดแบบดันเส้นลวด

Push–Pull wire feed – วิธีการป้อนลวดแบบดันและดึงเส้นลวด

Resistance welding – การเชื่อมที่อาศัยความต้านของไฟฟ้า

Retaining shoe – ชุดแผ่นทองแดงประกบของการเชื่อม ESW

Robotic arm – แขนกลที่ต่อเป็นหัวเชื่อม

Running flux – ฟลักซ์ป้อนตลอดของการเชื่อม ESW

Seamless cored wire – ท่อลวดไส้ฟลักซ์แบบไม่มีตะเข็บ

Sheath – โลหะท่อที่ใช้ผลิตลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

Short circuit transfer – การถ่ายโอนน้ำโลหะในรูปแบบลัดวงจร

Slag – ฟลักซ์หลอมเหลวแล้วแข็งตัวหลังการเชื่อมบนแนวเชื่อม

Slipping wire – การลื่นของลวดเชื่อมขณะขับป้อน

Solid state welding – การเชื่อมที่โลหะอยู่ในสถานะของแข็ง

Spool gun – หัวเชื่อมที่มีระบบป้อนลวดในตัวเอง

Spray transfer – การถ่ายโอนน้ำโลหะที่มีลักษณะเป็นละออง

Starting flux – ฟลักซ์เริ่มต้นเชื่อมของการเชื่อม ESW

Thermo–chemical welding – การเชื่อมที่อาศัยความร้อนจากปฏิกิริยาของสารเคมี

Transformer welding machince – เครื่องเชื่อมหม้อแปลงกระแสไฟสลับ

Turbulent gas flow – การไหลของแก๊สปกคลุมที่ออกมามากเกินไป

Voltage gradient – พฤติกรรมการค่อย ๆ ลดลงของแรงดันอาร์กขณะเชื่อม

Water cooling gun – หัวเชื่อมที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ

Weld pool – บ่อหลอมละลายของการเชื่อม

Welding gun/Torch – หัวเชื่อม

Welding machine – เครื่องจ่ายพลังงานสำหรับการเชื่อม

Wire conduit – ท่อสำหรับนำลวดเชื่อมภายในชุดหัวเชื่อม

Wire feed drive motor – อุปกรณ์ชุดป้อนลวดม้วน

Wire feed roller – ล้อขับป้อนลวด

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 3

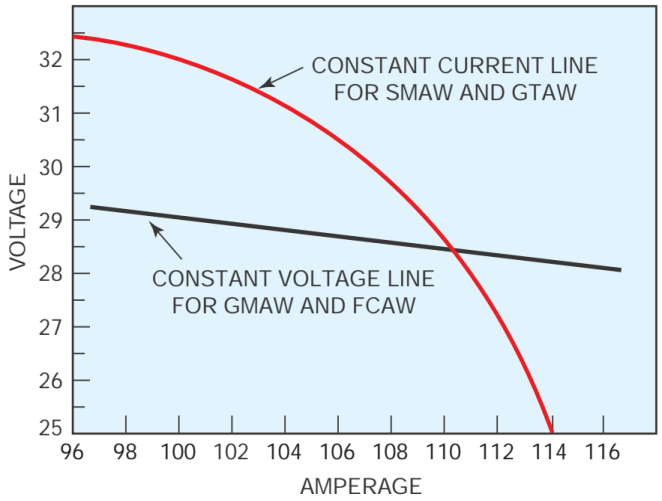
ข้อที่1. จงอธิบายความหมายของการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding processes) กับการเชื่อมแบบใช้แรงอัด (Pressure welding processes) พร้อมยกตัวอย่างกรรมวิธีการเชื่อมของแต่ละแบบมาอย่างน้อย 5 กรรมวิธี

ข้อที่ 2. สมาคมการเชื่อมแห่งสหรัฐอเมริกา (American Welding Society : AWS) ได้มีมาตรฐานการแบ่งกลุ่มกรรมวิธีการเชื่อมไว้กี่กลุ่ม อะไรบ้าง จงเขียนเป็นแผนผังกรรมวิธีการเชื่อม

ข้อที่ 3. จงสเก็ตภาพวงจรการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) มาให้เข้าใจ

ข้อที่ 4. จงอธิบายความแตกต่างของการต่อขั้วเชื่อมแบบ DCEP กับ DCEN พร้อมบอกประโยชน์ของการนำไปใช้งานของทั้งสองแบบ (วาดภาพประกอบการอธิบาย)

ข้อที่ 5. จากรูปข้างล่างนี้ จงอธิบายหลักการจ่ายพลังงานเชื่อมแบบ Constant Current : CC กับแบบ Constant Voltage : CV

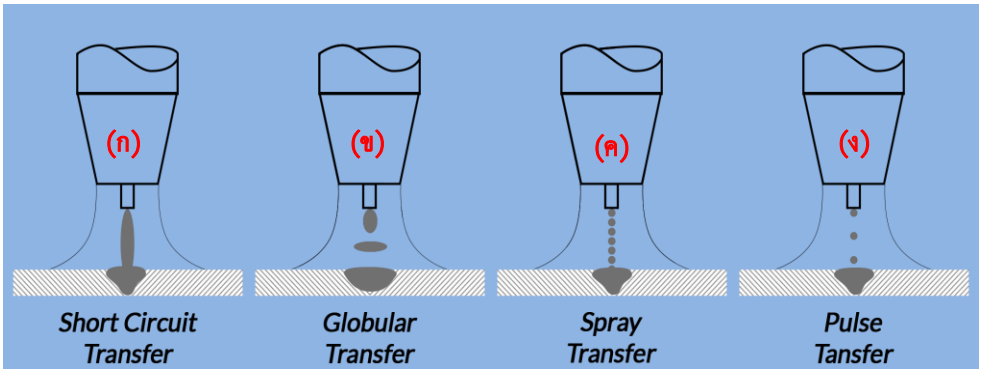


ที่มา : Larry Jeffus, Welding and metal fabrication, 2012.

ข้อที่ 6. จงบอกความแตกต่างของเครื่องแต่ละชนิดดังต่อไปนี้

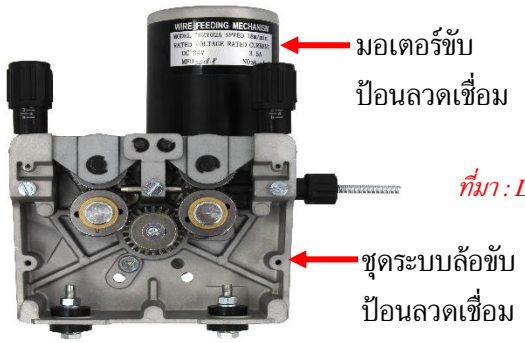
- เครื่องเชื่อมชนิดผลิตกระแสไฟตรง (Motor generator welding machine)
- เครื่องเชื่อมชนิดหม้อแปลงกระแสไฟสลับ (Transformer welding machine)
- เครื่องเชื่อมชนิดหม้อแปลงและเรียงกระแสไฟฟ้า (Transformer – rectifiers welding machine)
- เครื่องเชื่อมชนิดอินเวอร์เตอร์ (Inverter welding machine)

ข้อที่ 7. จงอธิบายความแตกต่างของการถ่ายโอนน้ำโลหะในแต่ละแบบมาพอเป็นสังเขป



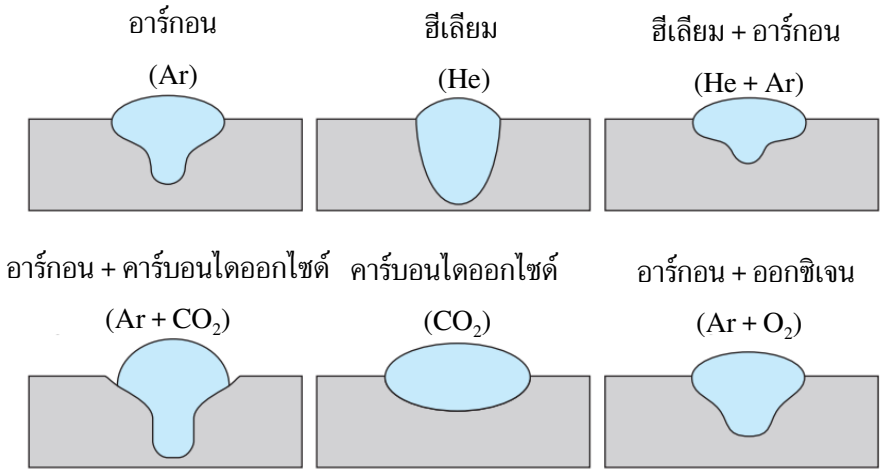
ที่มา : Zach Guzman, MIG Welding Transfer Method, 2017

ข้อที่ 8. จากรูปข้างล่างนี้ จงบอกหน้าที่และหลักการทำงานของชุดอุปกรณ์ป้อนลวดเชื่อมของกรรมวิธีการเชื่อมแบบ GMAW



ที่มา : Lincoln Electric, Welding Machine, 2016

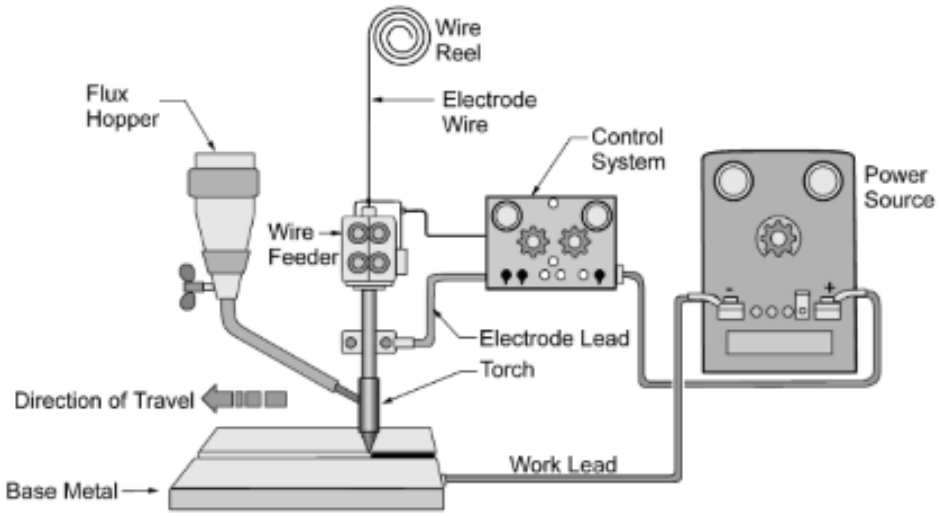
ข้อที่ 9. จากรูปข้างล่างนี้ จงอธิบายถึงพฤติกรรมของแก๊สปกคลุมแต่ละชนิดที่มีต่อการหลอมละลาย



ที่มา : Edward R. Bohbart, Welding Principles and Practices. 2017

ข้อที่ 10. จงอธิบายหลักการผลิตลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ พร้อมกับการบอกถึงความแตกต่างของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์แบบชนิด Self–shielding gas flux cored arc welding กับแบบชนิด Gas–shielding gas flux cored arc welding

ข้อที่ 11. จงอธิบายหลักและวิธีการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (SAW) มาพอสังเขป โดยใช้ภาพข้างนี้อ้างอิงเพื่อประกอบการอธิบาย



อุปกรณ์และระบบวงจรการทำงานของการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (SAW)

ที่มา : BMT Eleet Technology Limited, 2006

ข้อที่ 12. จงบอกข้อดี–ข้อเสียและการเก็บรักษาผงฟลักซ์ของการเชื่อมใต้ฟลักซ์ มาโดยละเอียด

ข้อที่ 13. รูปข้างล่างแสดงถึงกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม (Electro slag welding : ESW) จงบอกหลักการเชื่อมและบอกถึงลักษณะงานที่เหมาะสมกับขบวนการเชื่อมชนิดนี้



ขบวนการเชื่อมไฟฟ้าแสลกคลุม (ESW)

ที่มา : Steel mec sald Welding Equipments, 2012

บรรณานุกรมบทที่ 3

Andrew D. Althouse, Carl H. Turnquist, Willian A. Bowditch, Kevin E. Bowditch and Mark A. Bowditch, *Modern Welding*. 11th Edition, Goodheart−Willcox Co. Publisher, 2018.

American Welding Society (AWS). *Welding Handbook− Welding Science and Technology*. Vol. 1, 9th Edition. By American Welding Society, 2001.

American Welding Society (AWS). *Welding Journal−Electroslag Welding of Bridges*. May, 2012.

American Welding Society (AWS). *Welding Inspection Handbook*. Third Edition May, 2000.

ASM Handbook. *Welding, Brazing and Soldering. Electroslag and Electrogas Welding* Vol. 6, 1993.

B.J. Moniz and R.T. Miller. *Welding Skills*. 3rd Edition, American Technical Publishers, Inc.(AIP), 2004.

BOC. Section 4 : *Welding Processes−GMAW(MIG)/FCAW/MCAW*. Au−IPRM, 2007.

Edward R Bohnart. *Welding –Principles and Practices*. 5th Edition, McGraw Hil Education, 2017.

G. Shrijit. ESW. *Introduction, Step and Applications− Metallurgy*. Accessed July 2017.

HOBART Filler Metals. *Submerged Arc Welding Consumables*. HobartBrothers Company, 4th Edition, 2018.

Internation Welding Engineering (IWE). *Welding Processes and Equipment. GSI SLV, The Welding Engneering's Knowledge*. SLV Duisburg−Branch of GSI mbH. Edition, 2015.

International Standard (ISO). *Welding Consumables−Fluxes for Submerged Arc Welding and Electroslag Welding− Classification, ISO 14174*. Third Edition, 04−2019.

Jerome E. Spear. *Welding Fume Exposure tends to be highly variable due to several exposure Factors*. Issue of Occupational Health & Safety. 2011.

Kailash Chaudhary and Teena Choudhary. *A Study on Effect of Various Process Variables in Gas Metal Arc Welding*. International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering Vol. 3 Issue 11, 147−154, 2017.

Klas Weman. *Welding Processes Handbook*. *A Volume in Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies*. Second Edition, 2012.

KOBELCO STEEL. *Kobelco Welding Today*. International Operations Department–Welding Company, Kobe Steel, Ltd. Vol. 11 No. 1, 2008.

KOBELCO STEEL. *Fundamentals of MAG Welding (CO_2 Arc Welding)*. Education Center. 2018.

KOBE STEEL. *Welding Handbook– Welding Consumables and Processes*. Kobe Steel, LTD. Welding Company. 2008.

Larry Jeffus and Lawrence Bower. *Welding : Skill, Processes and Practices for Entry–Level Welders*. 1st Edition. Delmar Cengage Learning. Cliftan Park, New York, UAS, 2010.

Larry Jeffus. *Welding –Principles and Applications*. 7th Edition, Delmar, Cengage Learning Publisher, 2012.

LINCOLN ELECTRIC. *Process and Theory–Constant Current vs. Constant Voltage Output*. 2017.

LINCOLN ELECTRIC. *Welding & Cutting Equipment. Product Catalogue*, 2021.

LINCOLN ELECTRIC. *Gas Metal Arc Welding–Product and Procedure Selection*. Issue Date 08/2014.

LINCOLN ELECTRIC. *Welding Guns and Torches– Products for MIG, TIG, FCAW, SAW and Robotic Welding*. Lincoln Electric Conpany, 2018.

LINCOLN ELECTRIC. *Choosing a Shielding Gas for Flux–Cored Welding*. Process and Theory. 2016.

LINCOLN ELECTRIC. *Modern SAW–Mild Steel and Low Alloy Submerged Arc Welding Guide*. The Lincoln Electric Co., Issue Date 11/2019.

M. R. Nezamdost, M. N. Esfahani, S. A. Mirbozorgi. *Investigation of Temperature and Residual Stresses Field of Submerged Arc Welding by Finite Element Method and Experiments*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 87:615–624, 2016.

Michael A. Reeser. *Welding Complete : Techniques, Project plants and Instructions*. 2nd Edition, Cool Springs Press Publisher, United States, 2017.

Moniz B.J. and Miller R.J. *Welding Skills*. 3rd Edition. American Technical Publisher, Inc., USA, 2004.

Mohit Sharma, Manmohan and Neeraj Kumar. *A Survey on Submerged Arc Welding (SAW) –Review*. International Journal for Scientific Research & Development Vol.7, 2019.

Paul Kah, Hamidreza Latifi, Raimo Suranta, Jukka Martikainen and Markku Pirinen. *Unsability of Arc Types in Industrial Welding*, International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 9:15, 2014.

Ramesh Singh. *Applied Welding Engineering : Processes, Codes and Standards*. 2nd Edition. Elsevier–Health Sciences Division Publisher, Woburn United States, 2015.

US Army. *Welding Theroy and Application TC 9–237 A US Military Welding Textbook*. Ocotillo Press. May, 1993.

UTP Manintenance. *Strips and Fluxes for Electroslag and Submerged Arc Welding*. Tailor–Made Protectivity. Voestalpine, 2019.

Wesley Scott Hunko. *Gold Metal Transfer – Gas Metal Arc Welding (CMT – GMAW) Wire+Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process Control Implementation*. Doctor of Philosophy, Auburn University, May 5, 2018.

W.G. Bacon, M. Fraser and A. Mitchell. *The Application of Electroslag Melting and Welding to the Manufacture of Large Steel Components*. The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science. Vol. 14, 1975–Issue 2, 2013.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Effect of Hydrogen in Argon Shielding Gas for Welding Stainless steel Grade SUS 201 by GTA Welding process*. Journal of Advance Joining Processes. Vol. 1, 100016, 2020.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Effect of Welding Speed on Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of GTA Weld AISI 201 Stainless Steel Sheet*. Journal of Material Processesing Technology. Vol. 214 pp.402–408, 2014.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Heat Input and Shielding Gas Effects on the Microstructure, Mechanical Properties and Pitting Corrosion of Alternative Low Cost Stainless Steel Grade 202.* Journal of Results in Materials Vol. 7, 100111, 2020.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Effect of filler alloy on microstructure, mechanical and corrosion behavior of dissimilar weldment between AISI 201 stainless steel and low carbon steel sheets produced by a gas tungsten arc welding*. Journal of Advance Materials Research. Vol. 581–582, pp 808–816, 2012.

William L. Galvery, Jr. and Feank M. Marlow, PE. *Welding Essentials : Questions & Answers*. Second Edition, Industrial Press Inc. (IP), 2006.

Willian A. Bowditch, Kevin E. Bowditch and Mark A. Bowditch, *Welding Technology Fundamentals*. 4th Edition, Goodheart–Willcox Co. Publisher, 2009.

Zach Guzman. *MIG Welding Transfer Methods*. A.E.D. Metal Products & Supplies, 2017.

บทที่ 4

กรรมวิธีการเชื่อม : กลุ่มไม่เติมลวดเชื่อม

Welding Processes : Non Consumable



ที่มา : Friction Welding Holland, 2011



ที่มา : Water Welders. Updated, 2022

จุดประสงค์การเรียนรู้ บทที่ 4 กรรมวิธีการเชื่อม : กลุ่มไม่เติมลวดเชื่อม

- รู้และเข้าใจถึงกรรมวิธีการเชื่อมกลุ่มที่สามารถเชื่อมได้แบบไม่เติมลวดเชื่อม (Autogenous)
- รู้และเข้าใจถึงหลักและวิธีการเชื่อมออกซิอะเซทิลีนและการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม (OAW และGTAW)
- รู้และเข้าใจถึงหลักและวิธีการเชื่อมด้วยความต้านทานและการเชื่อมสลักเกลียว (RW และSW)
- รู้และเข้าใจถึงหลักและวิธีการเชื่อมด้วยความเสียดทานและการเชื่อมเทอร์มิด (FRW และTW)
- รู้และเข้าใจถึงหลักและวิธีการเชื่อมด้วยอาร์กพลาสมา (PAW)
- รู้และเข้าใจถึงหลักและวิธีการเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์ และการเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน (LBW และEBW)

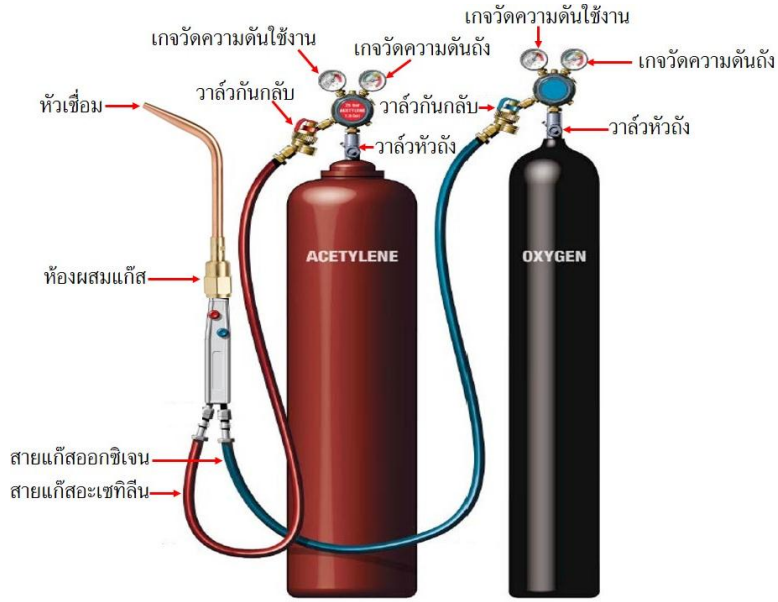
"Welding Processes" ที่ได้กล่าวไว้ในบทก่อนหน้านี้เป็นกลุ่มประเภทของการเชื่อมแบบหลอมละลายที่จำเป็นต้องใช้เนื้อโลหะจากลวดเชื่อมเติมเข้าไปทำหน้าที่ประสานโลหะให้ติดกัน (Filler metals) แต่สำหรับในบทเรียนนี้เป็นกลุ่มประเภทของกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายที่สามารถเชื่อมได้ทั้งแบบที่ให้โลหะติดกันด้วยการเติมเนื้อลวดเชื่อม (Filler metals) และแบบที่ให้โลหะติดกันโดยไม่ต้องใช้การเติมลวดเชื่อม (Autogenous) โดยเฉพาะการเชื่อมแบบไม่ต้องเติมลวดเชื่อมนั้นเหมาะอย่างยิ่งกับการเชื่อมโลหะจำพวกแผ่นบางหรือท่อบาง ซึ่งอาศัยน้ำโลหะจากการอาร์กที่บ่อหลอมละลายของทั้งสองชิ้นโลหะงานไหลเข้ามาผสมกัน โดยใช้หลักการส่ายของหัวเชื่อม (Weave patterns) เป็นตัวช่วยให้ชิ้นงานติดกันได้ดีและยังเป็นตัวช่วยในการควบคุมขนาดความกว้างของแนวเชื่อม การเชื่อมโลหะแบบไม่เติมเนื้อลวดเชื่อมนี้ แนวเชื่อมที่ได้มีลักษณะแบนราบ ไม่นูน ไม่เน้นความแข็งแรงของแนวเชื่อม แต่จะเน้นความสวยงามของแนวเชื่อมเป็นสำคัญ หรือบางครั้งต้องการเน้นความเรียบผิวของแนวเชื่อมเพื่อการนำไปประกอบกับชิ้นส่วนอื่น ๆ ต่อไป ที่พบเห็นกันบ่อย ๆ มักจะเป็นการเชื่อมประกอบผลิตภัณฑ์เหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อเน้นความสวยงามของเครื่องใช้ภายในบ้าน หรืองานเชื่อมประกอบโลหะแผ่นของชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น ดังนั้น ในบทนี้จะกล่าวถึงกรรมวิธีการเชื่อมที่สามารถเชื่อมได้แบบไม่ต้องเติมลวดเชื่อมที่นิยมใช้งานกัน ได้แก่

1. กรรมวิธีการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (Oxy–Acetylene Welding : OAW)
2. กรรมวิธีการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW)
3. กรรมวิธีการเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance Welding : RW)
4. กรรมวิธีการเชื่อมสลักเกลียว (Stud Arc Welding : SW)
5. กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทาน (Friction Welding : FRW)
6. กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิต (Thermit Welding : TW)
7. กรรมวิธีการเชื่อมด้วยอาร์กพลาสมา (Plasma Arc Welding : PAW)
8. กรรมวิธีการเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์ (Laser Beam Welding : LBW)
9. กรรมวิธีการเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Welding : EBW)

4.1 การเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (Oxy–Acetylene Welding : OAW)

เป็นกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายที่อาศัยความร้อนจากการเผาไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิงกับแก๊สออกซิเจน โดยแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้งานมักนิยมใช้เป็นแก๊สอะเซทิลีน (Acetylene : C_2H_2) เพราะเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่ให้พลังงานความร้อนสูงที่สุดที่ประมาณ 3,316 °C จึงเรียกกรรมวิธีการเชื่อมนี้ว่า "การเชื่อมแก๊สออกซิอะเซทิลีน" สามารถเชื่อมได้ทั้งแบบเติมลวดเชื่อมและไม่เติมลวดเชื่อม โดยมีระบบวงจรและอุปกรณ์การเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.1 เป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวางที่สามารถเชื่อมได้ทั้งวัสดุจำพวกโลหะกลุ่มเหล็ก (Ferrous metals) และโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non–ferrous metals) ด้วยเหตุที่การสร้างบ่อหลอมละลายขณะเชื่อมจะใช้หลักการเผาผิวงานจนหลอมด้วย

แก๊สจึงต้องใช้เวลามาก ซึ่งแตกต่างจากการเชื่อมอาร์กจึงไม่นิยมเชื่อมโลหะที่หนาแต่นิยมใช้เชื่อมโลหะแผ่นบางหรือท่อบาง หรือโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำที่ไม่สามารถเชื่อมด้วยวิธีการอาร์กได้ วิธีการเชื่อมนี้ไม่นิยมเชื่อมงานที่มีปริมาณมาก ๆ เพราะปริมาณของความร้อนมาจากสัดส่วนแก๊สผสมที่เหมาะสมและถูกต้อง ถ้าปริมาณแก๊สลดน้อยลงก็มีผลต่อการควบคุมเปลวไฟขณะเชื่อม ดังนั้น มักพบการเชื่อมด้วยกรรมวิธีนี้ในงานวิศวกรรมซ่อมบำรุงหรืองานปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ โดยเฉพาะงานภาคสนามที่ไม่มีพลังงานกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 4.1 อุปกรณ์และระบบวงจรการทำงานของการเชื่อมออกซีอะเซทีลีน (OAW)

ที่มา : ADOR WELDING, Technical Newsletter, 2012

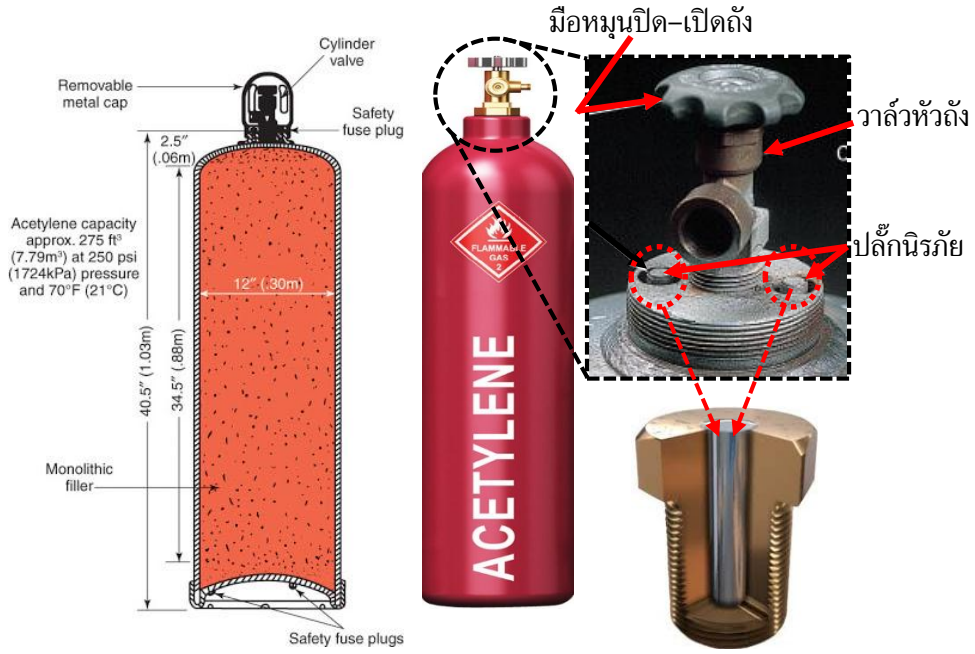
4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (Tool and equipment of OAW)

การเชื่อมโลหะด้วยแก๊สออกซิอะเซทิลีนเป็นขบวนการเชื่อมที่ไม่สลับซับซ้อนมากนัก แต่ประกอบด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์หลายชิ้นส่วน โดยเน้นความปลอดภัยที่อาจเกิดจากการระเบิดของถังความดันจากแก๊สอะเซทิลีนและจากแก๊สออกซิเจน จึงประกอบไปด้วยอุปกรณ์ตรวจวัด อุปกรณ์ป้องกันอันตราย และอุปกรณ์การเชื่อมดังรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ถังแก๊สอะเซทิลีน (Acetylene cylinder) เป็นถังบรรจุแก๊สติดไฟอะเซทิลีน (C_2H_2) ที่ผลิตได้จากการนำแคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) ผสมกับน้ำ โดยคาร์บอนที่อยู่ในแคลเซียมคาร์ไบด์กับไฮโดรเจนที่อยู่ในน้ำเกิดการรวมตัวกันเป็นแก๊สอะเซทิลีนขึ้นมา จากนั้นทำการอัดบรรจุเข้าไปเก็บไว้ในถังภาชนะเก็บความดันดังแสดงลักษณะของถังอะเซทิลีนในรูปที่ 4.2 (ก) ซึ่งที่หัวถังอะเซทิลีนมีวาล์วปิด–เปิด เหตุผลเพราะเป็นแก๊สที่ติดไฟได้ง่ายจึงต้องมีระบบป้องกันอันตรายจากกรณีไฟย้อนกลับไปลุกไหม้ในถัง

หรือถังได้รับความร้อนจากภายนอก จึงต้องมีระบบปลั๊กนิรภัย (Safety fuse plugs) พร้อมที่จะหลอมละลายและปล่อยแก๊สภายในออกมาเพื่อลดการระเบิดของถัง ปลั๊กนิรภัยทำจากโลหะตะกั่วหรือโลหะอื่นที่มีจุดหลอมเหลวต่ำติดตั้งไว้ที่หัวถังและก้นถัง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ข)

การควบคุมแก๊สอะเซทิลีนต้องอยู่ภายใต้ระดับความดันที่มากกว่า 30 ปอนด์/ตารางนิ้ว หรือ21 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร แก๊สอะเซทิลีนจะไม่สามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้หรือควบคุมไม่ได้ ถ้าหากอุณหภูมิสูงเกิน 1,435 °C จะเกิดการระเบิด จากคุณลักษณะดังกล่าวของแก๊สอะเซทิลีนจึงควรนำแก๊สอะเซทิลีนไปใช้งานที่ความดันไม่เกิน 15 ปอนด์/ตารางนิ้ว หรือ1.05 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร พบว่าในทางปฏิบัติของขบวนการบรรจุแก๊สอะเซทิลีนลงถังกระทำที่ความดัน 220–225 ปอนด์/ตารางนิ้ว ซึ่งที่ความดันระดับนี้เสี่ยงต่อการระเบิดของแก๊ส เทคนิคการลดความเสี่ยงนี้ทำได้โดยการนำสารอะซิโตน (Acetone) และวัสดุรูพรุนต่าง ๆ ใส่ไว้ภายในถังก่อนเพื่อทำหน้าที่ดูดซับแก๊สอะเซทิลีนและรักษาเสถียรภาพของแก๊สอะเซทิลีนไว้ภายในถังบรรจุและปล่อยไหลออกมาอย่างสม่ำเสมอขณะเปิดออกมาใช้งานผ่านวาล์วควบคุมที่หัวถัง โดยปกติวาล์ว หรือชุดอุปกรณ์ที่ใช้กับแก๊สอะเซทิลีนต้องผลิตจากโลหะทองเหลืองจะไม่ใช้โลหะทองแดงเพราะเมื่อสัมผัสกับแก๊สอะเซทิลีนแล้วจะเกิดเป็นสารประกอบ Copper acetylene ซึ่งอาจก่อให้เกิดการระเบิดได้ นอกจากนี้การจัดเก็บหรือสถานที่นำไปใช้งานของถังแก๊สต้องหลีกเลี่ยงแหล่งสภาพแวดล้อมที่อาจเกิดประกายไฟ หรือบริเวณที่อาจก่อเกิดของความร้อนต่อถังแก๊ส

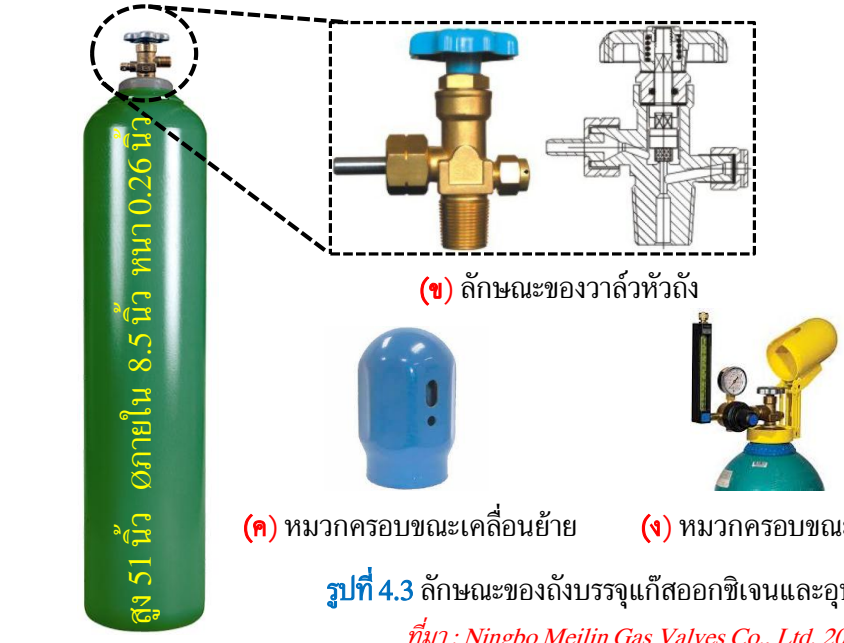


(ก) ลักษณะของถังบรรจุแก๊สอะเซทิลีน (ข) ลักษณะของปลั๊กนิรภัย

รูปที่ 4.2 ลักษณะของถังบรรจุแก๊สอะเซทิลีนและระบบปลั๊กนิรภัย

ที่มา : Acetylene Supply, Halverson CTS Newsletter, 2012

2. ถังแก๊สออกซิเจน (Oxygen cylinder) ออกซิเจนเป็นแก๊สที่ไม่ติดไฟแต่เป็นตัวช่วยให้ไฟติด การนำใช้ในการเชื่อมจะทำหน้าที่ช่วยให้เกิดการเผาไหม้หรือเกิดเปลวไฟกับแก๊สอะเซทิลีน แล้วสร้างอุณหภูมิความร้อนที่สูงมากที่สามารถหลอมละลายโลหะได้ การบรรจุหรือเก็บแก๊สออกซิเจนจะทำการอัดลงถังหรือท่อเหล็กกล้าคาร์บอนสูงที่ไม่มีตะเข็บที่มีขนาดมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก) โดยมีประกอบวาล์วปิด–เปิด ไว้ที่หัวถังดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ข) ซึ่งวาล์วเป็นโลหะทองเหลืองที่ทนต่อความดันได้สูงถึง 2,200 ปอนด์/ตารางนิ้วที่อุณหภูมิ 20 °C ซึ่งภายในวาล์วหัวถังนี้มีระบบซีล (Seal) ป้องกันแก๊สรั่วและมีก้านวาล์วคอยปิด–เปิดแก๊สเมื่อต้องการใช้ และเมื่อทำการเคลื่อนย้ายถังต้องนำหมวกครอบป้องกันวาล์ว (Protective cap) หมุนเข้ากับหัวถังให้เรียบร้อยก่อนเพื่อเป็นการปกป้องอุปกรณ์วาล์วที่หัวถัง และยังเป็นการเพิ่มความง่ายสะดวกในการเคลื่อนอีกด้วย นอกจากนี้ขณะที่เปิดแก๊สใช้งานก็ต้องต่อเข้ากับเกจวัดความดัน (Pressure regulator) ซึ่งต้องมีหมวกครอบป้องที่เป็นแบบขณะถังกำลังใช้งาน ดังแสดงลักษณะของหมวกครอบทั้งสองแบบในรูปที่ 4.3 (ค) และ (ง) ตามลำดับ



(ข) ลักษณะของวาล์วหัวถัง

(ค) หมวกครอบขณะเคลื่อนย้าย (ง) หมวกครอบขณะใช้งาน

(ก) ถังบรรจุแก๊สออกซิเจน

รูปที่ 4.3 ลักษณะของถังบรรจุแก๊สออกซิเจนและอุปกรณ์ร่วม

ที่มา : Ningbo Meilin Gas Valves Co., Ltd. 2020

3. อุปกรณ์มาตรวัดความดันแก๊ส (Pressure regulator) กรรมวิธีการเชื่อมออกซิอะเซทิลีนมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีมาตรวัดความดันของแก๊สทั้งแก๊สอะเซทิลีนและแก๊สออกซิเจน ซึ่งใช้สำหรับการควบคุมระดับความดันของแก๊สขณะนำออกมาใช้งาน และใช้สำหรับวัดระดับปริมาณความดันของแก๊สที่เหลืออยู่ภายในถังบรรจุแก่ผู้ปฏิบัติงานเชื่อม ซึ่งโดยปกติแล้วระดับความดันของแก๊สใช้งานจะต่ำกว่าระดับความดันของแก๊สภายในถังบรรจุ ดังนั้น มาตรวัดหรือเกจวัด (Gage) ที่ใช้จึงต้อง

แตกต่างกันตามระดับของความดันของทั้งแก๊สอะเซทิลีนและแก๊สออกซิเจนดังแสดงในรูปที่ 4.4 และมีรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

- เกจวัดความดันสูง (High pressure gage) เป็นเกจที่ใช้สำหรับวัดความดันของแก๊สที่อยู่ภายในถังบรรจุแก๊สซึ่งจะมีระดับความดันที่สูง โดยทั่วไปเกจที่ใช้วัดความดันแก๊สอะเซทิลีนสามารถวัดได้สูงสุด 350 ปอนด์/ตารางนิ้ว ส่วนเกจที่ใช้วัดความดันแก๊สออกซิเจนวัดได้สูงสุด 3,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว
- เกจวัดความดันต่ำ (Low pressure gage) เป็นเกจที่ใช้สำหรับวัดระดับของความดันแก๊สที่นำออกมาใช้งานซึ่งเป็นด้านที่ต่อเข้ากับหัวเชื่อม ซึ่งสามารถวัดความดันของแก๊สอะเซทิลีนได้ที่ระดับสูงสุด 30 ปอนด์/ตารางนิ้ว และปรับใช้งานที่ความดันไม่เกิน 15 ปอนด์/ตารางนิ้ว ส่วนเกจสำหรับวัดความดันของแก๊สออกซิเจนสามารถวัดได้สูงสูด 400 ปอนด์/ตารางนิ้ว และปรับใช้งานที่ความดันไม่เกิน 25 ปอนด์/ตารางนิ้ว โดยช่างเชื่อมสามารถทำการปรับความดันไปใช้งานตามความต้องการด้วยการปรับหมุนสกรูปรับความดัน (Adjusting screw)



รูปที่ 4.4 เกจวัดความดันของแก๊สอะเซทิลีนกับแก๊สออกซิเจน

ที่มา : Harris Industrial. 2020

แก๊สอะเซทิลีนและแก๊สออกซิเจนเป็นของไหลที่ต้องไหลผ่านท่อสายยางหรือสายเชื่อมนำไปสู่หัวเชื่อม ซึ่งถ้าสายเชื่อมยาวจะส่งผลทำให้ความดันใช้งานของแก๊สลดลง ดังนั้น ช่างเชื่อมต้องทราบถึงความยาวของสายเชื่อมเพื่อที่จะสามารถปรับระดับปริมาณของความดันแก๊สให้มากเพียงพอกับการเชื่อม โดยได้มีการทดลองหาความสัมพันธ์ของความยาวของสายเชื่อมกับระดับความดันใช้งานที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อระยะความยาวของสายเชื่อมเพิ่มมากขึ้นความดันของแก๊สภายในสายเชื่อมที่ต้องปรับที่เกจวัดหัวถังจะเพิ่มสูงขึ้นตาม ดังนั้น ถ้าเป็นไปได้สายเชื่อมควรจะต้องมีความยาวน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เช่น จากผลของตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ถ้าต้องการ

ความดันที่หัวทิพเชื่อม 1 ปอนด์/ตารางนิ้ว สายเชื่อมยาว 10 ฟุต ปรับความดันที่เกจวัดหัวถัง 1 ปอนด์/ตารางนิ้ว ซึ่งความดันไม่เปลี่ยนแปลงแต่ถ้าสายเชื่อมยาวมากขึ้นถึง 25 ฟุต จะต้องปรับความดันที่เกจวัดหัวถังสูงขึ้นถึง 2.25 ปอนด์/ตารางนิ้ว นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยของขนาดของสายเชื่อมที่ใหญ่ขึ้นหรือเล็กลง หรือปฏิบัติการเชื่อมในที่สูงจะทำให้ความดันภายในสายเชื่อมเกิดเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของความดันแก๊สกับความยาวของสายเชื่อม

ที่มา : Larry Jeffus. Welding and Metal Fabrication 2012.

ความดันหัวทิพเชื่อม (psi)	ความดันที่เกจวัดหัวถัง (ขนาดสายเชื่อม ø 1/4 นิ้ว หรือ 6 มม) psi				
	ระยะ 10 ฟุต	ระยะ 25 ฟุต	ระยะ 50 ฟุต	ระยะ 75 ฟุต	ระยะ 100 ฟุต
1	1	2.25	3.5	4.75	6
5	5	6.25	7.5	8.75	10
10	10	11.25	12.5	13.75	15

หมายเหตุ : ทำการเชื่อมในสถานที่สูงจากพื้นอัตราการไหลและความดันจะเกิดการเปลี่ยนแปลง

4. สายเชื่อมและข้อต่อ (Welding hose and connection) ทั้งสายเชื่อมและข้อต่อต่าง ๆ มีความสำคัญมากด้านความปลอดภัยในการเชื่อม เพราะกรรมวิธีการเชื่อมออกซิอะเซทิลีนจะเกี่ยวข้องกับ แก๊สติดไฟ แรงดันแก๊ส และต้องอ่อนตัวเคลื่อนตัวได้ดี สายเชื่อมและข้อต่อจึงต้องพิจารณาเลือกใช้และตรวจสอบให้ถูกต้องแม่นยำ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

● สายเชื่อม (Welding hose) มีลักษณะเป็นท่อยางทำหน้าที่นำส่งแก๊สจากถังบรรจุไปยังหัวทิพเชื่อม ด้วยเป็นเพราะเป็นแก๊สติดไฟและมีความดันสายเชื่อมจึงต้องมีสมบัติที่ต้อง

– ทนต่อแรงดันได้ดี
– มีความยืดหยุ่นอ่อนตัวได้ดี ง่ายและสะดวกในการเคลื่อนขณะทำการเชื่อม
– ไม่ทำปฏิกิริยากับแก๊สที่ใช้เชื่อม
– ทนต่อการลุกไหม้จากเปลวเพลิงได้ดี

ซึ่งจากสมบัติดังกล่าวข้างต้นของสายเชื่อมที่ดีจึงได้ออกแบบสายเชื่อมให้มีลักษณะเป็น 3 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ก) คือ

– ชั้นนอก ⟶ ทำจากวัสดุยางที่มีความอ่อนตัว มีความเหนียว ซึ่งจะเป็นชั้นที่บางสุด
– ชั้นกลาง ⟶ ทำจากวัสดุยางที่มีความแข็ง แต่มีความยืดหยุ่นตัวดี
– ชั้นใน ⟶ ทำจากวัสดุยางที่มีความคงทนต่อความดันแก๊ส มีความหนามากที่สุด

ซึ่งการประกอบของแต่ละชั้นของท่อยางจะสานด้วยใยผ้าเพื่อความคงทนต่อความดันที่สูงของแก๊ส โดยมาตรฐานสายเชื่อมหรือท่อยางที่นิยมเลือกใช้งานกันมีอยู่ 2 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข) และ(ค) ซึ่งสายอะเซทิลีนออกแบบเป็นสีแดง ส่วนสายออกซิเจนออกแบบเป็นสีเขียวหรือน้ำเงิน ดังนี้

1. แบบสายเดี่ยว (Single welding hose) เป็นสายเชื่อมที่แยกออกจากกันระหว่างสายของอะเซทิลีนกับสายของออกซิเจน

2. แบบสายคู่(Double welding hose) เป็นสายเชื่อมที่สายของอะเซทิลีนกับสายของออกซิเจนอยู่คู่ติดกัน

การวัดและเลือกขนาดของสายเชื่อมออกซิอะเซทิลีน จะใช้วิธีการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูภายในของท่อยางซึ่งมีหลายขนาด เช่น ขนาด 3/16 นิ้ว (4.6 มม) 1/4 นิ้ว (6 มม) 5/16 นิ้ว (7.8 มม) 3/8 นิ้ว (9.3 มม) หรือ 1/2 นิ้ว (12.5 มม) เป็นต้น



(ก) ลักษณะส่วนประกอบของสายเชื่อมออกซิอะเซทิลีน



(ข) แบบสายเดี่ยว (Single welding hose)



(ค) แบบสายคู่ (Double welding hose)

รูปที่ 4.5 สายเชื่อมสำหรับการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน

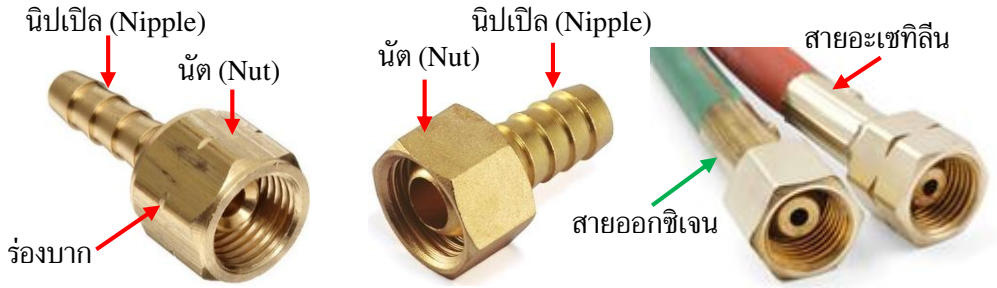
ที่มา : Harris Industrial. 2020

● ข้อต่อ (Connector) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกันของระบบการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน เพื่อให้สามารถใช้งานได้จะทำมาจากโลหะทองเหลืองเท่านั้น เพราะไม่ทำปฏิกิริยากับแก๊สอะเซทิลีนและแก๊สออกซิเจน ซึ่งต่างจากโลหะทองแดงที่จะทำปฏิกิริยากับแก๊สอะเซทิลีน ข้อต่อที่ใช้งานกันประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ คือ

1. นัต (Nut) มีลักษณะภายนอกเป็นหกเหลี่ยม มีเกลียวอยู่ด้านในใช้คู่กับนิปเปิล โดยใช้ประกอบเข้ากับด้านอุปกรณ์ปรับความดันและด้านหัวเชื่อม ตัวนัตสำหรับแก๊สออกซิเจนประทับอักษรคำว่า STD.OXY ส่วนตัวนัตสำหรับแก๊สอะเซทิลีนประทับอักษรคำว่า STD.ACET โดยนัตที่ใช้กับแก๊ส

อะเซทิลีนจะบากร่องตรงกลางไว้ เพื่อบอกเป็นสัญลักษณ์ว่าเป็นเกลียวหมุนซ้าย ส่วนนัตของแก๊สออกซิเจนจะไม่มีร่องบากเพื่อบอกว่าเป็นเกลียวหมุนขวา

2. นิปเปิล (Nipple) มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกสอดอยู่ในรูของนัต ส่วนปลายหางจะมีรูปร่างเรียวและขึ้นเป็นลอนเพื่อใช้สวมเข้ากับสายเชื่อมให้แน่นและไม่รั่วซึม



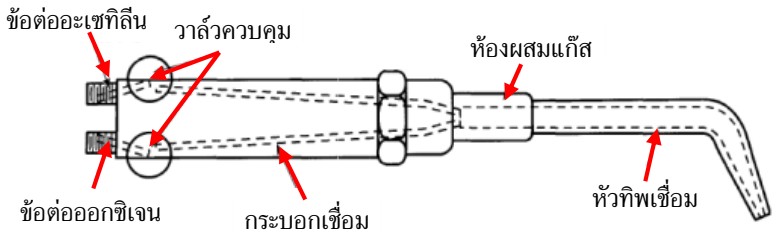
(ก) ข้อต่อสำหรับแก๊สอะเซทิลีน **(ข)** ข้อต่อสำหรับแก๊สออกซิเจน **(ค)** การใช้งานข้อต่อ

รูปที่ 4.6 ข้อต่อสำหรับการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน

ที่มา : Harris Industrial. 2020

5. หัวเชื่อมและหัวทิพเชื่อม (Torch and Tip) หัวเชื่อมหรือทอร์ชเชื่อมและหัวทิพเชื่อมเป็นอุปกรณ์ที่ประกอบอยู่ร่วมกันซึ่งมีความสำคัญมากของกรรมวิธีการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน โดยต้องต่อเข้ากับสายเชื่อมแล้วทำการผสมแก๊สในห้องผสม (Mixing chamber) ก่อนที่จะออกไปสู่หัวทิพเชื่อมเพื่อจุดไฟแล้วปรับเปลวไฟเชื่อม โดยจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของหัวเชื่อมและหัวทิพเชื่อมดังต่อไปนี้

- หัวเชื่อม (Welding torch) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างยิ่งซึ่งบางครั้งเรียกว่า “ทอร์ชเชื่อม หรือกระบอกเชื่อม” โดยมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญดังแสดงในรูปที่ 4.7



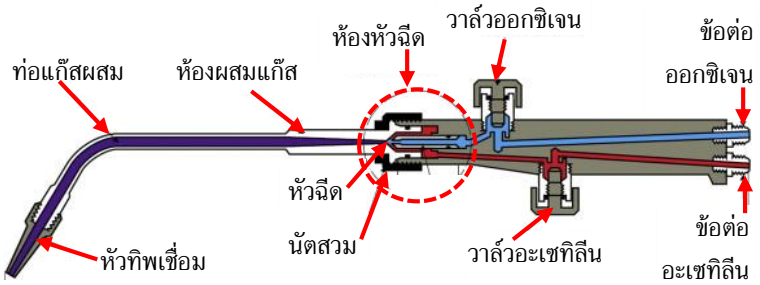
รูปที่ 4.7 ส่วนประกอบของหัวเชื่อมออกซิอะเซทิลีน

ที่มา : Wel Cor Supplies Inc. Product Catalogue Industrial. 2016

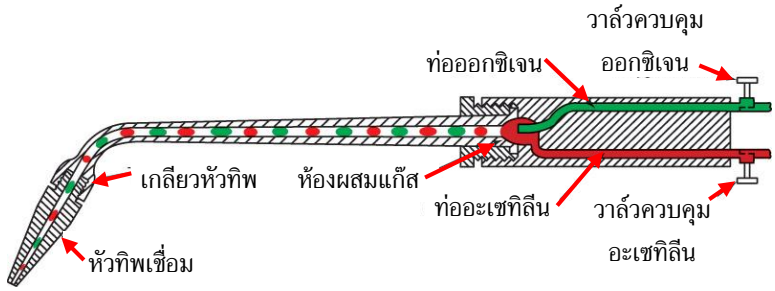
เป็นที่ทราบกันดีว่าแก๊สอะเซทิลีนที่เป็นแก๊สเชื้อเพลิงป้อนสำหรับการเชื่อมนั้น ได้จากการผลิตจากเครื่องกำเนิดแก๊สอะเซทิลีน (Acetylene generator) โดยตรง ซึ่งมีความดันที่ไม่สูงมากนัก กับชนิดที่ได้จากถังบรรจุแก๊สอะเซทิลีน (Acetylene cylinder) บางครั้งเรียกว่า “ถังสำเร็จ” ซึ่งมีระดับของความดันที่ค่อนข้างสูง ด้วยเหตุที่แหล่งป้อนแก๊สอะเซทิลีนเข้าสู่หัวเชื่อมมีระดับความดันที่แตกต่างกัน จึงได้สร้างหัวเชื่อมที่สามารถรองรับได้ตามระดับของความดันแก๊สขึ้น โดยมีหัวเชื่อม 2 แบบ คือ

1. หัวเชื่อมแบบหัวฉีด (Injector type) เป็นหัวเชื่อมที่เหมาะสมกับการใช้แก๊สอะเซทิลีนจากเครื่องกำเนิดแก๊สอะเซทิลีนป้อนเข้าสู่หัวเชื่อมซึ่งความดันค่อนข้างต่ำ โดยหัวเชื่อมแบบหัวฉีดนี้ได้ออกแบบโครงสร้างภายในให้ออกซิเจนที่มีความดันสูงไหลผ่าน และความเร็วของการไหลนี้จะทำให้เกิดสูญญากาศดูดเอาแก๊สอะเซทิลีนเข้าไปด้วย ไหลเข้าไปรวมตัวกันในห้องผสมแก๊สก่อนออกไปยังหัวทิพเชื่อม ดังแสดงลักษณะของหัวเชื่อมแบบหัวฉีดและส่วนประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก)

2. หัวเชื่อมแบบความดันสมดุล (Equal pressure type) เป็นหัวเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมที่ได้รับแก๊สอะเซทิลีนที่ป้อนจากถังบรรจุ ซึ่งมีความดันสูง โดยออกแบบหัวเชื่อมให้สามารถปรับแก๊สทั้งสองให้มีความดันเท่ากันแล้วไหลเข้าสู่ห้องผสมแก๊สแล้วไหลต่อไปสู่หัวทิพเชื่อม ดังแสดงลักษณะของหัวเชื่อมแบบสมดุลและส่วนประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ข)



(ก) หัวเชื่อมแบบหัวฉีด (Injector type)



(ข) หัวเชื่อมแบบความดันสมดุล (Equal pressure type)

รูปที่ 4.8 ชนิดของหัวเชื่อมออกซิอะเซทิลีน

ที่มา : M. Vural, Comprehensive Materials Processing, 2014

● หัวทิพเชื่อม (Welding torch) เป็นอุปกรณ์ส่วนปลายสุดที่ใช้ประกอบเข้ากับหัวเชื่อมหรือทอร์ชเชื่อม และเป็นท่อทางผ่านของแก๊สผสมพร้อมกับเป็นตัวกำหนดทิศทางและปริมาณของเปลวไฟ เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะของงาน หัวทิพเชื่อมมีให้เลือกใช้ 2 แบบ คือ

1. หัวทิพแบบชิ้นเดียว หัวทิพแบบนี้จะเป็นแบบชิ้นเดียวยาวตลอดซึ่งหัวเกลียวต่อเข้ากับกระบอกเชื่อมที่ยึดด้วยน๊อตเกลียว ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ก)

2. หัวทิพแบบแยกชิ้น หัวทิพแบบนี้มี 2 ชิ้นส่วน คือ ชิ้นส่วนตรงปลายและตรงโคน ประกอบเข้าด้วยกันโดยใช้เกลียวแล้วจึงนำไปประกอบเข้ากับหัวเชื่อมหรือทอร์ชเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ข)



(ก) หัวทิพเชื่อมแบบชิ้นเดียว **(ข)** หัวทิพเชื่อมแบบแยกชิ้น

รูปที่ 4.9 ชนิดของหัวทิพเชื่อมของหัวเชื่อมออกซิอะเซทิลีน

ที่มา : Harris Welding Supplies, 2019

6. อุปกรณ์ที่สำคัญอื่น ๆ (Other equipment) นอกจากอุปกรณ์ที่กล่าวมาแล้วนั้นยังมีอุปกรณ์อื่น ๆ ที่จำเป็นในขบวนการเชื่อมแก๊สออกซิอะเซทิลีน ได้แก่

1. แว่นตาเชื่อมแก๊ส (Gas goggles) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ก) แว่นตาเชื่อมแก๊สใช้สำหรับป้องกันตาเนื่องจากแสงเชื่อมหรือสะเก็ดเชื่อม ซึ่งต้องมีคุณสมบัติถ่ายเทอากาศได้ดีในขณะสวมใส่ การเลือกกระจกเลนส์กรองแสงต้องเลือกให้เหมาะสม เช่น เลนส์ 5–6 ใช้สำหรับเชื่อมโลหะแผ่นหนา ส่วนเลนส์เบอร์ 4 ใช้สำหรับแผ่นบาง เป็นต้น

2. อุปกรณ์จุดไฟแก๊ส (Spark lighter) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ข) เป็นอุปกรณ์เฉพาะที่ออกแบบไว้ใช้สำหรับการทำให้เกิดประกายไฟเพื่อนำไปจุดแก๊สที่ปลายของหัวทิพเชื่อม ตัวของอุปกรณ์จะมีถ้วยประกอบติดอยู่บริเวณปลายของขาด้านหนึ่ง อีกด้านหนึ่งประกอบด้วยแกนถ่านภายใน และในถ้วยมีแกนเหล็กกลมมีผิวคล้ายตะไบ ขณะใช้จุดเปลวไฟควรให้ปลายของหัวทิพอยู่ห่างจากถ้วยประมาณ 1 นิ้ว แก๊สจะถูกปล่อยและอยู่ภายในถ้วยจำนวนหนึ่งช่วยให้เกิดการจุดระเบิดได้ง่าย เมื่อใช้มือบีบให้แกนถ่านถูกับแท่งเหล็กและเกิดประกายไฟ แกนถ่านนี้สามารถถอดเปลี่ยนด้วยเกลียวเมื่อใช้จนกระทั่งสึกหรอและแกนถ่านหมดไป

3. อุปกรณ์ป้องกันไฟกลับ (Back pressure valve) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ค) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ติดกับถังผลิตแก๊สอะเซทิลีน ส่วนถังอะเซทิลีนแบบถังสำเร็จจะติดตั้งกับระบบการจ่ายแก๊สแบบท่อร่วม (Mandifolded) หม้อกันไฟกลับจะช่วยไม่ให้แก๊สหรือไฟย้อนกลับมาระหว่างถังผลิตหรือถังจ่ายกับสายเชื่อม ภายในหม้อจะบรรจุน้ำไว้ ทุก ๆ ครั้งที่จะใช้งานต้องตรวจสอบระดับน้ำก่อน

4. วาล์วกันแก๊สไหลย้อน (Check valve) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ง) วาล์วป้องกันการไหลย้อนกลับของแก๊สแบบนี้จะประกอบติดที่เกลียวบริเวณด้ามของหัวเชื่อมก่อนประกอบเข้ากับข้อต่อของสายเชื่อม เมื่อแก๊สผ่านมาตามท่อสายเชื่อมภายในวาล์วจะดันลูกบอลขนาดเล็ก และลูกบอลก็จะไปดันสปริง แก๊สจะผ่านลูกบอลและสปริงเข้าไปในหัวเชื่อม ถ้ามีความดันแก๊สไหลย้อนคืนมาแก๊สก็จะช่วยสปริงดันลูกบอลกลมปิดรูทางออกแก๊สไม่สามารถย้อนคืนออกไปได้

5. อุปกรณ์ทำความสะอาดหัวทิพ (Tip cleaner) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (จ) เป็นอุปกรณ์ใช้ทำความสะอาดหัวทิพ มีลักษณะเป็นลวดกลมเส้นเล็ก ผิวคล้ายกับตะไบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน ใช้ทำความสะอาดรูหัวทิพโดยที่ไม่ทำให้รูของหัวทิพขยายใหญ่ขึ้น จะทำให้เป็นชุดหรือตลับ ซึ่งแต่ละชุดจะมีจำนวนของเส้นลวดไม่เท่ากัน เช่น 22 เส้น 13 เส้น หรือ 9 เส้น เป็นต้น



(ก) หน้ากากเชื่อมแก๊ส



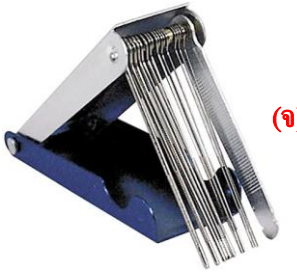
(ข) อุปกรณ์จุดไฟแก๊ส



(ค) อุปกรณ์หม้อกันไฟกลับ



(ง) วาล์วกันแก๊สไหลย้อน



(จ) อุปกรณ์ทำความสะอาดหัวทิพ

รูปที่ 4.10 อุปกรณ์อื่น ๆ ที่สำคัญของการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน

ที่มา : Harris Welding Supplies, 2019

4.1.2 เปลวไฟการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (Welding flame)

การเชื่อมโลหะด้วยแก๊สเชื้อเพลิงกับแก๊สออกซิเจน สามารถเลือกใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิดได้แก่ อะเซทิลีน (C_2H_2) โปรเพน (C_3H_8) โพรพิลีน C_3H_6) และแก๊สธรรมชาติ (Natural gas) ซึ่งแต่ละชนิดจะให้พลังงานความร้อนที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยช่างเชื่อมสามารถเลือกใช้ระดับค่าความร้อนตามความเหมาะสมกับลักษณะของงานโดยเฉพาะความหนาของโลหะงานเชื่อมที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปนิยมใช้แก๊สอะเซทิลีน เพราะให้พลังงานความร้อนที่สามารถหลอมละลายโลหะสูงมากถึง 3,316 °C ซึ่งสัดส่วนของอะเซทิลีนกับออกซิเจนที่ผสมกันสามารถปรับสัดส่วนได้และให้ปริมาณความร้อนต่างกัน และมีชื่อเรียกเปลวไฟที่ได้แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ชนิดของแก๊สเชื้อเพลิงที่เลือกใช้และอุณหภูมิสูงสุด

ที่มา : Larry Jeffus. Welding and Metal Fabrication 2012.

ชนิดของแก๊สเชื่อม (Type of gas welding)	อุณหภูมิสูงสุดโดยประมาณ (Temperature)
ออกซิเจน (O) + อะเซทิลีน (C_2H_2)	3,316 °C หรือ 6,000 °F
ออกซิเจน (O) + โปรเพน (C_3H_8)	2,500 °C หรือ 4,600 °F
ออกซิเจน (O) + ไฮโดรเจน (H)	3,400 °C หรือ 4,300 °F
อากาศ (Air) + อะเซทิลีน (C_2H_2)	5,500 °C หรือ 4,600 °F
อากาศ (Air) + โปรเพน (C_3H_8)	1,750 °C หรือ 3,200 °F

ตารางที่ 4.3 ระดับอุณหภูมิของเปลวไฟของการเชื่อมแก๊สออกซิอะเซทิลีน

ที่มา : Material Science Engineering at Tvasta Manufacturing Solutions 2017

สัดส่วนออกซิเจน/อะเซทิลีน	เปลวไฟ (Flame)	อุณหภูมิ (Temperature)	
		องศาเซลเซียส (°C)	องศาฟาเรนไฮต์ (°F)
0.8 / 1.0	Carburizing	3,065	5,550
0.9 / 1.0	Carburizing	3,150	5,700
1.0 / 1.0	Neutral	3,100	5,600
1.5 / 1.0	Oxidizing	3,427	6,200
1.8 / 1.0	Oxidizing	3,482	6,300
2.0 / 1.0	Oxidizing	3,370	6,100
2.5 / 1.0	Oxidizing	3,315	6,000

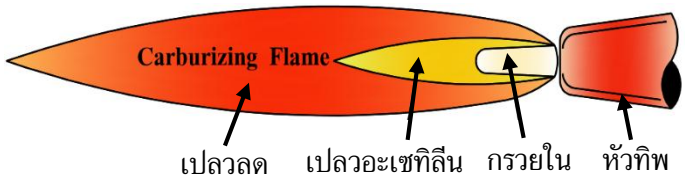
ก. ชนิดของเปลวไฟเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (Type of Oxy–Acetylene flame)

จากลักษณะงานที่ต่างกันมีความจำเป็นของการใช้พลังงานความร้อนที่ไม่เท่ากัน โดยเฉพาะค่าความร้อนเพื่อให้โลหะหลอมละลาย โดยทั่วไปจะแบ่งออกได้ 3 ชนิด โดยอ้างอิงจากบทความที่รวบรวมข้อมูลของขบวนการเชื่อมด้วยแก๊สออกซิอะเซทิลีน Rafael Lucas et al. (2021) คือ

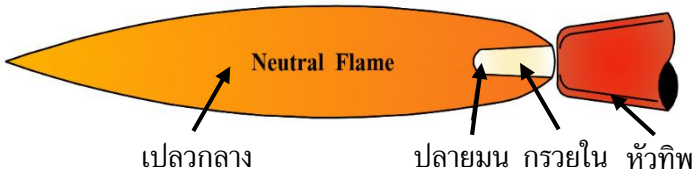
1. เปลวลด หรือเปลวคาร์บูไรซิง (Carburizing flame) เป็นเปลวเชื่อมที่มีปริมาณคาร์บอนมาก เป็นเปลวที่มีสัดส่วนปริมาณของแก๊สอะเซทิลีน (C_2H_2) ที่มากกว่าแก๊สออกซิเจน (O) โดยมีลักษณะเปลวเป็นกรวย 3 ชั้น ซึ่งเปลวชั้นนอกมีลักษณะเป็นเปลวยาวสีส้มล้อมรอบเปลวชั้นใน ซึ่งมีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของเปลวชั้นนอก ที่เปลวชั้นในจะมีอุณหภูมิประมาณ 2,800 °C การเผาไหม้ของเปลวไฟจะเกิดการหลงเหลือแก๊สอะเซทิลีนอยู่จำนวนหนึ่ง จึงเหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะงานที่ต้องการเติมปริมาณธาตุคาร์บอนที่บริเวณผิวของโลหะ เปลวไฟเชื่อมชนิดนี้เหมาะกับการเชื่อมโลหะที่ไม่ใช่จำพวกเหล็ก (Non–ferrous) ที่ต้องการใช้อุณหภูมิหลอมละลายไม่สูงมากนัก เช่น การเชื่อมโลหะอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม การเชื่อมโลหะแมกนีเซียมและแมกนีเซียมผสม รวมถึงงานประเภทการบัดกรีแข็ง (Brazing) การเชื่อมด้วยเปลวไฟชนิดนี้ไม่ควรปฏิบัติงานในที่อับอากาศ เพราะปริมาณของแก๊สอะเซทิลีนที่หลงเหลือจะก่อให้เกิดอันตราย เกิดการลุกไหม้ขึ้นในที่อากาศอับ ลักษณะของเปลวไฟชนิดนี้มีรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ก)

2. เปลวกลาง หรือเปลวนิวทรัล (Neutral flame) เป็นเปลวแบบสมดุลของปริมาณคาร์บอนกับ (C) ออกซิเจน (O) เป็นเปลวไฟที่ได้จากสัดส่วนผสมของปริมาณแก๊สอะเซทิลีนกับแก๊สออกซิเจนเท่ากันที่ปริมาณ 1 : 1 การเผาไหม้สมบูรณ์จะประกอบด้วยเปลวไฟ 2 ชั้น ชั้นในเป็นกรวยเปลวมน ระยะห่างจากปลายกรวยประมาณ 3 มม. จะมีอุณภูมิประมาณ 3,150 °C เมื่อนำไปเผาโลหะที่เป็นเหล็กจะหลอมละลายเป็นบ่อหลอมคล้ายน้ำเชื่อม เมื่อเย็นตัวลงจะได้แนวเชื่อมที่มีความสะอาด และมีความแข็งแรง เปลวไฟชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้ในการเชื่อมและการตัดโลหะได้ดี ลักษณะของเปลวไฟชนิดนี้มีรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ข)

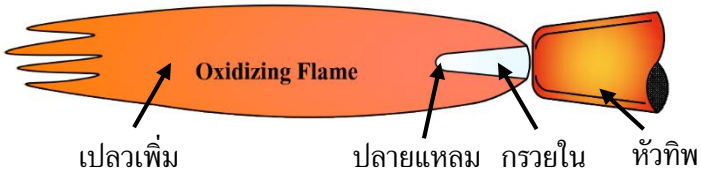
3. เปลวเพิ่ม หรือเปลวออกซิไดซิง (Oxidizing flame) เป็นเปลวที่มีปริมาณของออกซิเจนมาก เปลวไฟที่ได้จากสัดส่วนผสมของปริมาณแก๊สอะเซทิลีนน้อยกว่าแก๊สออกซิเจน ลักษณะของเปลวไฟจะมี 2 ชั้น เปลวชั้นในเป็นเปลวรูปกรวยแหลมหดสั้น ส่วนกรวยเปลวชั้นนอกจะมีสีเขียวอมน้ำเงิน เปลวนี้มีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 3,480 °C เมื่อทำการเชื่อมจะเกิดประกายไฟหรือสะเก็ดไฟกระเด็นออกมาจากบ่อหลอมละลายค่อนข้างมาก บ่อหลอมละลายมีฟองอากาศไม่เหมาะที่จะนำไปใช้กับงานเชื่อมโลหะเหล็ก เพราะการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะมีออกซิเจนหลงเหลืออยู่ และออกซิเจนก็จะเติมลงในเนื้อเหล็ก ทำให้แนวเชื่อมเปราะ ความแข็งต่ำ แต่นิยมนำไปใช้ในการตัดโลหะแผ่นบาง ลักษณะของเปลวไฟดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ค)



(ก) เปลวลด หรือเปลวคาร์บอนมาก (Carburizing flame)



(ข) เปลวกลาง หรือเปลวสมดลของคาร์บอนกับออกซิเจน (Neutral flame)



(ค) เปลวเพิ่ม หรือเปลวออกซิเจนมาก (Oxidizing flame)

รูปที่ 4.11 ชนิดเปลวไฟของการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (OAW)

ที่มา : Rafael Lucas, Welding Research–Welding Journal, 2021

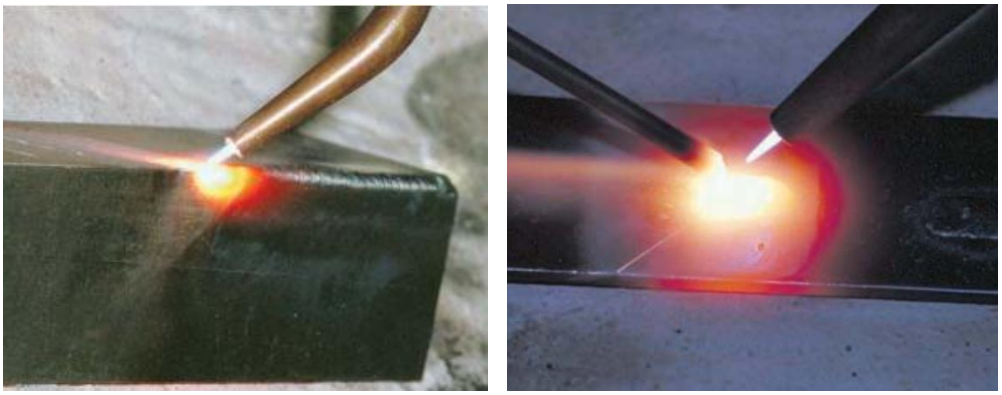
ข. เทคนิคการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน

การเชื่อมออกซิอะเซทิลีนนี้สามารถทำการเชื่อมได้ทั้งแบบวิธีการเติมลวด (Filler metal welding) และแบบวิธีที่ไม่ต้องเติมลวด (Autogenous welding) ซึ่งแบบแรกจะได้แนวเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูงกว่าแบบหลัง โดยการเลือกใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะของงาน ดังแสดงลักษณะของการเชื่อมที่แตกต่างกันของทั้งสองแบบในรูปที่ 4.12 (ก) และ (ข) นอกจากนี้ ยังมีเทคนิคการเดินของหัวเชื่อมโดยขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน ซึ่งมีเทคนิคการเชื่อมอยู่ 2 แบบ คือ

- เทคนิคการเชื่อมแบบเดินหัวเชื่อมไปทางซ้ายมือ (Leftward technique) หรือเรียกอีกอย่างว่า Fore hand welding เป็นเทคนิคการเชื่อมที่ให้ลวดเชื่อมนำหน้าเปลวไฟเชื่อม โดยช่างเชื่อมจะถือหัวเชื่อมด้วยมือขวา แล้วเริ่มเชื่อมจากทางขวามือไปทางซ้ายมือ วิธีการเชื่อมแบบนี้จะสูญเสียความร้อนไปบางส่วนเนื่องจากมีความร้อนสะท้อนออกไปจากผิวหน้าของโลหะงาน ซึ่งช่างเชื่อมสามารถที่จะเพิ่มหรือลดปริมาณของความร้อนที่บ่อหลอมละลายได้โดยการปรับมุมของหัวทิพเชื่อมกับชิ้นงาน กล่าวคือ ถ้าต้องการลดปริมาณความร้อนให้ลดมุมหัวทิพเชื่อมลง (ทำมุมน้อยลง) ในทางกลับกันถ้าต้องการเพิ่มปริมาณความร้อนก็ให้เพิ่มมุมหัวทิพเชื่อมขึ้น (ทำมุมมากขึ้น) ดังนั้น วิธีการเชื่อมแบบนี้จึงเหมาะสำหรับ

การเชื่อมชิ้นงานโลหะที่หนาไม่เกิน 3 มิลลิเมตร หรือถ้าต้องเชื่อมชิ้นงานที่หนามากเกินต้องทำการบากหน้างาน โดยมุมของลวดเชื่อมและมุมหัวเชื่อมจะต้องควบคุมให้อยู่ระหว่าง 30–40° และ 60–70° ตามลำดับ ดังแสดงลักษณะรูปแบบของการเชื่อมใน**รูปที่ 4.13 (ก)**

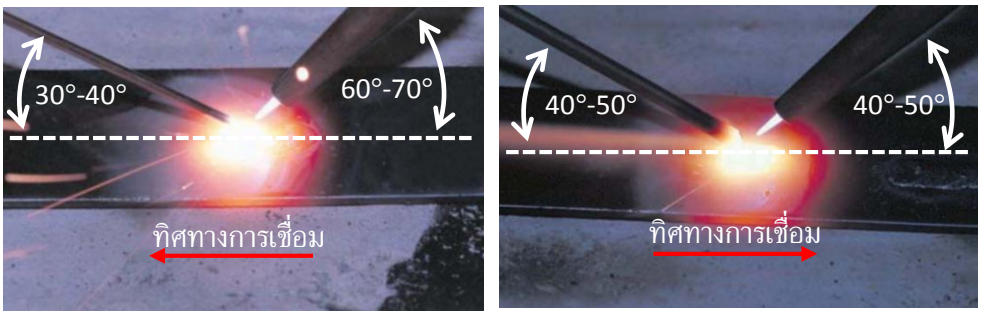
● เทคนิคการเชื่อมแบบเดินหัวเชื่อมไปทางขวามือ (Rightward technique) หรือเรียกอีกอย่างว่า Back hand welding เป็นเทคนิคการเชื่อมที่ให้ลวดเชื่อมตามหลังเปลวไฟเชื่อม โดยช่างเชื่อมจะถือหัวเชื่อมด้วยมือขวา แล้วเริ่มเชื่อมจากทางซ้ายมือไปทางขวามือ โดยควบคุมให้เปลวไฟพุ่งไปในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของการเชื่อม วิธีการเชื่อมแบบนี้บ่อหลอมละลายจะไม่สูญเสียความร้อน จึงเหมาะสำหรับการเชื่อมชิ้นงานโลหะที่หนาเกิน 3 มิลลิเมตร ขึ้นไป โดยมุมของลวดเชื่อมและมุมหัวเชื่อมจะต้องควบคุมให้อยู่ระหว่าง 40–50° และ 40–50° ตามลำดับ ดังแสดงลักษณะรูปแบบของการเชื่อมใน**รูปที่ 4.13 (ข)**



(ก) เชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม **(ข)** เชื่อมแบบเติมลวดเชื่อม

รูปที่ 4.12 การเชื่อมแบบไม่เติมลวดกับแบบเติมลวดของการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (OAW)

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metal Fabrication, 2012



(ก) เชื่อมไปทางซ้ายมือ (Leftward technique)

(ข) เชื่อมไปทางขวามือ (Rightward technique)

รูปที่ 4.13 เทคนิคการเดินหัวเชื่อมของการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (OAW)

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metal Fabrication, 2012

ค. องค์ประกอบที่สำคัญในการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน

Larry Jeffus (2012) ได้กล่าวไว้ในการเชื่อมด้วยแก๊สออกซิอะเซทิลีน ให้ได้แนวเชื่อมที่มีคุณภาพตามที่ต้องการนั้นต้องควบคุมองค์ประกอบ 4 ประการหลักที่สำคัญให้ถูกต้องและเหมาะสม องค์ประกอบดังกล่าว ได้แก่

1. ปริมาณความร้อนที่ถูกต้อง : ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานและขนาดของหัวทิพเชื่อมที่ใช้ ถ้าชิ้นงานบางต้องใช้หัวทิพที่มีขนาดเล็ก แต่ถ้างานหนาต้องใช้หัวทิพที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ความร้อนที่ใช้ต้องไม่มากหรือน้อยเกินไป กล่าวคือ ถ้าน้อยเกินไปจะเกิดปัญหาโลหะงานไม่หลอมละลาย แต่ถ้ามากเกินไปควบคุมการหลอมละลายยากบ่อหลอมละลายอาจทะลุชิ้นงานเชื่อมได้

2. ระยะห่างของกรวยเปลวไฟ : กรวยของเปลวไฟควรมีระยะห่างอยู่ระหว่าง 2–3 มิลิเมตร กับผิวชิ้นงาน โดยต้องระวังไม่ให้กรวยเปลวไฟชั้นในสัมผัสกับผิวชิ้นงานเพราะจะทำให้ความร้อนลดลง สร้างบ่อหลอมละลายได้ยากและเกิดแก๊สต่าง ๆ เข้าไปรวมตัวกับน้ำโลหะในบ่อหลอมละลายได้ง่าย ความร้อนสูงสุดของเปลวไฟจะอยู่ที่ปลายของกรวยเปลวไฟและลดลงเรื่อย ๆ ถ้าระยะห่างของกรวยเปลวไฟมากขึ้น หรือชิดมากขึ้น

3. มุมหัวทิพเชื่อมและมุมลวดเชื่อม : มุมของหัวทิพเชื่อมและมุมลวดเชื่อมจะต้องมีความสัมพันธ์กับชนิดของรอยต่อและตำแหน่งในการเชื่อม โดยจะเปลี่ยนไปเรื่อย ๆ ตามความเหมาะสมกับลักษณะของตำแหน่งท่าเชื่อม

4. ความเร็วและการเดินแนวเชื่อม : ทั้งความเร็วและการเดินแนวหรือการส่ายหัวทิพเชื่อมมีความสัมพันธ์กันกับความหนาของโลหะชิ้นงาน ชนิดรอยต่อ และตำแหน่งท่าเชื่อม ซึ่งมีผลโดยตรงกับขนาดของแนวเชื่อม เช่น ต้องการแนวเชื่อมที่เล็กแคบแต่นูน หรือแนวเชื่อมกว้างแต่แบนราบ สามารถควบคุมได้โดยการเดินส่ายหัวทิพเชื่อมในแบบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งอีกนัยหนึ่งเป็นการควบคุมความเร็วในการเชื่อม

ง. ลวดเชื่อมออกซิอะเซทิลีน (Filler rod)

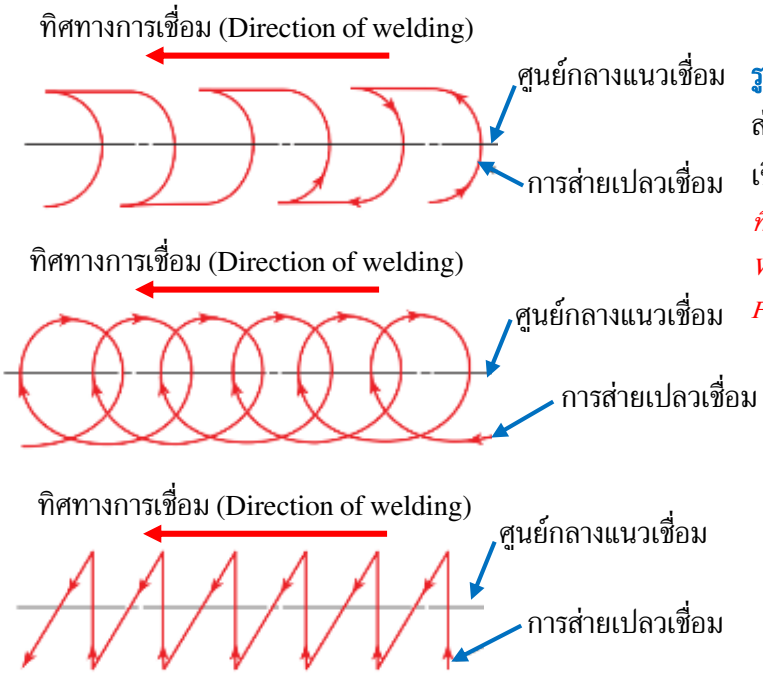
การเชื่อมด้วยแก๊สออกซิอะเซทิลีนแบบเติมลวด ส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมโลหะที่มีความหนาแล้วทำการต่อชน (Butt joint) หรือต่อตัวที (T joint) ช่างเชื่อมจะต้องเลือกลวดเชื่อมที่เป็นโลหะชนิดเดียวกับโลหะงาน โดยทั่วไปเป็นที่ทราบกันดีว่าลวดเชื่อมที่นิยมใช้กัน แบ่งได้ 2 ประเภท คือ

1. ลวดเชื่อมประเภทที่เป็นโลหะเหล็ก (Ferrous metal rod) จะมีส่วนผสมของธาตุเหล็กเป็นหลักและจะเติมธาตุอื่น ๆ ผสมตามคุณสมบัติที่ต้องการ เช่น ธาตุคาร์บอน แมงกานีส ซิลิกอน และฟอสฟอรัส เป็นต้น

2. ลวดเชื่อมประเภทที่เป็นโลหะไม่ใช่เหล็ก (Non–ferrous metal rod) จะใช้สำหรับการเชื่อมโลหะจำพวก อลูมิเนียม ทองแดง ทองเหลือง เป็นต้น โดยลวดเชื่อมจะต้องเป็นโลหะชนิดเดียวกันกับโลหะงานที่เชื่อม (Base metal) ขณะที่เชื่อมจำเป็นต้องใช้ฟลักซ์ (Flux) ร่วมด้วยเพื่อช่วยในการเพิ่ม

ประสิทธิภาพในการประสานเนื้อโลหะได้ดี

การเลือกใช้ลวดเชื่อมต้องพิจารณาร่วมกันกับขนาดของหัวทิพเชื่อม ความดันแก๊ส และขนาดของลวดเชื่อม ดังแสดงความสัมพันธ์ใน**ตารางที่ 4.4** ซึ่งอ้างอิงตามผู้ผลิต MWC (2014)



รูปที่ 4.14 เทคนิคการส่ายหัวทิพเชื่อมของการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metal Fabrication, 2012

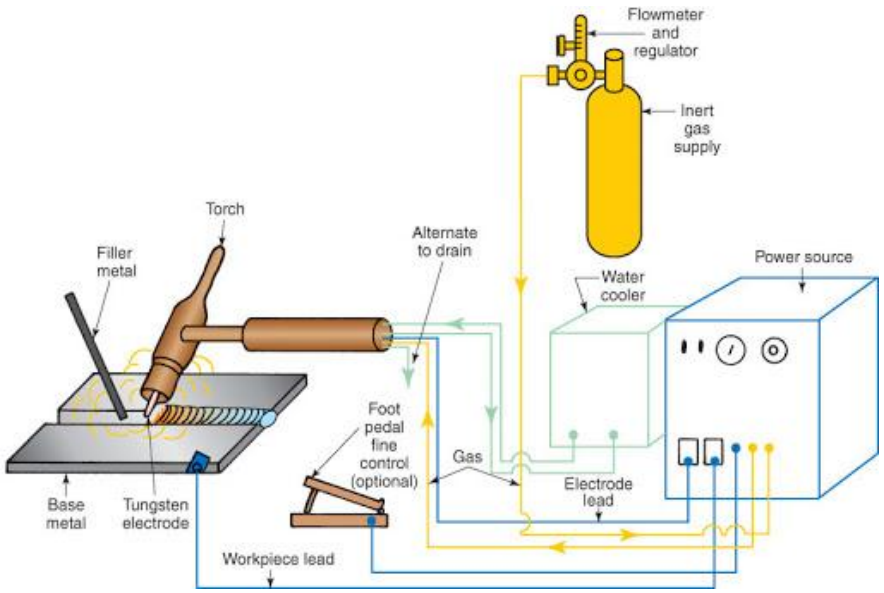
ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของความดันแก๊ส ชิ้นงานโลหะและขนาดลวดเชื่อม

ที่มา : MWC : Maine Welding Company 2014

ความดันแก๊ส ปอนด์/ตารางนิ้ว		ความหนาของโลหะงาน		ขนาด Ø ของลวดเชื่อม	
ออกซิเจน	อะเซทิลีน	นิ้ว	มิลลิเมตร	นิ้ว	มิลลิเมตร
1	1	–	–	–	–
2	2	1/32	0.8	1/16	1.5
3	3	1/16	1.5	1/16	1.5
4	4	3/32	2.4	1/16–1/8	1.5–3.2
5	5	1/8	3.2	3/32–1/8	2.4–3.2
6	6	3/16	4.8	1/8	3.2
7	7	1/4	6.4	3/16	4.8
8	8	5/16	7.9	3/16	4.8
9	9	3/8	9.5	1/4	4.8
10	10	7/9	11.5	3/16–1/4	4.8–6.4

4.2 การเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW)

อ้างอิงตาม CK Worldwide (2017) ที่ได้กล่าวไว้ว่า เป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่พัฒนาต่อยอดมาจากขบวนการเชื่อมแก๊สออกซิอะเซทิลีน (Oxyacetylene Welding : OAW) โดยต่างกันที่ใช้ความร้อนจากการอาร์กของลวดทังสเตน (Tungsten electrode) แทนเปลวแก๊สออกซิอะเซทิลีนและมีแก๊สเฉื่อยช่วยปกคลุมบ่อหลอมละลาย จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า การเชื่อมทิก (TIG) ซึ่งย่อมาจาก “ Tungsten Inert Gas” และในแถบยุโรปบางประเทศยังมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า WIG ซึ่งย่อมาจาก “ Wolfram Inert Gas” ในยุคแรก ๆ จะใช้แก๊สฮีเลียม (Helium gas) เป็นแก๊สปกคลุมจึงมีชื่อเรียกตามชนิดแก๊สปกคลุมว่า Heliarc (Helium Arc) หรือ Heliweld (Helium Welding) โดยชื่อที่ใช้เรียกเป็นมาตรฐานสากล คือ (Gas Tungsten Arc Welding) ที่ย่อว่า GTAW ดังแสดงถึงอุปกรณ์และระบบวงจรการทำงานของการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม ในรูปที่ 4.15



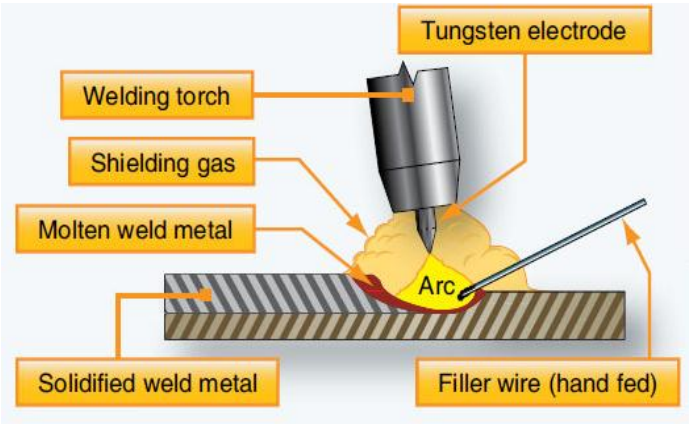
รูปที่ 4.15 อุปกรณ์และระบบวงจรการทำงานของการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม (GTAW)

ที่มา : Halverson CTS, The Gas Tungsten Arc Welding Station, 2017

4.2.1 ระบบการอาร์กและกระแสไฟเชื่อม (Arc system and welding current)

ระบบการอาร์ก (Arc system) Miller Electric Mfg. (2018) ได้อธิบายไว้ในคู่มือของการเชื่อมไว้ว่า กรรมวิธีการเชื่อมทิก (TIG) เป็นการเชื่อมที่จัดอยู่ในประเภทหลอมละลายที่อาศัยความร้อนจากการอาร์ก ระหว่างลวดทังสเตนกับชิ้นงานโลหะเพื่อสร้างบ่อหลอมละลาย ซึ่งขณะเดียวกันที่บริเวณเกิดการอาร์กจะใช้แก๊สเฉื่อย (Inert gas) ปกคลุมบริเวณอาร์กนั้นเพื่อป้องกันอากาศภายนอกเข้ามาทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะในบ่อหลอมละลาย เช่น แก๊สออกซิเจน ไนโตรเจน หรือความชื้นในอากาศ เกิดเป็น

ปฏิกิริยาที่เรียกว่า ออกซิเดชั่น (Oxidation) ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการอาร์กสูงมากเพียงพอสำหรับการหลอมละลายโลหะงาน โดยลวดทังสเตนไม่หลอมละลาย (Non–Consumable Electrode) จะทำหน้าที่เป็นเพียงตัวผลิตพลังงานความร้อน ดังแสดงลักษณะองค์ประกอบของการอาร์กในรูปที่ 4.16 ซึ่งเมื่อความร้อนมากพอที่จะสร้างเป็นบ่อหลอมละลายที่จุดรอยต่อตำแหน่งที่ต้องการ รอยต่อตำแหน่งนั้นจะเกิดการทำให้เนื้อโลหะติดกันอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4.16 หลักการของเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม (GTAW)
ที่มา : Flight Mechanic, Aircraft Welding, 2015

ในทางปฏิบัติได้จำแนกเทคนิคการเชื่อมให้ติดกันของการเชื่อมทิกไว้ 3 แบบ คือ

- เทคนิคการเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม (Autogenous welding technique) เป็นการเชื่อมที่ใช้เนื้อโลหะงานของบ่อหลอมละลายผสมติดกันโดยปราศจากการเติมเนื้อโลหะจากภายนอกเข้าไป ส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมงานโลหะที่บาง ผิวแนวเชื่อมราบ ไม่นูน เน้นความสวยงามไม่เน้นความแข็งแรงของแนวเชื่อม ดังแสดงรูปแบบของการเชื่อมในรูปที่ 4.17 (ก)
- เทคนิคการเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อมชนิดเดียวกับโลหะงาน (Homogenous welding technique) เป็นเทคนิคการเชื่อมที่ต้องใช้โลหะจากภายนอกเติมเข้าไปร่วมกับบ่อหลอมละลาย ด้วยลวดเชื่อม (Filler material) โดยลวดเชื่อมเติมเป็นโลหะชนิดเดียวกันกับโลหะงาน เหมาะกับงานเชื่อมโลหะหนาที่ต้องการความแข็งแรง แนวเชื่อมนูนและมีส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมเหมือนกันกับโลหะงานที่เชื่อม (Base metals) ดังแสดงรูปแบบของการเชื่อมในรูปที่ 4.17 (ข)
- เทคนิคการเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อมต่างชนิดกับโลหะงาน (Heterogenous welding technique) เป็นการเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อมอีกชนิดหนึ่ง โดยที่ใช้ลวดเชื่อมต่างชนิดกับโลหะงานที่เชื่อม เจตนาที่จะสร้างแนวเชื่อมที่มีสมบัติบางอย่างที่ต้องการ เช่น ต้องการควบคุมส่วนทางเคมีของแนวเชื่อม หรือสมบัติทางกลหรือประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อ เป็นต้น ซึ่งพบมากในการเชื่อมโลหะงานต่างชนิด (Dissimilar welding) ดังแสดงรูปแบบของการเชื่อมในรูปที่ 4.17 (ค)

ระบบกระแสไฟเชื่อม (System of welding current) ขบวนการเชื่อมทิกสามารถเลือกใช้กระแสไฟเชื่อมได้ 3 ชนิด ที่เกิดจากแหล่งพลังงานของเครื่องเชื่อมตามข้อมูลของ Larry Jeffus (2012) ดังนี้

1. กระแสไฟเชื่อมชนิดกระแสตรงขั้วลบ (Direct Current Electrode Negative) DCEN
2. กระแสไฟเชื่อมชนิดกระแสตรงขั้วบวก (Direct Current Electrode Positive) DCEP
3. กระแสไฟเชื่อมชนิดกระแสสลับความถี่สูง (Alternating Current and High Frequency) ACHF

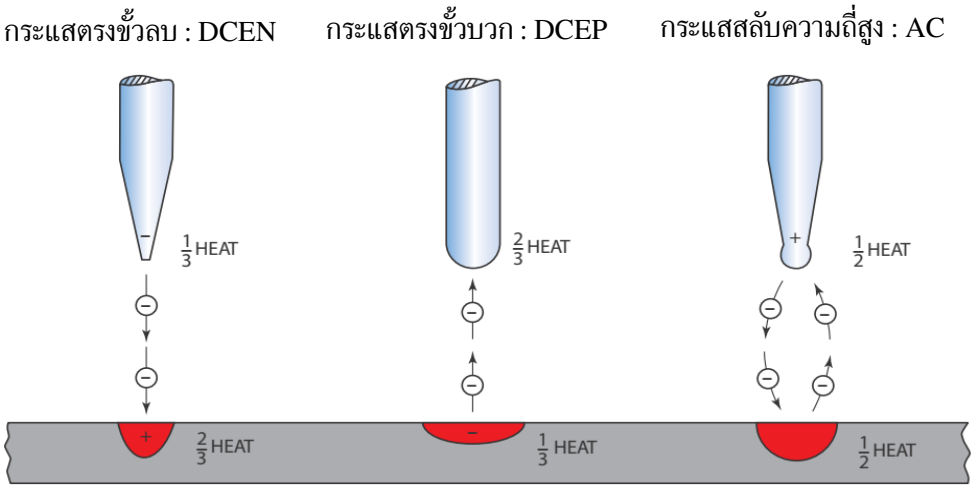
โดยแต่ละชนิดของระบบกระแสไฟเชื่อมจะมีความโดดเด่นแตกต่างกัน ดังสรุปเปรียบเทียบไว้ของแต่ละชนิดของกระแสไฟในรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.5 สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับกระแสไฟเชื่อมของแต่ละชนิดที่เลือกใช้จะกล่าวไว้ในบทเรียนถัดไปจากบทเรียนนี้



(ก) แบบไม่เติมลวดเชื่อม (ข) แบบเติมลวดเชื่อมชนิดเดียวกัน (ค) แบบเติมลวดเชื่อมต่างชนิด

รูปที่ 4.17 จำแนกเทคนิคการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม (TIG)

ที่มา : West Country Welding Supplies, 2013



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบชนิดของกระแสไฟเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม (TIG)

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metal Fabrication 2012

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบชนิดกระแสไฟเชื่อมสำหรับขบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม

ที่มา : B. J. Moniz and R.T. Miller, Welding Skills 2004

ชนิดของกระแสไฟเชื่อม (Type of welding current)		
กระแสตรง : DCEN, DC−	กระแสตรง : DCEP, DC+	กระแสสลับ : ACHF
●ลวดทังสเตนเป็นขั้วลบ ●ไม่ขจัดออกไซด์ระหว่างอาร์ก ●ความร้อนที่ชิ้นงาน 70 % ความร้อนที่ทังสเตน 30 % ●บ่อหลอมละลายซึมลึกมาก ●แนวเชื่อมแคบ	●ลวดทังสเตนเป็นขั้วบวก ●ขจัดออกไซด์ระหว่างอาร์ก ●ความร้อนที่ชิ้นงาน 30 % ความร้อนที่ทังสเตน 70 % ●บ่อหลอมละลายซึมลึกน้อย ●แนวเชื่อมกว้าง	●ลวดทังสเตนเป็นบวกและลบ ●ขจัดออกไซด์ระหว่างอาร์กที่ทุก ๆ ครึ่งไซเคิล ●ความร้อนที่ชิ้นงาน 50 % ความร้อนที่ทังสเตน 50 % ●บ่อหลอมซึมลึกปานกลาง ●แนวเชื่อมกว้างปานกลาง

4.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การเชื่อม (Welding equipment)

ขบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม หรือการเชื่อมทิก (TIG) ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญโดยอ้างอิงตาม GSI SLV. IWE (2015) ดังต่อไปนี้

1. เครื่องเชื่อม (Welding machine)

เครื่องเชื่อมสำหรับการเชื่อมทิก เป็นเครื่องเชื่อมที่มีการออกแบบให้มีระบบความถี่สูง (High frequency) และมีสวิตช์อัตโนมัติ (Solenoid valve) สำหรับการควบคุมการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น เพราะขบวนการเชื่อมนี้บริเวณอาร์กให้ความร้อนสูงมาก โดยทั่วไปมี 3 แบบ ดังนี้

- แบบทรานฟอร์เมอร์ (Transformer) เป็นเครื่องเชื่อมที่ป้อนจ่ายไฟเชื่อมกระแสสลับ (AC)
- แบบทรานฟอร์เมอร์−เรคติฟายเออร์ (Transformer−rectifiers) เป็นเครื่องเชื่อมที่ป้อนจ่ายไฟเชื่อมกระแสตรง (DC)
- แบบเจนเนอร์เรเตอร์ (Generators) ขับด้วยกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าสามารถป้อนจ่ายได้เฉพาะไฟกระแสตรง หรือที่ขับด้วยกำลังเครื่องยนต์ สามารถจ่ายได้ทั้งไฟกระแสตรงและกระแสสลับ โดยปกตินิยมใช้ในพื้นที่ปฏิบัติงานที่ไม่มีระบบกระแสไฟฟ้ารองรับ

จากที่ได้กล่าวมาทั้ง 3 แบบข้างต้น ช่างเชื่อมสามารถเลือกใช้ตามความเหมาะสมโดยพิจารณาจากความสามารถของเครื่องเชื่อม ความสะดวกในการใช้งานรวมถึงข้อจำกัดบางอย่างในการใช้งาน และต้นทุน โดยปกตินิยมใช้งานแบบทรานฟอร์เมอร์ (Transformer) กับแบบทรานฟอร์เมอร์−เรคติฟายเออร์ (Transformer−rectifiers) เพราะมีข้อดีหลายประการ เช่น ราคาต้นทุนต่ำ เสียงเครื่องทำงานเงียบ การบำรุงรักษาง่ายและสะดวก ดังแสดงตัวอย่างของเครื่องเชื่อมทิกพร้อมอุปกรณ์ ในรูปที่ 4.19



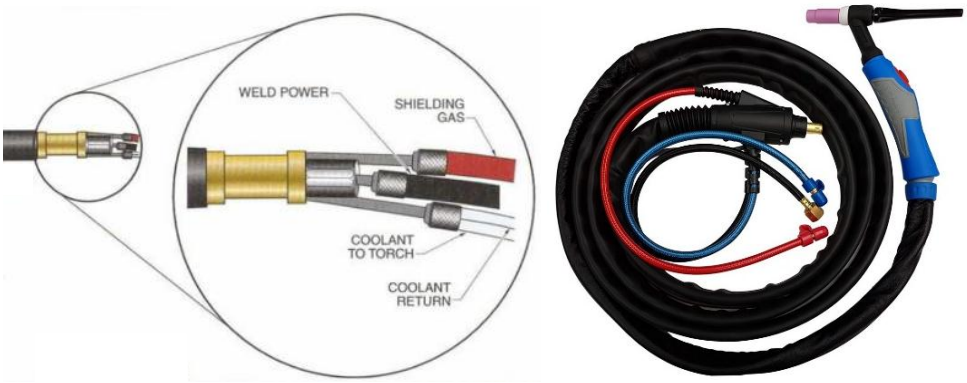
รูปที่ 4.19 เครื่องเชื่อมพร้อมอุปกรณ์สำหรับการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม (TIG)
ที่มา : Miller Electric Mfg., Welding Equipment, 2018

2. หัวเชื่อมพร้อมอุปกรณ์ (Welding torches)

หัวเชื่อมทิก หรือช่างเชื่อมที่นิยมเรียกกันว่า “ทิกทอร์ช (TIG Torch)” เป็นอุปกรณ์หลักที่สำคัญ เป็นส่วนที่ต้องสัมผัสกับอยู่กับความร้อนจากการอาร์อยู่ตลอดเวลาขณะเชื่อม ประจวบเหมาะกับความร้อนของขบวนการเชื่อมทิกที่ค่อนข้างสูง จึงต้องมีการออกแบบหัวเชื่อมให้มีระบบระบายความร้อน (Cooling system) เพื่อช่วยลดความเสียหายของหัวเชื่อมที่เกิดจากความร้อน จึงได้ออกแบบหัวเชื่อมตามระบบระบายความร้อนได้ 2 แบบ คือ

1. หัวเชื่อมที่มีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water–cooled torches) ดังแสดงในรูปที่ 4.20 (ก) จะใช้กับการเชื่อมที่ต้องการกระแสไฟเชื่อมที่สูงเกิน 160 แอมแปร์ ซึ่งเกิดความร้อนสูงมาก น้ำสามารถช่วยระบายความร้อนได้ดีกว่าอากาศ จึงสามารถเชื่อมได้อย่างต่อเนื่อง และช่วยลดอัตราการสึกหรอของลวดทังสเตน ที่สำคัญช่วยลดความร้อนที่มือจับของช่างเชื่อม แต่ก็มีข้อเสียที่บำรุงรักษายากอาจเกิดการรั่วของระบบน้ำรวมถึงไม่สะดวกในการเคลื่อนย้ายไปปฏิบัติงานในที่ต่าง ๆ

2. หัวเชื่อมที่มีระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air–cooled torches) ดังแสดงในรูปที่ 4.20 (ข) จะใช้กับการเชื่อมที่ต้องการกระแสไฟเชื่อมสูงไม่เกิน 150 แอมแปร์ เป็นที่นิยมใช้กันมากด้วยเพราะมีน้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายสะดวก ดูแลรักษาง่าย ระบบไม่ซับซ้อน สามารถออกแบบหัวเชื่อมได้หลากหลายขนาด โดยเฉพาะหัวเชื่อมที่ต้องการใช้กับกระแสเชื่อมที่ต่ำ



(ก) หัวเชื่อมแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water–cooled torches)



(ข) หัวเชื่อมแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air–cooled torches)

รูปที่ 4.20 หัวเชื่อมทิกที่มีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำและด้วยอากาศ

ที่มา : B. J. Moniz and R.T. Miller, Welding Skills 2004 และ Miller Electric, Equipment, 2018

ส่วนประกอบของหัวเชื่อมทิก (Components of TIG torch)

หัวเชื่อมทิกมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 4.21 โดยแต่ละส่วนประกอบมีหน้าที่ดังต่อไปนี้ อ้างอิงตาม CK Worldwide (2017)

1. ตัวหัวเชื่อม (Torch body) เป็นส่วนลำตัวของหัวเชื่อมสำหรับจับถือของช่างเชื่อม และทำหน้าที่เป็นทางเดินของแก๊สปกคลุม กระแสไฟเชื่อม และระบบระบายความร้อน (น้ำ/อากาศ)

2. ฝาครอบ (Back cap) เป็นส่วนปลายด้านบนของหัวเชื่อมมีหน้าที่ป้องกันไม่ให้แก๊สภายในไหลออกมา และยังเป็นตัวช่วยป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกไหลเข้าไปภายใน ฝาครอบมีทั้งแบบฝาครอบสั้น (Short back cap) และแบบฝาครอบยาว (Long back cap)

3. ลวดทังสเตน (Tungsten electrode) ทำหน้าที่สำหรับการอาร์กและนำความร้อนไปยังชิ้นงานเพื่อทำการหลอมละลาย โดยลวดทั้งสเตนไม่หลอมละลาย (Non−Consumable Electrode)

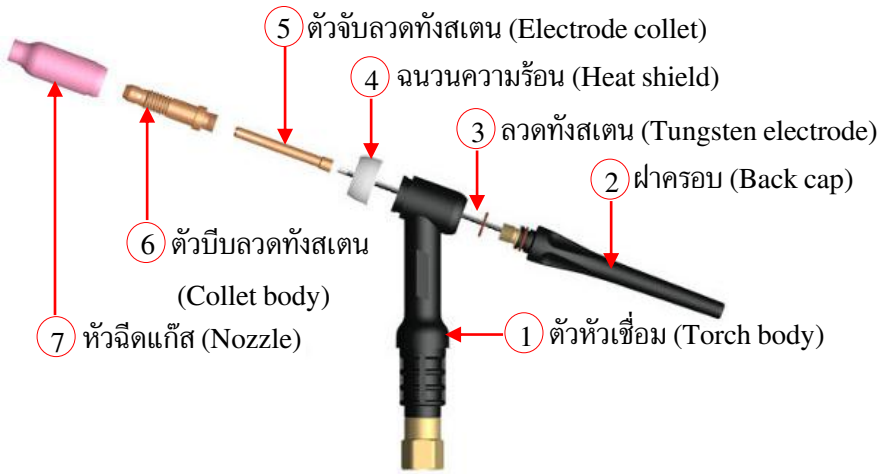
4. ฉนวนกันความร้อน (Heat shield) เป็นส่วนที่มีลักษณะเป็นวงแหวน (O−ring) ทำหน้าที่ป้องกันความร้อนจากการอาร์กไม่ให้ถ่ายโอนไปยังตัวหัวเชื่อม

5. ตัวจับลวดทังสเตน (Electrode collet) เป็นตัวจับล็อคลวดทังสเตน ซึ่งมีขนาดรูภายในตามของ Ø ของแท่งลวดทังสเตน ซึ่งส่วนใหญ่ทำจากโลหะทองแดงผสมเพื่อต้องการคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและนำความร้อนที่ดี

6. ตัวบีบแท่งลวดทังสเตน (Collet body) เป็นชิ้นส่วนทำหน้าที่บีบลวดทังสเตนให้ยึดแน่นกับตัวจับลวด (Electrode collet) โดยปลายด้านหนึ่งยึดติดกับหัวเชื่อมด้วยเกลียว ตรงกลางมีรูเพื่อให้แก๊สปกคลุมไหลออกไปยังหัวฉีดแก๊ส แล้วไปปกคลุมบ่อหลอมละลาย มักทำด้วยโลหะทองแดงผสม

7. หัวฉีดแก๊ส (Nozzle) เป็นส่วนปลายที่อยู่ใกล้กับบ่อหลอมละลาย ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลหรือฉีดแก๊สปกคลุมไปยังบ่อหลอมละลาย มีหลายรูปแบบและหลายขนาด ผลิตจากวัสดุจำพวกที่ทนความร้อนสูง ได้แก่ เซรามิกส์ แก้ว หรือ ซิลิกอนออกไซด์ เป็นต้น หัวฉีดแก๊สที่ใช้กับระบบระบายความร้อนด้วยน้ำจะมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า

หัวเชื่อมทิกได้มีการออแบบไว้หลากหลายลักษณะ โดยมั่งเน้นให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในลักษณะต่าง ๆ เช่น ในที่แคบหรือตำแหน่งงานที่เชื่อมยาก หรือบางแบบสามารถหมุนปรับเอียงได้เพื่อรองรับกับลักษณะงานรวมไปถึงการออกแบบรองรับกับหัวฉีดแก๊สที่เป็นแบบสั้นและแบบยาว เป็นต้น ดังตัวอย่างหัวเชื่อมที่ออกแบบไว้หลากหลายเฉพาะงานในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.21 ส่วนประกอบของหัวเชื่อมทิก

ที่มา : CK World Wide, The Standard in TIG Welding, 2017



รูปที่ 4.22 ลักษณะรูปแบบที่หลากหลายของการออกแบบหัวเชื่อมทิก

ที่มา : CK World Wide, The Standard in TIG Welding, 2017

3 ลวดทังสเตนสำหรับอาร์กเชื่อม (Tungsten electrode)

ลวดทังสเตนหรือแท่งทังสเตนสำหรับขบวนการเชื่อมทิกจะทำหน้าที่เป็นตัวอาร์กกับชิ้นงานเพื่อสร้างบ่อหลอมละลายโดยตัวของลวดเองจะไม่หลอมละลาย เหตุเพราะโลหะทังสเตนมีจุดหลอมเหลวสูงมากถึง 3,410 °C จะมีเพียงการสึกหรอไปตามสภาพของการใช้งานเท่านั้น ตามมาตรฐานของสมาคมการเชื่อมแห่งสหรัฐอเมริกา American Welding Society: AWS (2017) ได้จำแนกชนิดของลวดทังสเตนตามส่วนผสมของธาตุในโลหะทังสเตนดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 โดยแต่ละชนิดจะแยกด้วยรหัสสีที่ปลายของแท่งลวดทังสเตนดังแสดงในรูปที่ 4.23 ซึ่งช่างเชื่อมต้องเลือกลวดทังสเตนที่ถูกต้องเหมาะสมกับชนิดของกระแสไฟเชื่อม (Welding current) โดยปกติขนาดของลวดทังสเตนโตขึ้นจะสามารถเชื่อมได้ในกระแสไฟที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเหมือนกันทั้งระบบกระแสไฟ DCEN กระแสไฟ DCEP และกระแสไฟ AC ดังแสดงเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของขนาดลวดทังสเตนกับชนิดของกระแสไฟเชื่อมในตารางที่ 4.7

การกำหนดรหัสของสีต่าง ๆ มีเจตนาต้องการป้องกันความผิดผลาดในการเลือกใช้ เพราะแต่ละรหัสสีจะออกแบบส่วนผสมทางเคมีของลวดทังสเตนมาเพื่อความโดดเด่นในการใช้งาน เช่น หัวสีแดง (EWTh−2) เหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิม หรือหัวสีเขียว (EWP) เหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะอลูมิเนียม ส่วนหัวสีส้ม (EWCe−2) จุดเด่นใช้สำหรับการเชื่อมโลหะแผ่นบาง เป็นต้น

ตารางที่ 4.6 ชนิดของลวดทังสเตน (Type of tungsten electrode)

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metal Fabrication 2011

ชนิดของลวดทังสเตน (AWS)	ส่วนผสมของลวดทังสเตน (Composition)	สีของลวดทังสเตน (Tip color)
EWP	Pure tungsten	สีเขียว
EWTh−1	1% Thorium added	สีเหลือง
EWTh−2	2% Thorium added	สีแดง
EWZr	1/4 to 1/2 Zirconium added	สีน้ำตาล
EWCe−2	2% Cerium added	สีส้ม
EWLa−1	1% Lanthanum added	สีดำ
EWG	Alloy not specified	ไม่ระบุ



รูปที่ 4.23 ลักษณะรูปแบบการแบ่งชนิดลวดทังสเตนด้วยรหัสสี

ที่มา : The Publications of the welder, Tungsten Electrode 2017

ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของขนาดลวดทังสเตนกับชนิดของกระแสไฟเชื่อม

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metal Fabrication 2011

ขนาด Ø ของลวดทังสเตน		กระแสไฟเชื่อม (A)		
นิ้ว (in)	มิลลิเมตร (mm)	DCEN	DCEP	AC
0.04	1	15−16	−	10−50
1/16	2	70−100	10−20	50−90
3/32	2.4	90−200	15−30	80−130
1/8	3	150−350	25−40	100−200
5/32	4	300−450	40−55	160−300

การลับลวดทังสเตน (Grinding tungsten electrode)

นอกจากการเลือกชนิดของลวดทังสเตนที่ต้องสัมพันธ์กับชนิดของโลหะงาน ชนิดของกระแสไฟเชื่อม และปริมาณกระแสไฟที่ต้องใช้แล้วนั้น การลับลวดทังสเตนที่ถูกต้องก็มีความจำเป็นไม่น้อยไปกว่ากัน ในทางปฏิบัติช่างเชื่อมสามารถทำการลับลวดทังสเตนได้ทั้งแบบใช้เครื่องมือลับลวดทั้งสเตน (Tungsten grinder) นิยมเลือกใช้กันมากเพราะมีความเที่ยงตรงสูง ซึ่งมีทั้งแบบชนิดพกพา (Portable) สำหรับงานภาคสนามนอกสถานที่และแบบชนิดติดตั้งประจำตำแหน่ง (Stationary) ดังแสดงในรูปที่ 4.24 (ก) และ (ข) ตามลำดับ สำหรับกรณีที่ลับด้วยมือกับล้อหินขัด ช่างเชื่อมต้องมีความชำนาญมากพอ เพราะต้องควบคุมด้วยทักษะของผู้ที่ทำการลับ ดังแสดงวิธีการลับและทิศทางการลับที่ถูกต้องในรูปที่ 4.25 (ก) และ (ข) ตามลำดับอ้างอิงตาม Larry Jeffus (2011)



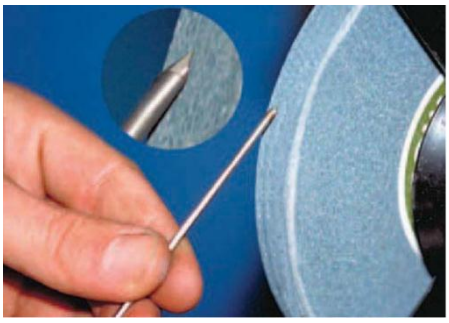


(ก) แบบชนิดพกพา (Portable) **(ข)** แบบชนิดติดตั้งประจำตำแหน่ง (Stationary)

รูปที่ 4.24 เครื่องลับลวดทังสเตน (Grinding tungsten electrode machine)

ที่มา : The Publications of the welder, Tungsten Electrode, 2017





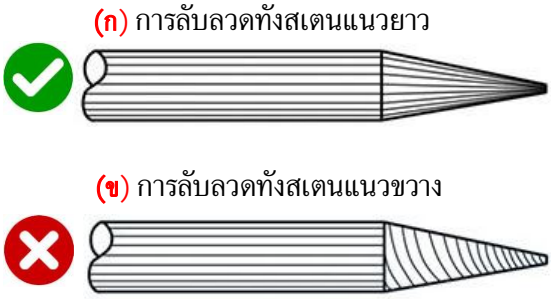
(ก) วิธีการลับลวดทังสเตนที่ถูกต้อง **(ข)** ทิศทางการลับลวดทังสเตนที่ถูกต้อง

รูปที่ 4.25 วิธีการลับลวดทังสเตนด้วยล้อหินขัดที่ถูกต้อง

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metal Fabrication, 2011

การลับหรือปรับแต่งลวดทังสเตนจะต้องลับตามแนวยาวของลวดทังสเตน เหตุผลเพราะตามแนวยาวจะช่วยให้การส่งถ่ายกระแสไฟเชื่อมเป็นทิศทางเดียวกัน ทำให้การควบคุมบ่อหลอมละลายทำได้ง่าย เปลวของกระแสไฟอาร์กจะเล็ก กำหนดขนาดของแนวเชื่อมได้ตามต้องการ ถ้าลับตามแนวขวางการส่ง

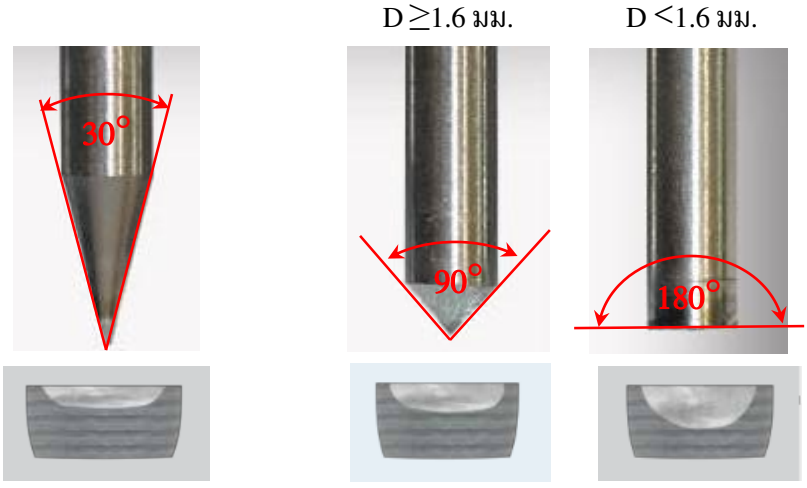
ถ่ายกระแสจะไม่สม่ำเสมอ และมีโอกาสที่ปลายลวดทังสเตนจะแตกหักและหลุดเข้าไปรวมตัวกับน้ำโลหะในบ่อหลอมละลายกลายเป็นสารแปลกปลอม (Contaminated) ดังแสดงเปรียบเทียบลักษณะของการลับลวดทังสเตนตามแนวยาวกับตามแนวขวางในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบการลับลวดทังสเตน

ที่มา : Winning Preparation, Proper preparation of tungsten electrodes for arc welding begins with the fundamentals 2015

นอกจากการลับปลายลวดที่ถูกต้องแล้วการกำหนดขนาดมุมของปลายลวดก็มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับขนาด Ø ของลวดทังสเตนและที่สำคัญสุดคือ ชนิดของกระแสไฟเชื่อม กล่าวคือ กระแสไฟเชื่อมชนิดกระแสไฟตรงมุมของปลายลวดโดยประมาณ 30° ส่วนกระแสไฟเชื่อมชนิดกระไฟสลับ กรณีที่ขนาด Ø ลวด $\geq$ 1.6 มม. มุมลับของปลายลวดจะประมาณ 90° แต่ถ้าขนาดของ Ø ลวด $<$ 1.6 มม. มุมลับของปลายลวดจะกว้างมากขึ้นจนแบนราบถึง 180° ซึ่งขนาดองศาของมุมปลายลวดทังสเตนจะมีผลต่อขนาดและรูปร่างของรอยเชื่อม ดังแสดงลักษณะมุมของปลายลวดทังสเตนที่เหมาะสมของแต่ละชนิดกระแสไฟเชื่อมและขนาดรูปร่างของรอยเชื่อมในรูปที่ 4.27 และได้รวบรวมอิทธิพลของลวดทังสเตนที่มีต่อขบวนการเชื่อมทิก ดังแสดงในตารางที่ 4.8 โดยอ้างอิงข้อมูลของ Roger Timings (2008)



(ก) กระแสไฟตรง (DC) (ข) กระแสไฟสลับ (AC)

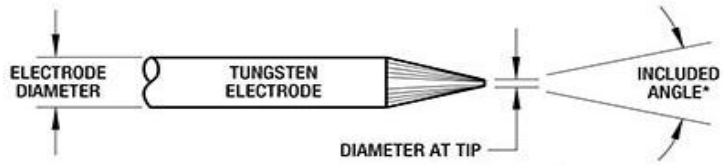
รูปที่ 4.27 ลักษณะของมุมลับปลายลวดทังสเตนสำหรับไฟกระแสตรงและกระแสสลับ

ที่มา : Welding Design & Fabrication, 2015

ตารางที่ 4.8 ขนาดของปลายลวดทังสเตน มุมรวม และช่วงของกระแสไฟเชื่อม

ที่มา : World Wide, The Standard in TIG Welding 2017

ขนาด Ø ของลวดทังสเตน		ขนาด Ø ของปลายลวดทังสเตน (TIP)		มุมรวม (Included angle)	ช่วงกระแสไฟ	ช่วงกระแสไฟระบบพัลส์
มิลลิเมตร	นิ้ว	มิลลิเมตร	นิ้ว	°	แอมแปร์	แอมแปร์
1.0	0.040	0.125	0.005	12°	2–15	2–25
1.0	0.040	0.250	0.010	20°	5–30	5–60
1.6	1/16	0.500	0.020	25°	8–50	8–100
1.6	1/16	0.800	0.030	30°	10–70	10–140
2.4	3/32	0.800	0.030	12°	12–90	12–180
2.4	3/32	1.100	0.045	12°	15–150	15–250
3.2	1/8	1.100	0.045	12°	20–200	20–300
3.2	1/8	1.500	0.060	12°	25–250	25–350



4. แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม (Shielding gases)

การเชื่อมทิกมีความจำเป็นที่จะต้องใช้แก๊สเฉื่อย (Inert gases) เพื่อทำหน้าที่ปกคลุมบ่อหลอมละลายจากบรรยากาศภายนอก การเลือกใช้ชนิดของแก๊สปกคลุมขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของโลหะงานที่เชื่อม การออกแบบรอยต่อ และคุณสมบัติของแนวเชื่อม ซึ่งรวมไปถึงความสามารถของแก๊สในการช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพในการอาร์ก แก๊สปกคลุมที่นิยมใช้ในการปกคลุม ซึ่งได้เผยแพร่อยู่ในบทความของ CK Worldwide (2017) ได้แก่

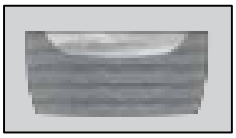
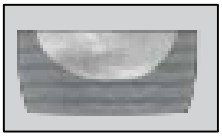
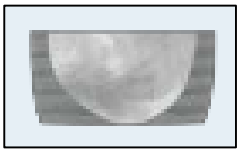
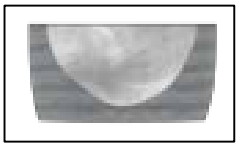
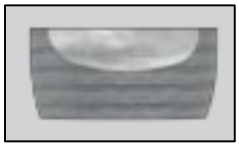
- แก๊สอาร์กอน (Argon : Ar) เป็นแก๊สเฉื่อยที่ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด มักจะเรียกขบวนการเชื่อมทิกนี้ว่า “การเชื่อมอาร์กอน” เพราะสามารถใช้เชื่อมกับโลหะทุกชนิด มีความสม่ำเสมอในการอาร์ก ช่วยในการขจัดผิวออกไซด์ได้ดี (Arc cleaning action) ช่วยอาร์กเริ่มต้นได้ดีและราคาค่อนข้างถูก
- แก๊สฮีเลียม (Helium : Hr) เป็นแก๊สเฉื่อยมีสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี ให้ค่าความร้อนสูงเหมาะกับการเชื่อมแบบอัตโนมัติ แนวเชื่อมมีอัตราการซึมลึกที่สูงสามารถเชื่อมได้เร็ว และเชื่อมได้กับโลหะทุกชนิด แต่ราคาค่อนข้างสูง
- แก๊สอาร์กอนผสมฮีเลียม (Ar + 15–75% He) เป็นแก๊สปกคลุมแบบผสมที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษของแก๊สเพื่อช่วยในการลดรูพรุน ลดอัตราการแตกร้าว ลดการบิดงอ และเหมาะสำหรับระบบการเชื่อมแบบอัตโนมัติ (Automatic welding)

● แก๊สอาร์กอนผสมไฮโดรเจน (Ar + 7% He) เป็นแก๊สปกคลุมแบบผสมที่ต้องการเพิ่มความร้อนแก่งานเชื่อมเพื่อสามารถเชื่อมได้รวดเร็วมากขึ้นเพราะเป็นแก๊สแอคทีฟ เหมาะกับการเชื่อมโลหะงานจำพวกเหล็กกล้าไร้สนิมหรือเหล็กกล้าผสมโครเมียมและนิกเกิลสูง เป็นต้น

จากการทดลองวิจัยในการใช้แก๊สปกคลุมแต่ละชนิด พบว่ามีอิทธิพลต่อขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อม ดังแสดงเปรียบเทียบในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 อิทธิพลของชนิดแก๊สปกคลุมที่มีผลต่อขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อม

ที่มา : CK World Wide, The Standard in TIG Welding, 2017

ชนิดของแก๊สปกคลุม (Gas type)	รูปร่างของแนวเชื่อม (Weld penetration profile)		
	มุมลวดทังสเตน 30°	มุมลวดทังสเตน 60°	มุมลวดทังสเตน 90°
100%Ar			
75%Ar + 25%He			
50%Ar + 50%He			
25%Ar + 75%He			
100%He			
95%Ar + 5%H_2			

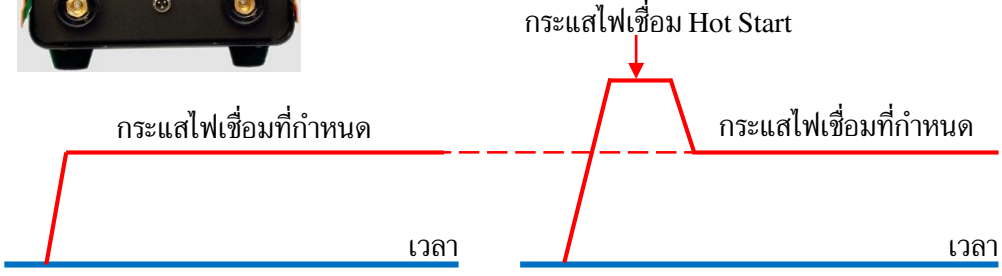
5. การเพิ่มกระแสขณะเริ่มอาร์ก (Hot Start) และการรักษาระยะอาร์ก (Arc Force)

การเพิ่มกระแสขณะเริ่มอาร์ก (Hot Start) Larry Jeffus (2011) ได้กล่าวถึงการเชื่อมทิกว่าเป็นการเชื่อมที่อาศัยการอาร์กเริ่มต้นจากปลายของลวดทังสเตน สำหรับช่างเชื่อมฝึกหัด หรือยังขาดความชำนาญจะยากในการที่จะควบคุมปลายลวดเพื่อการอาร์ก โดยเฉพาะการเชื่อมที่กระแสไฟต่ำ ถ้าเชื่อมที่กระแสไฟที่สูงขึ้นจะควบคุมการเริ่มต้นอาร์กได้ง่ายขึ้นตามลำดับ ดังนั้น เพื่อการเริ่มต้นการอาร์กที่ง่าย ผู้ผลิตจึงได้ออกแบบให้เครื่องเชื่อมมีปุ่ม Hot Start ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.28 โดยหน้าที่หลักของปุ่ม Hot Start คือ ช่วยเพิ่มกระแสไฟเมื่อขณะเริ่มต้นเชื่อมที่ 1–10% ของกระแสไฟเชื่อมที่กำหนด จากรูปที่ 4.29 (ก) แสดงลักษณะของกระแสไฟเชื่อมมาตรฐานหรือปกติของกระแสไฟเชื่อมเริ่มต้น ส่วนรูปที่ 4.29 (ข) เป็นการเริ่มต้นเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมด้วยระบบ Hot Start ซึ่งกระแสไฟเชื่อมขณะเริ่มต้นอาร์กจะสูงกว่ากระแสไฟเชื่อมที่กำหนด และลดลงเมื่อเวลาผ่านไปโดยปกติใช้เวลาประมาณ 0.5 วินาที จากนั้นระดับกระแสไฟเชื่อมก็จะอาร์กอย่างต่อเนื่องที่กระแสไฟเชื่อมที่กำหนดจนสิ้นสุดการเชื่อม ตัวอย่างเช่น เมื่อช่างเชื่อมกำหนดตั้งกระแสไฟเชื่อมไว้ที่ 100 A แล้วหมุนปรับตั้งปุ่ม Hot Start ไว้ที่ 10% เมื่อเริ่มต้นอาร์กกระแสเชื่อมจะขึ้นไปที่ 110 A เป็นเวลา 0.5 วินาที เมื่อจรดปลายลวดทังสเตนลงบนชิ้นงานการอาร์กก็ง่ายขึ้น หลังจากนั้นกระแสจะกลับลดลงมาอยู่ที่ 100 A ตามที่กำหนดตั้งไว้ดังเดิม



รูปที่ 4.28 แสดงตำแหน่ง Hot Start และตำแหน่ง Arc Force บนหน้าแผงควบคุมของเครื่องเชื่อม

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metal Fabrication 2011

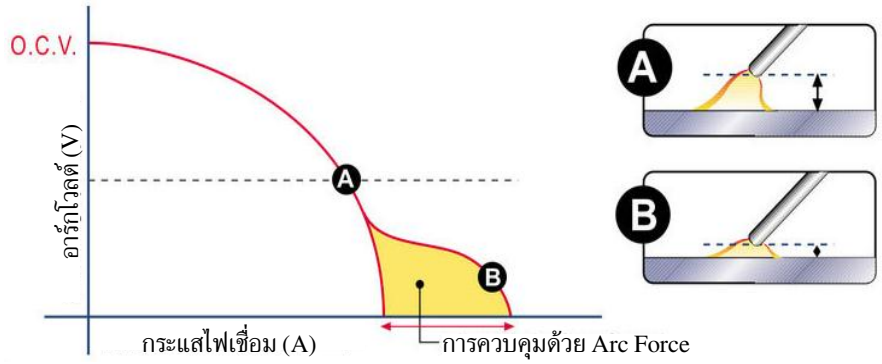


(ก) มาตรฐานกระแสไฟเชื่อมเริ่มต้น **(ข)** กระแสไฟเชื่อมเริ่มต้นด้วย Hot Start

รูปที่ 4.29 วิธีการเริ่มต้นการอาร์กเชื่อม (ก) ระบบมาตรฐานและ (ข) ระบบที่มี Hot Start

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metal Fabrication 2011

การรักษาระยะอาร์ก (Arc Force) เป็นปุ่มที่อยู่บนหน้าแผงควบคุมของเครื่องเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.28 ทำหน้าที่ต่อจาก Hot Start ในการเพิ่มหรือลดกระแสไฟเชื่อมอย่างรวดเร็วและทันที โดยจะช่วยในการรักษาระยะอาร์กให้เหมาะสมคงที่อยู่ตลอดเวลา กล่าวคือ ขณะทำการเชื่อมโดยเฉพาะการเชื่อมด้วยมือช่างเชื่อมระยะอาร์กอาจไม่สม่ำเสมอ เช่น ถ้าระยะอาร์กชิดมากเกินไปแรงดันอาร์กจะลดลง ระบบของ Arc Force จะทำหน้าที่ทันทีโดยปรับเพิ่มกระแสไฟให้สูงขึ้น อุณหภูมิหลอมเหลวจะเพิ่มขึ้นตาม การอาร์กก็ง่ายขึ้น ป้องกันปลายลวดทังสเตนติดกับผิวชิ้นงาน ในทางตรงกันข้ามถ้าระยะอาร์กห่างมากเกินไปแรงดันอาร์กจะเพิ่มสูงขึ้น ระบบของ Arc Force จะทำหน้าที่ปรับลดกระแสไฟลงเพื่อควบคุมลดขนาดของบ่อหลอมละลายให้เล็กลง โดยระบบ Arc Force ที่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 4.30 และตัวอย่าง ของการแสดงผลที่แผงควบคุมของเครื่องเชื่อมของ Hot Start กับ Arc Force ในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.30 ระบบกลไกการทำหน้าที่รักษาระยะอาร์กของระบบ Arc Force

ที่มา : Manual Arc Welding E201, Heavy Industrial Application

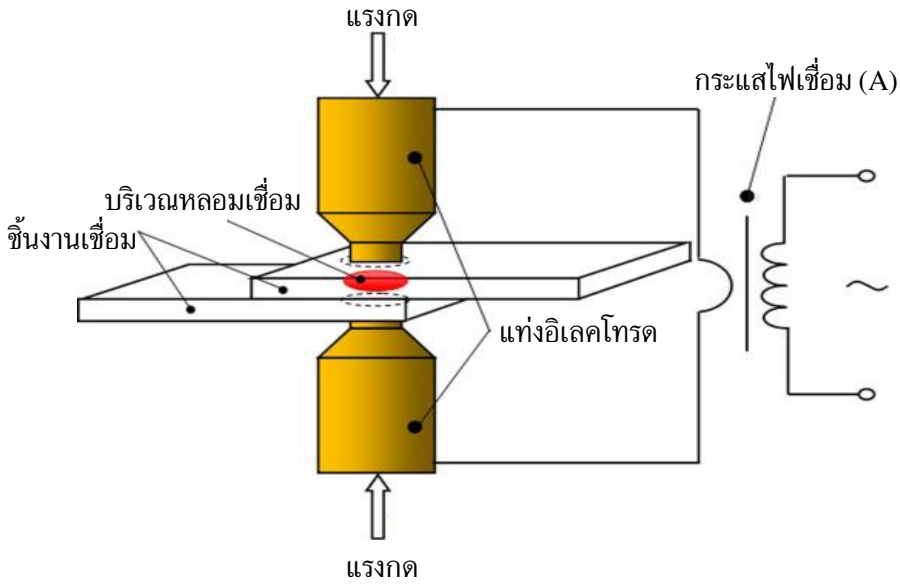


รูปที่ 4.31 ตัวอย่างการแสดงผลที่แผงควบคุมของเครื่องเชื่อมของ Hot Start กับ Arc Force

ที่มา : HIFA Electric Co., Ltd. Product Categories, 2017.

4.3 กรรมวิธีการเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance Welding : RW)

เป็นการเชื่อมโลหะโดยอาศัยหลักการสร้างความร้อนเพื่อการหลอมละลายด้วยการใช้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านโลหะที่มีความต้านทานไฟฟ้า (Resistance current) ซึ่งบริเวณที่มีความต้านทานสูง คือ ตำแหน่งผิวรอยต่อของโลหะงานทั้งสองชิ้นสัมผัสกัน และตำแหน่งนี้จะเกิดความร้อนสูงสุดจนทำให้เกิดการหลอมละลายที่ผิวงานทั้งคู่จนเป็นบ่อหลอมละลายและจะหลอมเชื่อมติดกัน บ่อหลอมละลายจะตื้นและมีพื้นที่ไม่กว้างมาก การเชื่อมแบบความต้านทานนี้ไม่ต้องมีแก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลาย ไม่มีมลพิษ ความร้อนบริเวณการเชื่อมไม่มากเหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะแผ่น (Sheet) เป็นขบวนการเชื่อมที่ไม่ต้องอาศัยทักษะของช่างเชื่อมมากนัก ส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมด้วยหุ่นยนต์อัตโนมัติ ที่กล่าวโดย Luo Yi et al. (2016) โดยมีข้อจำกัดกับการประยุกต์ใช้งานที่ไม่หลากหลาย เครื่องเชื่อมและอุปกรณ์ราคาค่อนข้างสูง ดังแสดงกลไกระบบของการเชื่อมในรูปที่ 4.32 และ AMDA Weld Tech Inc (2020) ซึ่งได้แยกขบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานออกเป็นแบบวิธีย่อยตามรูปแบบลักษณะของงานที่เชื่อมได้ 6 รูปแบบ ดังนี้



รูปที่ 4.32 กลไกระบบของการเชื่อมแบบความต้านทาน (Resistance welding)

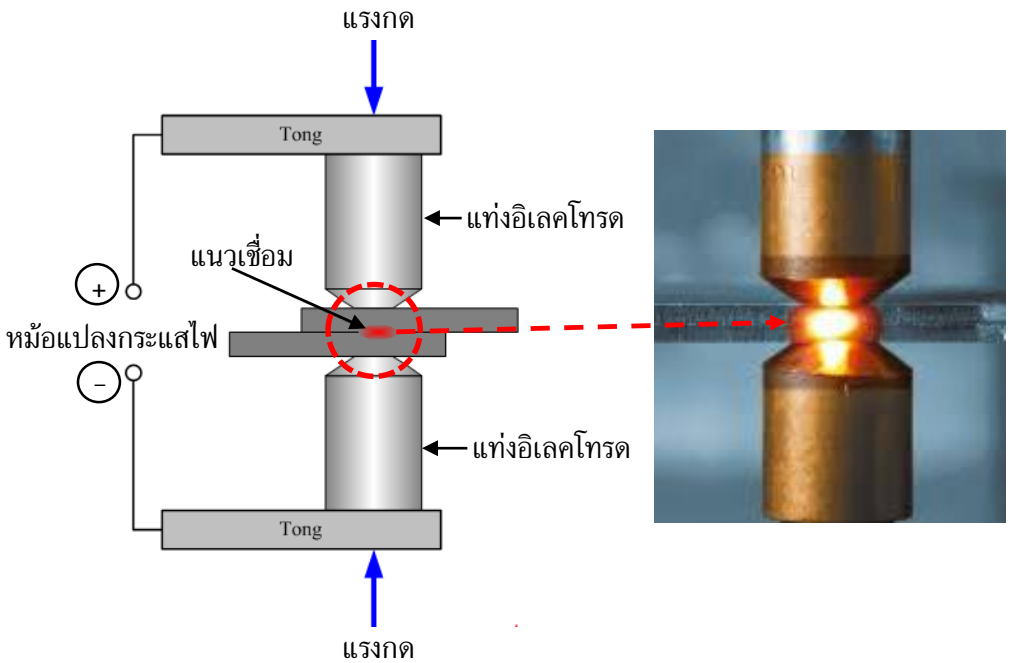
ที่มา : Luo Yi et al. Journal of Materials Processing Technology, 229 (2016) 492–500

4.3.1 การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding)

การเชื่อมที่อาศัยความต้านทานแบบจุดนี้มีชื่อที่นิยมเรียกกันทั่วไปว่า การเชื่อม Spot ซึ่งเป็นการเชื่อมแบบหลอมละลายที่แนวเชื่อมมีลักษณะเป็นจุด ๆ โดยชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมต้องวางเกยทับสัมผัสผิวกันอย่างดี ซึ่งใช้ความร้อนสำหรับเพื่อการหลอมละลายโลหะชิ้นงานให้ติดกันนั้น อาศัยหลักการความต้านทานกระแสไฟฟ้าของวัสดุโลหะ หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้แบบสเต๊ปดาวน์ (Step –Down Transformer) คือ แปลงไฟฟ้าจากระบบความดันสูง–กระแสต่ำ แปลงเป็นระบบแรงดันต่ำ–กระแสสูง

เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วแท่งโลหะที่เป็นอิเลคโทรดซึ่งจะเป็นโลหะทองแดงผสม (Copper alloy) ซึ่งมี 2 แท่งขั้ว คือ แท่งขั้วบวก (+) และแท่งขั้วลบ (−) เมื่อใช้แรงกดให้ปลายของแท่งขั้วทั้งสองเคลื่อนที่มาสัมผัสกับผิวของโลหะชิ้นงาน จะทำให้กระแสไฟฟ้าแบบแรงดันต่ำ−กระแสสูงในปริมาณที่มากไหลไปสู่โลหะงานเพื่อจะไหลต่อไปยังแท่งขั้วตรงข้าม ซึ่งจะต้องผ่านผิวของโลหะงานอีกชิ้น ด้วยเพราะกระแสไฟที่มากแต่มีพื้นที่สัมผัสที่ปลายแท่งขั้วอิเลคโทรดที่สัมผัสอยู่กับผิวโลหะงานน้อย จึงเกิดเป็นความร้อนขึ้นที่บริเวณผิวของโลหะงานสองชิ้นที่ต่อเกยและสัมผัสกันตรงตำแหน่งที่ตรงกับปลายของแท่งขั้วอิเลคโทรด ผิวโลหะชิ้นงานทั้งคู่เริ่มหลอมละลายและติดกันเป็นแนวเชื่อมที่เป็นจุด การเชื่อมติดกันนอกจากการหลอมละลายแล้วส่วนหนึ่งเกิดจากแรงกดของปลายหัวอิเลคโทรด ดังแสดงระบบกลไกของการเชื่อมจุดในรูปที่ 4.33

การเชื่อมความต้านทานแบบจุดนี้เหมาะกับงานโลหะแผ่นบาง โดยวางเกยซ้อนกันหนาไม่เกิน 3 มิลลิเมตร เป็นการเชื่อมที่ไม่มีการเติมลวดเชื่อมใช้พลังงานความร้อนน้อยกว่าการเชื่อมแบบวิธีอื่น ๆ ชิ้นงานเชื่อมไม่เกิดการเสียรูปหรือบิดงอ ทำงานได้รวดเร็ว แนวเชื่อมมีความแข็งแรงต่ำกว่าขบวนการเชื่อมวิธีอื่น ๆ แท่งขั้วอิเลคโทรดจะเกิดความร้อนสะสมเมื่อเชื่อมอย่างต่อเนื่องจึง ต้องมีระบบระบายความร้อนของแท่งทองแดงผสมที่เป็นอิเลคโทรด กรณีเชื่อมโลหะงานแผ่นบาง ๆ นิยมใช้ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศหรือลม (Air cooling) ส่วนกรณีโลหะงานหนาจะใช้ระบบระบายความร้อนด้วยระบบน้ำ (Water cooling)

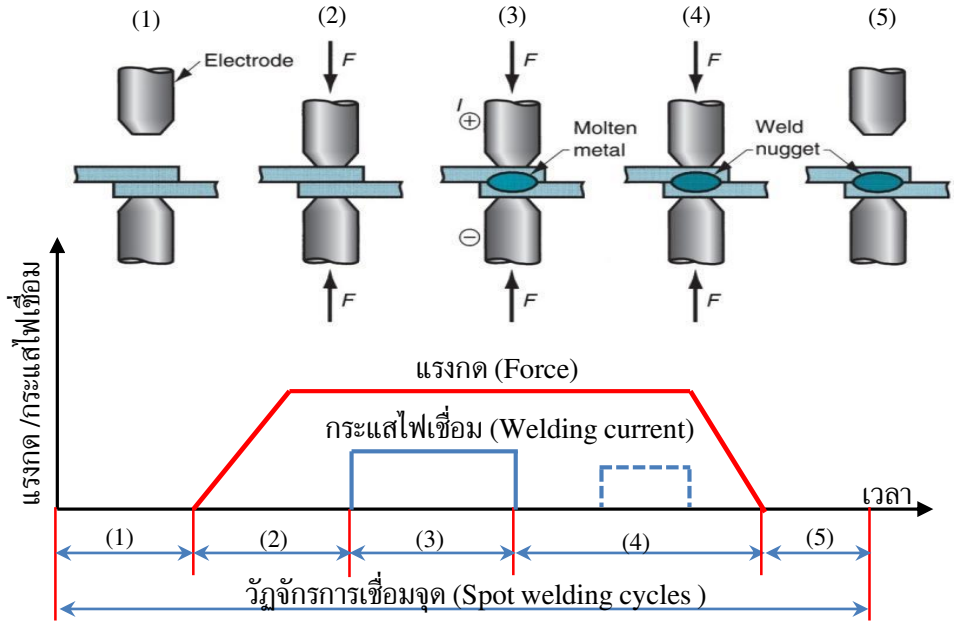


รูปที่ 4.33 กลไกระบบของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding)

ที่มา : MOHAMAD AQEEL AL−JADER, Thesis of the Degree of Doctor of Philosophy, 2014

วัฏจักรของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding cycles)

การเชื่อมความต้านทานแบบจุดถึงแม้จะใช้เวลาในการเชื่อมที่สั้นต่อจุดที่เชื่อมก็ตาม ในช่วงเวลาของการเชื่อมเริ่มต้นและเชื่อมเสร็จสิ้นก็มีลำดับ (Step) ของการเชื่อมที่ต้องเกี่ยวข้องกับกระแสไฟเชื่อม (Welding current) แรงกดเชื่อม (Welding force) และเวลาของการเชื่อม (Welding time) ดังแสดงในรูปที่ 4.34 พร้อมคำอธิบายของแต่ละลำดับขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 4.34 วัฏจักรของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Spot welding cycles)

ที่มา : MOHAMAD AQEEL AL-JADER, Thesis of the Degree of Doctor of Philosophy, 2014

ลำดับที่ (1) เตรียมโลหะแผ่นชิ้นงานเชื่อมวางเกย โดยกำหนดตำแหน่งที่จะเชื่อมวางให้ตรงกับปลายของแท่งขั้วอิเลคโทรด ขั้นตอนนี้ไม่มีกระแสไฟเชื่อมและไม่มีแรงกดมีแต่เวลาที่ต้องดำเนินการ

ลำดับที่ (2) เลื่อนแท่งขั้วอิเลคโทรดเข้ามาให้สัมผัสกับผิวของโลหะงานโดยใช้แรงกดที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นกดจนผิวสัมผัสทุกส่วนแนบสนิทกัน ขั้นตอนนี้ยังไม่มีกระแสไฟเชื่อม ใช้เวลาเพิ่มขึ้น ช่วงเวลานี้เรียกว่าช่วงเวลาบังคับ (Squeezing time)

ลำดับที่ (3) แรงกดสูงสุด ขณะเดียวกันก็ปล่อยกระแสไฟเชื่อมสูงสุด ผิวชิ้นงานหลอมละลายกดแช่ไว้จนเวลาผ่านไประบบไฟฟ้าจะตัด แต่แรงกดยังคงอยู่เพื่อกดแช่ให้บ่อหลอมละลายติดกันแนบแน่น ใช้เวลาเพิ่มขึ้น ช่วงเวลานี้เรียกว่า ช่วงเวลาเชื่อม (Welding time)

ลำดับที่ (4) แรงกดยังคงสูงสุดเพื่อกดให้แนวเชื่อมติดกัน โดยอาจตั้งระบบปล่อยกระแสไฟเชื่อมอีกครั้งกรณีต้องการส่วนที่หลอมละลายเพิ่ม ใช้เวลาเพิ่มขึ้น ช่วงเวลานี้เรียกว่า ช่วงเวลายึด (Holding time)

ลำดับที่ (5) ขั้นตอนสุดท้ายเมื่อส่วนหลอมละลายเย็นตัวติดกัน ปล่อยแรงกด เคลื่อนแท่งอิเลคโทรดออก เสร็จสิ้นวัฏจักรขบวนการเชื่อม ใช้เวลาเพิ่มขึ้น ช่วงเวลานี้เรียกว่า ช่วงเวลาหยุด (Off time)

ความร้อนของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding)

ปริมาณของความร้อนที่ต้องการเพื่อสร้างบ่อหลอมละลายจะอาศัยหลักการของความต้านทานกระแสไฟฟ้า โดยความร้อนที่ได้เกิดขึ้นจากปัจจัยสำคัญ 3 ประการ ดังนี้

1. ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานโลหะ ซึ่งก็คือค่า “ I ” โดยคิดเป็นค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density) ต่อพื้นที่หน้าตัดของแท่งขั้วอิเลคโทรด กรณีที่ป้อนปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่มากจะส่งผลให้เกิดปริมาณความร้อนที่สูงขึ้น ซึ่งทำให้ใช้เวลาในการเชื่อมลดลงและสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของแท่งขั้วอิเลคโทรด อย่างไรก็ตาม การที่จะเลือกหรือปรับปริมาณของกระแสไฟฟ้าต้องคำนึงถึงกำลังความสามารถหรือประสิทธิภาพของเครื่องเชื่อมเป็นสำคัญ

กระแสไฟเชื่อมที่ใช้สำหรับการเชื่อม มี 2 แบบ คือ

- กระแสไฟเชื่อมแบบกระแสเชื่อมคงที่ (Content current) เป็นกระแสเชื่อมที่เลือกใช้กับการเชื่อมโลหะงานที่ไม่ต้องเตรียมหรือปรับสภาพผิวชิ้นงานให้ดีมากก็สามารถทำการเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นที่นิยมใช้กับการเชื่อมโลหะที่ไม่มีการเคลือบผิว (Non–coating metal)
- กระแสไฟเชื่อมแบบกระแสเชื่อมพัลส์ (Pulse current) เป็นกระแสไฟเชื่อมที่ป้อนเข้ามาเป็นจังหวะ (Square wave) สูงและต่ำ เป็นกระแสไฟที่เหมาะกับการเชื่อมโลหะที่ผ่านการเคลือบผิว (Coating metal) เช่น โลหะแผ่นเคลือบสังกะสี เคลือบดีบุก หรือเคลือบสีป้องกันสนิม เป็นต้น

2. ปริมาณค่าความต้านทาน ซึ่งก็คือค่า “ R ” โดยเป็นค่าที่ต้านทานกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามามากแต่ไหลผ่านออกไปได้น้อย ยิ่งต้านทานมากก็ยิ่งส่งผลให้เกิดความร้อนมากขึ้น ดังนั้น ค่าความต้านทานจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดปริมาณความร้อนของการเชื่อมแบบความต้านทาน

3. เวลาที่ป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่โลหะชิ้นงาน ซึ่งก็คือค่า “ t ” เป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณความร้อนที่จะเกิดขึ้น กรณีถ้าเวลาป้อนกระแสไฟฟ้านานขึ้นความร้อนที่เกิดจากการต้านกระแสไฟฟ้าจะสูงขึ้นตามในทางตรงกันข้ามถ้าใช้เวลาป้อนกระแสไฟฟ้าน้อยค่าความร้อนที่ได้จะลดลงตาม

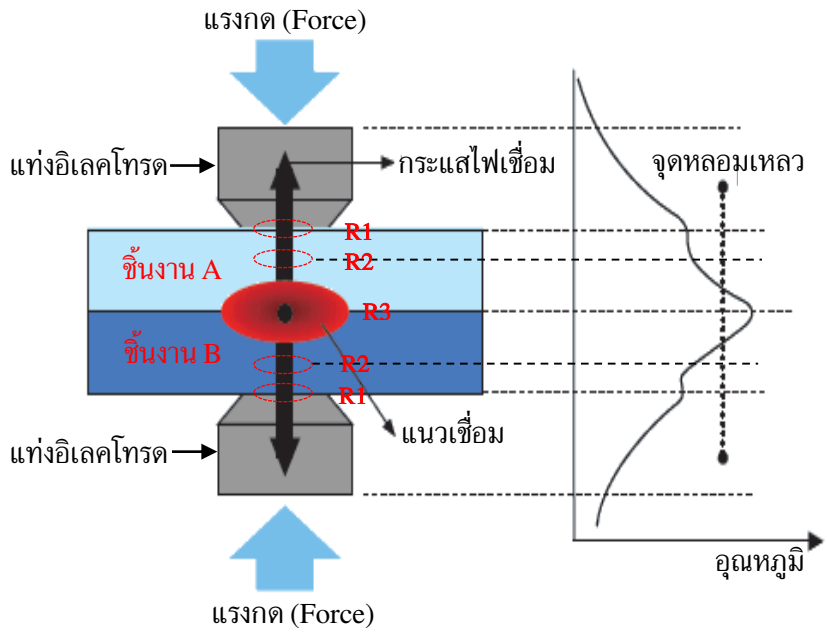
จากปัจจัยสำคัญทั้ง 3 ประการข้างต้นสามารถเขียนเป็นสมการที่มาของความร้อนที่จะใช้ในการเชื่อมแบบความต้านทานนี้ว่า

$$H = I^2 \times R \times t$$

เมื่อ H = ค่าความร้อนสำหรับการหลอมละลาย (Heat in put)
I = ปริมาณกระแสไฟเชื่อม (Alternating current : AC)
t = เวลาที่ใช้ในการป้อนกระแสไฟเชื่อม (Time)

ความสัมพันธ์ของความต้านทานกับความร้อนของการเชื่อมแบบจุด

ความต้านทานที่เกิดขึ้นในขบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด จะเกิดความต้านทานขึ้นในตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.35 ได้แก่ ตำแหน่งระหว่างแท่งขั้วอิเลคโทรดและโลหะชิ้นงาน (R1) ความต้านทานที่เกิดขึ้นในเนื้อของโลหะชิ้นงาน (R2) และความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวโลหะชิ้นงานของทั้งสองชิ้น (R3) ซึ่งแต่ละตำแหน่งมีระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยที่ตำแหน่ง (R3) มีอุณหภูมิสูงที่สุดนั่นคือจุดหลอมเหลวและจะลดลงเรื่อย ๆ ตามลำดับที่ตำแหน่ง (R2) และ (R1)



รูปที่ 4.35 ตำแหน่งค่าความต้านทานของขบวนการเชื่อมจุดและอุณหภูมิของการเชื่อม

ที่มา : WSI, Weld Systems Integrators, Inc. Resistance Welding Products, 2019

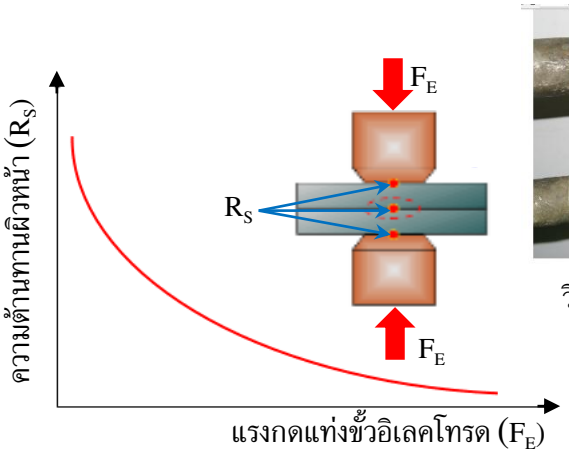
***R1** หมายถึง* ความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างแท่งขั้วอิเลคโทรดและชิ้นงาน ซึ่งค่าความต้านทานสามารถลดให้น้อยลงได้ โดยการปรับผิวหน้าสัมผัสของปลายแท่งขั้วอิเลคโทรดให้เรียบและสะอาด รวมถึงขนาดและชนิดของแท่งขั้วอิเลคโทรด นอกจากนี้ยังรวมถึงปริมาณแรงกดของแท่งอิเลคโทรดด้วย

***R2** หมายถึง* ความต้านทานที่เกิดขึ้นในเนื้อของโลหะชิ้นงาน ค่าความต้านทานที่เกิดตำแหน่งนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดและความหนาของโลหะชิ้นงาน

***R3** หมายถึง* ความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวโลหะชิ้นงานของทั้งสองชิ้น

ดังนั้น โดยสรุปหลักของการเกิดความต้านทานในขบวนการเชื่อมแบบจุดสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ ค่าความต้านทาน $R_1 > R_2 < R_3$ แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความต้านทานนี้ยังขึ้นอยู่กับสภาพผิวของแท่งขั้วอิเลคโทรดและผิวชิ้นงาน ซึ่งเรียกว่าค่าความต้านทานที่ผิว (Surface resistance) โดยค่าความต้านทานที่ผิวดังกล่าวมีความสัมพันธ์กันกับปริมาณแรงกดของแท่งขั้วอิเลคโทรด ที่วัดได้

จากเครื่องมือเกจวัดแรงกดอิเลคโทรด (Electrode force gauge) ดังแสดงในรูปที่ 4.36 เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์เห็นได้ชัดเจนว่า กรณีที่แรงกดจากแท่งขั้วอิเลคโทรดน้อย ค่าความต้านทานที่ผิว (R_S) ไม่ว่าจะเป็นผิวระหว่างแท่งขั้วอิลคโทรดกับชิ้นงาน หรือชิ้นงานกับชิ้นงานจะมีค่าความต้านทานที่สูง และมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อแรงกดของแท่งขั้วอิเลคโทรดเพิ่มสูงขึ้น เหตุผลเพราะพื้นที่ผิวสัมผัส (Surface contact) แนบสนิทมากขึ้นกระแสไหลผ่านไปได้มากขึ้นความต้านจึงลดลง





วิธีวัดแรงกดแท่งขั้วอิเลคโทรด

รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ค่าความต้านทานที่ผิวกับแรงกดของแท่งขั้วอิเลคโทรด

ที่มา : SIAM PART PRODUCTS, Spot Welding Level 2 for Technicians, 2014

ความสัมพันธ์ของขนาดแนวเชื่อม กระแสไฟเชื่อม และเวลาเชื่อม ของขบวนการเชื่อมแบบจุด

M. Pouranvari (2011) ได้อธิบายถึงขนาดของแนวเชื่อมที่ได้หลังจากการเชื่อมเป็นเป้าหมายอันสำคัญยิ่งของทุกขบวนการเชื่อม โดยปกติแนวเชื่อมจากขบวนการเชื่อมอื่น ๆ จะควบคุมขนาดของแนวเชื่อมในเรื่องด้านต่าง ๆ เช่น ควบคุมสัดส่วนความกว้างต่อความลึกของแนวเชื่อม (Depth/Width) ควบคุมความนูนของแนวซึมลึก (Root penetration) หรือขนาดความกว้างของแนวเชื่อมมุม (Leg size of fillet weld) เป็นต้น แต่สำหรับการเชื่อมความต้านทานแบบจุดจะวัดขนาดของแนวเชื่อมด้วยขนาด Ø ของรอยเชื่อม ด้วยเพราะแนวเชื่อมเป็นจุดวงกลมตามรูปทรงของแท่งขั้วอิเลคโทรดที่ใช้เชื่อม ซึ่งขนาดของวงกลมแนวเชื่อม (Nugget diameter) จะขึ้นอยู่กับกระแสไฟเชื่อม (Welding current) เวลาในการเชื่อม (Welding Time) ดังแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.37 ซึ่งจากรูปเห็นได้ว่าขนาดของ Ø ของวงรอยเชื่อมที่ยอมรับได้ต้องเลือกขนาดของกระแสไฟและเวลาที่ใช้เชื่อมอย่างเหมาะสม ถ้าไม่เหมาะสมอาจได้แนวเชื่อมที่มี Ø ของรอยเชื่อมที่เล็กเกินไปหรืออาจใหญ่เกินไปที่ซึ่งเกินเกณฑ์ที่จะยอมรับได้

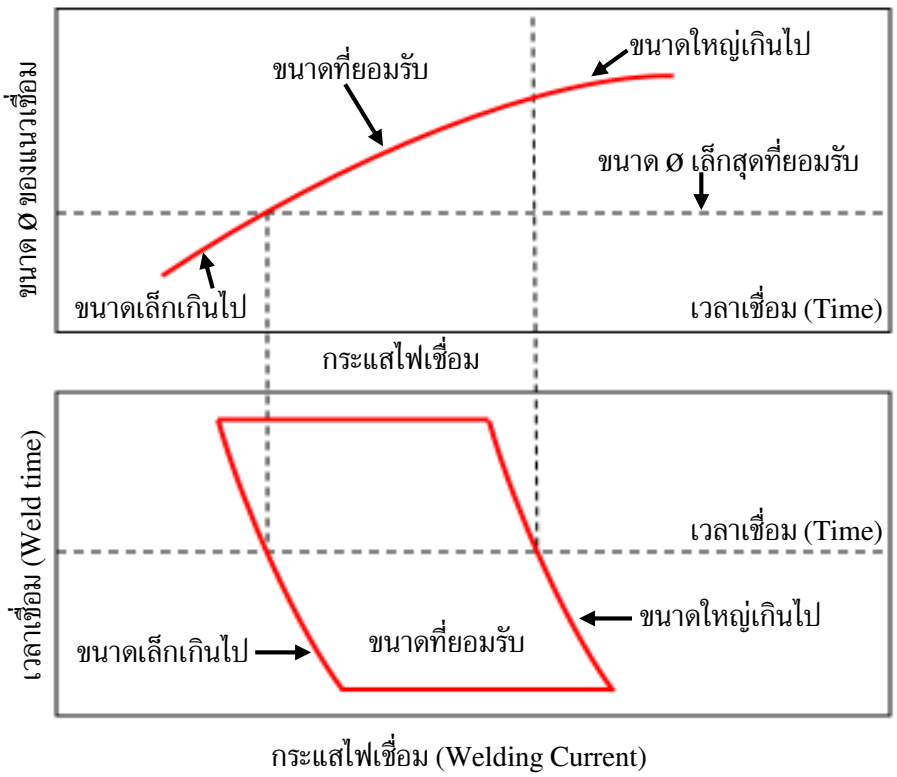
นอกจากนี้ได้มีงานวิจัยที่ได้ศึกษารวบรวมมา พบว่า ยังมีปัจจัยอีกหลายเรื่องของการสมดุลความร้อนขณะทำการเชื่อม (Heat balance) โดยมีรูปแบบของการสมดุลความร้อนอยู่ 2 แบบ คือ

1. แบบสมดุลความร้อนอัตโนมัติ (Automatic heat balance) จะเกิดขึ้นกับเงื่อนไขของการเชื่อมในกรณีทำการเชื่อมโลหะงานชนิดเดียวกัน มีความหนาเท่ากัน และมีชนิด ขนาด และรูปร่างของแท่งขั้ว

อิเลคโทรดที่เหมือนกัน ซึ่งเงื่อนไขที่เชื่อมเหมือนกันดังกล่าวจะทำให้พฤติกรรมการกระจายตัวของความร้อนไปในทิศทางต่าง ๆ ที่สมดุล ดังแสดงในรูปที่ 4.38

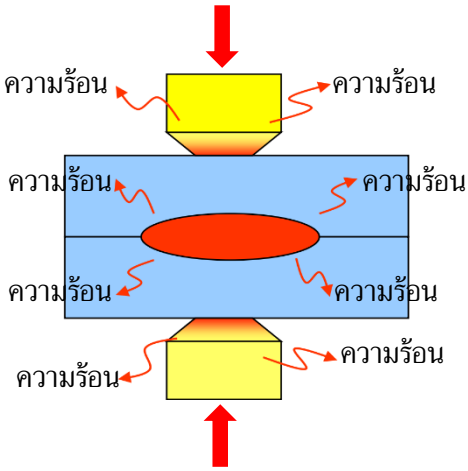
2. แบบสมดุลความร้อนไม่อัตโนมัติ (Non–automatic heat balance) จะเกิดขึ้นกับเงื่อนไขการเชื่อมในกรณีทำการเชื่อมโลหะงานต่างชนิดกัน โลหะชนิดเดียวกันแต่ความหนาต่างกัน และมีชนิด ขนาด และรูปร่างของแท่งขั้วอิเลคโทรดที่แตกต่างกัน ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นมีพฤติกรรมการกระจายตัวแบบไม่สมดุลทุกทิศทาง เหตุผลเพราะความแตกต่างของเงื่อนไขดังที่กล่าวซึ่งมีสมบัติด้านความต้านทานกระแสไฟฟ้าไม่เท่ากันส่งผลให้เกิดความร้อนในปริมาณต่างกัน วิธีการแก้ไขสามารถทำได้ดังนี้

- กรณีเชื่อมโลหะชิ้นงานต่างชนิดกัน แก้ไขโดยการลดความร้อนในโลหะที่มีสมบัติด้านทานกระแสไฟสูง ด้วยวิธีการลดความหนาแน่นของกระแสต่อพื้นที่ลง (A/mm^2) ซึ่งหมายถึงการเพิ่มขนาดของแท่งขั้วอิเลคโทรด
- กรณีเชื่อมโลหะชิ้นงานหนาต่างกัน แก้ไขโดยการลดความหนากับโลหะชิ้นงานที่มีค่าความต้านทานกระแสสูง เป็นการลดความร้อนลง
- กรณีการเชื่อมด้วยแท่งขั้วอิเลคโทรดต่างชนิด ต่างขนาด และต่างรูปร่าง แก้ไขโดยการเพิ่มค่าความร้อนบนโลหะที่มีความต้านทานกระแสต่ำ ด้วยวิธีเลือกใช้แท่งขั้วอิเลคโทรดที่มีความต้านทานสูง



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟเชื่อม เวลาเชื่อมที่มีผลต่อขนาดของแนวเชื่อม

ที่มา : SIAM PART PRODUCTS, Spot Welding Level 2 for Technicians, 2014



รูปที่ 4.38 การกระจายตัวสมดุลของความร้อนของการเชื่อมแบบจุด
ที่มา : SIAM PART PRODUCTS, Spot Welding Level 2 for Technicians, 2014

เครื่องมือและอุปกรณ์การเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Welding equipment)

เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเชื่อมที่อาศัยความต้านทานแบบจุดนี้ มีส่วนประกอบน้อยชิ้น เพราะเป็นขบวนการเชื่อมที่ไม่ยุ่งยากหรือสลับซับซ้อนไม่ต้องใช้ลวดเชื่อม ไม่ต้องใช้แก๊สปกคลุมและบ่อหลอมละลายค่อนข้างเล็กบนแผ่นโลหะบาง เครื่องมือที่สำคัญและจำเป็นที่สุด คือ เครื่องเชื่อมแบบความต้านทาน (Welding resistance machine) โดยปกติเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบจุดนี้มี 2 แบบให้เลือกใช้ ดังแสดงในรูปที่ 4.39 คือ

1. เครื่องเชื่อมที่ใช้สำหรับเชื่อมด้วยคน (Spot welder) เป็นเครื่องเชื่อมที่ใช้สำหรับการเชื่อมในลักษณะงานทั่วไป ซึ่งสามารถพบเห็นได้ 2 แบบ คือ

- เครื่องเชื่อมแบบพกพา (Portable spot welding machine) เป็นเครื่องเชื่อมที่มีขนาดเล็ก มีขนาดพอเหมาะกับการพกพาไปได้ในที่ต่าง ๆ จับถือได้ด้วยคนเชื่อม ออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับงานภาคสนามที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายงานไปเชื่อมในโรงงานได้ หรือมีตำหน่งที่ต้องการเชื่อมปริมาณน้อยตำแหน่ง เช่นงานซ่อมบำรุงต่าง ๆ รวมไปถึงการเชื่อมงานเฉพาะที่เข้าไปเชื่อมยาก เป็นต้น ลักษณะของเครื่องเชื่อมแบบพกพามีทั้งแบบ C– Type และ X– Type ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.39 (ก) และ (ข) ตามลำดับ
- เครื่องเชื่อมแบบติดตั้งประจำตำแหน่ง (Stationary spot welding machine) เป็นเครื่องเชื่อมที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ติดตั้งประจำอยู่ในตำแหน่งงานเชื่อมในโรงงานอุตสาหกรรม กำลังการเชื่อมจะสูงมากสามารถเชื่อมงานได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ออกแบบมาเพื่อรองรับกับการเชื่อมงานในโรงงานผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ โดยเฉพาะชิ้นส่วนยานยนต์ ดังแสดงตัวอย่างของเครื่องในรูปที่ 4.39 (ค)

2. เครื่องเชื่อมที่ใช้สำหรับเชื่อมด้วยหุ่นยนต์ (Robot spot welding machine) เป็นเครื่องเชื่อมที่ออกแบบมาเพื่อใช้กับการเชื่อมด้วยระบบที่สั่งการผ่านหุ่นยนต์หรือแขนกล (Welding robot arm) แทนคนเชื่อม ซึ่งเป็นระบบการเชื่อมแบบอัตโนมัติเชื่อมงานได้ดี รวดเร็ว มีประสิทธิภาพสูง มีความแม่นยำสูง

เชื่อมงานได้ติดต่อกันเป็นเวลานาน ๆ เหมาะกับระบบการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ดังแสดงตัวอย่างของเครื่องเชื่อมแบบ C– Type และ แบบ X– Type ในรูปที่ 4.39 (ง) และ (จ) ตามลำดับ



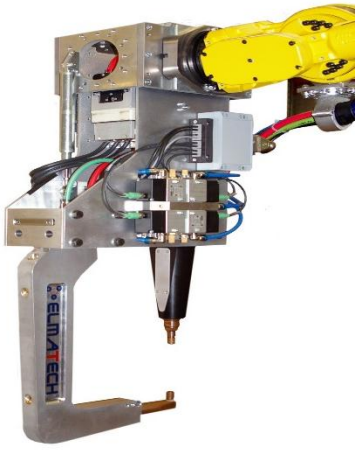
(ก) เครื่องเชื่อมจุดแบบพกพา (C–Type)



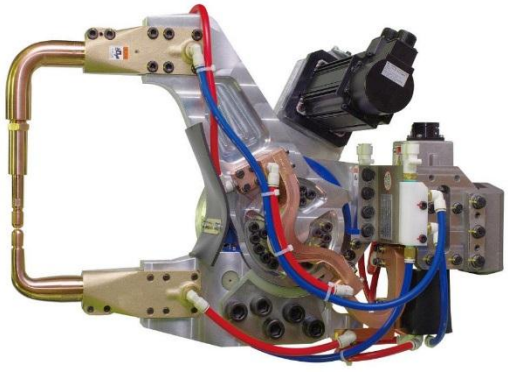
(ข) เครื่องเชื่อมจุดแบบพกพา (X–Type)



(ค) เครื่องเชื่อมจุดแบบติดตั้งประจำตำแหน่ง



(ง) เครื่องเชื่อมจุดแบบหุ่นยนต์ (C–Type)



(จ) เครื่องเชื่อมจุดแบบหุ่นยนต์ (X–Type)

รูปที่ 4.39 ชนิดเครื่องเชื่อมความต้านทาน แบบการเชื่อมจุด (Spot welding machine)

ที่มา : Dengensha Europe, Spot welding machine, 2016

แท่งขั้วอิเลคโทรด (Electrode)

แท่งขั้วอิเลคโทรดสำหรับขบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดถือว่ามีความสำคัญยิ่ง เพราะจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงลักษณะของแนวเชื่อมที่ได้จากหลังการเชื่อมเสร็จสิ้น โดยส่วนใหญ่ทำมาจากวัสดุโลหะทองแดงผสม (Copper alloy) ด้วยเหตุเพราะทองแดงมีคุณสมบัติที่เป็นตัวนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี ส่วนธาตุที่ผสมเข้าไป (Alloying) จุดประสงค์เพื่อเพิ่มเติมคุณสมบัติทางกลบางประการ เช่น เพิ่มความแข็งแรง (Strength) เพิ่มความคงทนต่อแรงกด (Compressive strength) แรงกระแทก (Impact strength) และเพิ่มความสามารถทนการสึกหรอที่ปลายของแท่งอิเลคโทรด (Ware resistance) เป็นต้น คุณสมบัติทางกลเหล่านี้ต้องดีเยี่ยมสำหรับภาระหน้าที่ของแท่งขั้วอิเลคโทรด โดยหน้าที่หลักของแท่งขั้วอิเลคโทรดพอสรุปได้ดังต่อไปนี้

- ต้องทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าที่ดี ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลอย่างคงที่และสม่ำเสมอ (Uniform current density)
- ต้องทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟเชื่อมให้ไหลผ่านจุดหรือตำแหน่งที่ต้องการเชื่อมอย่างแม่นยำ (Concentrating current at weld)
- ต้องทำหน้าที่เป็นตัวนำและเป็นตัวตัวระบายความร้อนจากชิ้นงานโลหะได้ดี (Good thermal conductivity)

ชนิดของแท่งขั้วอิเลคโทรด (Type of electrode)

วัสดุที่ใช้ทำแท่งขั้วอิเลคโทรดจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณสมบัติว่าเหมาะสมกับการเชื่อมโลหะชนิดใด โดย Resistance Welding Machine & Accessory (2019) หรือที่รู้จักกันในนามของ สมาคม RWMA ภายใต้สมาคมการเชื่อมแห่งสหรัฐอเมริกา (AWS) ที่ได้ทำการแบ่งกลุ่มชนิดของแท่งขั้วอิเลคโทรดตามองค์ประกอบของวัสดุที่ผสมเข้าไป ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

1. แท่งขั้วอิเลคโทรด กลุ่ม A เป็นกลุ่มที่ผลิตจากโลหะทองแดงที่ผสมธาตุต่าง ๆ เพิ่มเข้าไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของแท่งขั้วอิเลคโทรด โดย RWMA ได้แบ่งเป็นระดับ (Class) ต่าง ๆ ซึ่งค่าระดับที่สูงขึ้นหมายถึง แท่งอิเลคโทรดมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่ตรงกันข้ามในคุณสมบัติของการนำกระแสไฟฟ้าและการนำความร้อนกลับลดลง ด้วยเหตุเพราะในแท่งขั้วอิเลคโทรดมีปริมาณของธาตุที่ผสมอยู่ภายในมากระดับของแท่งขั้วอิเลคโทรดที่แยกโดย RWMA มีรายละเอียดของแต่ละระดับ ดังต่อไปนี้

- แท่งขั้วอิเลคโทรดระดับ RWMA Class I ผลิตจากวัสดุโลหะทองแดง–เซอร์โคเนียมผสม (Copper–Zirconium alloy) หรือมาตรฐาน ASTM คือ C15000 เหมาะสำหรับใช้ในการเชื่อมโลหะจำพวกอลูมิเนียมผสม แมกนีเซียมผสม ทองเหลือง และบรอนซ์ เป็นต้น
- แท่งขั้วอิเลคโทรดระดับ RWMA Class II ผลิตจากวัสดุโลหะทองแดง–เซอร์โคเนียม–โครเมียมผสม (Copper–Zirconium–Chromium alloy) หรือมาตรฐาน ASTM คือ C18150 เป็นแท่งอิเลคโทรดที่มีความแข็งแรงสูงกว่า Class I แต่มีคุณสมบัติในการนำกระแสไฟฟ้าลดลง เหมาะสำหรับ

การเชื่อมโลหะแผ่นเหล็กกล้าทั้งแบบรีดร้อนและรีดเย็นและโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม รวมถึงโลหะแผ่นเคลือบสังกะสี เป็นต้น

- แท่งขั้วอิเลคโทรดระดับ RWMA Class III ผลิตจากวัสดุโลหะทองแดง–โคบอลต์–เบอริลเลียมผสม (Copper–Cobalt–Beryllium alloy) หรือมาตรฐาน ASTM คือ C17500 เป็นแท่งขั้วอิเลคโทรดที่มีความแข็งแรงสูงมาก เหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมหรือโลหะแผ่นนิโครมและโมเนล เป็นต้น
- แท่งขั้วอิเลคโทรดระดับ RWMA Class IV ผลิตจากวัสดุโลหะทองแดง–เบอริลเลียมผสม (Copper– Beryllium alloy) หรือมาตรฐาน ASTM คือ C17200 เป็นแท่งขั้วอิเลคโทรดที่มีคุณสมบัติความแข็งแรงสูงกว่า Class III สามารถรองรับแรงกดมาก ๆ ได้ขณะเชื่อมเหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะที่หนามากขึ้น หรือการเชื่อมต่อชนแบบที่เกิดประกายไฟและการเชื่อมแบบปุ่มยื่น (Projection welding)

2. แท่งขั้วอิเลคโทรด กลุ่ม B เป็นกลุ่มที่ผลิตจากวัสดุโลหะที่ทนความร้อนสูง (High heat resistance) โดยมีจุดประสงค์ต้องการที่จะให้อิเลคโทรดทนการสึกหรอที่อุณหภูมิสูงคู่กับความแข็งแรงสูง แต่คุณสมบัติค่าการนำไฟฟ้าและความร้อนจะลดลง โดย RWMA ได้จัดแบ่งตามคุณสมบัติเป็นระดับ (Class) ซึ่งตัวเลขระดับมากขึ้นค่าการนำไฟฟ้าและความร้อนจะลดลง ดังรายละเอียดของระดับต่าง ๆ ดังนี้

- แท่งขั้วอิเลคโทรดระดับ RWMA Class X ผลิตมาจากวัสดุโลหะทองแดง–ทังสเตนผสม (Copper–Tungsten alloy : 45%–50%) หรือมาตรฐาน ASTM ไม่มีระบุ เป็นแท่งขั้วอิเลคโทรดที่ออกแบบมาใช้สำหรับขบวนการเชื่อมความต้านทาน แบบการเชื่อมวาบ (Flash welding : FW) และแบบการเชื่อมปุ่มยื่น (Projection welding) โดย Class X นี้มีสมบัติที่นำกระแสไฟฟ้าและความร้อนได้ค่อนข้างดี
- แท่งขั้วอิเลคโทรดระดับ RWMA Class XI ผลิตมาจากวัสดุโลหะทองแดง–ทังสเตนผสม (Copper–Tungsten alloy : 25%–75%) หรือมาตรฐาน ASTM คือ B702C1D อิเลคโทรดระดับหรือคลาสนี้มีความแข็ง (Hardness) ที่สูงมากกว่า Class X และสามารถเชื่อมงานที่หนากว่า เพราะแท่งอิเลคโทรดเพิ่มความสามารถในการรับแรงกดขณะเชื่อมได้มากขึ้น
- แท่งขั้วอิเลคโทรดระดับ RWMA Class XII ผลิตมาจากวัสดุโลหะทองแดง–ทังสเตนผสม (Copper–Tungsten alloy : 20%–80%) หรือมาตรฐาน ASTM คือ B702C1E เป็นแท่งอิเลคโทรดที่แข็งที่สุดในกลุ่มของทองแดง–ทังสเตนผสม ด้วยเพราะมีความแข็งสูงมาก รับแรงกดได้มาก มีอัตราการสึกหรอที่อุณหภูมิสูงต่ำ จึงเหมาะสมและนิยมใช้กับการเชื่อมความต้านทานแบบปุ่มยื่น (Projection welding)
- แท่งขั้วอิเลคโทรดระดับ RWMA Class XIII ผลิตมาจากวัสดุโลหะทังสเตน (Tungsten 100%) หรือมาตรฐาน ASTM ไม่มีระบุ เป็นแท่งอิเลคโทรดที่มีความแข็งสูงมากมีความเหนียวต่ำ นิยม

นำมาใช้กับการเชื่อมเส้นลวดตามแนวขวาง (Cross-wire welding) ของวัสดุจำพวกโลหะทองแดงและทองเหลือง

● แท่งขั้วอิเลคโทรดระดับ RWMA Class XIV เป็นแท่งขั้วอิเลคโทรดที่ผลิตมาจากวัสดุโลหะโมลิบดินัม (Molybdenum 100%) หรือมาตรฐาน ASTM คือ B387 Type 360 เป็นแท่งอิเลคโทรดที่มีความแข็งน้อยกว่า Class XIII สามารถใช้กับงานเชื่อมเส้นลวดตามแนวขวาง (Cross-wire welding) ได้เช่นเดียวกัน โดยราคาค่อนข้างถูกกว่าและมีความเหนียวมากกว่า ช่วยลดปัญหาการแตกร้าวของแท่งอิเลคโทรด

3. แท่งขั้วอิเลคโทรด กลุ่ม C เป็นกลุ่มที่ผลิตจากวัสดุพิเศษ (Specialty materials) โดยมีจุดประสงค์ต้องการจะนำแท่งอิเลคโทรดไปใช้เชื่อมโลหะที่มีสภาพผิวเคลือบต่าง ๆ โดย RWMA ได้กำหนดไว้ดังนี้

● แท่งขั้วอิเลคโทรดระดับ RWMA Class XX หรือมาตรฐาน ASTM คือ C15760 ผลิตมาจากวัสดุโลหะทองแดง-อลูมิเนียม (Copper-Aluminum alloy) ที่ผ่านขบวนการเพิ่มความแข็งแรงด้วยเทคนิควิธีการ Dispersion strengthened กล่าวคือ การใช้อลูมิเนียมออกไซด์กระจายตัวในโลหะหลักทองแดง ด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปแบบโลหะซินเตอร์ (Power metallurgy) โดยแท่งขั้วอิเลคโทรดจะมีโครงสร้างภายในที่ความหนาแน่นต่ำ ค่าความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าและการนำความร้อนไม่สูงมากนัก นิยมใช้กับกระแสไฟเชื่อมแบบพัลส์ (Pulse current) ในการเชื่อมโลหะที่ผ่านการเคลือบผิว (Galvanized steel) เป็นต้น

ลักษณะรูปร่างของแท่งขั้วอิเลคโทรด (Shape of electrode)

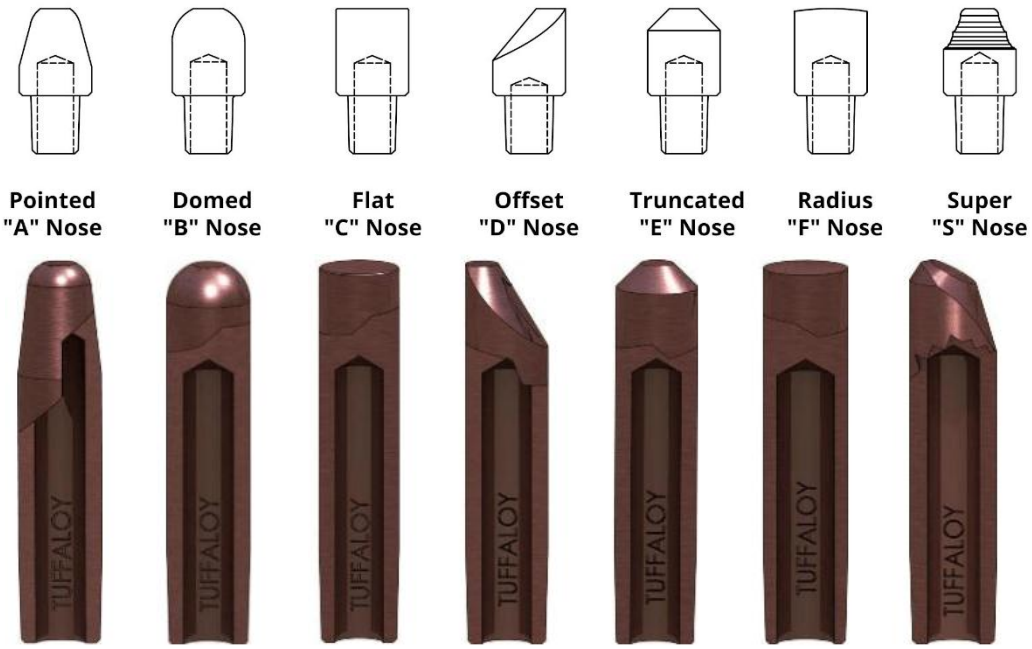
แท่งขั้วอิเลคโทรดถึงแม้จะมีหลากหลายชนิดตามความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน แต่เมื่อพิจารณาถึงลักษณะรูปทรงหรือองค์ประกอบของแท่งขั้วอิเลคโทรดจะพบว่ามีเพียง 2 ลักษณะเท่านั้น คือ

1. ลักษณะรูปร่างที่เป็นแบบแท่งชิ้นเดียว (Massive) เป็นอิเลคโทรดที่ใช้กันมาแต่ต้นของการขบวนการเชื่อมจุด โดยเป็นเนื้อเดียวกันทั้งแท่งที่รวมทั้งด้ามและปลายของแท่งอิเลคโทรด เมื่อใช้งานไปนาน ๆ ปลายของแท่งอิเลคโทรดจะสึกหรอจนไม่สามารถใช้งานได้อีกต้องทิ้งทั้งแท่ง ซึ่งเป็นการสูญเสียเนื้อโลหะบริเวณด้ามที่เหลืออยู่มากอย่างน่าเสียดาย ซึ่งผู้ผลิตได้ออกแบบปลายของแท่งขั้วอิเลคโทรดที่หลากหลายรูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.40

2. ลักษณะรูปร่างที่เป็นแบบแท่งประกอบ (Shank and Cap) เป็นอิเลคโทรดที่พัฒนาปรับปรุงเพื่อลดการสิ้นเปลืองด้ามอิเลคโทรด โดยการออกแบบด้าม (Shank) ที่สามารถนำส่วนปลาย (Cap) ของแท่งอิเลคโทรดหรือที่เรียกกันว่า “หมวก” มาสวมได้เมื่อผ่านการใช้งานไปนาน ๆ หากปลายของแท่งอิเลคโทรดเกิดการสึกหรอก็สามารถถอดเปลี่ยนเฉพาะส่วนปลายเท่านั้น ซึ่งผู้ผลิตก็ได้ออกแบบปลายสำหรับสวมที่หลายหลายรูปทรงตามลักษณะการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.41 การติดตั้งหรือสวมของปลายแท่งอิเลคโทรดได้ออกแบบไว้ 2 วิธี คือ วิธีการสวมอัดและวิธีการขันเกลียว



รูปที่ 4.40 มาตรฐานของแท่งอิเลคโทรดแบบแท่งชิ้นเดียว (Massive)
ที่มา : WSI, Weld Systems Integrators, Inc. Resistance Welding Products 2019



รูปที่ 4.41 มาตรฐานของแท่งอิเลคโทรดแบบแท่งประกอบ (Shank and Cap)
ที่มา : WSI, Weld Systems Integrators, Inc. Resistance Welding Products 2019

ข้อควรพิจารณาของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Considered of spot welding)

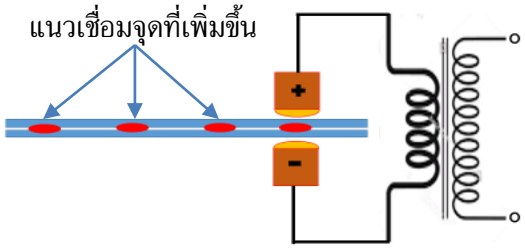
การเชื่อมความต้านทานแบบจุดถึงแม้จะมีขบวนการที่ไม่ซับซ้อนมากนัก แต่ก็มีสิ่งที่ช่างเชื่อมควรระวังหรือต้องพิจารณาซึ่งเป็นคำแนะนำจากผู้ผลิต Miller Electric– Guideline (2018) ได้แก่

1. การที่กระแสไฟฟ้าไม่ไหลผ่านจุดเชื่อม (Shunting effect) เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยมากสำหรับการเชื่อมที่อาศัยความร้อนจากการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า (Resistance welding) ซึ่งเมื่อกระแสไหลผ่านจุดตำแหน่งที่ต้องการเชื่อมน้อย จะทำให้ค่าความต้านทานต่ำลง ส่งผลต่อปริมาณ

ความร้อนที่เกิดน้อยเนื้อโลหะหลอมละลายน้อย แนวเชื่อมที่ได้จะมีขนาดเล็กหรืออาจถึงขั้นเชื่อมไม่ติด จากการศึกษาค้นคว้าของผู้เขียนพอจะสรุปสาเหตุของการเกิดหลัก ๆ ดังนี้

- เกิดจากการเว้นระยะห่างระหว่างจุดแนวเชื่อมแต่ละจุดไม่มากพอ กล่าวคือ โดยปกติการเชื่อมจุดมักออกแบบจุดเชื่อมที่มากจุด ซึ่งถ้าระยะห่างระหว่างจุดน้อยเกินไป จะทำให้กระแสไฟบางส่วนเกิดการไหลไปยังจุดเชื่อมข้างเคียงที่เชื่อมเสร็จแล้วส่งผลให้ปริมาณกระแสที่ต้องการใช้เชื่อมไม่มากเพียงพอ โดยระยะห่างที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับปัจจัยการเชื่อมอื่นร่วมด้วย ดังแสดงระยะห่างที่เหมาะสม (ระยะA) ในตารางที่ 4.10
- เกิดจากแผ่นโลหะที่ซ้อนเชื่อมมีพื้นที่แนบสนิทติดกันมาก กล่าวคือ การที่แผ่นโลหะที่นำมาเชื่อมเมื่อวางทับซ้อนกัน มีความเรียบและแนบสนิทติดกันเป็นพื้นที่กว้างทำให้กระแสไฟเชื่อมสามารถไหลกระจายไปทั่ว โดยจุดที่ต้องการเชื่อมมีปริมาณกระแสไฟน้อยเกินไปไม่เกิดความหนาแน่นของกระแสที่มากพอที่จะสร้างความต้านทานแล้วเกิดความร้อนขึ้นได้
- กรณีการเชื่อมแบบวิธีทางอ้อม (Indirect spot welding) ปัญหามักเกิดจากที่การจัดเรียงความหนาของแผ่นโลหะไม่ถูกต้องอาจทำให้ได้แนวเชื่อมที่เล็กเกินไป และมีความแข็งแรงต่ำ
- ปัญหาจากการติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดที่มีสายไฟฟ้าต่อหรือสัมผัสกับชิ้นงาน หากอุปกรณ์ดังกล่าวมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมอาจรั่วไหลไปยังเครื่องมือวัด แทนที่จะไหลไปยังจุดที่ต้องการเชื่อม

2. การสูญเสียความต้านทานจากการเหนี่ยวนำ (Induction effect) ในขณะที่ทำการเชื่อมความต้านทานของระบบวงจรไฟฟ้าของเครื่องเชื่อมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งความต้านทานของระบบวงจรไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากความต้านทานของโลหะชิ้นงานที่ทำการเชื่อมนั่นเอง ส่งผลทำให้กระแสไฟฟ้าทุติยภูมิ (Secondary current) ของหม้อแปลงเครื่องเชื่อมลดลง กระแสไฟเชื่อมที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานก็น้อยลง แนวเชื่อมจึงมีขนาดเล็กและเมื่อเชื่อมจำนวนจุดที่เพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานของระบบวงจรไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.42

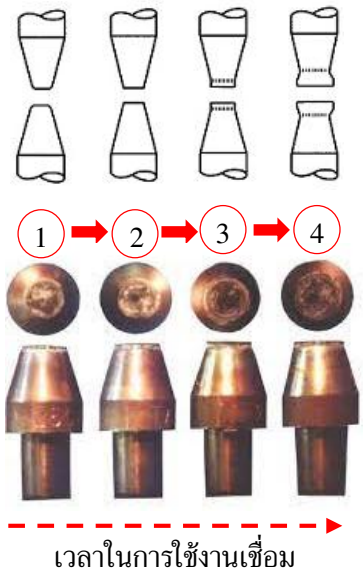


รูปที่ 4.42 ลักษณะของการสูญเสียความต้านทานเมื่อจำนวนจุดเชื่อมที่เพิ่มขึ้น

ที่มา : วิชาญ ช่วยพันธ์ เอกสารประกอบการสอน วิชาเทคโนโลยีงานเชื่อม 2562

3. ความเสียหายของแท่งขั้วอิเลคโทรด (Electrode effected) เป็นการเปลี่ยนแปลงเชิงเสียหายของปลายแท่งขั้วอิเลคโทรดที่เกิดขึ้นหลังจากการนำไปใช้งาน ซึ่งสามารถพบเห็นความเสียหายนี้บ่อย ๆ จึงเป็นเหตุที่ให้ต้องระมัดระวังเพื่อยืดอายุการใช้งานของแท่งขั้วอิเลคโทรด โดยเกิดได้ในลักษณะดังนี้

● เกิดจากแรงกดแท่งขั้วอิเลคโทรดขณะเชื่อม (Force effected) เป็นความเสียหายของแท่งขั้วอิเลคโทรดที่เกิดจากแรงกดเชื่อมจะพบเห็นเสมอและสามารถเกิดได้กับการเชื่อมทุกชนิดของโลหะแผ่นที่นำมาเชื่อม โดยจะเกิดกับเมื่อแท่งอิเลคโทรดได้ผ่านการใช้งานมาเป็นเวลานาน ซึ่งปลายของแท่งอิเลคโทรดจะเสียรูปบานออกเรื่อย ๆ จนทำให้ขนาดของปลายแท่งอิเลคโทรดโตเกินขนาดของจริง ซึ่งปัจจัยที่ส่งเสริมให้เกิดการเสียรูปบานออกได้ง่าย คือ ความร้อนที่เกิดการเชื่อม (Heating welding) และแรงกดขณะเชื่อม (Force welding) ดังแสดงในรูปที่ 4.43 โดย หมายเลข 1 จะเริ่มเสียรูปบานออกและเมื่อใช้งานมากขึ้นอัตราการเสียรูปจะเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ 2⟶ 3⟶ 4 จนไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไปจึงต้องทำการเปลี่ยนแท่งขั้วอิเลคโทรดแท่งใหม่แทน



รูปที่ 4.43 การสึกหรอของแท่งขั้วอิเลคโทรดที่เกิดจากแรงกดขณะเชื่อม

ที่มา : วิชาญ ช่วยพันธ์ เอกสารประกอบการสอน วิชาเทคโนโลยีงานเชื่อม 2562

● เกิดจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของปลายแท่งขั้วอิเลคโทรด (Properties of electrode effected) เป็นความเสียหายที่เกิดจากคุณสมบัติที่ปลายของแท่งขั้วอิเลคโทรดเปลี่ยนไป กล่าวคือ โดยปกติการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ถ้าเชื่อมบนโลหะแผ่นเหล็กที่ไม่มีการเคลือบผิว (Non-coating sheet) แท่งขั้วอิเลคโทรดจะมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าการเชื่อมโลหะแผ่นเหล็กที่เคลือบด้วยโลหะสังกะสี (Galvanized sheet) เหตุผลเพราะความร้อนจากการเชื่อมจะทำโลหะสังกะสีที่เคลือบผิวอยู่ละลายออกมาติดกับปลายแท่งขั้วอิเลคโทรด เมื่อเกาะติดอยู่ในปริมาณที่มากขึ้นความร้อนในการเชื่อมแต่ละครั้งจะทำให้โลหะสังกะสีสามารถแพร่ซึม (Diffusion) เข้ามารวมตัวกับโลหะทองแดงที่ปลายของ

แท่งขั้วอิเลคโทรดได้ ส่งผลทำให้ปลายของแท่งอิเลคโทรดกลายเป็นโลหะทองแดงผสม (Copper + Zinc) ที่เรียกว่า “ทองเหลือง (Brass)” ซึ่งมีคุณสมบัติที่เปราะและสร้างความร้อนได้ลดลง ดังนั้น เมื่อทำการเชื่อมก็จะต้องใช้แรงกดที่มากขึ้นและใช้กระแสที่สูงขึ้นพร้อมกับเวลาในการเชื่อมที่นานมากขึ้น จากผลดังกล่าว ให้เกิดการเสียรูปบานออกของปลายแท่งขั้วอิเลคโทรดที่มีลักษณะรูปร่างคล้ายกับดอกเห็ด จึงเรียกความเสียหายแบบนี้ว่า “ Electrode mushrooming” ดังแสดงในรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.44 สภาพของแท่งขั้วอิเลคโทรดที่ปกติ กับสภาพเสียรูปบานออกคล้ายดอกเห็ด
ที่มา : SWANTEC Software and Engineering Aps, 2018

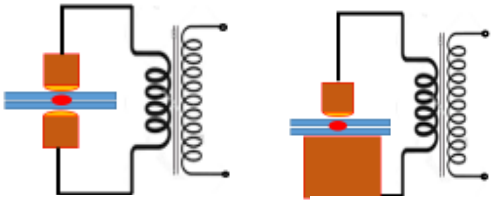
ประเภทของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Type of spot welding)

เทคนิคหรือวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ได้ประยุกต์ออกแบบไว้หลากหลายจากบนพื้นฐานของขีดจำกัดของการเชื่อมซึ่งที่พบเห็นกันบ่อย ๆ พอจะแยกออกได้ดังนี้ โดยอ้างอิงข้อมูลที่เผยแพร่ในเอกสารการปฏิบัติงานของ ENTRON Controls LLC (2014)

1. วิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ชนิดโดยตรง (Direct spot welding) ซึ่งเป็นเทคนิคหรือวิธีการพื้นฐานของการเชื่อมจุดโดยแท่งขั้วอิเลคโทรด 2 แท่งกดแผ่นโลหะชิ้นงานจากด้านตรงข้ามเพื่อให้กระแสไฟเชื่อมไหลผ่านความต้านทานแล้วเกิดความร้อนที่รอยต่อแล้วหลอมละลายติดกันเป็นแนวเชื่อม (Nugget) ดังแสดงในรูปที่ 4.45 (ก)

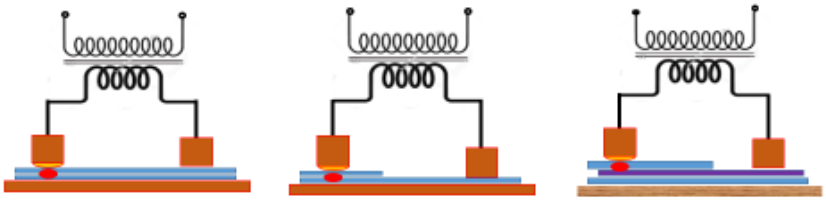
2. วิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ชนิดโดยอ้อม (Indirect spot welding) ซึ่งเป็นเทคนิคหรือวิธีการเชื่อมที่ใช้ในกรณีที่ปลายของแท่งขั้วอิเลคโทรดไม่สามารถวางให้อยู่ในตำแหน่งตรงกันข้ามได้ เช่น กรณีที่ชิ้นงานเชื่อมมีขนาดใหญ่มาก ไม่สามารถนำป้อนเข้ามาในระยะห่างระหว่างขั้วของแท่งอิเลคโทรดได้ จึงได้ออกแบบสร้างแท่งก้อนโลหะทองแดง (Copper bar) เป็นแท่งขั้วอิเลคโทรดขึ้นในตำแหน่งฝั่งตรงข้ามไว้เพื่อรองรับโลหะงานที่จะเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.45 (ข)

3. วิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุดชนิดกดและดึง (Phus–Pull spot welding) เป็นเทคนิคการเชื่อมจุดที่เป็นลักษณะของการเชื่อมอยู่ในรูปแบบชนิดโดยตรง ที่มีแท่งขั้วอิเลคโทรด 2 แท่ง กดลงบนแผ่นชิ้นงานเชื่อมเป็นรูปแบบอนุกรมที่มีการกดและดึง ซึ่งสามารถเชื่อมได้มากกว่าหนึ่งจุดในเวลาเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.45 (ค)



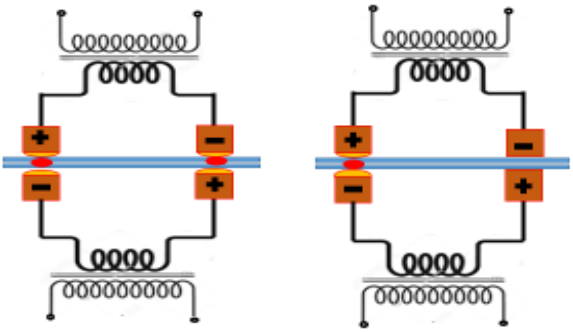
แบบ A แบบ B

(ก) การเชื่อมความต้านทานแบบจุดชนิดโดยตรง (Direct spot welding)



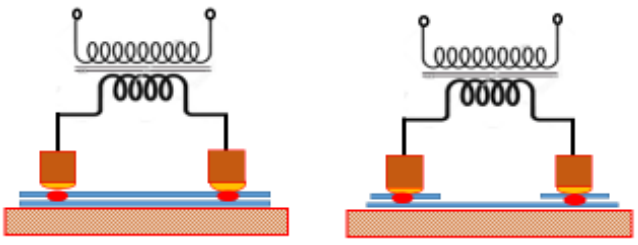
แบบ A แบบ B แบบ C

(ข) การเชื่อมความต้านทานแบบจุดชนิดโดยอ้อม (Indirect spot welding)



แบบ A แบบ B

(ค) การเชื่อมความต้านทานแบบจุดชนิดกดและดึง (Phus–Pull spot welding)



แบบ A แบบ B

(ง) การเชื่อมความต้านทานแบบจุดชนิดอนุกรม (Series spot welding)

รูปที่ 4.45 ประเภทของการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (Type of spot welding)

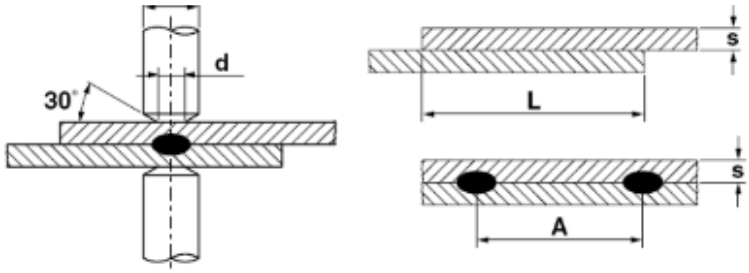
ที่มา : HOW To Resistance Weld, 2012 (เขียนใหม่)

4. วิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุดชนิดอนุกรม (Series spot welding) เป็นเทคนิคการเชื่อมจุดที่เป็นลักษณะของการเชื่อมที่อยู่ในรูปแบบชนิดโดยอ้อมที่มีแท่งขั้วอิเลคโทรด 1 แท่ง (Electrode rod) ทำหน้าที่กดลงบนแผ่นชิ้นงาน และอีกขั้วอิเลคโทรดเป็นแท่งก้อนโลหะทองแดง อีก 1 แท่งก้อน ซึ่งทำหน้าที่รองรับแผ่นชิ้นงานที่จะเชื่อม (Electrode bar) โดยเป็นรูปแบบอนุกรมที่มีตำแหน่งที่จะเชื่อมได้มากกว่าหนึ่งจุดในเวลาเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.45 (ง)

จากเทคนิคหรือวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุดแต่ละชนิดของการออกแบบการเชื่อมที่กล่าวมาข้างต้นนั้น ช่างเชื่อมหรือวิศวกรการเชื่อมต้องพิจารณาถึงความหนาของแผ่นโลหะที่ต้องการจะเชื่อม (Base metals) โดยต้องสัมพันธ์กันกับปัจจัยและเงื่อนไขของการเชื่อมจุด ดังแสดงเป็นตัวอย่างที่ความหนาของโลหะแผ่นงานบางขนาดในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ปัจจัยการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่สัมพันธ์กับความหนาของโลหะเชื่อม

ที่มา : SIAM PART PRODUCTS, Spot Welding Level 2 for Technicians 2014



S (mm)	d (mm)	D≥ (mm)	A (min)	L (min)	เวลาเชื่อม (Periods)	แรงกด (daN)	กระแสเชื่อม (A)	ขนาดแนวเชื่อม (mm)
0.25	4	10	6.5	10	3	91	4000	3.3
0.5	5	10	10	11	5	136	6100	4.3
0.75	6	13	13	12	6	181	8000	5.3
1	6.5	13	19	13	9	227	9200	5.8
1.25	6.5	13	22	14	10	295	10300	6.3
1.5	6.5	13	27	16	12	362	11600	6.9
2	8	16	35	17	18	496	13300	7.9
2.5	8	16	41	19	21	590	14700	8.6
3	10	16	50.8	22	25	815	17500	10.2

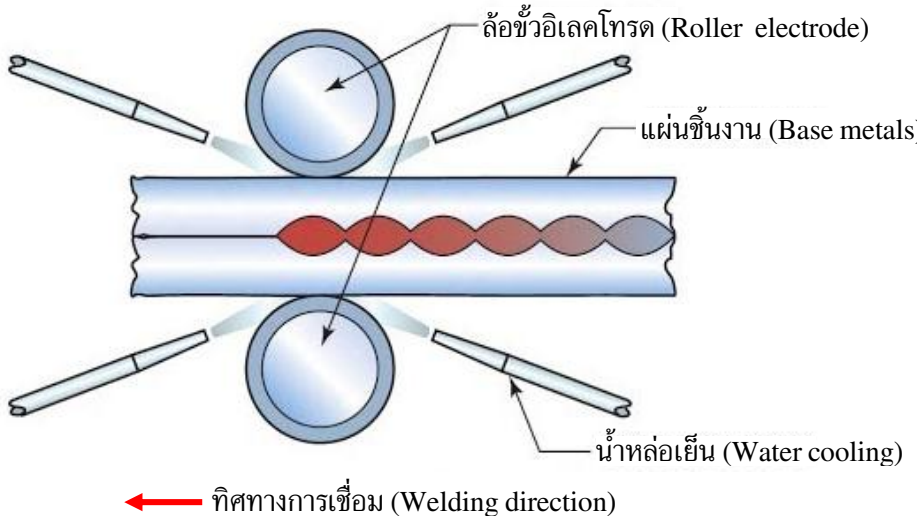
* ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์แนวเชื่อม ถึงขอบของระยะห่างระหว่างแนวต่ำสุด = 2–2.5 x Ø แนวเชื่อม

* ระยะห่างแนวเชื่อม ถึงแนวเชื่อมต่ำสุด = 10 x ความหนาของชิ้นงาน

4.3.2 การเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทาน (Resistance seam welding)

ก. หลักการของการเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทาน

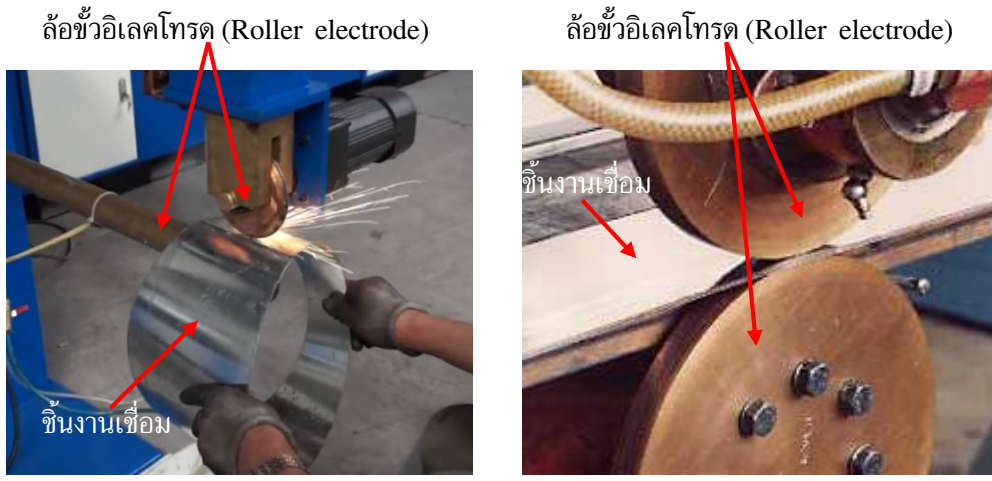
Larry Jeffus (2011) ได้กล่าวถึงหลักของการเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทานของกระแสไฟฟ้าว่า เป็นขบวนการเชื่อมพิเศษเฉพาะที่ต้องการเชื่อมโลหะแผ่นให้ติดกันเป็นแนวเชื่อมยาวแบบตะเข็บ ซึ่งมีหลักของการเชื่อมที่คล้ายกับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ต่างกันที่การเชื่อมแบบจุดจะมีแนวเชื่อม (Weld nugget) ห่างกันเป็นช่วง ๆ ส่วนการเชื่อมแบบตะเข็บจะเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous weld nugget) โดยขั้วของอิเลคโทรดมีลักษณะเป็นล้อกลม (Roller electrode) 2 ขั้ว ล้อที่ทำจากโลหะทองแดงจะทำหน้าที่หมุนและกดลงบนผิวของโลหะชิ้นงานเชื่อมตลอดเวลาขณะเชื่อม และจะมีระบบน้ำหล่อเย็นที่ต้องการระบายความร้อนที่ล้อของขั้วอิเลคโทรดโดยตรง ดังแสดงระบบของขบวนการเชื่อมในรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.46 ระบบของการเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทาน (Resistance seam welding)

ที่มา : Larry Jeffus, Welding Principles and Applicstions, 2004.

โดยปกติแล้วแนวเชื่อมแบบตะเข็บมีความแข็งแรงต่ำกว่าการเชื่อมต่อชน เหตุผลเพราะแนวเชื่อมแบบตะเข็บเป็นแนวเชื่อมเกยที่รับแรงในแนวเฉือน และยังมีลักษณะเหมือนกับมีรอยบากโดยรอบแนวเชื่อม ดังนั้น จึงมักนิยมเลือกใช้กันมากกับงานเชื่อมต่อเป็นภาชนะบรรจุภัณฑ์และผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ป้องกันอากาศหรือไอระเหยต่าง ๆ รั่วไหลออกจากภาชนะบรรจุ เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างการเชื่อมตะเข็บของชิ้นงานที่แนวตะเข็บเล็ก ๆ บนโลหะแผ่นแบบบางกับแนวเชื่อมตะเข็บที่ใหญ่ ๆ บนโลหะแผ่นหนาในรูปที่ 4.47 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยล้อหมุนที่ทำหน้าที่เป็นขั้วอิเลคโทรดจะออกแบบให้เหมาะสมกับลักษณะของงานที่จะเชื่อม และขนาดของล้อก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามความหนาของชิ้นงานโลหะที่เชื่อม ซึ่งโลหะแผ่นที่หนาต้องใช้ล้อหมุนที่มีขนาดใหญ่ เพราะนอกจากจะให้ความร้อนได้สูงแล้วนั้นยังช่วยเป็นแรงกดลงบนแนวเชื่อมให้โลหะแผ่นเชื่อมติดกันได้ดีมากขึ้นด้วย



(ก) การเชื่อมตะเข็บโลหะแผ่นบาง (ข) การเชื่อมตะเข็บโลหะแผ่นหนา

รูปที่ 4.47 ตัวอย่างของการเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทานที่ขนาดโลหะแผ่นหนาต่างกัน

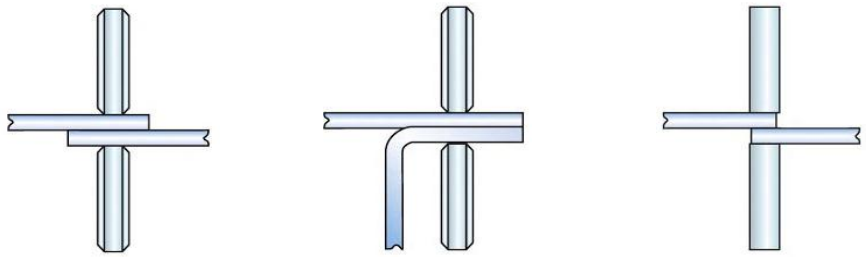
ที่มา : Ammar AM. et. al., Diyala Journal of Eng. Scie., Vol. 07, No. 03, pp. 80–91, 2014.

การออกแบบชนิดรอยต่อสำหรับการเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทานนั้น มี 3 แบบ คือ

1. แบบต่อเกยแบบ Lap seam เป็นการต่อเกยที่เหมือนกับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ต่างกันที่แนวเชื่อมเกิดจากอิเลคโทรดที่เป็นลักษณะล้อกลมหมุน ดังแสดงลักษณะการต่อเกยในรูปที่ 4.48 (ก)

2. แบบต่อเกยแบบ Flanged seam เป็นการต่อเกยตะเข็บปีกเพื่อใช้เป็นขอบหรือบ่าของภาชนะบรรจุ ดังแสดงลักษณะการต่อเกยในรูปที่ 4.48 (ข)

3. แบบต่อเกยแบบ Mashed seam เป็นลักษณะการต่อเกยที่มีระยะการเกยน้อยกว่าการเกยแบบปกติ โดยระยะเกยจะอยู่ที่ 1–1.5 เท่าของความหนาโลหะแผ่นงาน หลังจากเชื่อมแล้วตรงบริเวณแนวเชื่อมจะมีความหนาที่มากขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความกว้างของผิวหน้าของล้อหมุนอิเลคโทรดที่ออกแบบให้แบนราบ ซึ่งสามารถควบคุมขนาดของรอยต่อได้ ดังแสดงลักษณะการต่อเกยในรูปที่ 4.48 (ค)



(ก) การต่อแบบ Lap seam (ข) การต่อแบบ Flanged seam (ค) การต่อแบบ Mashed seam

รูปที่ 4.48 ชนิดของการต่อเกยสำหรับการเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทาน

ที่มา : Larry Jeffus, Welding Principles and Applicstions, 2004.

นอกจากจะเลือกชนิดของแนวตะเข็บเชื่อมที่เหมาะสมกับลักษณะของงานแล้วนั้น ขณะทำการเชื่อมช่างเชื่อมต้องควบคุมระดับแรงกดและปริมาณของกระแสเชื่อมที่ไหลผ่านขั้วล้ออิเลคโทรดตลอดเวลา รวมไปถึงความเร็วเชื่อม ระยะเกย และความหนาของรอยต่อที่ต้องมีความสัมพันธ์กัน ดังแสดงเป็นตัวอย่างความสัมพันธ์ของปัจจัยการเชื่อมต่อความหนาของชิ้นงานโลหะเชื่อมในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ปัจจัยการเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทานที่สัมพันธ์กับความหนาของโลหะเชื่อม

ที่มา : Resistance Welding Manual, Resistance Welder Manufacturers, Association Alliance 2003

วัสดุโลหะชิ้นงานเชื่อม		ความเร็วเชื่อม	เวลาเชื่อม (Cycles)		แรงกดอิเลคโทรดแต่ละปุ่มยื่น (lds)	กระแสไฟเชื่อม (A)
แผ่นบาง (in)	แผ่นหนา (in)	(in/min)	Heat	Cool		
0.031	0.078	75	3	2	600	16,000
0.031	0.078	142	2	1	800	22,000
0.031	0.050	72	3	2	800	17,000
0.031	0.050	142	2	1	700	20,000
0.050	0.078	60	4	3	1,200	22,000
0.050	0.078	120	3	1	1,200	20,000

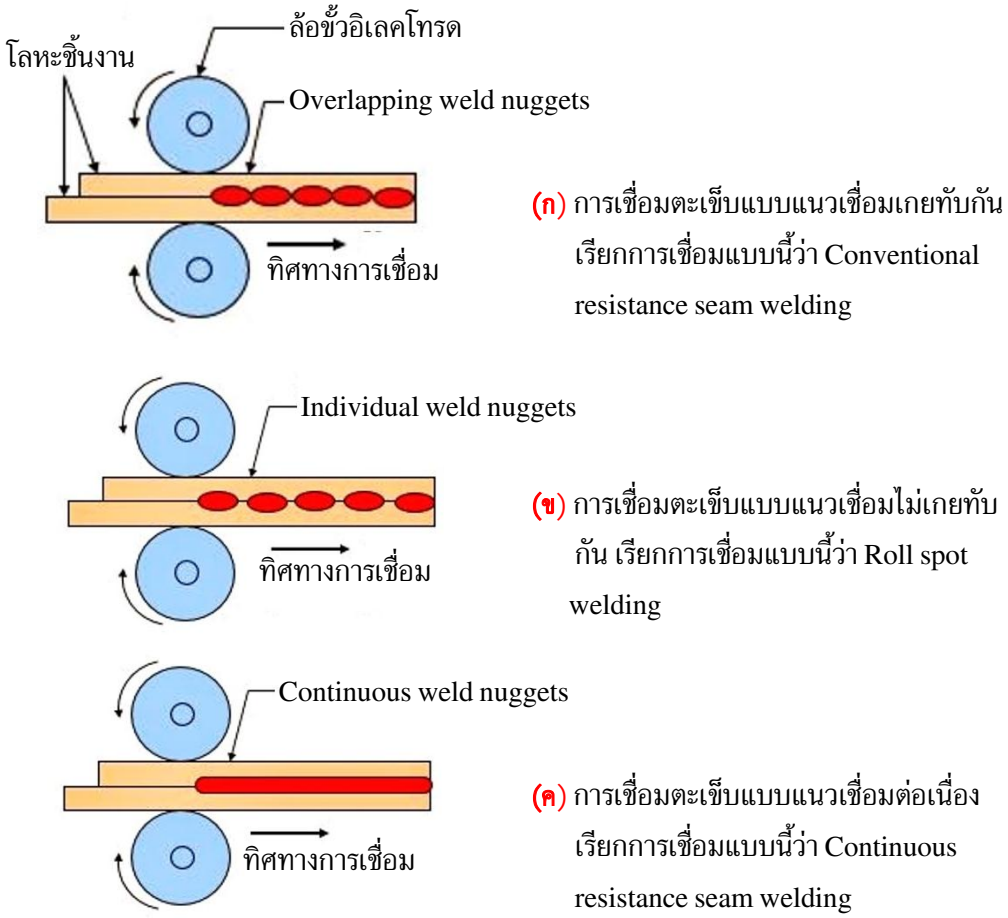
โดยชิ้นงานโลหะที่ต้องการเชื่อมจะอยู่ระหว่างล้อขั้วอิเลคโทรดที่หมุนไปในทิศทางการเชื่อม ซึ่งมีการปล่อยกระแสไฟเชื่อมไหลผ่านตลอดเวลาและผ่านระบบควบคุมเปิด–ปิด (On–Off) กระแสไฟเชื่อมที่ไหลผ่านโลหะชิ้นงานโดยถูกควบคุมให้ เปิด–ปิดไหลตามซ้ำ ๆ กันไปอย่างรวดเร็ว ขณะเปิดกระแสไฟเชื่อมจะไหลผ่านทำให้เกิดความต้านทานและเกิดการเชื่อม ขณะปิดไม่มีกระแสไฟก็ไม่เกิดการเชื่อม ดังนั้น การควบคุมการเปิด–ปิดกระแสไฟเชื่อมจึงสามารถควบคุมลักษณะของแนวเชื่อมตะเข็บได้ว่าต้องการในลักษณะตะเข็บเชื่อมแบบใด ซึ่งในทางปฏิบัติจะมีระบบควบคุมการเปิด–ปิดแบบอัตโนมัติโดยเฉพาะในระบบการเชื่อมในสายระบบการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งพบว่า ลักษณะของแนวเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทานมี 3 ลักษณะ ดังนี้

1. ลักษณะแนวเชื่อมตะเข็บแบบแนวเชื่อมเกยทับกัน (Overlap weldment) โดยลักษณะของแนวเชื่อมตะเข็บแต่ละจุด (Spot) มีเกยซ้อนทับกันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจัดว่าเป็นลักษณะของแนวเชื่อมตะเข็บปกตินิยมที่ใช้งานกันมาก มักเรียกการเชื่อมแบบนี้ว่า Conventional resistance seam welding ดังแสดงลักษณะของแนวเชื่อมตะเข็บในรูปที่ 4.49 (ก)

2. ลักษณะแนวเชื่อมตะเข็บแบบแนวเชื่อมไม่เกยทับกัน (Individual weldment) โดยลักษณะของแนวเชื่อมตะเข็บจะเป็นแนวเชื่อมที่เป็นจุดเชื่อม (Nugget) แต่ละจุดไม่มีส่วนที่ซ้อนทับกัน จะแยกห่างออกจากกันเป็นช่วง ๆ อย่างต่อเนื่อง มักเรียกการเชื่อมแบบนี้ว่า Roll spot welding ดังแสดง

ลักษณะของแนวเชื่อมตะเข็บในรูปที่ 4.49 (ข)

3. ลักษณะแนวเชื่อมตะเข็บแบบแนวเชื่อมต่อเนื่อง (Continuous weldment) โดยลักษณะของแนวเชื่อมจะหลอมเป็นแนวตะเข็บเชื่อมอย่างต่อเนื่องตลอดทั้งแนว คล้ายกับการเชื่อมแบบหลอมละลายของวิธีเชื่อมอื่น ๆ ซึ่งแตกต่างจากสองลักษณะที่กล่าวมาข้างต้น จะเป็นแนวเชื่อมตะเข็บที่มีความแข็งแรงสูงเหมาะกับการเชื่อมตะเข็บของภาชนะความดันหรือภาชนะที่ต้องการป้องกันการรั่วไหล มักจะเรียกการเชื่อมแบบนี้ว่า Continuous resistance seam welding ดังแสดงลักษณะของแนวเชื่อมตะเข็บในรูปที่ 4.49 (ค) ที่อ้างอิงจาก Larry Jeffus (2004)



รูปที่ 4.49 ลักษณะของรอยเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทาน

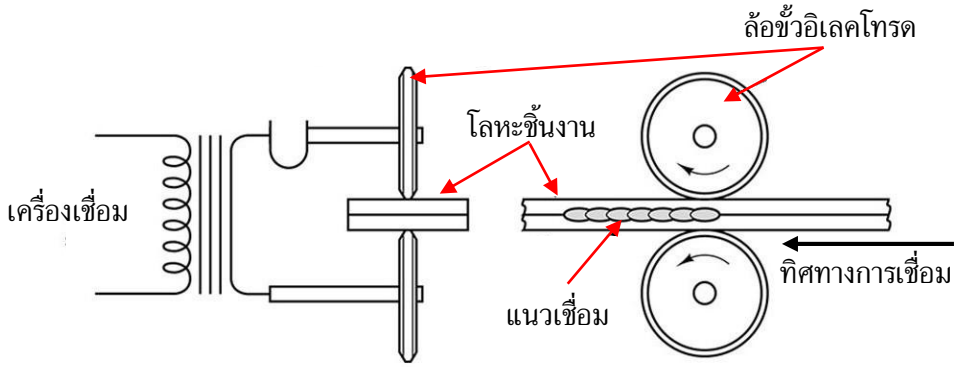
ที่มา : Larry Jeffus, Welding Principles and Applicstions, 2004.

ข. องค์ประกอบของเครื่องเชื่อมสำหรับการเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทาน (Welding machine)

Westermans International Ltd. (2013) ได้เผยแพร่ข้อมูลในวารสารว่าการเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทานมีระบบหลักการเชื่อมที่อาศัยความร้อนจากความต้านทานกระแสไฟฟ้าเช่นเดียวกับการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ดังนั้น องค์ประกอบหลักที่สำคัญของการเชื่อมจึงเหมือนกัน จะต่างกันที่รูปแบบของขั้วอิเลคโทรด ดังแสดงในรูปที่ 4.50 โดยทั่วไปพบว่าเครื่องเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทานจะมีรูปร่างของเครื่องเชื่อมที่หลากหลาย ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่ต้องการเชื่อมเพื่อสร้างความสะดวกหรืออาจลดข้อจำกัดของการเชื่อม แต่ยังคงอาศัยหลักการพื้นฐานของความต้านทานกระแสไฟฟ้าที่เหมือนกัน ซึ่งที่พบเห็นบ่อย สามารถแยกได้ 2 ประเภท คือ

1. เครื่องเชื่อมตะเข็บแบบเชื่อมด้วยคน (Manual seam welding machine) เหมาะกับงานเชื่อมโลหะแผ่นบาง มีการออกแบบล้อขั้วอิเลคโทรดที่หลากหลายขนาดตามความเหมาะสม ดังแสดงตัวอย่างของเครื่องเชื่อมในรูปที่ 4.51 (ก) เครื่องเชื่อมลักษณะแบบนี้มีพบเห็นอยู่ทั่วไปกับโรงงานประกอบงานเชื่อมขนาดเล็กหรือปานกลาง ที่ใช้เชื่อมโลหะแผ่นของงานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมากนัก ที่สำคัญคือ มีระบบการใช้งานของเครื่องไม่ซับซ้อนเพราะสั่งการทำงานของเครื่องด้วยคนที่เชื่อม

2. เครื่องเชื่อมตะเข็บแบบเชื่อมด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automatic seam welding machine) เครื่องเชื่อมประเภทนี้จะพบเห็นในระบบการผลิตอย่างต่อเนื่องของสายการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ถังบรรจุน้ำมัน เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างของเครื่องเชื่อมในรูปที่ 4.51(ข) เครื่องเชื่อมประเภทนี้มีขีดความสามารถในการเชื่อมที่สูง สามารถเชื่อมตะเข็บบนโลหะแผ่นที่มีความหนามากกว่าแบบแรกที่กล่าวมา ใช้ระบบสั่งการทำงานผ่านโปรแกรมสั่งงานบนคอมพิวเตอร์ควบคุม สามารถปฏิบัติการเชื่อมได้แบบอัตโนมัติ และทำการเชื่อมได้ติดต่อกันเป็นเวลานาน ๆ ได้ดี เป็นเครื่องเชื่อมที่ติดตั้งไว้บนเครื่องจักรที่มีระบบกลไกจับยึดและป้อนชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมได้ด้วยตัวของเครื่องจักร เครื่องเชื่อมลักษณะนี้มีราคแพงและมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาค่อนข้างสูง



รูปที่ 4.50 องค์ประกอบของการเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทาน

ที่มา : Larry Jeffus, Welding Principles and Applicstions, 2004.



(ก) เครื่องเชื่อมตะเข็บแบบเชื่อมด้วยคน (Manual seam welding machine)



(ข) เครื่องเชื่อมตะเข็บด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automatic seam welding machine)

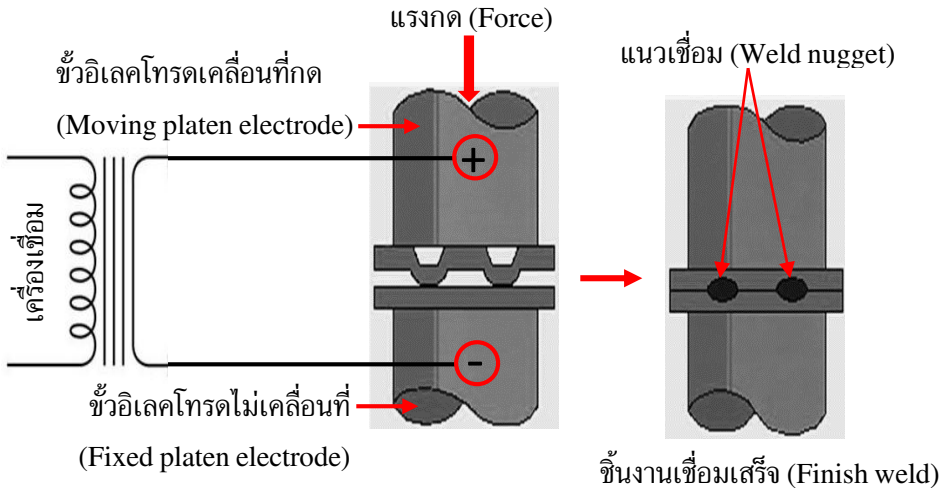
รูปที่ 4.51 ตัวอย่างเครื่องเชื่อมตะเข็บด้วยความต้านทาน

ที่มา : Guangzhou Durowelder Limited, 2016.

4.3.3 การเชื่อมปุ่มยื่นด้วยความต้านทาน (Resistance projection welding)

ก. หลักการของการเชื่อมปุ่มยื่นด้วยความต้านทาน

RWMA (2003) ได้กล่าวถึงการเชื่อมปุ่มยื่น (อาจเป็นรอยนูน/รอยบุ๋ม) หรือการเชื่อมประกอบชิ้นส่วนที่ผ่านการขึ้นรูปมาแล้วด้วยความต้านทานของกระแสไฟฟ้า เป็นขบวนการเชื่อมที่อาศัยหลักการของความต้านทานเหมือนกับการเชื่อมจุด (Spot welding) จะต่างกันที่หนึ่งในสองชิ้นของโลหะชิ้นงานที่ทำการเชื่อมจะต้องผ่านขบวนการขึ้นรูปเพื่อสร้างรอยนูนหรืออาจเป็นรอยบุ๋มตามรูปร่างและขนาดที่ต้องการ จากนั้นก็นำโลหะงานทั้งคู่มาวางบนขั้วอิเลคโทรดแบบแผ่นแบนเรียบของเครื่องเชื่อมด้านขั้วอิเลคโทรดไม่เคลื่อนที่ (Fixed platen electrode) ต่อด้วยการใช้แรงกดลงบนโลหะชิ้นงานที่จะเชื่อมเพื่อให้ติดกันพร้อมทั้งปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จนเกิดร้อนจากความต้านทานขึ้นตรงรอยปุ่มยื่นหรือรอยบุ๋มหรือรอยนูน และจะอ่อนตัวหลอมละลายติดกัน ซึ่งในขณะเดียวกันแรงกดของขั้วอิเลคโทรดเคลื่อนที่ (Moving platen electrode) กดให้ส่วนที่หลอมละลายติดกันแน่นและแบนเรียบมากยิ่งขึ้นจนเกิดเป็นแนวเชื่อม (Weld nugget) ที่สมบูรณ์ ดังแสดงองค์ประกอบของการเชื่อมปุ่มยื่นในรูปที่ 4.52 การเชื่อมด้วยกรรมวิธีนี้ไม่ต้องการอิเลคโทรดที่มีรูปร่างซับซ้อน เพราะต้องการให้แผ่นขั้วอิเลคโทรด (Platens electrode) แนบชิดกับผิวโลหะชิ้นงานเป็นสำคัญ



รูปที่ 4.52 หลักการของระบบการเชื่อมปุ่มยื่นด้วยความต้านทาน

ที่มา : Osborn Summers, Projection welding, 2016. (เขียนใหม่)

ตัวแปรที่มีอิทธิพลการเชื่อมของกรรมวิธีนี้ โดยอ้างอิงจาก RWMA (2003)ได้แก่

1. ความหนาของโลหะชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม (Thickness of base metals) โดยชิ้นงานที่หนามากขึ้นจะต้องใช้กระแสไฟเชื่อม (Welding current) เวลาเชื่อม (Weld cycle time) และแรงกดของแผ่นอิเลคโทรดที่สูงขึ้นตามความหนา ดังตัวอย่างแสดงเปรียบเทียบที่ความหนาของโลหะชิ้นงานต่างกันในตารางที่ 4.12

2. ขนาดของปุ่มยื่น/รอยนูน/รอยบุ๋ม (Projections) ของชิ้นงานที่จะเชื่อมมีผลต่อการกำหนดปัจจัยของการเชื่อมค่อนข้างมาก ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดความโต (Diameter of projection) และความสูง (Height of projection) ของปุ่มยื่น ดังแสดงในตารางที่ 4.12

3. จำนวนตำแหน่งปุ่มยื่น/รอยนูน/รอยบุ๋ม (Projections) ของชิ้นงานที่จะเชื่อม มีความสำคัญที่ต้องพิจารณาอย่างละเอียด เพราะแนวโน้มต่อปัจจัยการเชื่อมด้านต่าง ๆ จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อจำนวนปุ่มยื่นที่มากขึ้น ดังแสดงเปรียบเทียบปัจจัยการเชื่อมของการเชื่อมชิ้นงานที่มีจำนวนปุ่มยื่น 2 หรือ 3 กับ 4 หรือมากกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ

4. ชนิดของวัสดุ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าวัสดุโลหะที่จะเชื่อมแต่ละชนิดมีสมบัติต่อความสามารถในการเชื่อมแตกต่างกัน โดยเฉพาะจุดหลอมเหลวของวัสดุโลหะนั้น ๆ ดังนั้น ปัจจัยการเชื่อมต้องมีการปรับเปลี่ยนไปตามความเหมาะสมของวัสดุโลหะที่จะเชื่อมแต่ละชนิด โลหะที่นิยมเชื่อมกันได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าผสมและโลหะนิกเกิล เป็นต้น

ตารางที่ 4.12 ปัจจัยการเชื่อมปุ่มยื่นด้วยความต้านทานที่สัมพันธ์กับความหนาของโลหะเชื่อม

ที่มา : Resistance Welding Manual, Resistance Welder Manufacturers, Association Alliance, 2003

วัสดุโลหะชิ้นงานเชื่อม		ขนาดของปุ่มยื่น (in)	ความสูงของปุ่มยื่น (in)	แรงกดอิเลคโทรด (lds)	เวลาเชื่อม (Cycles)	กระแสไฟเชื่อม (kA)
เกรด	ความหนา (mm)					
21	0.033/0.84	0.110	0.035	240	3	6.6
19	0.042/1.07	0.110	0.035	330	5	8.0
18	0.048/1.22	0.140	0.038	400	8	8.8
16	0.060/1.52	0.150	0.042	550	10	10.3
14	0.075/1.91	0.180	0.048	800	14	NA
13	0.090/2.29	0.210	0.050	1,020	16	13.15
12	0.105/2.67	0.240	0.055	1,250	19	14.10

ตารางที่ 4.13 ปัจจัยการเชื่อมปุ่มยื่นจำนวน 2 หรือ 3 ปุ่มที่สัมพันธ์กับความหนาของโลหะเชื่อม

ที่มา : Resistance Welding Manual, Resistance Welder Manufacturers, Association Alliance , 2003

วัสดุโลหะชิ้นงานเชื่อม		เวลาเชื่อม (Cycles)	แรงกดอิเลคโทรดแต่ละปุ่มยื่น (lds)	กระแสไฟเชื่อม (kA)
เกรด	ความหนา (mm)			
25	0.021/0.53	6	150	3.85
23	0.027/0.69	6	150	4.45
21	0.033/0.84	6	150	5.1
19	0.042/1.07	10	210	6.0
18	0.048/1.22	16	270	6.5
16	0.060/1.52	20	365	7.65
14	0.075/1.91	28	530	8.85
13	0.090/2.29	32	680	9.75
12	0.105/2.67	38	830	10.6

ข. การออกแบบการเชื่อมปุ่มยื่นด้วยความต้านทาน

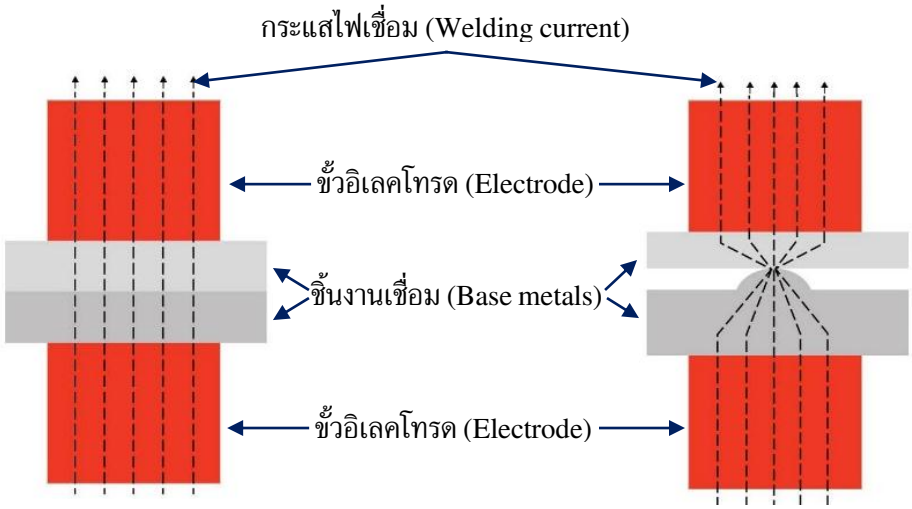
Girish P. Kelkar (2017) ได้กล่าวไว้ในงานวิจัยถึงการเชื่อมด้วยกรรมวิธีนี้ว่าจะต้องมีการออกแบบแผ่นขั้วอิเลคโทรดไปตามลักษณะของรูปทรงชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม โดยขึ้นอยู่กับรูปทรงและจำนวนของปุ่มยื่น/รอยบุ๋ม/รอยนูนของโลหะชิ้นงาน และสามารถเชื่อมได้กับโลหะเหล็กกล้าและเหล็กกล้าผสมที่ความหนาอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 3.2 มม. เป็นสำคัญ ส่วนในบางกรณีที่ต้องเชื่อมวัสดุพิเศษก็ต้องมีเครื่องมือเฉพาะที่จะใช้ในการช่วยยับยั้งไม่ให้ปุ่มยื่นหรือปุ่มนูน (Projection) เกิดการยุบตัวเร็วเกินไป

ตารางที่ 4.14 ปัจจัยการเชื่อมปุ่มยื่นจำนวน 4 ปุ่ม หรือ มากกว่า ที่สัมพันธ์กับความหนาโลหะ

ที่มา : Resistance Welding Manual, Resistance Welder Manufacturers, Association Alliance, 2003

วัสดุโลหะชิ้นงานเชื่อม		เวลาเชื่อม	แรงกดอิเลคโทรดแต่ละ	กระแสไฟเชื่อมแต่
เกรด	ความหนา (mm)	(Cycles)	ปุ่มยื่น (lds)	ละปุ่มยื่น (kA)
25	0.021/0.53	6	80	2.9
23	0.027/0.69	8	100	3.3
21	0.033/0.84	11	125	3.8
19	0.042/1.07	15	160	4.3
18	0.048/1.22	19	220	4.4
16	0.060/1.52	25	330	5.4
14	0.075/1.91	34	470	6.4
13	0.090/2.29	42	610	7.2
12	0.105/2.67	50	740	8.3

จำนวนของปุ่มยื่น/รอยบุ๋ม/รอยนูนของโลหะชิ้นงาน ช่างเชื่อมต้องพิจารณาเป็นประเด็นสำคัญ เพราะจะเป็นตัวกำหนดปัจจัยในการเชื่อม โดยเฉพาะการกำหนดปริมาณของกระแสไฟเชื่อม ด้วยเหตุที่พฤติกรรมการไหลของกระแสจะมีทิศทางไปรวมกันที่ปุ่มยื่นเพื่อสร้างความร้อนจากความต้านทานของกระแสไฟเชื่อม ดังนั้น ถ้ามีจำนวนปุ่มยื่นที่จะเชื่อมมากขึ้นก็ต้องป้อนกระแสไฟเชื่อมที่เพิ่มสูงขึ้นเพื่อเฉลี่ยกระแสไฟไปในทุก ๆ ปุ่มยื่นที่เท่า ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 4.53



(ก) กระแสไฟไหลบนโลหะราบเรียบ
(Welding current flow on flat metal)

(ข) กระแสไฟไหลบนโลหะมีปุ่มยื่น
(Welding current flow on projection metal)

รูปที่ 4.53 ลักษณะการไหลของกระแสไฟในการเชื่อมปุ่มยื่นด้วยความต้านทาน

ที่มา : Girish P. Kelkar, Ph.D., WJM Technologies, 2017.

การออกแบบการเชื่อมปุ่มยื่นด้วยความต้านทานที่พบเห็นกันมาก เป็นการออกแบบตามลักษณะของชิ้นงานประกอบ ซึ่งแบ่งได้ 4 ชนิดของรอยเชื่อมปุ่มยื่น (Type of projection welds) ดังนี้

1. การเชื่อมปุ่มยื่นแบบประทับ (Stamped projection welding) เป็นลักษณะของปุ่มยื่นที่ปกติสามารถพบเห็นกันบ่อย ๆ ในการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่น ชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ โดยการกดหรือประทับ (Stamped) ให้โลหะสองชิ้นติดกัน ดังแสดงการออกแบบปุ่มยื่นแบบประทับของชิ้นงานโลหะเชื่อมและแนวเชื่อมที่ได้ในรูปที่ 4.54 (ก)

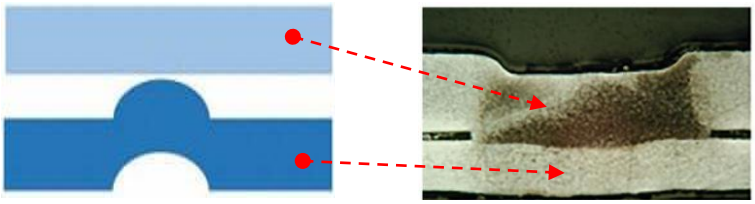
2. การเชื่อมปุ่มยื่นแบบใช้เครื่องจักร (Machined projection welding) เป็นลักษณะการเชื่อมที่ต้องใช้กำลังของเครื่องจักรกดอัดปุ่มยื่นให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างในบางส่วน (Deformation) และบางส่วนก็เกิดการหลอมละลายติดกัน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์ภาชนะบรรจุที่ต้องการแนวเชื่อมเป็นชิ้นส่วนของการอุดรูหรือปิดฝาในตำแหน่งที่อาจมีการรั่วไหลของภาชนะ ดังแสดงการออกแบบปุ่มยื่นแบบใช้เครื่องจักรของชิ้นงานโลหะเชื่อมและแนวเชื่อมที่ได้ในรูปที่ 4.54 (ข)

3. การเชื่อมปุ่มยื่นแบบเหรียญ (Coined projection welding) เป็นลักษณะของการเชื่อมปุ่มยื่นที่ออกแบบปุ่มยื่นที่เป็นก้าน/สลัก โดยที่ฐานเป็นรูปเหรียญวงกลมที่มีส่วนนูนออกมาแล้วกดให้เชื่อมติดกัน เหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการสร้างก้านหรือสลัก (Pin) ยื่นออกมาเพื่อไว้สวมกับชิ้นส่วนอื่น ๆ ดังแสดงการออกแบบปุ่มยื่นแบบเหรียญของชิ้นงานโลหะเชื่อมและแนวเชื่อมที่ได้หลังการเชื่อมเสร็จ ในรูปที่ 4.54 (ค)

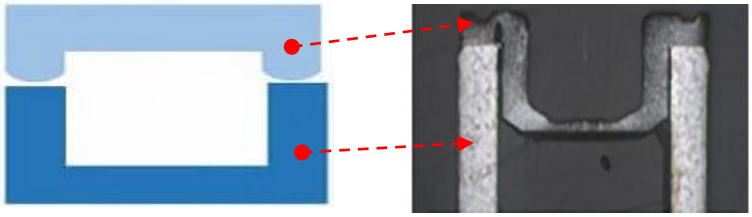
4. การเชื่อมปุ่มยื่นแบบมุม (Corner projection welding) เป็นรูปแบบของการเชื่อมที่คล้ายกับแบบใช้เครื่องจักร (Machined projection welding) ลักษณะของปุ่มยื่นหรือส่วนที่นูนออกมาคล้ายกับหัวน๊อต (Nut) วางบนชิ้นงานอีกชิ้น จากนั้นใช้แรงกดโดยส่วนที่ขั้วอิเลคโทรดสัมผัสกันจะเกิดการหลอมละลายติดกัน ซึ่งรอยเชื่อมที่ติดกันมีลักษณะเป็นซีล (Seal) ทำหน้าที่ป้องกันการรั่วไหล พบว่าส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมชิ้นส่วนจำพวกถังบรรจุผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดังแสดงการออกแบบปุ่มยื่นแบบมุมของชิ้นงานโลหะเชื่อมและแนวเชื่อมที่ได้หลังการเชื่อมเสร็จในรูปที่ 4.54 (ง)

ค. เครื่องเชื่อมปุ่มยื่นด้วยความต้านทาน

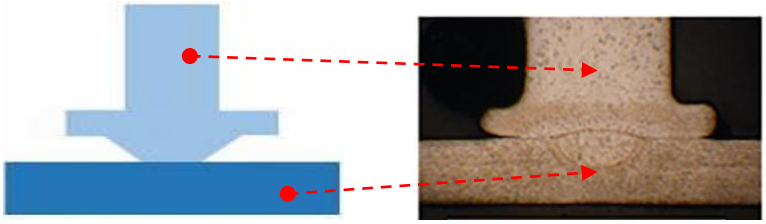
การเชื่อมปุ่มยื่นด้วยความต้านทานใช้เครื่องเชื่อมที่อาศัยระบบความต้านทานกระแสไฟฟ้าสร้างความร้อนเพื่อการหลอมละลายเหมือนกับการเชื่อมความต้านทานแบบอื่น ๆ โดยเครื่องเชื่อมจะพบเห็นกันทั้งแบบควบคุมการเชื่อมด้วยมือของช่างเชื่อมซึ่งเรียกว่าเครื่องแบบ Manual ดังแสดงตัวอย่างของเครื่องเชื่อมในรูปที่ 4.55 (ก) เหมาะกับการเชื่อมงานที่มีจำนวนน้อยชิ้นแต่หลากหลายรูปแบบ กับประเภทเครื่องเชื่อมที่ถูกควบคุมการเชื่อมด้วยแขนกลหุ่นยนต์ ซึ่งเรียกว่าเครื่องแบบ Automatic ดังแสดงตัวอย่างของเครื่องเชื่อมในรูปที่ 4.55 (ข) เหมาะกับงานเชื่อมแบบต่อเนื่องตลอดเวลาในระบบสายการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเชื่อมได้รวดเร็วและมีความแม่นยำสูง แต่อาจมีต้นทุนการผลิตที่สูงและต้องมีการดูแลซ่อมบำรุงระบบเป็นอย่างดี



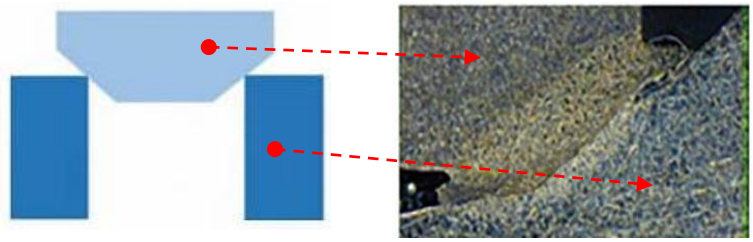
(ก) การเชื่อมปุ่มยื่นแบบประทับ (Stamped projection welding)



(ข) การเชื่อมปุ่มยื่นแบบใช้เครื่องจักร (Machined projection welding)



(ค) การเชื่อมปุ่มยื่นแบบเหรียญ (Coined projection welding)

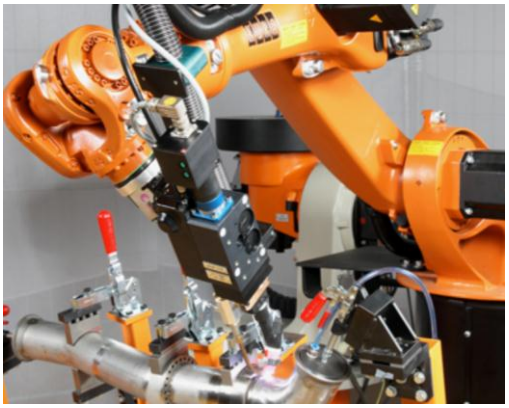


(ง) การเชื่อมปุ่มยื่นแบบมุม (Corner projection welding)

รูปที่ 4.54 ชนิดของรอยเชื่อมปุ่มยื่นด้วยความต้านทาน (Type of projection welds)

ที่มา : Girish P. Kelkar, Ph.D., WJM Technologies, 2017.





(ก) เครื่องเชื่อมปุ่มยื่นแบบเชื่อมด้วยคน (Manual projection welding machine)

(ข) เครื่องเชื่อมปุ่มยื่นด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automatic projection welding machine)

รูปที่ 4.55 ตัวอย่างเครื่องเชื่อมปุ่มยื่นด้วยความต้านทาน

ที่มา : Shri Balaji Engineering, Product of Projection welding machine 2019

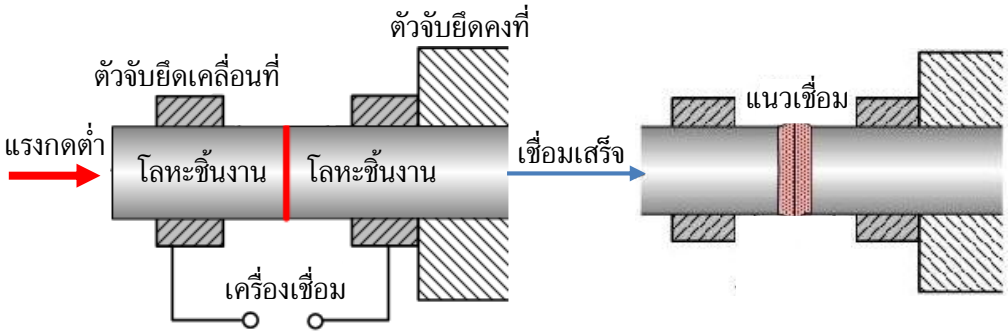
4.3.4 การเชื่อมต่อชนด้วยความต้านทาน (Resistance butt welding)

ขบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานวิธีนี้เป็นการเชื่อมแบบต่อชน (Butt joint) ที่อาศัยความร้อนจากการต้านทานกระแสไฟฟ้าซึ่งมีกรรมวิธีการเชื่อมที่คล้าย ๆ กันอยู่ 2 กรรมวิธี โดยจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดของแต่ละวิธีการเชื่อม โดยอ้างอิงตาม Malur Srinivasan (2007) ดังต่อไปนี้

1. กรรมวิธีการเชื่อมอยู่ด้วยความต้านทาน (Resistance upset welding) ซึ่งบางครั้งก็เรียกว่าการเชื่อมชนด้วยความต้านทานวิธี UW นิยมใช้ในการเชื่อมโลหะที่เป็นท่อ (Pipe) และโลหะที่เป็นแท่งตัน (Rod) (ที่มีขนาดไม่โตมากนัก) โดยวางชิ้นงานโลหะที่จะเชื่อม 1 ชิ้น บนด้านตัวจับยึดคงที่ กับอีก 1 ชิ้น บนด้านตัวจับยึดเคลื่อนที่ จากนั้นก็เคลื่อนชิ้นงานเข้าหากันเมื่อสัมผัสก็ปล่อยกระแสไฟฟ้าแบบ Heavy current เพื่อให้เกิดความร้อนจากความต้านทาน ในขณะเดียวกันเครื่องเชื่อมก็จะใช้แรงดันชิ้นงานด้านตัวจับเคลื่อนที่ให้เข้าไปชนกันเพื่อให้ปลายชิ้นงานหลอมติดกันเป็นแนวเชื่อม ดังแสดงองค์ประกอบและขบวนการเชื่อมในรูปที่ 4.56 (ก) และ (ข) ตัวอย่างการเชื่อมเหล็กเพลาข้ออ้อย

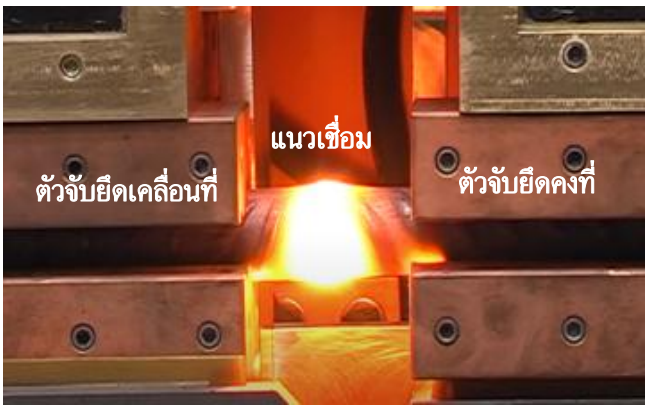
2. กรรมวิธีการเชื่อมวาบด้วยความต้านทาน (Resistance flash welding) ซึ่งบางครั้งเรียกว่าการเชื่อมชนด้วยความต้านทานวิธี FW นิยมเชื่อมงานโลหะแท่งที่มีขนาดโต เช่น รางรถไฟ หรือเหล็กท่อที่มีความหนามาก ๆ โดยขบวนการเชื่อมจะเหมือนกันกับวิธีการเชื่อมอยู่ (Upset welding) ต่างกันที่วิธีการนี้จะใช้กระแสไฟเชื่อมจากขั้วอิเลคโทรดที่เป็นกระแสแบบ Light current ไหลผ่านปลายชิ้นงานเชื่อมแล้วเกิดการอาร์กเพื่อทำให้เกิดการหลอมละลาย ในขณะอาร์กก็จะมีแรงดันเคลื่อนปลายชิ้นงานชน

กันด้วยแรงดันที่ค่อนข้างสูง เพื่อให้เนื้อโลหะที่เกิดการหลอมอัดตัวติดแน่นกัน ซึ่งแนวเชื่อมที่ได้มีลักษณะที่มีส่วนนูนออกมาค่อนข้างมาก ดังแสดงองค์ประกอบและขบวนการเชื่อมในรูปที่ 4.57 (ก) และ (ข) ตัวอย่างการเชื่อมเหล็กรางรถไฟ



(ก) กรรมวิธีการเชื่อมยู่ด้วยความต้านทาน (Resistance upset welding)

ที่มา : Substances & Technologies, Resistance Welding, 2012

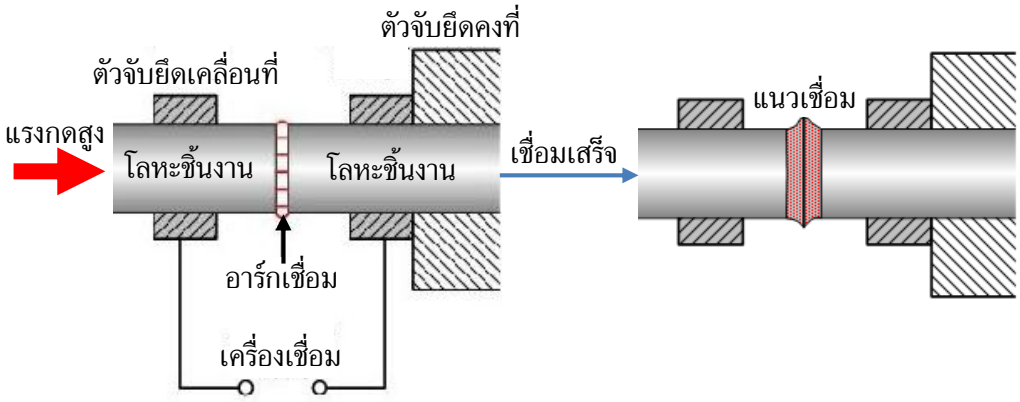


(ข) ตัวอย่างการเชื่อมต่อชนเหล็กเพลาข้ออ้อยด้วยวิธีการเชื่อมยู่ด้วยความต้านทาน (Resistance upset welding)

ที่มา : Heavy duty uoset welder, 2015

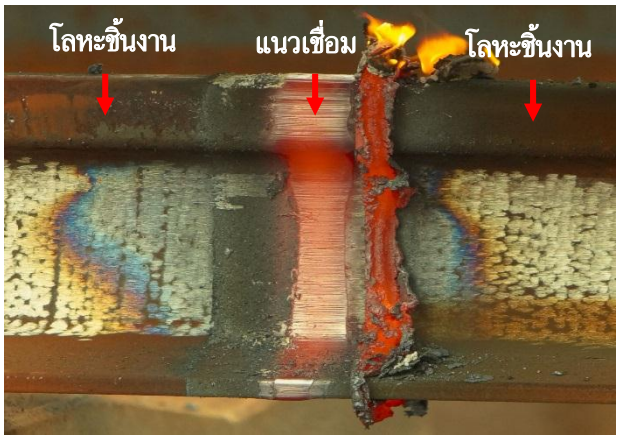
รูปที่ 4.56 กรรมวิธีการเชื่อมยู่ด้วยความต้านทาน (Resistance upset welding)

สำหรับเครื่องเชื่อมของทั้งสองกรรมวิธีการเชื่อม อาศัยหลักความต้านทานจากกระแสไฟฟ้าจนเกิดเป็นพลังงานความร้อนใช้หลอมละลายเนื้อโลหะให้ติดกันเกิดเป็นแนวเชื่อมที่เหมือนกัน ซึ่งขณะเชื่อมกระแสไฟจะไหลผ่านชิ้นงานโลหะ และพบว่า กรรมวิธีการเชื่อมยู่ด้วยความต้านทาน (UW) จะมีปริมาณกระแสไหลผ่านที่ค่อนข้างมากหรือหนัก (Heavy current) เพราะต้องการความต้านทานที่สูงเพื่อสร้างความร้อนที่สูงตาม ส่วนกรรมวิธีการเชื่อมวาบด้วยความต้านทาน ต้องการปริมาณกระแสที่น้อยกว่าหรือเบากว่า (Light current) โดยได้สร้างภาพเปรียบเทียบการไหลของกระแสไฟเชื่อมของทั้งสองกรรมวิธีไว้ในรูปที่ 4.58 และตัวอย่างเครื่องเชื่อมของทั้งสองกรรมวิธีการเชื่อม ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.59



(ก) กรรมวิธีการเชื่อมวาบด้วยความต้านทาน (Resistance flash welding)

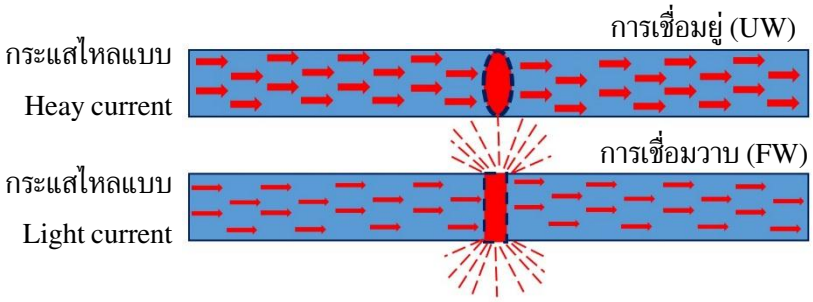
ที่มา : Substances & Technologies, Resistance Welding, 2012



(ข) ตัวอย่างการเชื่อมต่อชนเหล็กรางรถไฟด้วยวิธีการเชื่อมวาบด้วยความต้านทาน (Resistance flash welding)

ที่มา : Railroad forums, Flash Butt Weld, 2010

รูปที่ 4.57 กรรมวิธีการเชื่อมวาบด้วยความต้านทาน (Resistance flash welding)



รูปที่ 4.58 เปรียบเทียบปริมาณการไหลของกระแสไฟเชื่อมสร้างความต้านทาน

ที่มา : How To Resistance Weld, 2010 (เขียนใหม่)



(ก) เครื่องเชื่อมวาบรางรถไฟแบบเคลื่อนที่ (Mobile flash weld railway welding machine)

ที่มา : Plasser & Theurer, Railway Welding, 2011



(ข) เครื่องเชื่อมวาบรางรถไฟแบบประจำที่ (Stationary flash weld rail way welding machine)

ที่มา : KZESO, Railway Welding, 2006



(ค) เครื่องเชื่อมวาบใบเลื่อย (Flash weld band saw welding machine)

ที่มา : Cruxweld Tech, 2018



(ง) เครื่องเชื่อมยู่เพลา/ลวด/ท่อ กลม (Flash weld rod/wire/pipe welding

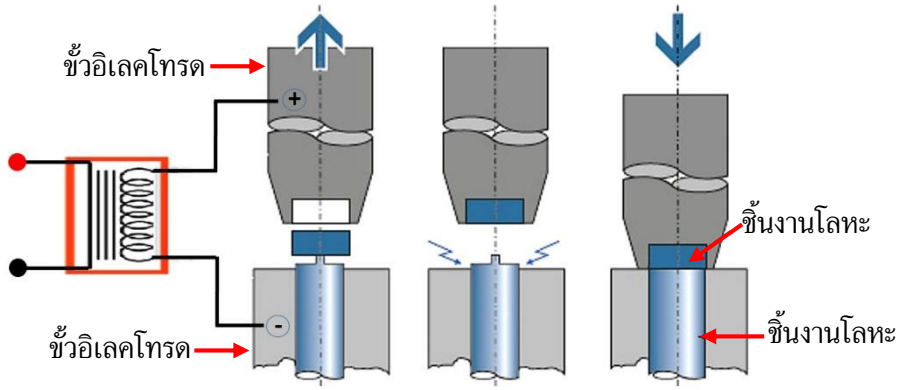
ที่มา : Montfort International, 2015

รูปที่ 4.59 เครื่องเชื่อมยู่ด้วยความต้านทาน (UW) และเชื่อมวาบด้วยความต้านทาน (FW)

ที่มา : How To Resistance Weld, 2010 (เขียนใหม่)

4.3.5 การเชื่อมกระทบด้วยความต้านทาน (Resistance percussion welding)

การเชื่อมกระทบเป็นขบวนการเชื่อมที่อาศัยความต้านทานของกระแสไฟฟ้าอีกชนิดหนึ่ง ที่นิยมใช้เชื่อมต่อชนกับจำพวกโลหะชิ้นงานขนาดเล็ก ๆ เช่น เส้นลวด (Wire metals) ขนาดต่าง ๆ หรือชิ้นส่วนที่มีลักษณะเป็นแท่งต่าง ๆ เช่น สลักเกลียว และเพลาเล็ก ๆ เป็นต้น โดยระบบการเชื่อมประกอบด้วย แหล่งพลังไฟฟ้า และขั้วอิเลคโทรดทั้งสองที่มีหน้าที่จับยึดชิ้นงานโลหะที่ต้องการเชื่อม โดยออกแบบการจับยึดให้เหมาะสมกับลักษณะรูปทรงของชิ้นงานเชื่อม เมื่อนำชิ้นงานเข้าตำแหน่งจับยึดที่ขั้วอิลคโทรด จากนั้นปล่อยกระแสไฟฟ้าเพื่อสร้างความร้อนจากระบบความต้านทานกระแสไฟฟ้า เมื่อชิ้นงานร้อนมากจนเกือบหลอมละลาย เครื่องเชื่อมจะปล่อยระบบกลไกแรงกระทบหรือแรงการตอก (Percussion) ให้ชิ้นงานเคลื่อนมากระทบกัน ด้วยความร้อนบวกกับแรงกระทบร่วมกันทำให้โลหะชิ้นงานสองชิ้นหลอมติดกันเป็นแนวเชื่อม ดังแสดงระบบของการเชื่อมดังกล่าวในรูปที่ 4.60

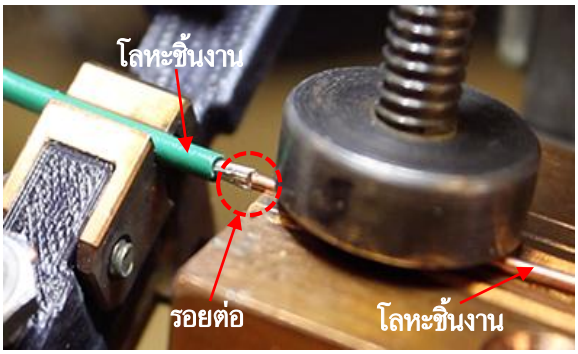


รูปที่ 4.60 ขบวนการเชื่อมกระทบด้วยความต้านทาน (Resistance percussion welding)

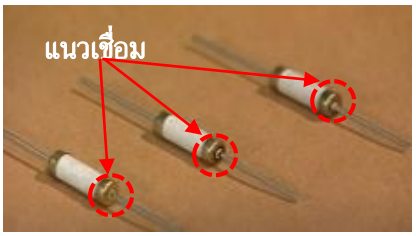
ที่มา : SNS Institutions, Welding Technology 2019 (เขียนใหม่)

การเชื่อมกระทบหรือการเชื่อมด้วยการตอกด้วยความต้านทานนี้มีหลักการที่คล้ายกับการเชื่อมแบบวาบ (FW) มักนิยมใช้กับลักษณะงานที่วิธีการเชื่อมวาบไม่สามารถเชื่อมได้ เช่น ชิ้นงานเชื่อมลวดขนาดเล็ก ๆ หรือชิ้นงานในลักษณะที่วิธีการอื่นไม่สามารถเชื่อมได้ โดยกรรมวิธีการเชื่อมนี้ใช้เวลาในการเชื่อมต่อชิ้นสั้นมาก โดยประมาณจะน้อยกว่า 0.1 วินาที เหตุเพราะจะสร้างความต้านเพื่อให้เกิดความร้อนในพื้นที่เฉพาะปลายชิ้นงาน (Particular area hetaing) ดังนั้น แนวเชื่อมจะไม่เกิดผลกระทบกับพื้นที่โลหะรอบข้างที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายได้ เช่น การเชื่อมวัสดุวงจรอิเลคทรอนิกส์พลาสติกที่หุ้มสายทองแดงจะไม่เสียหาย หรือการเชื่อมอุปกรณ์ชิ้นส่วนที่เสี่ยงต่อความเสียหาย ดังแสดงในรูปที่ 4.61(ก) และ (ข) ตามลำดับ และกรรมวิธีการเชื่อมนี้ยังเหมาะสำหรับการเชื่อมวัสดุโลหะต่างชนิดที่อาจมีจุดหลอมเหลวต่างกัน ค่านำความร้อนต่างกันรวมถึงขนาดความหนาที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.61 (ค) แต่อย่างไรก็ตามวิธีการเชื่อมนี้ก็ไม่สามารถที่จะเชื่อมโลหะชิ้นงานงานที่มีความหนามากเกินพื้นที่หน้าตัด 600 ตารางมิลลิเมตร โดยประมาณได้ และมักไม่นิยมเชื่อมวัสดุโลหะที่เหมือนกัน (Similar

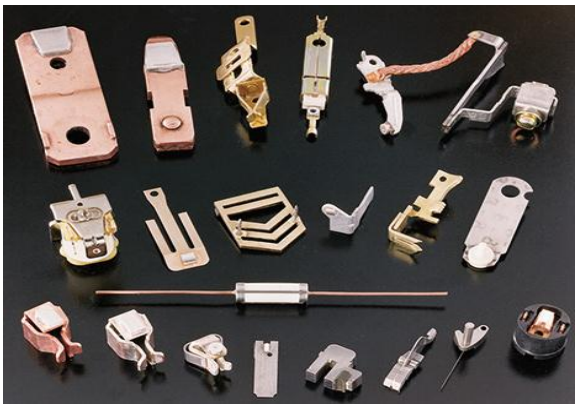
materials) แต่จะเหมาะกับการเชื่อมวัสดุโลหะที่ต่างชนิดกัน (Disimilar materials) ดังแสดงตัวอย่างขนาด ชนิดของวัสดุโลหะเชื่อมที่ต่างกัน และรูปทรงของผลิตภัณฑ์ที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมกระทบด้วยความต้านทานในรูปที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.61 (ง) อ้างอิงตาม AMADA WELD (2020)



(ก) การเชื่อมกระทบลวดทองแดงของสายไฟฟ้า
ที่มา : MTI Micro Welding, 2015



(ข) การเชื่อมกระทบอุปกรณ์ชิ้นส่วนที่เสี่ยงต่อความเสียหาย
ที่มา : TWI, Percussive Welding, 2015



(ง) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมกระทบ
ที่มา : HANSON Welding Machines, 2019

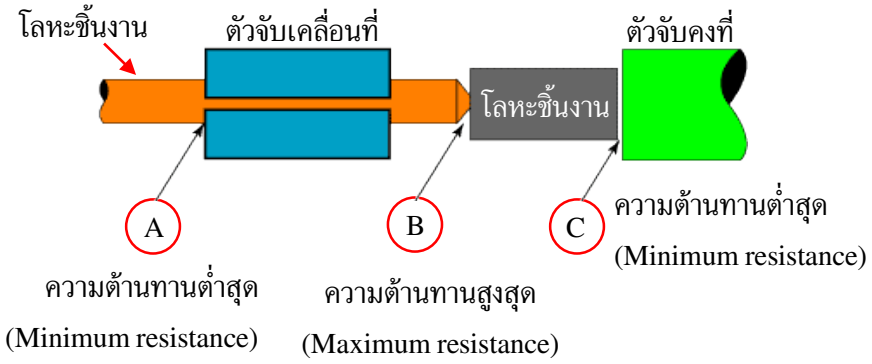


(ค) การเชื่อมกระทบโลหะต่างชนิด
ที่มา : SNS Institutions, Welding Technology 2019

รูปที่ 4.61 ลักษณะของการเชื่อมกระทบด้วยความต้านทานของผลิตภัณฑ์รูปแบบต่าง ๆ

สำหรับเครื่องเชื่อมที่ใช้กับขบวนการเชื่อมแบบกระทบด้วยความต้านทานนี้จะมีระบบหม้อแปลงกระแสไฟสำหรับการเชื่อมเหมือนกับเครื่องเชื่อมความต้านทานแบบอื่น ๆ แต่ได้มีการออกแบบระบบของวงจรไฟฟ้าที่สามารถสร้างความต้านทานแตกต่างกันของแต่ละตำแหน่งที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน โดยปกติของขบวนการเชื่อมนี้จะมีตำแหน่งของความต้านทานอยู่ 3 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.62 กล่าวคือ ตำแหน่ง A มีความต้านทานต่ำสุด (Minimum resistance) เหตุเพราะเป็นความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเลคโทรดกับผิวชิ้นงาน ซึ่งมีพื้นที่สัมผัสกันมากส่งผลต่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลกระจายความต้านทานไปทั่วผิวสัมผัสความต้านทานจึงต่ำ ลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นเหมือนกันกับตำแหน่ง C แต่สำหรับตำแหน่ง B เป็นตำแหน่งที่มีความต้านทานกระแสสูงสุด (Maximum resistance) เนื่องจาก

ปลายชิ้นงานที่เชื่อมมีลักษณะเรียวแหลมที่เรียกว่า Shisel point ด้วยเหตุที่กระแสไฟเชื่อมทั้งหมดไหลผ่านพื้นที่แคบและน้อย จะเกิดความหนาแน่นของกระแสขึ้นส่งผลให้ตำแหน่งนี้เกิดความต้านทานที่สูงสุด และเกิดความร้อนได้มากและรวดเร็ว ซึ่งเมื่อดันชิ้นงานเข้าหากันจึงเกิดการหลอมติดกันได้ง่ายและรวดเร็ว โดยปัจจัยการเชื่อมจะถูกกำหนดขึ้นตามขนาดของโลหะชิ้นงาน



รูปที่ 4.62 ตำแหน่งของการเกิดความต้านทานและความร้อนของขบวนการเชื่อมกระทบ

ที่มา : Comnent Inter Technologies, Inc., Percussive Arc Welding, 2007 (เขียนใหม่)

ชนิดของเครื่องเชื่อมที่ใช้มีหลายขนาดขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงานมีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 4.63



(ก) เครื่องเชื่อมกระทบแบบขนาดเล็ก

ที่มา : MTI, Microwelding, 2020



(ข) เครื่องเชื่อมกระทบแบบขนาดใหญ่

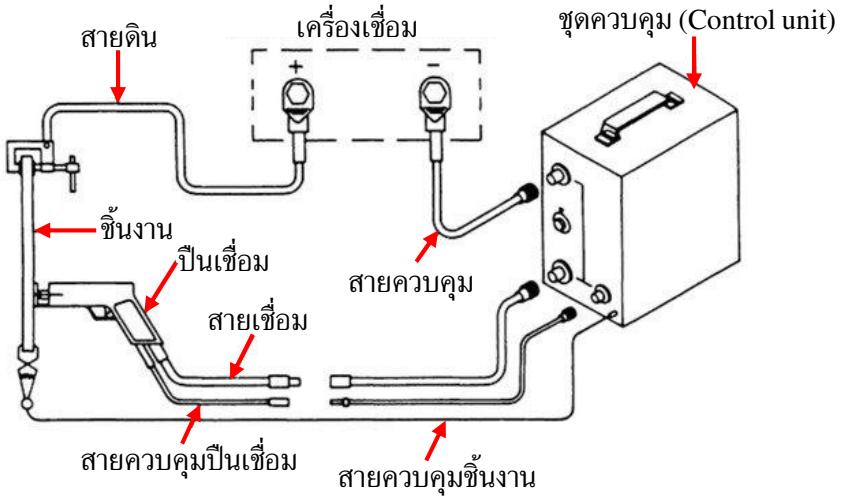
ที่มา : Pef Welding Engineering, Hennigsdorf, 2020

รูปที่ 4.63 เครื่องเชื่อมกระทบด้วยความต้านทาน

4.4 กรรมวิธีการเชื่อมสลักเกลียว (Stud Arc Welding : SW)

การเชื่อมสลักเกลียวหรือที่นิยมเรียกกันสั้น ๆ ว่า “เชื่อมสตัด” เป็นขบวนการเชื่อมที่จัดอยู่ในกลุ่มประเภทของการเชื่อมอาร์ก (Arc welding processes) เป็นวิธีการเชื่อมที่ค่อนข้างพิเศษเฉพาะงาน เป็นลักษณะงานที่ต้องการส่วนที่ยื่นออกมาจากชิ้นส่วนหลักที่เป็นโลหะแผ่น โดยไม่ต้องทำการเจาะหรือทำเกลียวบนพื้นที่ของแผ่นโลหะหลัก ได้แก่ลักษณะงานจำพวกสลักเกลียว (Bolt) สลักหมุด (Pin) สกรู (Screw) หรือเดือยแหลม (Spike) ต่าง ๆ เป็นต้น กล่าวไว้โดย Complete Stud Welding (2017)

ขบวนการเชื่อมจะใช้แหล่งกำลังงานจากเครื่องเชื่อมแบบหม้อแปลงเพื่อการอาร์ก โดยผ่านชุดควบคุม เมื่อเกิดการอาร์กการหลอมเหลวจะเกิดขึ้นกับผิวของโลหะแผ่นและที่ปลายของสลักเกลียว ซึ่งต่อจากนั้นปืนเชื่อมจะยิงหรือกดสลักเกลียวเข้าหาแผ่นโลหะเพื่อจะให้โลหะทั้งสองชิ้นติดกัน ดังแสดงระบบของขบวนการเชื่อมในรูปที่ 4.64 ขนาดและชนิดของโลหะที่ใช้เป็นสลักเกลียว (Bolt) กับโลหะแผ่น (Base metal) หลักเป็นตัวกำหนดปัจจัยของการเชื่อมได้แก่ กระแสไฟเชื่อม (Welding current) และเวลาอาร์ก (Arc time) ขบวนการเชื่อมนี้เป็นที่นิยมกันมาก อาจเป็นเพราะสามารถเชื่อมได้อย่างรวดเร็วและช่างเชื่อมไม่จำเป็นต้องมีทักษะที่สูงมาก และปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการเชื่อมสตัดแบบต่าง ๆ ที่ทันสมัย ทำให้ผลิตภัณฑ์มีมูลค่าเพิ่มขึ้น สะดวก ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูง



รูปที่ 4.64 ระบบของขบวนการเชื่อมสลักเกลียว (Stud arc welding)

ที่มา : ASM Metal Handbook Vol. 6, 1993. (ปรับปรุงใหม่)

เทคนิคการเชื่อมสลักเกลียวหรือการเชื่อมสตัด นิยมใช้งานกันมากในงานอุตสาหกรรมการผลิตและอุตสาหกรรมประกอบชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยเฉพาะชิ้นส่วนยานยนต์ มีเทคนิคหรือวิธีการเชื่อมที่ได้นำเสนอไว้ในงานวิจัยของ K Hartz−Behrend et al. (2014) โดยมีเป็นลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เทคนิคการเชื่อมสลักเกลียวด้วยการอาร์ก (Arc stud welding) ช่างเชื่อมมักเรียกเทคนิคนี้ว่า “การเชื่อมสตัดประกายไฟ” เป็นการเชื่อมสตัดที่มีรอยเชื่อมแข็งแรงสูงบนโลหะแผ่นงานที่บาง 2 มม.

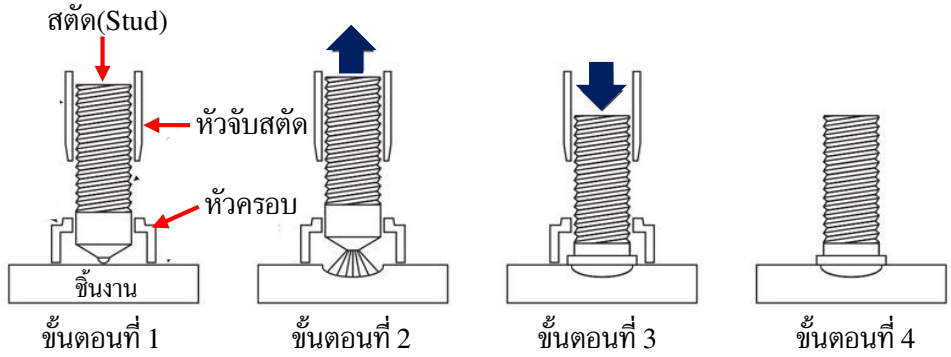
และใช้เวลาเชื่อมสั้นเพียง 0.06 วินาที โดยมีขั้นตอนของการเชื่อม 4 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 4.65 กล่าวคือ

ขั้นตอนที่ 1 นำสตัด (Stud) บรรจุเข้าไปในตำแหน่งหัวจับสตัด (Chuck) ของปืนเชื่อม โดยที่บริเวณปลายของสตัดต้องมีหัวครอบเซรามิกส์ (Ferrule) ติดไว้ที่ปลายปาก (เพื่อทำหน้าที่กักเก็บโลหะหลอมเหลวที่เกิดจากการอาร์กให้อยู่ภายใน) ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.66 แล้วนำปืนเชื่อมไปวางตำแหน่งที่ต้องการเชื่อม

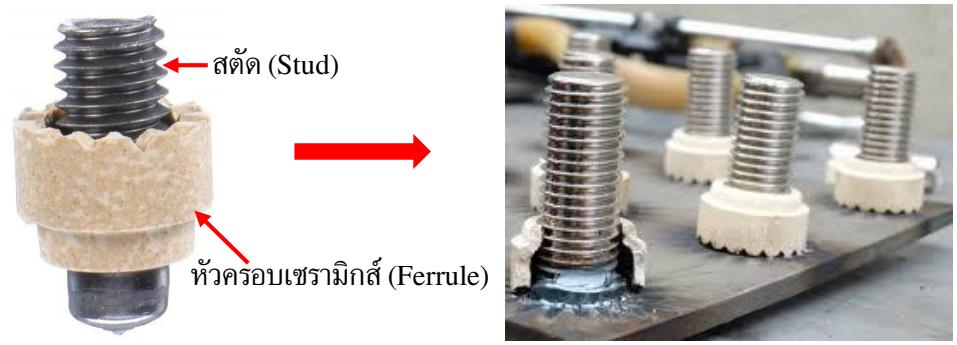
ขั้นตอนที่ 2 ทำการกดไกปืนเชื่อมเพื่อให้กระแสไฟฟ้าส่งสัญญาณของการปล่อยพลังงานมาที่ชุดกลไกของปืน ให้เคลื่อนสตัด (Stud) ออกมาเพื่อให้เกิดการอาร์ก (Arc) ขึ้นระหว่างหัวสตัดกับผิวโลหะงาน (Base metal) ขณะที่อาร์กสตัดจะถูกดันขึ้นสูงเนื่องจากแรงดันของการอาร์ก

ขั้นตอนที่ 3 เกิดการหลอมละลายและปลายสตัดจะถูกกดให้จม (Sinking) ลงไปในบ่อหลอมละลาย พร้อมกับลดพลังงานของการอาร์กลง

ขั้นตอนที่ 4 โลหะหลอมเหลวเย็นตัวลงและเกิดการเชื่อมติดกันอย่างสมบูรณ์ของหัวสตัดกับชิ้นงานโลหะด้วยแนวเชื่อม ปืนเชื่อมพร้อมหัวครอบก็จะยกตัวขึ้นและเคลื่อนออกมาเสร็จสิ้นขบวนการเชื่อม



รูปที่ 4.65 ขั้นตอนของเทคนิคการเชื่อมสลักเกลียว/สตัดด้วยการอาร์ก (Arc stud welding)
ที่มา : K. Hartz-Behrend et.al., Journal of Physic : Conference Series 550, 2014. (ปรับปรุงใหม่)



รูปที่ 4.66 การสวมหัวครอบเซรามิกส์ (Ferrule) เข้ากับปลายสตัด
ที่มา : EXTREME : Bolt & Fastener-Inconel weld studs, 2018

การประยุกต์ใช้งานเทคนิคการเชื่อมสลักเกลียวด้วยการอาร์ก (Arc stud welding)

- เหมาะสำหรับสตัดที่ผลิตจากโลหะเหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิม อลูมิเนียม และทองเหลืองขนาด M6–M22
- เหมาะสำหรับการเชื่อมบนโลหะแผ่นบางไม่น้อยกว่า 2 มม. โดยมีระยะจมของสตัดบนผิวโลหะงานเพียง 1–3 มม. โดยใช้เวลาเชื่อมสั้นมากเมื่อเทียบกับวิธีการเชื่อมแบบอื่น ๆ
- เหมาะสำหรับงานโครงสร้างต่าง ๆ หรืองานที่เกี่ยวกับอุสาหกรรมการต่อเรือ เป็นต้น
- เหมาะสำหรับผิวงานที่ไม่สะอาดมากนัก เพราะมีหัวครอบเซรามิกส์ (Ferrule) ช่วยในการกักของเหลวจากการหลอมละลาย ซึ่งเป็นตัวช่วยขจัดสิ่งสกปรกบนผิวชิ้นงานของตำแหน่งที่ทำการเชื่อม
- เหมาะสำหรับงานที่ต้องการโชว์พื้นผิวงาน เพราะเกิดเป็นร่อยรอยของการเชื่อมเพียงด้านเดียว
- เหมาะสำหรับงานที่ต้องการรอยเชื่อมสตัดที่แข็งแรง ป้องกันการสั่นสะเทือนที่อาจเกิดการหลุดของรอยต่อได้เป็นอย่างดี และสามารถเชื่อมบนโลหะชิ้นงานที่มีสีเคลือบผิวได้

เครื่องเชื่อมและหัวเชื่อมสตัดแบบอาร์ก (Arc stud welding machine and welding gun)

เครื่องเชื่อมและหัวเชื่อมของกรรมวิธีการเชื่อมสตัดแบบการอาร์ก เป็นการเชื่อมที่นิยมใช้กันมากทั้งในงานที่เป็นระบบการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมและงานภาคสนามทั่ว ๆ ไป เหตุผลเพราะเป็นการเชื่อมเสริมชิ้นส่วนย่อยกับกับชิ้นส่วนหลัก ได้แก่ เชื่อมจำพวก Bolt กับ Nut สลักหมุดต่าง ๆ เข้ากับแผ่นโลหะเพื่อการประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดังนั้น ผู้ผลิตเครื่องเชื่อมได้มีการออกแบบเครื่องเชื่อมให้เหมาะสมกับลักษณะของงาน ซึ่งมีทั้งเครื่องเชื่อมแบบปกติที่ใช้กับงานกันทั่ว ๆ ไป (Stationary stud welding machine) และเครื่องเชื่อมแบบพกพาสามารถเคลื่อนที่ไปใช้ในที่ต่าง ๆ ได้ (Portable stud welding machine) และแบบติดตั้งประจำในระบบสายการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นระบบการเชื่อมอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยระบบ CNC (Automatic stud welding machine) ดังแสดงตัวอย่างของเครื่องเชื่อมทั้งสามแบบในรูปที่ 4.67 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ โดยมีปืนเชื่อมเป็นองค์ประกอบสำคัญ ซึ่งปืนเชื่อมมีการออกแบบรูปร่างและรูปทรงที่หลากหลายเพื่อให้สามารถนำไปใช้กับเครื่องเชื่อมแต่ละชนิดหรือตามลักษณะของงานที่เหมาะสม โดยมีองค์ประกอบหลักในการใช้งานของชิ้นส่วนปืนเชื่อมจะเหมือนกัน มีเพียงส่วนประกอบเสริมบางส่วนที่นำมาประกอบเพื่อลักษณะเฉพาะงานบางอย่าง ดังแสดงตัวอย่างรูปทรงของปืนเชื่อมที่นิยมใช้งานกันในรูปที่ 4.67 (ง) เป็นข้อมูลที่ให้คำแนะนำในการเลือกเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับขบวนการเชื่อมแบบสตัดอาร์ก โดยผู้ผลิต THOMAS –Welding systems (2013) และผู้ผลิต Weldtron Engineering (2018)



(ก) เครื่องเชื่อมสตัดแบบเคลื่อนที่

ที่มา : THOMAS –Welding systems, 2013



(ข) เครื่องเชื่อมสตัดแบบพกพา

ที่มา : Nelson –Portable welding machine, 2016



(ค) เครื่องเชื่อมสตัดแบบระบบ CNC

ที่มา : HBS – Stud welding automated CNC, 2017

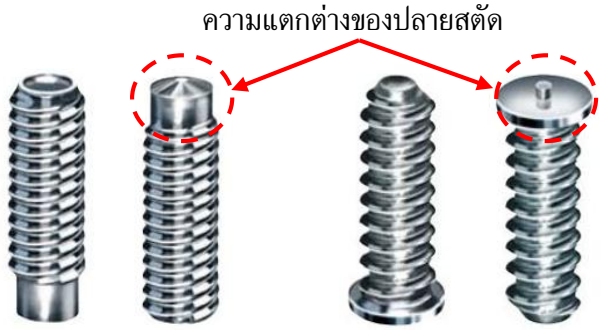


(ง) ลักษณะรูปทรงของปืนเชื่อมแบบต่าง ๆ ที่นิยมใช้งาน

ที่มา : Weldtron Engineering – Stud welding gun, 2018

รูปที่ 4.67 เครื่องเชื่อมและหัวเชื่อมของการเชื่อมสตัดแบบการอาร์ก (Arc stud welding)

2. เทคนิคการเชื่อมสลักเกลียวด้วยวิธีการปล่อยประจุ (Capacitor discharge stud welding) ช่างเชื่อมมักเรียกเทคนิคนี้ว่า “การเชื่อม CD stud” เป็นการเชื่อมสลักเกลียวหรือสลักหมุดต่าง ๆ ที่ต้องใช้แบบสตัดที่มีลักษณะด้านปลายมีปุ่มส่วนยื่นออกมา (Ignition tip) ซึ่งแตกต่างกับสตัดที่ใช้ในการเชื่อมแบบอาร์ก ดังแสดงการเปรียบเทียบปลายของสตัดที่แตกต่างกันในรูปที่ 4.68 สำหรับกรรมวิธีการเชื่อมนี้จะมีลักษณะที่คล้ายกับวิธีการเชื่อมแบบอาร์กค่อนข้างมาก โดยการเชื่อมแบบการปล่อยประจุจะมีอุปกรณ์ชุดเก็บประจุไฟในการผลิตและปล่อยพลังงาน โดยไม่จำเป็นต้องมีหัวครอบเซรามิกส์ (Ferrule) ที่ใช้เก็บโลหะหลอมเหลวเหมือนกับการเชื่อมแบบอาร์ก อ้างอิงข้อมูลจาก A. Magda et al. (2018)



รูปที่ 4.68 การเปรียบเทียบความแตกต่างของลักษณะรูปร่างของตัวสตัด *ที่มา : EXTREME : Bolt & Fastener–Inconel weld studs, 2018*

(ก) สตัดสำหรับวิธีเชื่อมแบบอาร์ก **(ข)** สตัดสำหรับวิธีเชื่อมแบบปล่อยประจุ

ขั้นตอนการเชื่อมสตัดแบบปล่อยประจุ (CD process) ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 4.69

ขั้นตอนที่ 1 นำสตัด (Stud) ที่ออกแบบใช้เฉพาะแบบปล่อยประจุบรรจุเข้าไปในหัวจับสตัด (Chuck) ทางด้านปลายของปืนเชื่อม จากนั้นนำไปวางที่ตำแหน่งต้องการเชื่อม โดยกำหนดความแม่นยำจากปลายของปุ่มยื่นสตัด (Ignition tip) จะต้องตรงและสัมผัสกับพื้นผิวของแผ่นโลหะชิ้นงานเชื่อม

ขั้นตอนที่ 2 กดไกปืนเชื่อมเพื่อปล่อยพลังงานออกมาจากตัวเก็บประจุทันที (Capacitor discharge) โดยประจุจะวิ่งผ่านปุ่มยื่นของปลายสตัด ซึ่งปกติมีขนาดเล็กจึงไม่สามารถทนต่อพลังงานปริมาณที่มากที่ถูกปล่อยออกมาจึงเกิดการหลอมละลาย

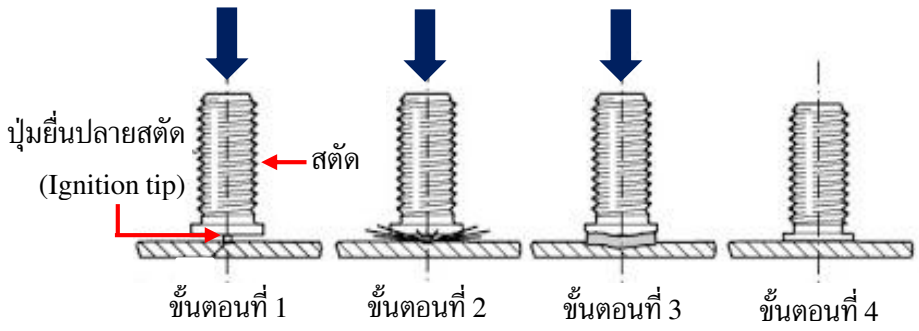
ขั้นตอนที่ 3 ขณะที่ปุ่มยื่นของสตัดเกิดการหลอมละลายเป็นช่วงเวลาอันสั้น จะเกิดช่องว่าง (Gap) ขึ้นระหว่างปลายสตัดกับผิวชิ้นงาน ซึ่งเป็นเวลาเดียวกันที่ปืนเชื่อมกดอัดปลายสตัดเข้าหาแผ่นโลหะชิ้นงานผ่านโลหะหลอมเหลวเมื่อโลหะเย็นลงชิ้นงานจะติดกันเป็นแนวเชื่อม

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อครบรอบเวลา (Cycle time) ปืนเชื่อมจะถูกดันขึ้นจากสตัดที่เชื่อมเสร็จเรียบร้อยเป็นอันเสร็จสิ้นขั้นตอนการเชื่อมสตัดแบบปล่อยประจุ ดังแสดงตัวอย่างการเชื่อมและชิ้นงานเชื่อมเสร็จในรูปที่ 4.70

การประยุกต์ใช้งานเทคนิคการเชื่อมสลักเกลียวด้วยการปล่อยประจุ (CD stud welding)

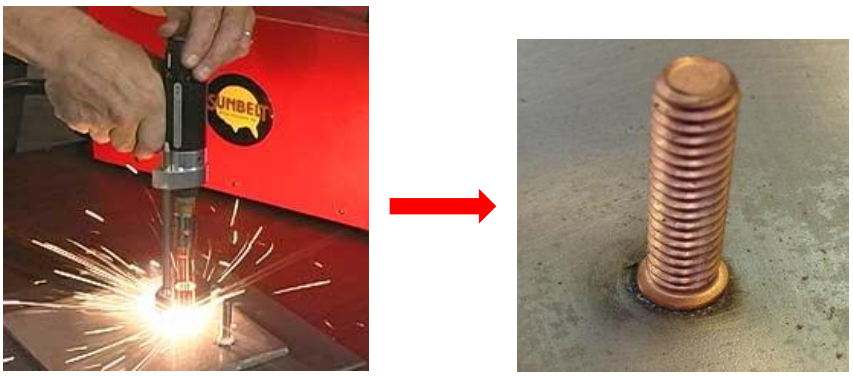
- เหมาะสำหรับสตัดที่ผลิตจากโลหะเหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิม อลูมิเนียม และทองเหลืองขนาด M3–M8

- เหมาะสำหรับการเชื่อมบนโลหะแผ่นงานที่บางน้อยกว่า 0.5 มม. โดยมีระยะจมของสตัดบนผิวโลหะงานเพียง 0.1 มม.
- เหมาะสำหรับงานชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็ก ๆ น้ำหนักเบา เพราะใช้เวลาในการเชื่อมสั้นมาก เช่น ใช้เวลาเพียง 0.01 วินาที กับชิ้นงานที่มีขนาด 0.02 นิ้ว
- เหมาะสำหรับงานที่ต้องการโชว์พื้นผิวงาน เพราะความร้อนจากการเชื่อมน้อย ลดปัญหาการไหม้หรือทำลายสารเคลือบบนพื้นผิวชิ้นงาน เกิดเป็นร่องรอยของการเชื่อมเพียงด้านเดียว
- เหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะต่างชนิดที่มีจุดหลอมเหลวหรือหนาบางแตกต่างกันได้ดี เพราะรอยเชื่อมมีระยะลึกเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.69 ขั้นตอนของเทคนิคการเชื่อมสตัดด้วยการปล่อยประจุ (CD stud welding)

ที่มา : THOMAS–Welding : Stud welding, 2013



(ก) การเชื่อมสตัดด้วยวิธีการปล่อยประจุ **(ข)** ตัวอย่างชิ้นงานเชื่อม

รูปที่ 4.70 วิธีการเชื่อมสตัดด้วยการปล่อยประจุและชิ้นงานเชื่อมเสร็จ

ที่มา : Sunbelt : Studwelding INC, 2018

เครื่องเชื่อมและหัวเชื่อมสตัดแบบปล่อยประจุ (CD stud welding machine and welding gun)

เครื่องเชื่อมและหัวเชื่อมของกรรมวิธีการเชื่อมสตัดแบบปล่อยประจุ มีระบบกลไกการทำงานคล้ายกับการเชื่อมสตัดแบบอาร์ก ต่างกันที่การออกแบบให้เหมาะสมกับปัจจัยการเชื่อมโลหะแผ่นที่มีขนาดบาง ๆ ซึ่งประเภทของเครื่องเชื่อมและปืนเชื่อมได้แสดงไว้เป็นตัวอย่างในรูปที่ 4.71



(ก) เครื่องเชื่อมสตัดแบบเคลื่อนที่

ที่มา : TAYLOR–Stud welding systems, 2011



(ข) เครื่องเชื่อมสตัดแบบพกพา

ที่มา : TAYLOR–Stud welding systems, 2011



(ค) เครื่องเชื่อมสตัดแบบระบบอัตโนมัติ

ที่มา : Motoman– Stud welding robot, 2012



หัวเชื่อมสำหรับเครื่องเชื่อมสตัดแบบระบบอัตโนมัติ (Automatic stud welding head)







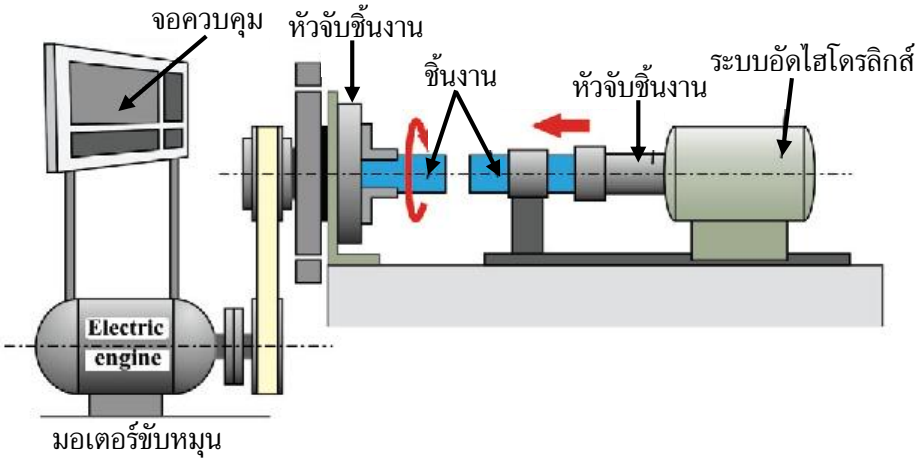
(ง) ลักษณะรูปทรงของปืนเชื่อมแบบต่าง ๆ ที่นิยมใช้งาน

ที่มา : THOMAS Welding systems, 2014

รูปที่ 4.71 เครื่องเชื่อมและหัวเชื่อมของการเชื่อมสตัดแบบปล่อยประจุ (CD stud welding)

4.5 กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทาน (Friction Welding : FRW)

Eder paduan Alves (2012) ได้กล่าวถึงกรรมวิธีการเชื่อมวิธีนี้ว่า เป็นการเชื่อมที่อาศัยหลักการของแรงเสียดทานหรือบางครั้งเรียกว่าแรงเสียดสีของวัสดุที่ต้องการที่จะเชื่อมต่อกันมาสัมผัสกัน โดยปราศจากพลังงานไฟฟ้า ปราศจากการอาร์ก แต่อาศัยความร้อนเพื่อการหลอมเชื่อมต่อกันด้วยแรงเสียดทานทางกล (Friction mechanical) ดังองค์ประกอบของขบวนการเชื่อมในรูปที่ 4.72 ซึ่งมีลำดับขั้นตอนของการเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.73 ดังคำอธิบายของหลักการปฏิบัติการในแต่ละขั้นตอนดังต่อนี้



รูปที่ 4.72 ระบบวิธีการเชื่อมเสียดทาน (Friction welding process)

ที่มา : Eder Paduan Alves : J. Aerosp. Technol. Manag. Vol. 4 No.1, 2012

ขั้นตอนวิธีการเชื่อมเสียดทาน (Step of friction welding process)

ลำดับขั้นตอนของขบวนการเชื่อมที่อาศัยความร้อนจากแรงเสียดทานนี้ มี 4 ขั้นตอน ไม่ว่าจะเป็นวัสดุชนิดหรือประเภทใด เช่น โลหะกลุ่มเหล็ก/นอกกลุ่มเหล็ก และรูปทรงของวัสดุเป็นแบบใด เช่น เป็นรูปแท่งทรงกลม แผ่นเรียบ แท่งเหลี่ยม หรือรูปทรงระบอก จะแตกต่างกันเฉพาะปัจจัยการเชื่อมเท่านั้น โดยขั้นตอนปฏิบัติการเชื่อม ดังนี้

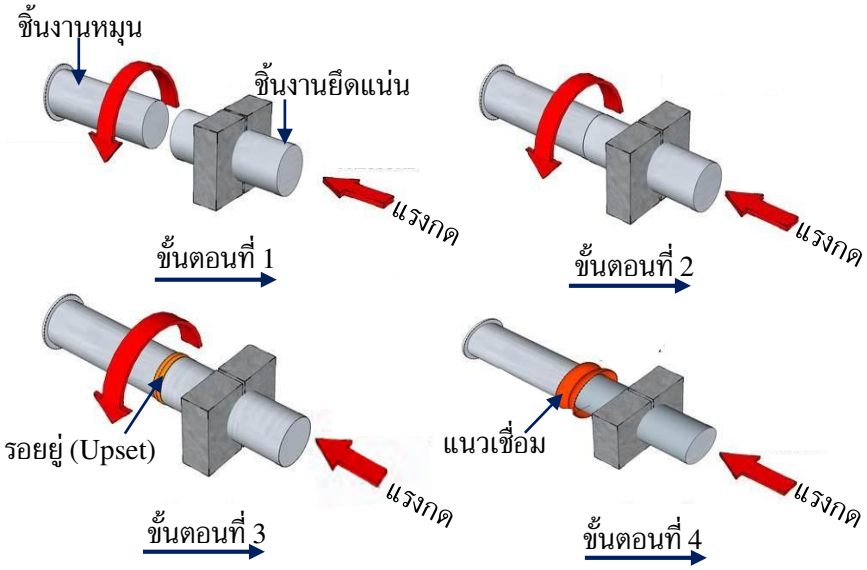
ขั้นตอนที่ 1 นำชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมที่ผ่านการเตรียมผิวหน้าสำหรับการต่อชน (Butt joints) ทั้งสองชิ้นมาจับยึดบนเครื่องเชื่อม (อาจเป็นเครื่องจักรกลประยุกต์) โดยชิ้นงานที่เชื่อมหนึ่งชิ้นจับยึดกับหัวจับด้านไม่เคลื่อนที่ (Non−rotating) กับอีกชิ้นหนึ่งชิ้นจับยึดกับหัวจับด้านเคลื่อนที่ (Rotating) จากนั้นปรับตั้งปัจจัยของการเชื่อมที่ชุดควบคุมการเชื่อม ซึ่งประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลัก คือ ความเร็วรอบของการเคลื่อนที่ (Rotation speed : rpm) ความเร็วในการเชื่อม (Welding speed : mm/min) และแรงกด (Pressure/Down force : Nm) โดยเริ่มทำการเชื่อมด้วยการเคลื่อนชิ้นงานเข้าหากัน

ขั้นตอนที่ 2 เมื่อชิ้นงานด้านหมุนเคลื่อนที่สัมผัสกับชิ้นงานด้านคงที่ จากทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นงานตรงกันข้ามจึงเกิดการเสียดสีกันของผิวหน้าชิ้นงาน ขณะเดียวกันมีการเพิ่มแรงกดกับชิ้นงานจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นและจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อปริมาณความร้อนจากการเสียดทาน/เสียดสีสูงมากพอที่จะทำให้เนื้อโลหะบริเวณผิวหน้าสัมผัสเกิดการอ่อนตัวจนเกือบหลอมเหลว (Non–melting) เนื้อโลหะส่วนที่อ่อนตัวจะผสมผสานกันโดยมีแรงช่วยกดอัดตลอดเวลา

ขั้นตอนที่ 4 เป็นขั้นตอนที่ชิ้นงานด้านหมุนเคลื่อนที่หยุดทำงาน จะมีเพียงชิ้นงานด้านจับยึดคงที่ถูกอัดด้วยแรงเพื่อให้เนื้อโลหะที่ผสมผสานติดกันแน่นมากยิ่งขึ้น และเย็นตัวได้แนวเชื่อมที่สมบูรณ์ โดยแนวเชื่อมอาจเกิดระยะรอยยู่ (Total of upset length) มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแต่ละปัจจัยการเชื่อมหรือแต่ละชนิดของวัสดุโลหะเชื่อมซึ่งระยะยู่ (Upset) บางลักษณะงานจะมีการกำจัดออกไป

จากคำอธิบายของแต่ละขั้นตอนของขบวนการเชื่อมดังกล่าวข้างต้น สามารถสร้างเป็นแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละลำดับขั้นตอนเพื่อความง่ายต่อการเข้าใจ และแสดงถึงลำดับความสัมพันธ์กันของปัจจัยการเชื่อมในระหว่างการเชื่อมได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.74

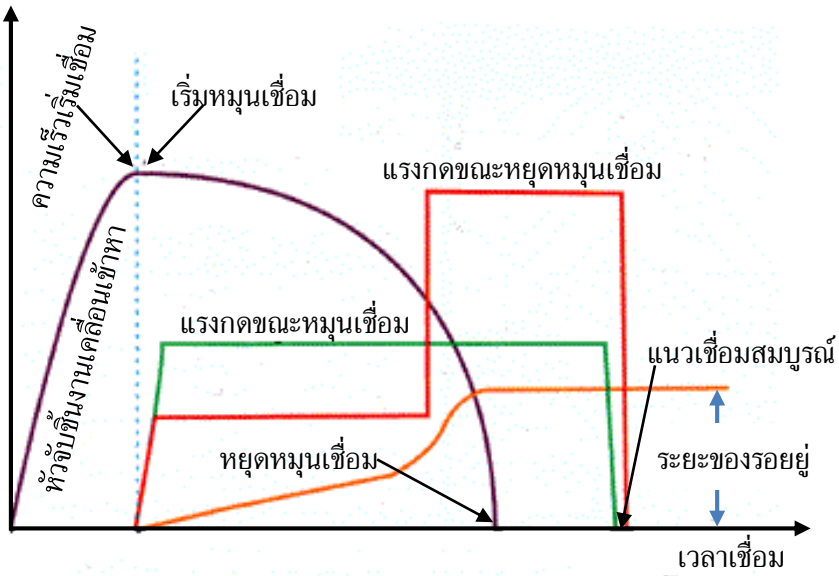


รูปที่ 4.73 ขั้นตอนวิธีการเชื่อมเสียดทาน (Step of friction welding process)

ที่มา : Anonio M. Mateo Garcia, Advances Gas Turbine Technology. 2011

เทคนิคของวิธีการเชื่อมเสียดทาน (Technic of friction welding process)

F Khalfallah et al. (2020) ได้กล่าวถึงเทคนิคการเชื่อมเสียดทานว่านิยมเชื่อมต่อกับวัสดุโลหะที่มีสมบัติอ่อนตัวได้ดี และเหมาะกับการเชื่อมโลหะต่างชนิด (Dissimilar welding) โดยเฉพาะโลหะที่มีปัญหาเกิดข้อบกพร่องได้ง่ายจากการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Melting welding process) หรือโลหะต่างชนิดที่มีจุดหลอมเหลวต่างกันมาก เป็นต้น จากการศึกษาค้นคว้าถึงพัฒนาการด้านเทคโนโลยีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน พบว่า ปัจจุบันเทคนิคการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ ประเภทที่ต้องใช้เครื่องมือ (Tool welding) กับประเภทที่ไม่ต้องใช้เครื่องมือ (Non–tool welding) ดังรายละเอียดเพิ่มเติม ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.74 ความสัมพันธ์ขณะเชื่อมของปัจจัยการเชื่อมเสียดทาน

ที่มา : F. Khalfallah , International Rewiew of Applied Sciences and Engineering. Vol. 11, 2020

เทคนิคการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน เป็นเทคนิคที่เกิดจากการประยุกต์ใช้งานของช่างเชื่อมที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม เช่น เป็นชิ้นงานโลหะแผ่นเรียบ ชิ้นงานแท่งกลม/แท่งเหลี่ยม หรือชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมต่อเกย (Lap joint) เป็นต้น ซึ่งเทคนิคที่สามารถพบเห็นและนิยมใช้เชื่อมงานกันในปัจจุบัน มี 4 วิธี โดยจะได้อธิบายความแตกต่างกันของแต่ละเทคนิคการเชื่อมดังต่อไปนี้

1. เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding : FSW) ดังแสดงองค์ประกอบของขบวนการเชื่อมในรูปที่ 4.75 (ก) เป็นเทคนิคการเชื่อมแบบแรกดั้งเดิมของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในชื่อว่าการเชื่อมแบบกวน (Stir welding) เพราะเทคนิคการเชื่อมนี้จะมีเครื่องมือ (Tool) เป็นตัวกวน โดยที่ปลายของเครื่องมือมีหัวกวน (Probe/Pin) ทำหน้าที่กวนเนื้อโลหะให้เกิดการอ่อนตัวจนเกือบหลอมละลายและผสมผสานกัน ซึ่งลักษณะรูปทรงของหัวกวนมีการออกแบบที่หลากหลาย เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะของงานที่ต้องการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.75 (ข) เทคนิคการเชื่อมนี้จะเหมาะกับการเชื่อมต่อชน (Butt joint) ชิ้นงานโลหะแผ่นเรียบ

ลำดับขั้นตอนของการเชื่อมแบบ FSW มี 4 ขั้นตอนหลักสำคัญ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.75 (ค) กล่าวคือ

ขั้นตอนที่ 1 นำโลหะชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมจับยึดแน่นคงที่บนเครื่องจักร โดยหัวกวนจับยึดอยู่กับแกนเพลาหมุนที่สามารถหมุนได้ (Rotating) และเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงานเชื่อมได้ด้วยอาศัยกำลังของเครื่องจักร ซึ่งทิศทางการเคลื่อนก็คือทิศทางของการเชื่อม (Welding direction)

ขั้นตอนที่ 2 เคลื่อนหัวกวนเข้าหาชิ้นงานโลหะ และกดหัวกวนลงในช่องว่างระหว่างรอยต่อบนชิ้นงานเชื่อม (Plunging) ซึ่งที่หัวกวนกำลังหมุนจะเกิดแรงเสียดสีกันหรือเสียดทานกัน และเริ่มเกิดความร้อนขึ้นและจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ

ขั้นตอนที่ 3 เนื้อโลหะที่ร้อนอ่อนตัวจนเกือบหลอม ในขณะที่หัวกวนหมุนก็จะนำเอาเนื้อโลหะกวนมาผสมผสานกันจนเกิดได้เป็นบริเวณแนวเชื่อมตามขนาดของหัวกวน (Welding) ขั้นตอนนี้หัวกวนจะหมุนกวนไปอย่างต่อเนื่องตลอดความยาวของตำแหน่งงานที่ต้องการเชื่อม

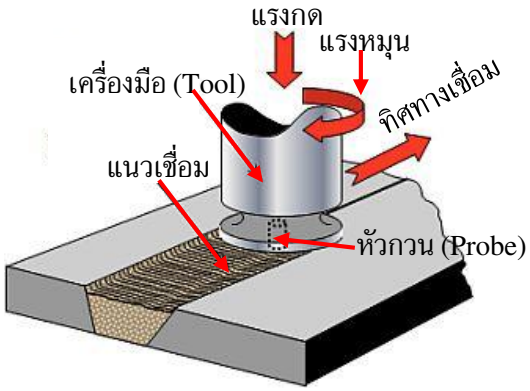
ขั้นตอนที่ 4 เมื่อสิ้นสุดตำแหน่งงานที่ต้องการเชื่อมหัวกวนจะถูกเครื่องจักรถอยแรงกดออกชิ้นงาน (Pull off) ก็จะได้ชิ้นงานเชื่อมติดกัน โดยปกติที่จุดสิ้นสุดการกวนมักเกิดเป็นรูของหัวกวนที่เรียกว่า Keyhole ซึ่งถือเป็นข้อบกพร่อง ดังนั้น ต้องเคลื่อนหัวกวนให้เลยตำแหน่งของปลายสุดของชิ้นงานที่ต้องการออกไปเล็กน้อย

สำหรับปัจจัยของการเชื่อมด้วยเทคนิคการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (FSW) ต้องพิจารณาถึงปัจจัยหลัก 3 ส่วนสำคัญ คือ วัสดุ (Materials) เครื่องมือ/หัวกวน (Tool/Probe) และเครื่องจักรต้นกำลัง (Machince) ดังแสดงในตางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ปัจจัยการเชื่อมด้วยเทคนิคการเชื่อมด้วยเสียดทานแบบกวนที่ต้องพิจารณา

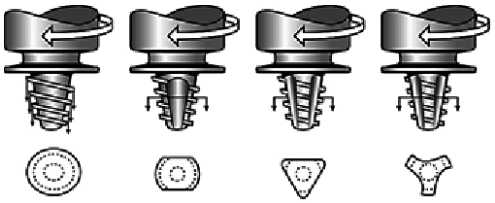
ที่มา : วรพจน์ ศิริรักษ์ และคณะ วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยเชียงใหม่ 23 (3) 64–82 2016

วัสดุ (Materials)	เครื่องมือ/หัวกวน (Tool/Probe)	เครื่องจักรต้นกำลัง (Machince)
ปัจจัยที่ต้องพิจารณา 1.ชนิดของวัสดุ (Type of materials) การเชื่อมกรรมวิธีนี้สามารถเชื่อมได้ทั้งโลหะนอกกลุ่มเหล็กและกลุ่มเหล็กแต่จะนิยมเชื่อมโลหะที่มีสมบัติอ่อนเหนียว 2. ความหนาของวัสดุ (Thickness) ที่ต่างกันมีผลต่อการปรับปัจจัยการเชื่อม 3. การเชื่อมต่อสามารถเชื่อมได้ทั้งวัสดุชนิดเดียวกัน (Similar) และต่างชนิดกัน (Dissimilar)	ปัจจัยที่ต้องพิจารณา 1. การออกแบบรูปทรงของหัวกวนซึ่งมีหลากหลายแบบ ได้แก่ – ทรงกรวย – ทรงกรวยเกลียว – ทรงกระบอก – ทรงกระบอกเกลียว – ทรงสี่เหลี่ยม – ทรงสามเหลี่ยม 2. เครื่องมือ (Tool) – วัสดุทำเครื่องมือ –ขนาดของบ่าเครื่องมือ (Shoulder tool size) – ขนาดของหัวกวน (Probe size)	ปัจจัยที่ต้องพิจารณา 1. ความเร็วรอบหมุนของเครื่องจักร (rpm) 2. ความเร็วเดินเชื่อม (mm/min) 3. แรงกดแนวแกน (kN) 4. ระยะกดลึก (mm) 5. มุมเอียงเครื่องมือกวน (^{o})



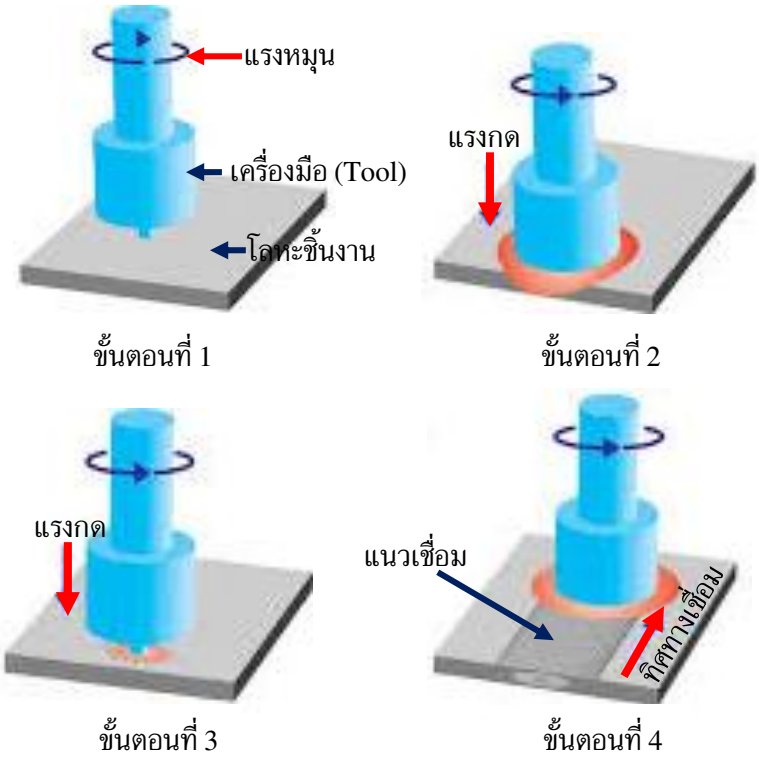
(ก) กรรมวิธีการเชื่อมแบบ FSW

ที่มา : Friction Stir Welding Seminar Report, 2017



(ข) ชนิดของหัวกวนการเชื่อมแบบ FSW

ที่มา : FSW: Development & Trends, 2013



(ค) ขั้นตอนของการเชื่อมแบบ FSW

ที่มา : Metallo., Micro. and Analysis 8: 713–725 , 2019

รูปที่ 4.75 เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding : FSW)

2. เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Friction stir spot welding : FSSW) Daniela Lohwasser et al. (2010) กล่าวถึงเทคนิคการเชื่อมวิธีนี้ว่ามีขบวนการเชื่อมและองค์ประกอบของการเชื่อมที่คล้าย

กับเทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) โดยมีเครื่องจักรเป็นต้นกำลังของการหมุน (Rotating) กับการกด (Press) ตัวเครื่องมือจะแตกต่างกันที่วิธีนี้ตัวเครื่องมือ (Tool) ไม่ได้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง (Non linear movement) แต่จะเคลื่อนที่ขึ้นลงเป็นตำแหน่งจุด (Spot) ดังแสดงองค์ประกอบของขบวนการเชื่อมในรูปที่ 4.76 (ก) และนอกจากนี้ลักษณะของตัวเครื่องมือจะแตกต่างกันเล็กน้อยตรงส่วนของปลายหัวกวน (Pin) ปลายจะยาวลึกกว่าเพราะนิยมใช้กับการเชื่อมโลหะแผ่นแบบต่อเกย (Lap joint) ลักษณะรูปทรงของหัวกวนที่นิยมกันมีทั้งแบบทรงกระบอกตรง (Straight cylindrical) แบบทรงกระบอกเรียว (Tapered cylindrical) และสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal) แสดงในรูปที่ 4.76 (ข)

ขั้นตอนของการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุด (FSSW) ซึ่งโดยขั้นตอนพื้นฐานของขบวนการเชื่อมที่จุดเดียว มี 3 ลำดับขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 4.76 (ค)

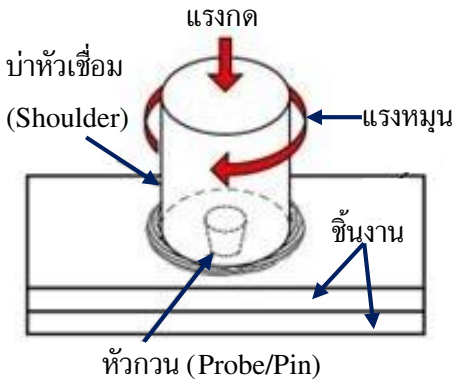
ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนนี้เรียกว่า “ Plunging” นำโลหะชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมวางเกยทับกันพร้อมกับการจับยึดบนฐานรองของเครื่องจักรที่ใช้เชื่อม จากนั้นก็เริ่มหมุนหัวกวน (Rotation) พร้อมกับใช้แรงกด (Pression) ให้เคลื่อนเข้าหาโลหะชิ้นงาน

ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนนี้เรียกว่า “ Stirring” โลหะชิ้นงานแผ่นบนที่โดนกวนก่อนก็จะเกิดความร้อนและอ่อนตัวจนเกือบหลอมเหลวก่อน โดยจะต่อเนื่องไปจนถึงโลหะชิ้นงานแผ่นล่าง ซึ่งรัศมีของความร้อนจะเท่ากับขนาดความกว้างของหัวกวน ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการผสมผสานของเนื้อโลหะที่อ่อนตัวเป็นเนื้อเดียวกัน

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนนี้เรียกว่า “ Drawing out” ขั้นตอนนี้จะหยุดการหมุนกวนแล้วรอจนเนื้อโลหะเย็นตัวจากนั้นก็ถอยแรงกดออกจากชิ้นงานก็จะได้เป็นแนวเชื่อมแบบจุด (Spot weldment) ที่สมบูรณ์

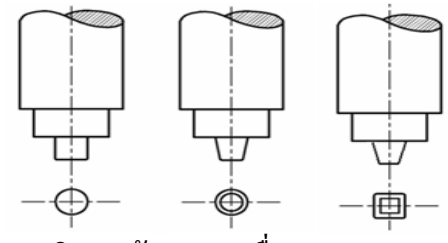
แนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุด (FSSW) โดยปกติที่จุดกึ่งกลางของจุดเชื่อมจะมีลักษณะที่เป็นรู/หลุม (Keyhold) เกิดขึ้นเสมอโดยเกิดจากอิทธิพลของหัวกวนที่ถอยออกหลังจากเนื้อโลหะเย็นตัวไปแล้ว ดังแสดงลักษณะของรอยเชื่อมดังกล่าวในรูปที่ 4.77 (ก) ซึ่งสำหรับแนวเชื่อมของชิ้นส่วนบางประเภทถือว่าเป็นรอยตำหนิหรือผิวชิ้นงานไม่สวยงาม ที่เป็นขีดจำกัดของการเชื่อมวิธีนี้ ในวงการเทคโนโลยีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทายได้พยายามพัฒนาคิดค้นและแก้ปัญหา จึงเกิดเทคนิคการเชื่อมใหม่ขึ้นที่แนวเชื่อมจุดจะเติมเต็มและไม่เกิดเป็นรู/หลุม ดังแสดงลักษณะของรอยเชื่อมดังกล่าวในรูปที่ 4.77 (ข) เรียกเทคนิคการเชื่อมนี้ว่า การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานจุดแบบเติม (Refill friction stir spot welding : Refill–FSSW) แนวเชื่อมที่ได้จะเกิดจากการอัดให้เนื้อโลหะที่อ่อนตัวไหลไปเติมเต็ม (Refill) ด้วยเครื่องมือ (Tool) ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ บ่าเครื่องมือ (Shoulder of tool) กับหัวกวนเครื่องมือ (Probe of tool) ซึ่งทั้งคู่จะหมุนและอิสระต่อกัน โดยมี 2 วิธีการเชื่อม คือ

1. วิธีการอัดเนื้อโลหะเติมเต็มด้วยบ่าเครื่องมือ (Shoulder tool) วิธีนี้ใช้ส่วนของบ่า (Shoulder) ทำหน้าที่หมุนเพื่อสร้างแรงเสียดทานให้เกิดความร้อน เมื่อเนื้อโลหะทั้งสองชิ้นที่จะต่อกันอ่อนตัว ส่วนของหัวกวน (Probe) จะหมุนพร้อมอัดเนื้อโลหะให้หลอมติดแน่นกัน ซึ่งเป็นขณะเดียวกันที่ตัวบ่าเคลื่อนที่ขึ้น



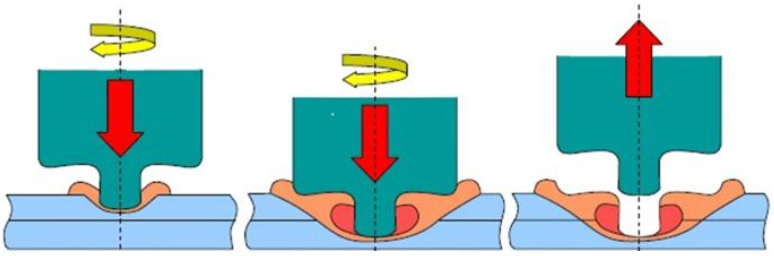
(ก) กรรมวิธีการเชื่อมแบบ FSSW

ที่มา : TWI, Friction welding process, 2015



(ข) ชนิดของหัวกวนการเชื่อมแบบ FSSW

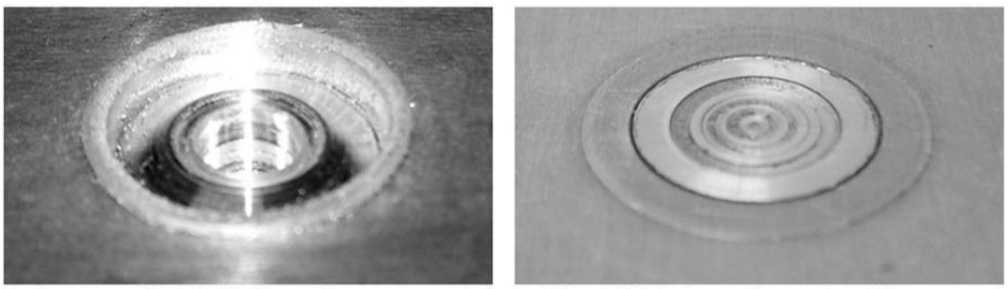
ที่มา : Journal of Mechanical Engineering and Automation 2(4) : 74–79, 2012



(ค) ขั้นตอนของการเชื่อมแบบ FSSW

ที่มา : Metallo, Micro. and Analysis 8: 713–725, 2019

รูปที่ 4.76 เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Friction stir spot welding : FSSW)



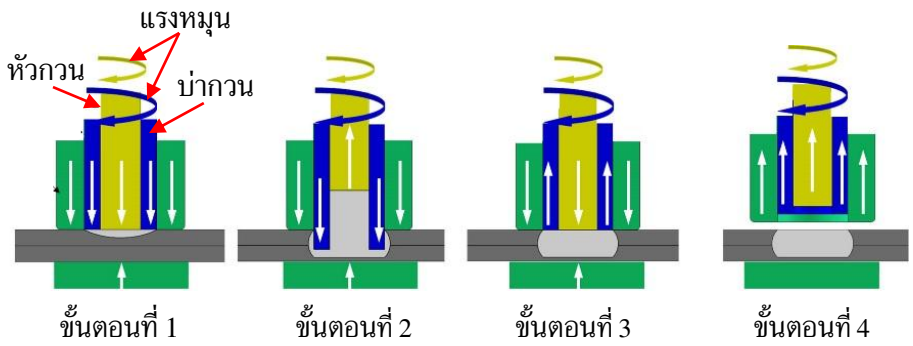
(ก) แนวเชื่อมของการเชื่อมแบบ FSSW (ข) แนวเชื่อมของการเชื่อมแบบ Refill– FSSW

รูปที่ 4.77 เปรียบเทียบลักษณะแนวเชื่อมแบบ FSSW กับแบบ Refill–FSSW

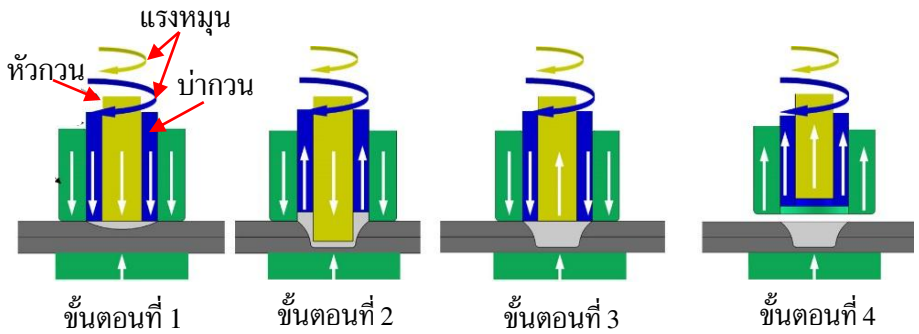
ที่มา : Y. Chen, Refill friction stir spot welding of dissimilar alloys. Materials Science, 2015

สวนทางกันเพื่อเปิดช่องพื้นที่ให้เนื้อโลหะไหลได้เต็มพื้นที่เชื่อม เมื่อเนื้อโลหะเย็นตัวก็จะถอยเครื่องมือทั้งคู่ออกจะได้แนวเชื่อมที่สมบูรณ์ ดังแสดงลำดับขั้นตอนดังกล่าวในรูปที่ 4.78 (ก)

2. วิธีการอัดเนื้อโลหะเติมเต็มด้วยหัวกวนเครื่องมือ (Probe) วิธีนี้ใช้ส่วนของหัวกวนเป็นตัวทำหน้าที่หมุนสร้างความร้อนจากการเสียดทาน เมื่อเนื้อโลหะทั้งสองชิ้นอ่อนตัว ตัวบ่าจะเคลื่อนอัดพร้อมหมุนให้เนื้อโลหะที่ผสมผสานกันแล้วไหลตัว ซึ่งเป็นขณะเดียวกันที่ตัวหัวกวนจะถอยออกเพื่อสร้างพื้นที่ว่างให้เนื้อโลหะไหลได้เต็มพื้นที่รอยเชื่อม หลังจากเนื้อโลหะเย็นตัวลงตัวของเครื่องมือทั้งคู่ก็ถอยออก จะได้แนวเชื่อมที่เต็มพื้นที่สมบูรณ์ ดังแสดงขั้นตอนดังกล่าวในรูปที่ 4.78 (ข)



(ก) ขั้นตอนการเชื่อมแบบ Refill–FSSW ด้วยวิธี Shoulder –plunge



(ข) ขั้นตอนการเชื่อมแบบ Refill–FSSW ด้วยวิธี Probe–plunge

รูปที่ 4.78 ขั้นตอนการเชื่อมแบบ Refill–FSSW วิธี Shoulder–plunge กับ Probe–plunge

ที่มา : TWI : Refill Friction Stric Spot Weldimg, 2017

การประยุกต์ใช้งานการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานจุดแบบเติม (Refill friction stir spot welding : Refill–FSSW)

การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานจุดแบบเติม (Refill–FSSW) นิยมใช้เชื่อมโลหะอลูมิเนียมที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนมา เชื่อมได้ทั้งอลูมิเนียมเกรดเดียวกัน (Similar grade) หรือต่างเกรดกัน (Dissimilar grade) หรือวัสดุต่างชนิดกัน (Dissimilar materials) เป็นสำคัญ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจุด (FSSW) มีข้อดี ดังต่อไปนี้

- แนวเชื่อมไม่เกิดข้อพกพร่องที่เป็นรู/หลุมที่ผิวหน้าชิ้นงาน ผิวงานเชื่อมจะเต็มพื้นผิว
- อุณหภูมิการเชื่อมต่ำ ลดการบิดเบี้ยวและหดตัวได้ดี
- สามารถซ่อมโลหะอลูมิเนียมเกรดที่ไม่สามารถเชื่อมแบบหลอมละลายได้
- สามารถเชื่อมโลหะได้หนามากกว่า
- ขบวนการเชื่อมเหมาะกับการเชื่อมแบบอัตโนมัติ (Automation welding)
- เหมาะสำหรับการเชื่อมชิ้นส่วนเครื่องบิน เช่น Fuselage และWing structure

3. เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบเส้นตรง (Linear friction welding : LFW) Nimal S. Kalsi et al. (2011) ได้นำเสนอถึงเทคนิคการเชื่อมแบบเชิงเส้นนี้ว่า อาศัยหลักการของแรงเสียดสี/เสียดทานกันของผิวชิ้นงานแบบสั่น (Oscillation) ภายใต้สภาวะของแรงกดที่สูง จนเนื้อโลหะชิ้นงานที่เชื่อมเกิดความร้อนและทำให้โลหะเกิดการอ่อนตัว โลหะชิ้นงานจะสั้นลงตามทิศทางแรงอัด อิทธิพลของแรงอัดทำให้โลหะที่อ่อนตัวไหลไปทั่วรอยต่อของชิ้นงาน และมีบางส่วนไหลออกมาที่ขอบของชิ้นงานครอบคลุมขอบรอยต่อทั้งหมด และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงชิ้นงานจะเชื่อมติดกันสนิมเป็นแนวเชื่อมที่สมบูรณ์ ดังแสดงองค์ประกอบของการเชื่อมในรูปที่ 4.79 (ก)

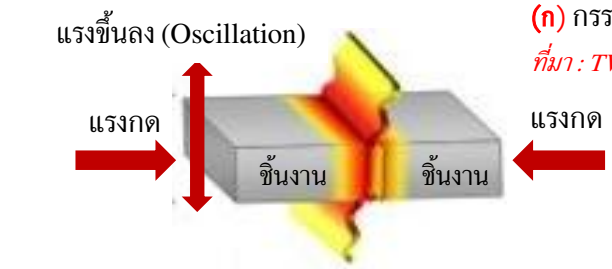
เทคนิคการเชื่อมแบบนี้สามารถเชื่อมได้ทั้งวัสดุที่เป็นประเภทโลหะ (Metals) ประเภทพลาสติก (Plastics) และประเภทไม้ (Wood) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหมาะกับวัสดุโลหะที่มีคุณสมบัติต้านทานแรงดัดกับแรงเฉือนได้ดี และมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ ขบวนการเชื่อมนี้ทำให้เกิดความร้อนได้อย่างรวดเร็วและคงที่โดยการเชื่อมด้วยเทคนิคนี้จะเชื่อมได้ดีกับวัสดุชนิดที่มีสมบัติเหมือนกันหรือใกล้เคียงกันมากกว่าวัสดุต่างชนิดกัน เหตุผลเพราะต้องอาศัยอัตราการเกิดความร้อนและการอ่อนตัวที่พร้อมกันจากวัสดุชิ้นงานเองโดยตรงไม่มีตัวเครื่องมือ (Tool) มาช่วยสร้างความร้อน แต่จะอาศัยแรงกดอัดที่สูงมาก ดังอธิบายถึงขั้นตอนของการเชื่อมด้วยภาพประกอบในรูปที่ 4.79 (ข)

ขั้นตอนที่ 1. นำชิ้นงานที่ต้องเชื่อมทั้งสองชิ้นจับยึดเข้ากับหัวจับ (Chuck) ชิ้นละข้าง โดยปากจับจะเคลื่อนชิ้นงานเข้าหากันเพื่อสัมผัสและสร้างแรงเสียดทานในแนวแกน

ขั้นตอนที่ 2. เมื่อผิวหน้าของชิ้นงานสัมผัสกันสนิท หัวจับชิ้นงานจะเริ่มสั่นขึ้นลง (Oscillation) ภายใต้แรงกดที่มากแรงเสียดทานจะเพิ่มสูงขึ้นจนเริ่มเกิดความร้อน

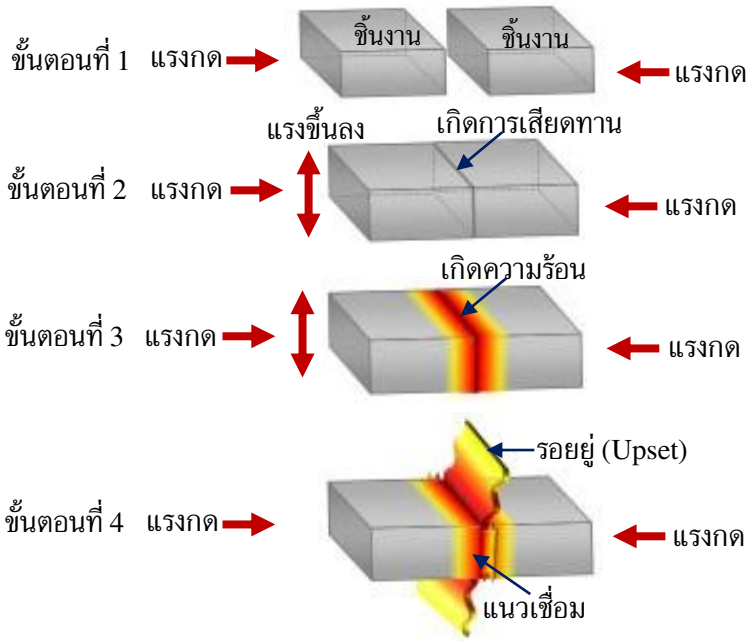
ขั้นตอนที่ 3. ภายใต้สภาวะแรงเสียดทานขึ้นลงและแรงกดที่สูงมาก ชิ้นงานเกิดความร้อนจนอ่อนตัวในระดับสถานะเกือบหลอมละลาย

ขั้นตอนที่ 4. เมื่อเนื้อวัสดุอ่อนตัวจะลดแรงเสียดทานลง แต่เพิ่มแรงกดอัดจนเนื้อวัสดุไหลไปทั่วผิวหน้าสัมผัสของทั้งสองชิ้นและไหลล้นออกมาครอบคลุมขอบรอยต่อรอบด้าน ขั้นตอนนี้ความยาวของชิ้นงานจะลดลง ด้วยเพราะเนื้อวัสดุอ่อนตัวและไหลออกไปเรียกว่า รอยยู่ (Upset) เมื่อเนื้อวัสดุเย็นตัวจะเกิดการเชื่อมผสานเป็นเนื้อเดียวกัน โดยเนื้อวัสดุที่ล้นออกมาสามารถกำจัดออก หรือไม่กำจัดออกก็ได้ตามความเหมาะของการนำชิ้นงานไปใช้ ดังแสดงตัวอย่างชิ้นงานขณะทำการเชื่อมในรูปที่ 4.80 (ก) และตัวอย่างการเชื่อมวัสดุไทเทเนียมผสมที่ในรูปที่ 4.80 (ข)



(ก) กรรมวิธีการเชื่อมแบบ LFW

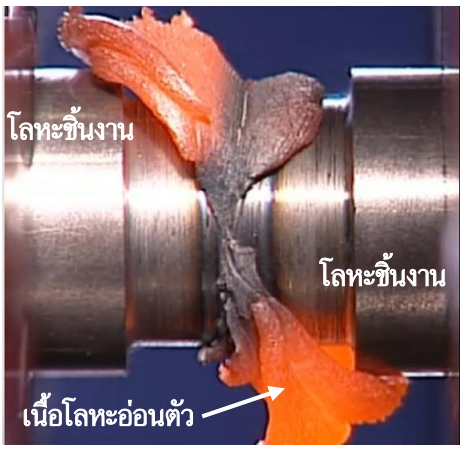
ที่มา : TWI , Friction welding process . 2015



(ข) ขั้นตอนของการเชื่อมแบบ LFW

ที่มา : TWI, Linear Friction Welding , 2019

รูปที่ 4.79 เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบเส้นตรง (Linear friction welding : LFW)



(ก) การไหลของเนื้อโลหะขณะเชื่อม

ที่มา : How Friction Welding works. 2014



(ข) ตัวอย่างชิ้นงานโลหะที่ผ่านการเชื่อม

ที่มา : ACB , Linear Friction Welding. 2016

รูปที่ 4.80 ตัวอย่างการไหลของเนื้อโลหะและชิ้นงานของการเชื่อมแบบเส้นตรง (LFW)

4. เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบหมุน (Rotary friction welding : RFW) M.C. Chaturvedi (2012) ได้กล่าวถึงเทคนิคการเชื่อมแบบนี้ว่า เป็นขบวนการเชื่อมที่คล้ายกับการเชื่อมแบบเส้นตรง จะต่างกันที่ทิศทางการหมุนของแรงที่ทำให้เกิดการเสียดทานบนผิวของชิ้นงาน โดยเทคนิคการเชื่อมขบวนการนี้จะใช้แรงเสียดทานหมุนแบบเป็นวงกลม (Rotating) ซึ่งเทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบหมุนนี้มีรูปแบบการหมุนขณะทำการเชื่อม 2 แบบ คือ

ก. การเชื่อมหมุนแบบต่อเนื่อง ซึ่งเรียกกันว่า Continuous drive rotary friction welding หรือ Continuous drive RFW ดังแสดงในรูปที่ 4.81 (ก) เป็นการหมุนเชื่อมปกติที่นิยมใช้กัน จะใช้เชื่อมกับชิ้นงานทรงกลมตัน (Cylindrical bar) เป็นส่วนใหญ่ ขณะทำการเชื่อมชิ้นงานจะมีรูปแบบอัตราความเร็วการหมุนอย่างต่อเนื่องตลอดการเชื่อม

ข. การเชื่อมหมุนแบบอาศัยแรงเฉื่อย ซึ่งเรียกกันว่า Inertia rotary friction welding หรือ Inertia RFW ดังแสดงในรูปที่ 4.81 (ข) การหมุนเชื่อมแบบนี้ชิ้นงานเชื่อมจะหมุนด้วยแรงเฉื่อยหรือพลังงานจลน์ (Kinetic energy) ที่เกิดจากแรงเฉื่อยบนมู่เล่ (Flywheel) ที่จับยึดชิ้นงานไว้แล้วนำมาสร้างแรงเสียดทานจนเกิดเป็นความร้อนขึ้น

ลำดับขั้นตอนของการเชื่อมทั้ง 2 รูปแบบการหมุนคล้ายกัน มีเพียงบางขั้นตอนที่แตกต่างกัน โดยอ้างอิงขั้นตอนหลัก ๆ ของการเชื่อมหมุนแบบต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 4.81 (ค) โดยมีลำดับขั้นตอนหลักของขบวนการเชื่อม พร้อมคำอธิบายของแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

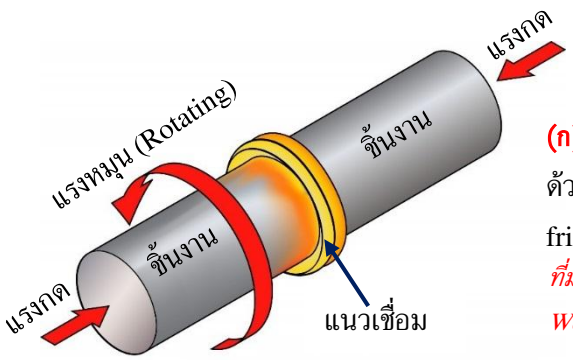
ขั้นตอนที่ 1. นำชิ้นงานโลหะที่ต้องการเชื่อมทั้งสองชิ้นไปจับยึด โดยหนึ่งชิ้นจับยึดกับหัวจับที่หมุนได้ กับอีกหนึ่งชิ้นจับยึดกับหัวจับที่ยึดแน่น จากนั้นด้านหมุนจะหมุนชิ้นงานด้วยแรงของเครื่องจักรในทิศทางตามเส้นรอบวงของชิ้นงาน ส่วนด้านยึดแน่นจะเคลื่อนที่ชิ้นงานเข้าหากันอย่างช้า ๆ ด้วยแรงดันที่สูงมาก

ขั้นตอนที่ 2. เมื่อชิ้นงานเคลื่อนที่จนผิวหน้าสัมผัสกันก็จะเกิดแรงเสียดทานขึ้น และเกิดเป็นความร้อนขึ้นที่บริเวณหน้าสัมผัสของชิ้นงาน

ขั้นตอนที่ 3. ความร้อนจะเพิ่มสูงขึ้นในเวลาอันสั้นจนทำให้เนื้อโลหะชิ้นงานอ่อนตัว ซึ่งยังอยู่ภายใต้สภาวะแรงกดตลอดเวลา ในขั้นตอนนี้ความยาวของชิ้นงานเชื่อมลดลง เนื่องจากเนื้อโลหะอ่อนตัวไหลออกจากหน้าสัมผัสด้วยแรงกด

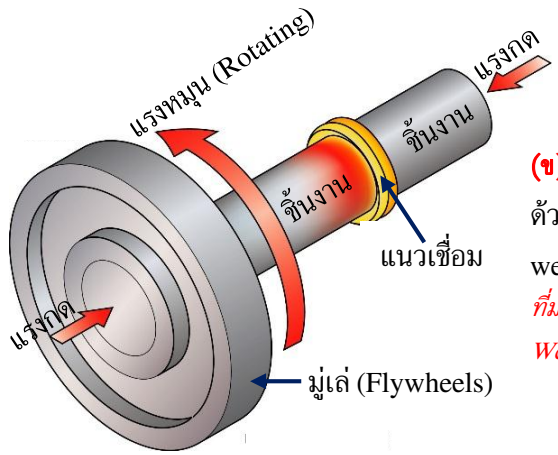
ขั้นตอนที่ 4. หัวจับหยุดหมุนแต่แรงกดคงที่แช่ไว้จนกว่าเนื้อโลหะจะเย็นตัว จึงจะถอยแรงกดออก

ข้อแตกต่างสำหรับการเชื่อมหมุนแบบอาศัยแรงเฉื่อย ใช้หลักการหมุนของมู่เล่จนถึงความเร็วสูงสุดตามที่กำหนดไว้ จากนั้นก็ปลดแรงขับปล่อยให้มู่เล่ซึ่งจับยึดชิ้นงานไว้หนึ่งข้างหมุนไปเองด้วยแรงเฉื่อย (พลังงานจลน์) โดยเป็นเวลาเดียวกันกับการเคลื่อนชิ้นงานอีกข้างเข้ามาหา เช่นดียวกับการเชื่อมแบบหมุนต่อเนื่อง ขั้นตอนต่อไปก็เหมือนกันเมื่อพิจารณาถึงปัจจัยการเชื่อม (Welding parameters) ของทั้งสองแบบ พบว่า มีความแตกต่างกันในบางปัจจัย ดังแสดงเปรียบเทียบด้วยกราฟในรูปที่ 4.82 และเพื่อเพิ่มความเข้าใจที่ดียิ่งขึ้น จึงได้นำตัวอย่างการเชื่อมชิ้นงานจริงของการเชื่อมหมุนแบบต่อเนื่องและการเชื่อมหมุนแบบอาศัยแรงเฉื่อยมาเปรียบเทียบกัน ดังในรูปที่ 4.83 และ รูปที่ 4.84 ตามลำดับ



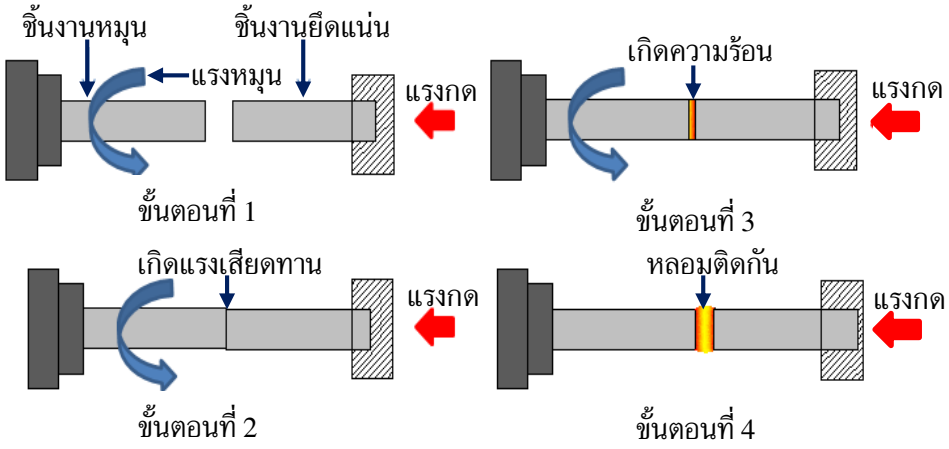
(ก) กรรมวิธีการเชื่อมแบบ RFW ด้วยวิธี Continuous drive rotary friction welding

ที่มา : TWI , Rotary Friction Welding . 2015



(ข) กรรมวิธีการเชื่อมแบบ RFW ด้วยวิธี Inertia rotary friction welding

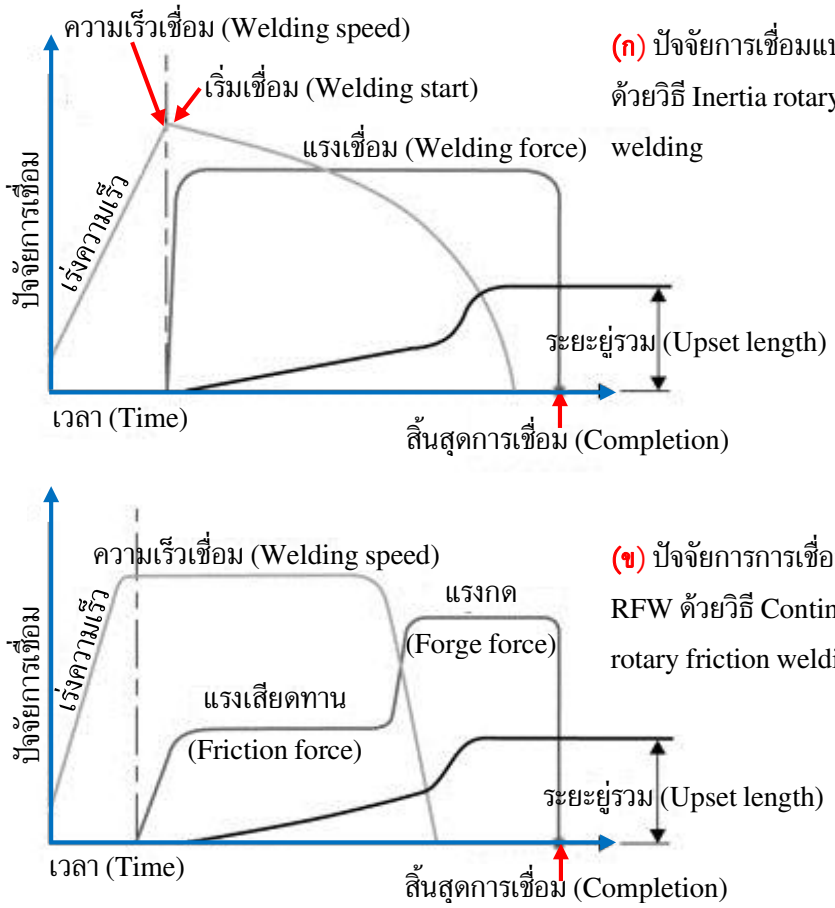
ที่มา : TWI , Rotary Friction Welding . 2015



(ค) ขั้นตอนของการเชื่อมแบบ RFW

ที่มา : TWI, Linear Friction Welding , 2015

รูปที่ 4.81 เทคนิคการเชื่อมแบบ (Rotary friction welding : RFW)



รูปที่ 4.82 เปรียบเทียบปัจจัยการเชื่อมแบบ Inertia RFW กับแบบ Continuous drive RFW

ที่มา : Welding and Joining of Aerospace Materials, 2 Edition, pp 21–65, 2012



(ก) การไหลของเนื้อโลหะขณะเชื่อม

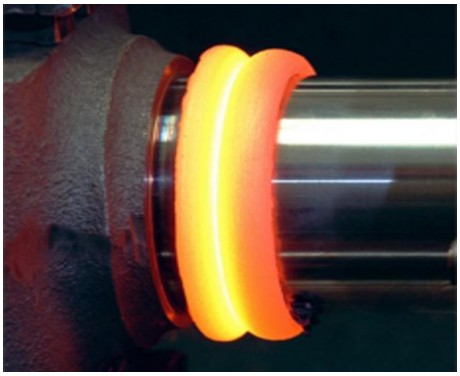
ที่มา : Navya S.: Rotary Friction Welding. 2017



(ข) ตัวอย่างชิ้นงานโลหะที่ผ่านการเชื่อม

ที่มา : American Friction Welding, 2015

รูปที่ 4.83 การเชื่อมหมุนแบบต่อเนื่อง (Continuous drive RFW)



(ก) การไหลของเนื้อโลหะขณะเชื่อม
ที่มา : MT Aerospace, 2015



(ข) ตัวอย่างชิ้นงานโลหะที่ผ่านการเชื่อม
ที่มา : IMHOF HARTCHROM, 2016

รูปที่ 4.84 การเชื่อมหมุนแบบอาศัยแรงเฉื่อย (Inertia RFW)

4.6 กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิต (Thermit Welding : TW)

Golaschmidt Germany (2020) ได้กล่าวถึงกรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิต หรือบางครั้งเรียกว่า เทอร์ไมต์ ว่าถูกค้นพบโดย ศาสตราจารย์ ดร. ฮันส์ โกลด์ชมิดท์ (Hans Goldschmidt) เป็นนักเคมีชาวเยอรมัน จากการผลิตโลหะหนักจากออกไซด์ของโลหะโดยทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของอลูมิเนียม ซึ่งก็คือ ปฏิกิริยาอลูมิโนเทอร์มิตและเรียกหลักการนี้ว่า “ขบวนการเทอร์มิต (Thermit process)” เป็นลักษณะของปฏิกิริยาประเภทคายความร้อน ดังนั้น จึงได้ประยุกต์เอาความร้อนที่คายออกนำมาใช้ในการหลอมละลายเนื้อโลหะ เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อกันได้ด้วยที่มาของแหล่งความร้อนจากปฏิกิริยาทางเคมี กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิตนี้จึงมีความแตกต่างจากกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายอื่น ๆ

ขบวนการเทอร์มิต (Thermit process) จะเกิดจากปฏิกิริยาอลูมิโนเทอร์มิตที่ประกอบด้วยส่วนผสมของผงเหล็กออกไซด์และผงอลูมิเนียมผสมทำปฏิกิริยากัน ดังแสดงในสมการทางเคมีข้างล่างนี้

โลหะออกไซด์ + ผงอลูมิเนียม ⟶ อลูมิเนียมออกไซด์ + โลหะ + ความร้อน

โลหะอลูมิเนียมจะถูกทำการออกซิไดซ์โดยโลหะออกไซด์ชนิดอื่น ๆ ได้แก่ ไอร์ออนออกไซด์ (Iron oxide) คอบเปอร์ออกไซด์ (Copper oxide) แมงกานีสออกไซด์ (Manganese oxide) และโครเมียมออกไซด์ (Chromium oxide) เป็นต้น ได้ผลของปฏิกิริยาออกมาเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide) + โลหะ (Metal) + ความร้อน (Heat) โดยนำความร้อนที่ได้มาประยุกต์ใช้งาน ซึ่งมีระดับปริมาณความร้อนสูงมากที่สามารถหลอมโลหะให้เป็นของเหลวได้ จากการวิจัย พบว่า ขบวนการของปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นและสิ้นสุดลงได้อย่างสมบูรณ์เมื่อออกซิเจนอัฟฟินิตี (Oxygen affinity) ของตัวรีดิวซ์ ซึ่งก็คือ อลูมิเนียมต้องมีค่าสูงกว่าออกซิเจนอัฟฟินิตีของโลหะออกไซด์ซึ่งถูกรีดิวซ์ ดังแสดงตัวอย่างของปฏิกิริยาเทอร์มิตที่นิยมใช้กันดังสมการข้างล่างนี้ หลักการทางเคมีของปฏิกิริยาเทอร์มิต

สามารถใช้โลหะชนิดอื่นตัวรีดิวซ์ก็ได้แต่มักไม่นิยม จะนิยมใช้อลูมิเนียมด้วยเหตุเพราะอลูมิเนียมมีสมบัติที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยานี้ กล่าวคือ มีจุดหลอมเหลวต่ำที่อุณหภูมิ 660 ^{o}C ทำให้หลอมเป็นโลหะเหลวได้ง่ายแต่มีจุดเดือดที่สูงถึง 2,327 ^{o}C ซึ่งช่วยส่งเสริมให้อุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังสามารถสร้างชั้นฟิล์มบาง ๆ ที่มีความเสถียรต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ดีกว่าโลหะชนิดอื่น

$3Fe_3O_4 + 8Al$	⟶	$9Fe + 4Al_2O_3 +$ ความร้อน
$3FeO + 2Al$	⟶	$3Fe + Al_2O_3 +$ ความร้อน
$Fe_2O_3 + 2Al$	⟶	$2Fe + Al_2O_3 +$ ความร้อน
$3CuO + 2Al$	⟶	$3Cu + Al_2O_3 +$ ความร้อน
$3Cu_2O + 2Al$	⟶	$6Cu + Al_2O_3 +$ ความร้อน

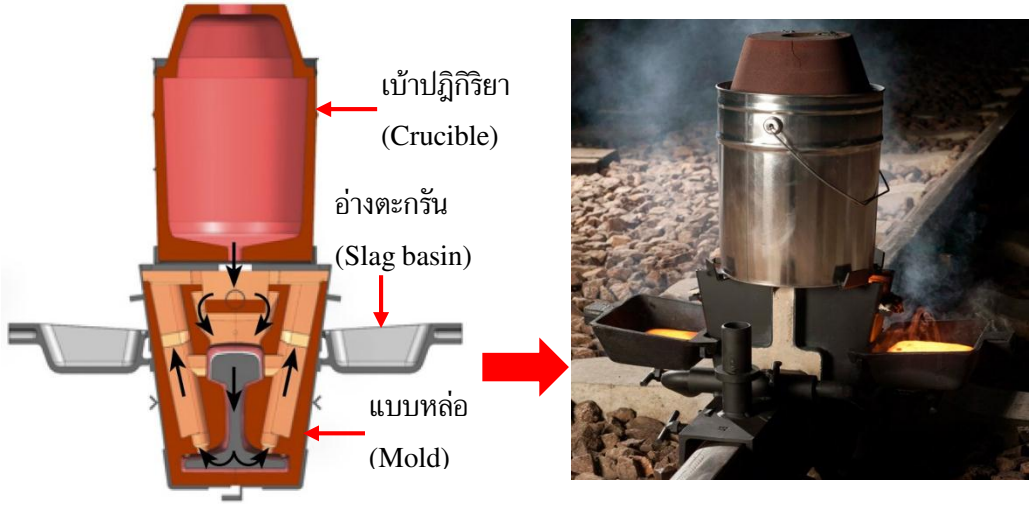
การนำประโยชน์ของปฏิกิริยาเทอร์มิตมาใช้งานส่วนใหญ่เป็นงานที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมโลหะ เพราะโลหะเหลวและความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจะสามารถเชื่อมประสานให้โลหะติดกันได้ดี โดยที่อลูมิเนียมออกไซด์มีสมบัติเบา (ความหนาแน่นต่ำ) และสามารถลอยตัวแยกออกจากน้ำโลหะได้ดีที่เรียกว่า สแลก (Slag) นอกจากนี้ ยังมีการปรับปรุงสารผสมเทอร์มิต โดยการเติมธาตุผสมบางตัวที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของการเชื่อม เช่น เพิ่มความสามารถในการไหลตัวของโลหะเหลว (Fluidity) หรือลดอุณหภูมิการแข็งตัวของแสลก เป็นต้น

กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิต (Thermit welding process) ปัจจุบันได้มีการพัฒนานำไปใช้เชื่อมกับลักษณะงานที่หลากหลายประเภทมากขึ้น ดังต่อไปนี้

1. กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ (Thermit rail welding process)

Ramakant Sharma (2020) ได้อธิบายไว้ในคู่มือปฏิบัติงานเชื่อมรางรถไฟ ถึงปฏิกิริยาเทอร์มิตที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในขบวนการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ จะออกแบบให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นในชุดอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.85 ที่ประกอบไปด้วยเบ้าปฏิกิริยา (Crucible) แบบหล่อ (Mold) และอ่างตะกรัน (Slag basin) ที่เป็นองค์ประกอบหลัก โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่ ดังนี้

- เบ้าปฏิกิริยา (Crucible) มีหน้าที่ในการสร้างน้ำเหล็กเหลวด้วยปฏิกิริยาเทอร์มิต พร้อมแยกขี้ตะกรันให้ลอยสู่ด้านบนของน้ำเหล็ก โดยสารผสมเทอร์มิตประกอบด้วยเหล็กออกไซด์ (Iron oxide) กับผงอลูมิเนียม (Aluminum power) ดังแสดงในรูปที่ 4.86 (ก) ผสมกันแล้วบรรจุลงในเบ้าปฏิกิริยา
- แบบหล่อ (Mold) เป็นส่วนของโพรงแบบชิ้นงานรางรถไฟที่รองรับการไหลของน้ำเหล็กเหลวให้เข้าเต็มแบบ พร้อมมีช่องรูล้น (Riser) เพื่อระบายสแลกที่ติดมาออกสู่ภายนอก ดังในรูปที่ 4.86 (ข)
- อ่างตะกรัน (Slag basin) เป็นส่วนของอุปกรณ์ที่ติดตั้งเพื่อรองรับขี้ตะกรันพร้อมกับน้ำเหล็กเหลวบางส่วนที่ล้นออกมาจากทางรูล้น ซึ่งจะมี 2 ข้างเพื่อต้องการให้เกิดความสมาตรกันของการไหลเข้าโพรงแบบของน้ำเหล็กเหลว ดังแสดงในรูปที่ 4.86 (ค)



รูปที่ 4.85 ชุดส่วนประกอบของอุปกรณ์ขบวนการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ

ที่มา : Goldschmidt : Thermit ® Welding Processes, 2012



ผงอลูมิเนียม (Aluminum powder)



ผงเหล็กออกไซด์ (Iron oxide)

(ก) สารผสมเทอร์มิต (Thermit powder)

ที่มา : GOLDSCHMIDT: Smart Rail Solutions, 2020



(ข) แบบหล่อเชื่อมรางรถไฟ (Mold thermit welding)

ที่มา : GOLDSCHMIDT: Smart Rail Solutions, 2020



(ค) อ่างรับตะกรัน (Slag basin)

ที่มา : AGICO Rail Joint, 2011

รูปที่ 4.86 ชุดส่วนประกอบของอุปกรณ์ขบวนการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ

ลำดับขั้นตอนของการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.87 พร้อมคำอธิบายถึงรายละเอียดเพิ่มเติมดังนี้

ขั้นตอนที่ 1. เป็นขั้นตอนเตรียมของขบวนการเชื่อม มี 2 ส่วน คือ

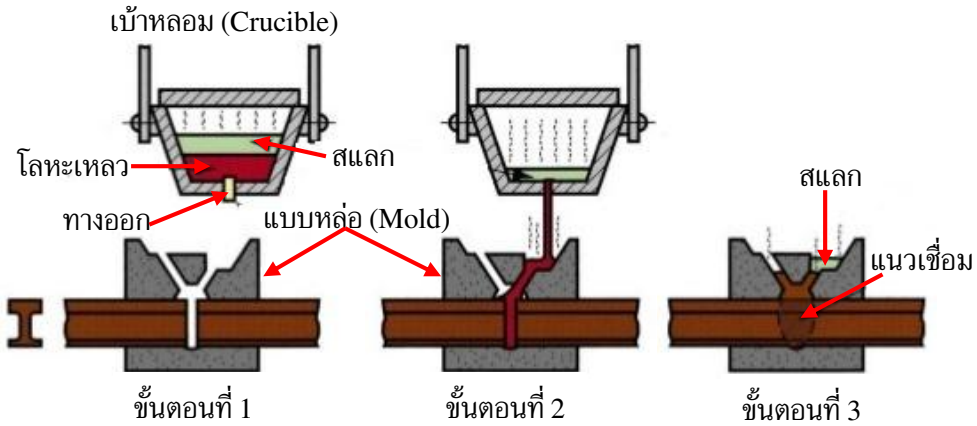
1. ส่วนของแบบหล่อ โดยการนำแบบหล่อที่ทำด้วยทรายควอร์ซหรืออิฐทนไฟไปประกอบเข้ากับปลายของเหล็กรางรถไฟที่ห่างกันของปลายเพื่อเป็นร่องแนวเชื่อมประมาณ 25–30 มม. พร้อมกับอุดรอยกันน้ำเหล็กรั่วไหลด้วยปูนทนความร้อน

2. ส่วนของการเตรียมสารผสมเทอร์มิตลงในเบ้าหลอม แล้วนำไปวางที่ตำแหน่งบนแบบหล่อ โดยให้รูปล่อยน้ำเหล็กเหลวตรงกับทางเข้าแบบหล่อ (Runner) ก่อนเชื่อมต้องให้ความร้อนที่ปลายของเหล็กรางก่อนด้วยการเผาด้วยเปลวแก๊ส (Pheheating) จนกว่าจะได้อุณหภูมิโดยประมาณ 600–800 ^{o}C (ประมาณ 5 นาที) จากนั้นเริ่มจุดระเบิดผงเทอร์มิตในเบ้าหลอมให้เกิดเป็นปฏิกิริยาเทอร์มิตขึ้นภายในกลายเป็นความร้อนที่ทำให้ผงเหล็กเกิดการหลอมเหลวได้เป็นน้ำเหล็กเหลวและขี้ตะกรันที่แยกกันลอยอยู่ผิวบน น้ำเหล็กเหลวพร้อมที่จะถูกปล่อยไหลไปสู่แบบหล่อเชื่อม (Mold)

ขั้นตอนที่ 2. ขณะที่ปลายเหล็กรางร้อนพร้อมแล้ว ช่องทางออกของน้ำเหล็กที่กันเบ้าหลอมจะถูกเปิดออก เพื่อให้น้ำเหล็กไหลด้วยแรงโน้มถ่วงเข้าสู่แบบหล่อจนเต็มโพรงแบบหล่อเชื่อม โดยสังเกตการเติมเต็มแบบได้จากการที่น้ำเหล็กและขี้ตะกรันส่วนที่ล้นออกมาทางรูล้น (Riser) ที่รองรับด้วยอ่างรับขี้ตะกรัน (Slag basin)

ขั้นตอนที่ 3. หลังจากน้ำเหล็กเต็มโพรงแบบก็เคลื่อนเบ้าหลอมออก รอจนน้ำเหล็กแข็งตัวทำการตกแต่งเฉือนเนื้อเหล็กส่วนเกินออกด้วยเครื่องมือเฉพาะทางของงานระบบรางรถไฟ มีลำดับขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 4.88

จากคำอธิบายถึงขั้นตอนของการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟในข้างต้นของแต่ละขั้นตอนจะดำเนินไปตามปัจจัยการเชื่อม ซึ่งปัจจัยการเชื่อมรางรถไปจะเป็นเกณฑ์มาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 4.16



รูปที่ 4.87 ขั้นตอนการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ (Thermit rail welding processes)

ที่มา : Thermite Welding : Principle, Working, Equipment and Application 2017



ขั้นตอนที่ 1 น้ำเหล็กหล่อเชื่อมเย็นตัว

ที่มา : ALAMY : Thermit Welding, 2005



ขั้นตอนที่ 2 กำจัดเนื้อเหล็กหล่อเชื่อมส่วนเกินออก

ที่มา : ELEKTRO THERMIT, 2012



ขั้นตอนที่ 3 เหล็กรางเชื่อมเสร็จ

ที่มา : ALAMY : Thermit Welding, 2005



ขั้นตอนที่ 4 ตกแต่งเหล็กรางเชื่อมด้วยการเจียระไน

ที่มา : PANDROL Alpha Grinder, 2014

รูปที่ 4.88 ขั้นตอนการกำจัดเนื้อเหล็กหล่อเชื่อมส่วนเกินของการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ

ตารางที่ 4.16 ปัจจัยการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ

ที่มา : Y.Chen et al. Heat transfer modelling of rail thermite welding, Material Science, 2006

ปัจจัยการเชื่อม (Welding parameters)	ค่ามาตรฐาน (Values)
ช่องว่างของรอยต่อ (Weld gap)	25–30 มม.
เวลาให้ความร้อนชิ้นงาน (Preheating time)	5 นาที
อุณหภูมิเผารางรถไฟก่อนเชื่อม (Preheating temperature)	600–800 ^{o}C
เวลาเปิดช่องน้ำเหล็ก (Tapping time)	60 วินาที
อุณหภูมิเริ่มหลอมโดยเฉลี่ย (Average initial liquid temperature)	2,050 ^{o}C
อุณหภูมิสภาพแวดล้อมโดยรอบ (Ambient temperature)	25 ^{o}C

2. กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิตแท่งวัสดุเสริมแรง (Thermit reinforcing bar welding process)

อรวรรณ สัมฤทธิ์เดชขจร (2553) ได้อธิบายถึงกรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิตแบบนี้ว่าจะนิยมใช้กับการเชื่อมเหล็กเส้นเสริมแรง (Reinforcing bar) ในงานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งมีทั้งที่เป็นแบบผิวเรียบและผิวข้ออ้อย หรืออาจใช้ในการเชื่อมเหล็กเพลาตันขนาดเล็ก ๆ สำหรับงานอื่น ๆ กรรมวิธีการเชื่อมแบบนี้มีหลักการเชื่อมคล้ายกับการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ จะต่างกันที่ลักษณะงานประเภทนี้จะมีชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งทั้งแนวตั้งและแนวนอน รูปแบบของแบบหล่อและเบ้าหลอมจึงออกแบบตามเบ้าหลอมที่สามารถใช้เชื่อมได้ทั้งที่ต่อกันในแนวนอน (Horizontal joint) และต่อกันในแนวตั้ง (Vertical joint) ดังแสดงในรูปที่ 4.89 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองแบบมีลำดับขั้นตอนการเชื่อมที่เหมือนกัน โดยอ้างอิงขั้นตอนจาก Camille A. Lssa et al. (2006) ดังนี้

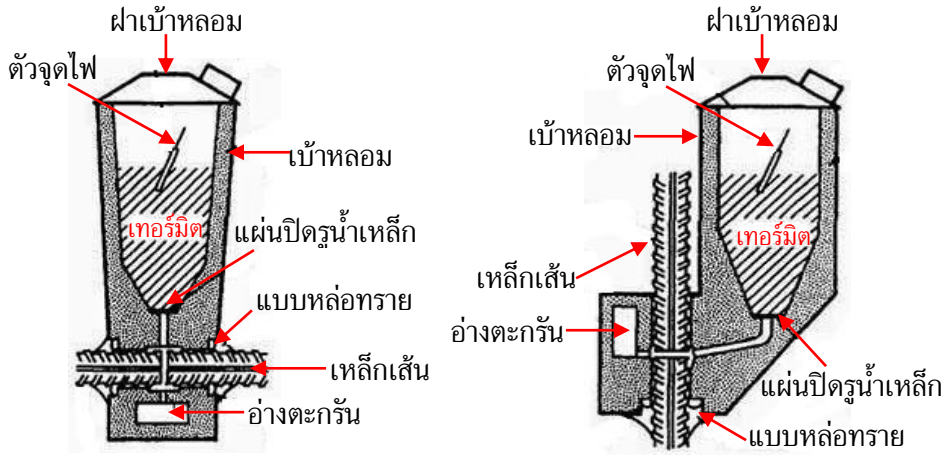
ขั้นตอนที่ 1. นำเบ้าหลอม (Crucible) ไปประกอบเข้ากับแบบหล่อโลหะที่มีปลายของเหล็กเส้นเสริมแรงทั้งสองข้างอยู่ตรงกลาง และตรงรอยต่อของเหล็กเส้นจะต้องตรงกับตำแหน่งของทางป้อนน้ำโลหะ (Runner) พร้อมกับใช้ดินเหนียวทนไฟอุดบริเวณขอบแบบหล่อป้องกันการรั่วไหลของน้ำเหล็ก

ขั้นตอนที่ 2. เตรียมนำสารผสมผงเทอร์มิต (Thermit power) บรรจุลงเบ้าหลอมพร้อมที่จะจุดไฟด้วยตัวจุดไฟ (Igniter)

ขั้นตอนที่ 3. ทำการเผาปลายเหล็กเส้นเสริมแรงให้ร้อนแดงที่อุณหภูมิประมาณ 600–800 ^{o}C

ขั้นตอนที่ 4. ทำการจุดไฟสารผสมผงเทอร์มิตพร้อมปิดฝาเบ้าหลอม รอจนได้น้ำเหล็กเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 2,050 ^{o}C จากนั้นเปิดแผ่นรูน้ำเหล็กให้ไหลไปตามทางวิ่งของน้ำเหล็กเข้าสู่รอยต่อ โดยมีรูล้นที่ระบายขี้ตะกรันและรองรับน้ำเหล็กที่ล้นออกมา

ขั้นตอนที่ 5. ปล่อยให้น้ำเหล็กแข็งตัวแล้วทำการถอดแบบหล่อออก เหล็กเส้นก็จะติดกันดังแสดงในรูปที่ 4.90



(ก) การเชื่อมแนวนอน (Horizontal joint) **(ข)** การเชื่อมแนวตั้ง (Vertical joint)

รูปที่ 4.89 เทคนิคการเชื่อมเทอร์มิตแท่งวัสดุเสริมแรง

ที่มา : Thermite Welding : Principle, Working, Equipment and Application, 2017



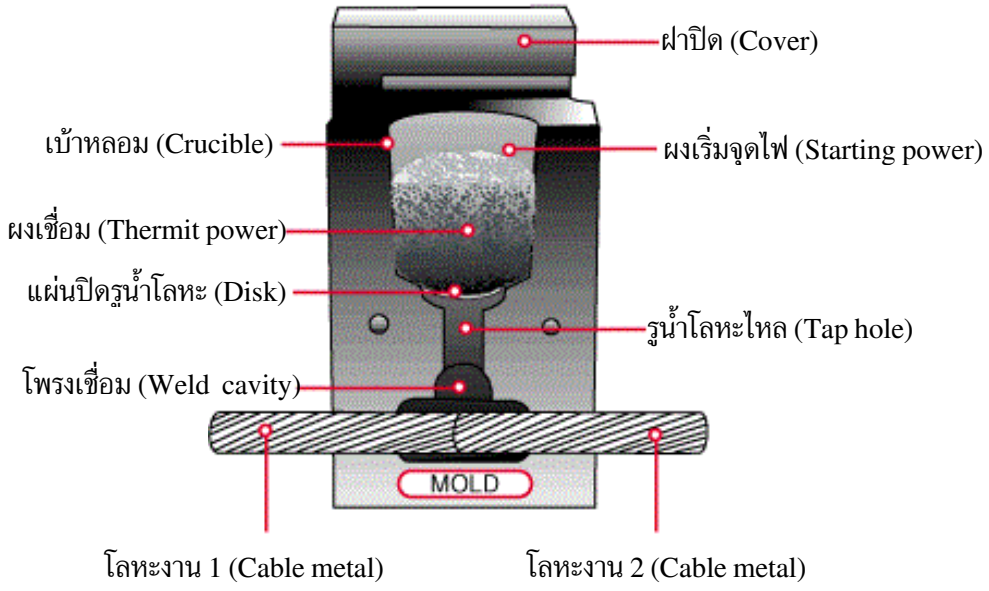
รูปที่ 4.90 ตัวอย่างการเชื่อมเทอร์มิตแท่งวัสดุเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตเสริมแรง

ที่มา : Amiable Weld : Exothermic

3. กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิตงานต่อทางไฟฟ้า (Thermit electrical connections welding process)

กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิตในงานที่เกี่ยวกับการเชื่อมต่อระบบสายไฟฟ้า เป็นที่นิยมกันมาก โดยเฉพาะในงานระบบสายดินหรือสายล่อฟ้า ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมวัสดุโลหะทองแดง จึงต้องใช้ผงสารผสมทองแดงออกไซด์กับอลูมิเนียม เพราะโลหะทองแดงมีความสามารถนำไฟฟ้าได้ดี ดังสมการปฏิกิริยาเทอร์มิตข้างล่างนี้ และมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญของขบวนการเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.91

$$3CuO + 2Al \longrightarrow 3Cu + Al_2O_3 + \text{ความร้อน}$$

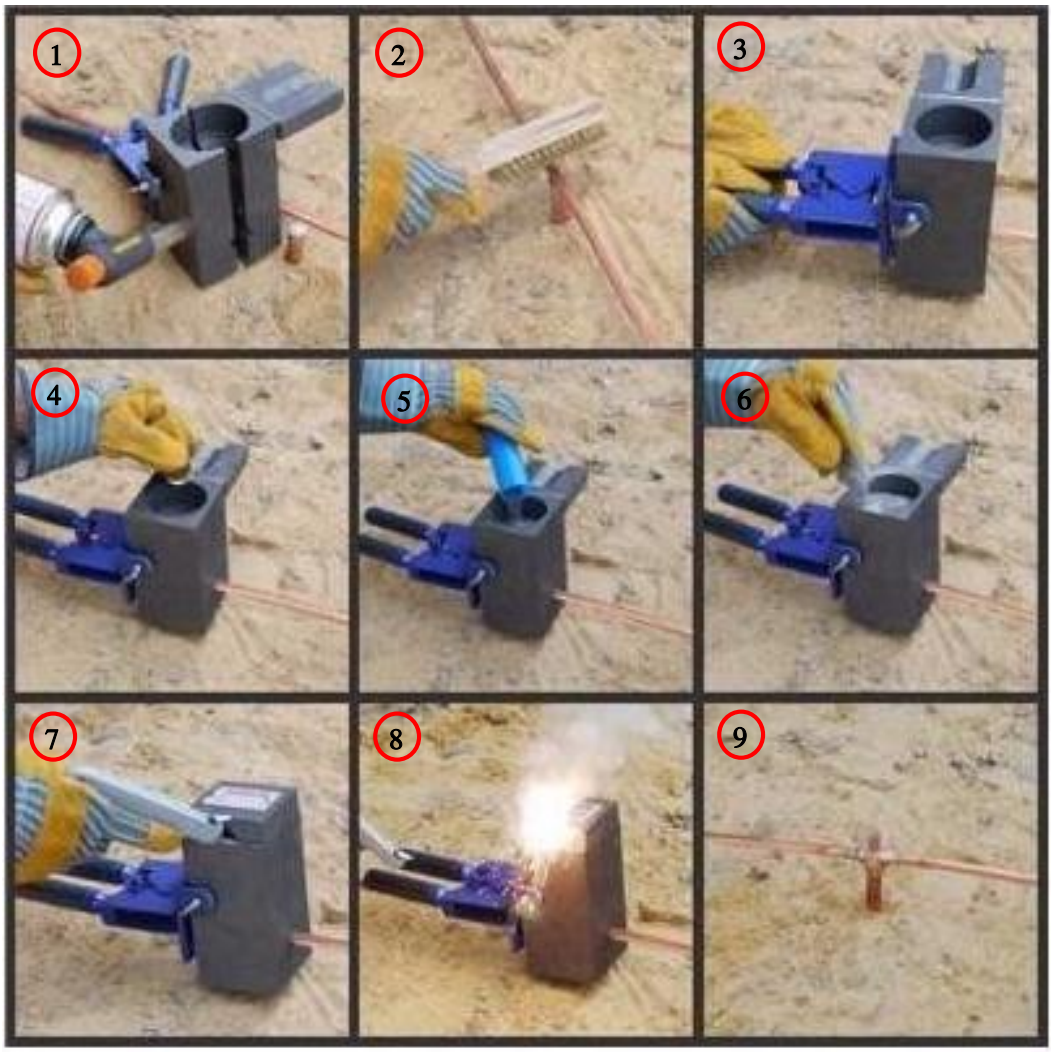


รูปที่ 4.91 องค์ประกอบของการเชื่อมเทอร์มิตงานต่อทางไฟฟ้า

ที่มา : TechtoWeld : Exothermic Welding Connections, 2012

Amiable Impex (2012) ได้ลำดับขั้นตอนของการเชื่อมเทอร์มิตงานเชื่อมต่อทางไฟฟ้าว่า มีลำดับขั้นตอนดังนี้ (ดูรูปที่ 4.92 ประกอบการอธิบาย) เริ่มต้นด้วยการเตรียมเบ้าหลอม ผงเทอร์มิต และอุปกรณ์อื่น ๆ จากนั้นก็ทำความสะอาดชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม ต่อด้วยการประกอบเบ้าหลอมที่มีแบบหล่อเข้ากับโลหะชิ้นงานโดยใส่แผ่นจานปิดรูทางน้ำโลหะไหลเข้าสู่แบบหล่อ ตามด้วยการใส่สารผสม

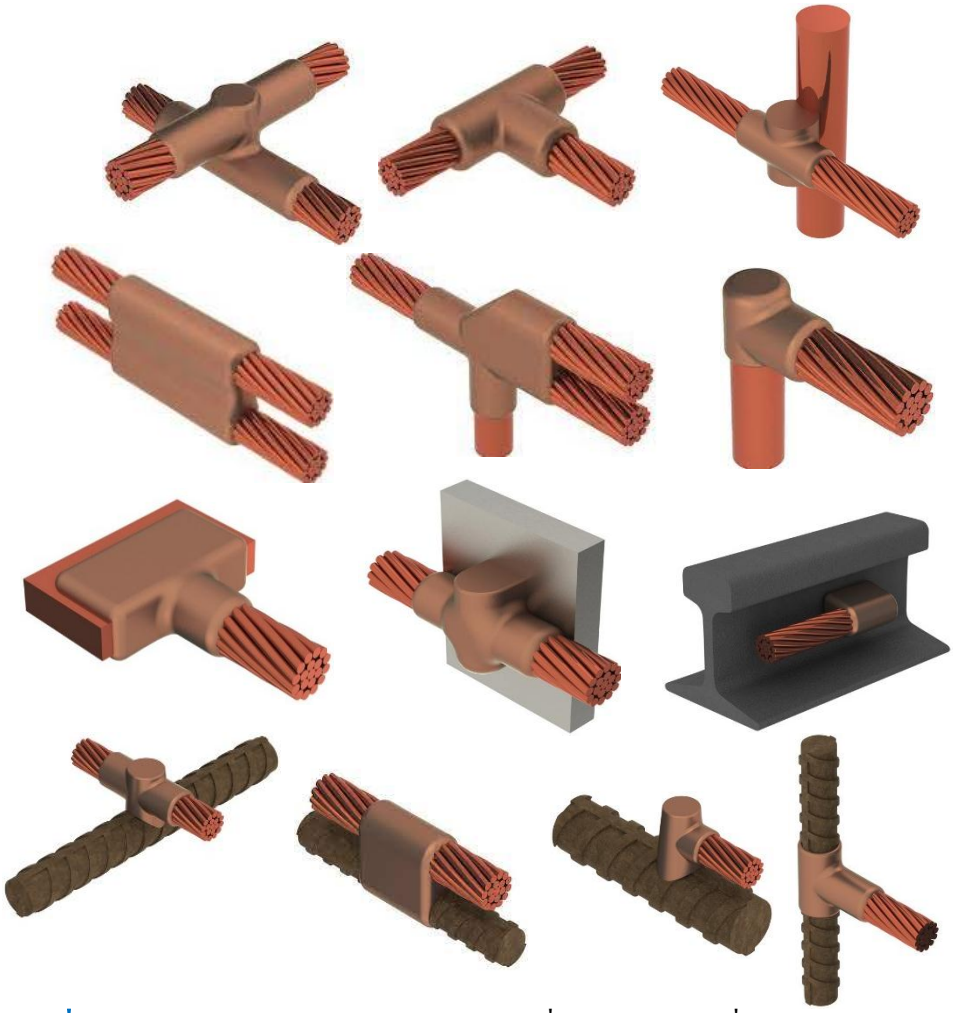
เทอร์มิตลงในเบ้าหลอม ซึ่งต้องใส่ผงจุดไฟไว้ผิวบน ปิดฝาเบ้าหลอมพร้อมจุดไฟ จะเกิดประกายไฟของปฏิกิริยาเทอร์มิตภายในแบบหล่อและได้ความร้อนมากพอที่จะทำให้โลหะหลอมเหลว จากนั้น แผ่นจานปิดรูหลอมละลายเปิดช่องทางให้น้ำโลหะเหลวที่จะไหลไปเชื่อมโลหะงาน จากนั้น รอจนน้ำโลหะแข็งตัว ทำการถอดแบบหล่อออกจะได้แนวเชื่อมต่อที่สมบูรณ์



รูปที่ 4.92 ลำดับขั้นตอนของการเชื่อมเทอร์มิตงานต่อทางไฟฟ้า

ที่มา : Amiable Impex. Exothermic Welding Catalouge, 2012

การออกแบบเบ้าหลอมและแบบหล่อจะพิจารณาจากลักษณะรูปแบบของงานที่เชื่อม ซึ่งมีทั้งที่เป็นแบบเชื่อมต่อปลายลวดชนิดเดียวกัน เชื่อมต่อกับโลหะลวดต่างชนิด หรือเชื่อมต่อกับวัสดุโครงสร้างหลักอื่น ดังแสดงตัวอย่างรูปแบบของลักษณะรอยต่อรูปแบบต่าง ๆ ในรูปที่ 4.93 และตัวอย่างแบบหล่อ (Graphite mold) ที่ออกแบบตามลักษณะของรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 4.94



รูปที่ 4.93 ตัวอย่างรอยต่อรูปแบบต่าง ๆ ของการเชื่อมเทอร์มิตงานเชื่อมต่อทางไฟฟ้า

ที่มา : Amiable Impex : Thermite Welding Powder, 2014



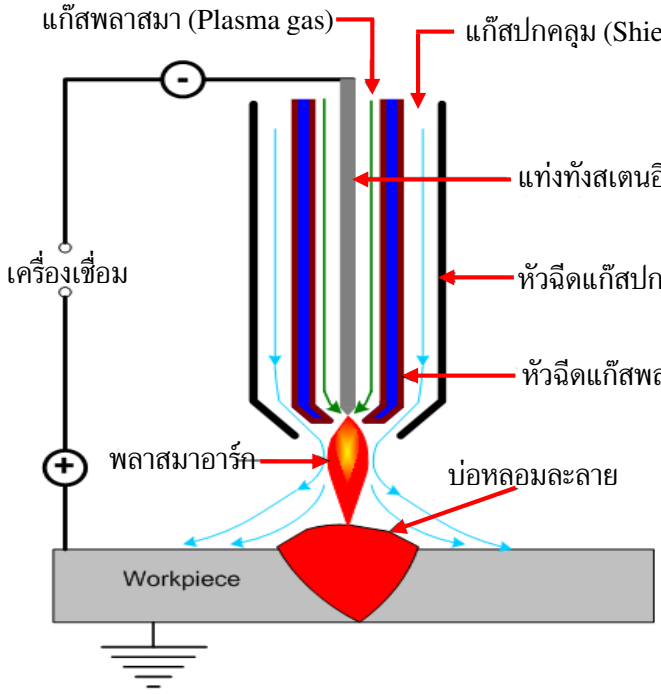
รูปที่ 4.94 ตัวอย่างแบบหล่อกราไฟต์ของการเชื่อมเทอร์มิตงานเชื่อมต่อทางไฟฟ้า

ที่มา : Thermite Weld (Pakistan) EST., 2014

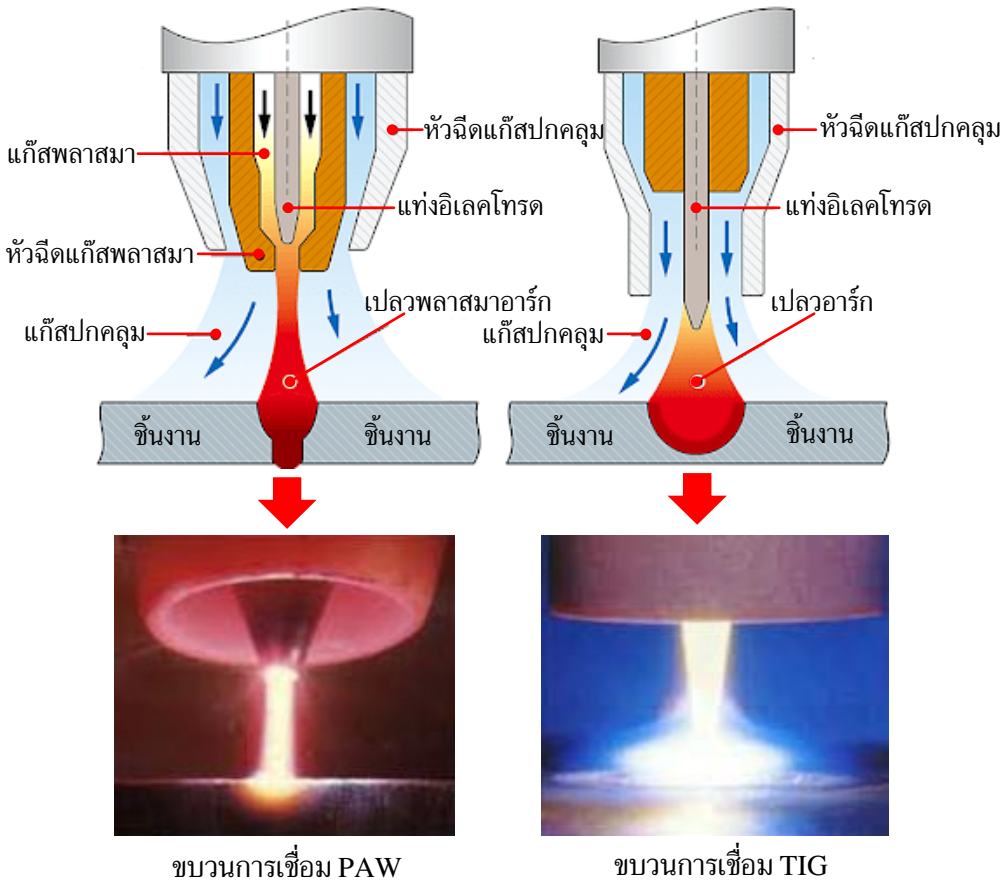
4.7 กรรมวิธีการเชื่อมด้วยอาร์กพลาสมา (Plasma Arc Welding : PAW)

THERMAL ARC (2009) ได้กล่าวถึงกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กด้วยพลาสมานี้ไว้ว่า เป็นขบวนการเชื่อมที่อาศัยความร้อนสำหรับการหลอมละลายเนื้อโลหะ ที่เกิดจากการอาร์กของแท่งทังสเตนที่ทำหน้าที่เป็นอิเลคโทรด ที่เรียกว่า " Non–consumable electrode" กับชิ้นงานโลหะ ดังได้แสดงถึงองค์ประกอบของกรรมวิธีการเชื่อมในรูปที่ 4.95 โดยกระแสไฟอาร์กได้จากแหล่งจ่ายของเครื่องเชื่อม ซึ่งขณะแท่งอิเลคโทรดเริ่มอาร์กกับชิ้นงานก็จะมีเปลวแก๊สพลาสมาไหลผ่านหัวฉีดแก๊สพลาสมา (Plasma nozzle) ซึ่งอยู่ชั้นในจึงมักเรียกว่า "Inner nozzle" ที่มีระบบน้ำหล่อเย็นช่วยระบายความร้อน เป็นตัวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการอาร์กให้ได้ความร้อนที่สูงขึ้นโดยโลหะเกิดการหลอมเหลวได้เร็วขึ้น ในขณะเดียวกันก็ต้องใช้แก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลาย (Shielding gas) โดยไหลออกมาพร้อมกันโดยผ่านทางช่องของหัวฉีดแก๊สปกคลุม (Shielding gas nozzle) ที่อยู่ด้านนอกจึงเรียกว่า "Outer nozzle"

ขบวนการเชื่อมด้วยอาร์กพลาสมาเป็นเทคโนโลยีการเชื่อมที่พัฒนาต่อยอดจากขบวนการเชื่อมแก๊สทังสเตนอิเลคโทรด (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW) หรือที่เรียกกันว่า การเชื่อม "TIG" ที่มาจาก Tangsten Inert Gas ดังนั้น กรรมวิธีการเชื่อมจึงมีความคล้ายกันมาก แตกต่างกันที่หัวเชื่อมออกแบบให้มีหัวฉีดแก๊ส 2 ชั้น มีแก๊สพลาสมาช่วยการอาร์ก โดยที่ส่วนองค์ประกอบอื่น ๆ เหมือนกันดังแสดงการเปรียบเทียบกันขององค์ประกอบของขบวนการเชื่อมของทั้งสอง ในรูปที่ 4.96



รูปที่ 4.95 องค์ประกอบของกรรมวิธีการเชื่อมพลาสมา
ที่มา : Dmitri Kopeliovich : Plasma Arc Welding , 2012



รูปที่ 4.96 เปรียบเทียบองค์ประกอบของขบวนการเชื่อม PAW กับขบวนการเชื่อม TIG

ที่มา : CHIH SHENG YI : Plasma Welding Machines , 2012

อุปกรณ์และเครื่องของขบวนการเชื่อมพลาสมา (Plasma arc welding equipment)

การเชื่อมพลาสมาประกอบด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ อ้างอิงจาก SanRex (2014)

1. เครื่องเชื่อม (Power source) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า โดยสามารถใช้ได้ทั้งระบบไฟฟ้าที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current : DC) และไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current : AC) จากการศึกษาจากงานวิจัย พบว่า การเชื่อมพลาสมาแนะนำให้เลือกใช้ไฟฟ้ากระแสตรงจะเหมาะสมกว่าและต้องเป็นแบบกระแสคงที่ (Content current) ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ทั้งประเภทเครื่องเชื่อมที่เป็น Generator และ Rectifier โดยเลือกสภาพขั้วในการเชื่อมเป็นแบบกระแสไฟตรงขั้วตรง (Direct Current Straight Polarity : DCSP หรือ Direct Current Electrode Negative : DCEN) ซึ่งก็หมายถึง การต่อขั้วลบ (−) เข้ากับหัวเชื่อมและต่อขั้วบวก (+) เข้ากับชิ้นงาน ความร้อนจะเกิดขึ้นที่ขั้วของชิ้นงานมากกว่าที่หัวเชื่อม ชิ้นงานจึงมีอัตราการซึมลึกสูงมาก ซึ่งหลักการนี้เป็นจุดเด่นของกรรมวิธีการเชื่อมพลาสมา ซึ่งโดยปกติเครื่องเชื่อมที่เลือกใช้จะมีความสามารถในการปรับระดับกระแสไฟได้ตั้งแต่ 2 – 200 แอมแปร์ ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องเชื่อม (Duty cycle) อยู่ที่ระดับ 60% ยกเว้นกรณีที่การเชื่อมงานที่มีขนาดใหญ่อาจเลือกเครื่องเชื่อมที่มีขนาดกำลังกระแสสูงถึง 300

แอมแปร์ และระดับแรงดันจะอยู่ที่ประมาณ 80 โวลต์ ดังแสดงตัวอย่างของเครื่องเชื่อมพลาสมาที่พบเห็นและใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ในรูปที่ 4.97 (ก) นอกจากนี้ ยังมีการออกแบบและผลิตเครื่องเชื่อมเพื่อใช้กับงานเชื่อมด้วยแขนกลอัตโนมัติสำหรับระบบงานผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ดังแสดงในรูปที่ 4.97 (ข) และที่สำคัญ คือ เครื่องเชื่อมพลาสมาเหมาะสำหรับการเชื่อมงานที่มีขนาดเล็ก ๆ ที่กรรมวิธีการเชื่อมแบบอื่น ๆ ไม่สามารถทำการเชื่อมได้ซึ่งเป็นจุดเด่นของการเชื่อมพลาสมา เช่น ชิ้นงานโลหะบางขนาด 100 ไมครอน – 1.5 มม. หรือชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก ๆ มีพื้นที่ให้เชื่อมน้อย ๆ จะเรียกเครื่องเชื่อมชนิดนี้ว่า เครื่องเชื่อมไมโครพลาสมา (Micro plasma welding machine) ที่มีช่วงปรับกระแสไฟเชื่อมอยู่ระหว่าง 0.5–50 แอมแปร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.97 (ค)



(ก) เครื่องเชื่อมพลาสมา
(Plasma welding machine)
ที่มา : SanRex : Welding equipment, 2009



(ข) เครื่องเชื่อมไมโครพลาสมา
(Micro plasma welding machine)
ที่มา : Arcraft : Plasma equipment, 2012



(ค) เครื่องเชื่อมพลาสมาแขนกล
(Automatic plasma welding machine)
ที่มา : SanRex : Welding equipment, 2009

รูปที่ 4.97 เครื่องเชื่อมแบบต่าง ๆ ของการเชื่อมพลาสมา

2. หัวเชื่อมพลาสมาและอุปกรณ์เสริม (Plasma welding torch and accessory) หัวเชื่อมเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ต้องออกแบบให้เหมาะสมกับหน้าที่ของการใช้งาน หัวเชื่อมพลาสมาดูจากลักษณะ

โดยรวมเหมือนกันกับหัวเชื่อมทิก จะแตกต่างกันที่หัวเชื่อมพลาสมามีส่วนประกอบเพิ่มเติมบางส่วน เช่น มีหัวฉีดแก๊สพลาสมา ท่อนำแก๊สพลาสมา และระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ เป็นต้น โดยในรูปที่ 4. 98 (ก) เป็นการแสดงถึงองค์ประกอบภายในของหัวเชื่อมพลาสมา และลักษณะทางกายภาพของหัวเชื่อม วัสดุที่นำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนจะต้องทนความร้อนได้สูง เพราะพลังงานความร้อนที่เกิดจากอาร์กด้วยเปลวของแก๊สพลาสมามีความร้อนสูงมาก แม้จะมีระบบระบายความร้อนด้วยระบบน้ำไหลวนภายในหัวเชื่อมก็ตาม

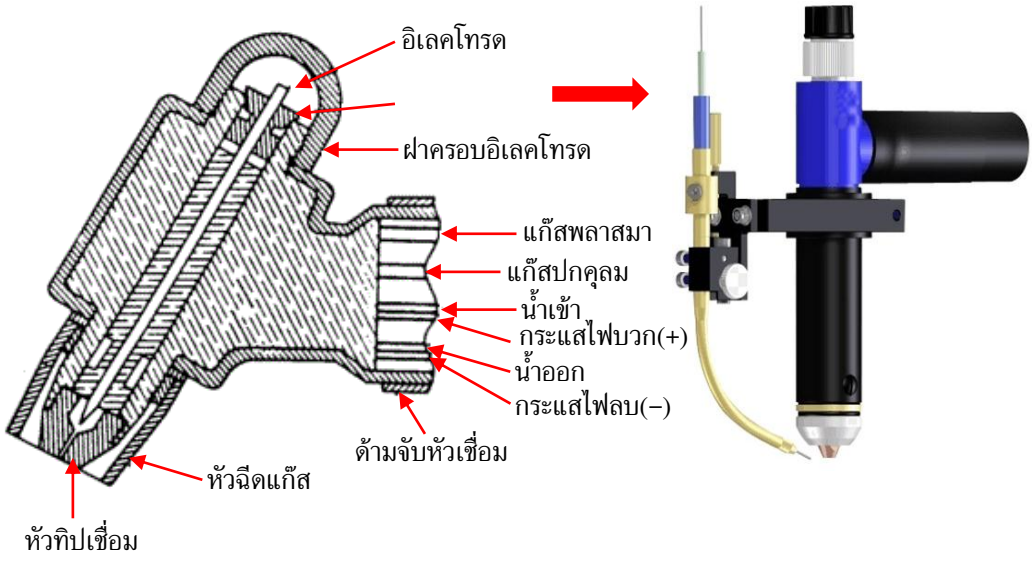
ประเภทของหัวเชื่อมพลาสมาที่ใช้งานกันในปัจจุบันสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

● หัวเชื่อมประเภทเชื่อมแบบไมโครพลาสมา (Micro plasma welding torch) เป็นหัวเชื่อมประเภทที่ใช้กับการเชื่อมงานที่มีขนาดเล็ก พื้นที่รอยเชื่อมน้อย ใช้กระแสเชื่อมต่ำ (ไม่เกิน 50 แอมแปร์) ซึ่งเรียกการเชื่อมพลาสมาจำพวกนี้ว่า “การเชื่อมไมโครพลาสมา (Microplasma welding process)” ด้วยเพราะลักษณะงานที่ขนาดเล็กพื้นที่แคบ หรือหัวเชื่อมเข้าถึงยาก จึงได้มีการออกแบบหัวเชื่อมที่มีขนาดในระดับไมโครพลาสมาใช้ หัวเชื่อมมีขนาดค่อนข้างเล็กและให้สามารถปรับมุมองศาเชื่อมได้หลากหลายระดับองศา หรือบางครั้งออกแบบไว้สำหรับงานเฉพาะบางอย่าง ดังแสดงตัวอย่างของหัวเชื่อมไมโครพลาสมาแบบต่าง ๆ ในรูปที่ 4. 98 (ข)

● หัวเชื่อมประเภทเชื่อมแบบกระแสไฟสูง (High amperage plasma welding torch) หรือบางครั้งเรียกว่า “การเชื่อมคีย์โฮนพลาสมา (Keyhole plasma)” หัวเชื่อมประเภทนี้มีขนาดที่โตขึ้น ชิ้นส่วนทนความร้อนได้มากขึ้น เพราะใช้เชื่อมกับกระแสไฟเชื่อมที่สูงขึ้น (เกิน 50 แอมแปร์ แต่ไม่เกิน 300 แอมปร์) มีทั้งที่มี Duty cycle 60 % และ100 % โดยสามารถปรับมุมเชื่อมได้หลายองศาเพื่อความเหมาะสมกับตำแหน่งงานที่เชื่อม ดังแสดงตัวอย่างของหัวเชื่อมแบบกระแสไฟเชื่อมสูงในรูปที่ 4. 98 (ค)

ขบวนการอาร์กของพลาสมา (Plasma arc process) จะได้เปลวพลาสมาที่มีความสามารถในการสร้างความร้อนสูงในเวลาอันสั้นซึ่งเหมาะนำมาหลอมละลายเนื้อโลหะ ปัจจุบันได้มีการประยุกต์ขบวนการอาร์กของพลาสมานำมาใช้งานกันมากขึ้น โดยเทคโนโลยีของการอาร์กลวดทังสเตนให้เกิดเปลวพลาสมาสำหรับงานเชื่อมพลาสมา มี 2 แบบ คือ

● การเชื่อมแบบถ่ายโอนพลาสมาอาร์กไปยังชิ้นงาน (Transferred plasma arc welding) ดังแสดง ในรูปที่ 4. 99 (ก) โดยอ้างอิงจากการวิจัยของ Ruiying Zhang et al. (2016) โดยกระแสไฟเชื่อมขั้วลบ (−) ถูกต่อเข้ากับขั้วแท่งทังสเตนอิเลคโทรด และขั้วบวก (+) ต่อผ่านไปยังชิ้นงาน แก๊สพลาสมาไหลผ่านหัวฉีดทองแดงเป็นแบบพลาสมาสเปร์ยไปยังโลหะชิ้นงานที่เป็นขั้วบวกด้วยความหนาแน่นของพลังงานที่มากและมีความเร็วสูง ทำให้ชิ้นงานเกิดความร้อนและหลอมละลายอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะนำการถ่ายโอนแบบนี้ไปใช้กับการเชื่อมที่ต้องการความร้อนสูง เช่น ชิ้นงานหนาต้องการแนวเชื่อมซึมลึกมาก และยังนิยมนำไปใช้กับขบวนการตัด (Plasma cutted)



(ก) ส่วนประกอบภายในของหัวเชื่อมพลาสมา และลักษณะของหัวเชื่อมพลาสมา

ที่มา : Weld Guru : Plasma Welding. 2019



(ข) หัวเชื่อมพลาสมาแบบ 1–6 ใช้สำหรับการเชื่อม Microplasma

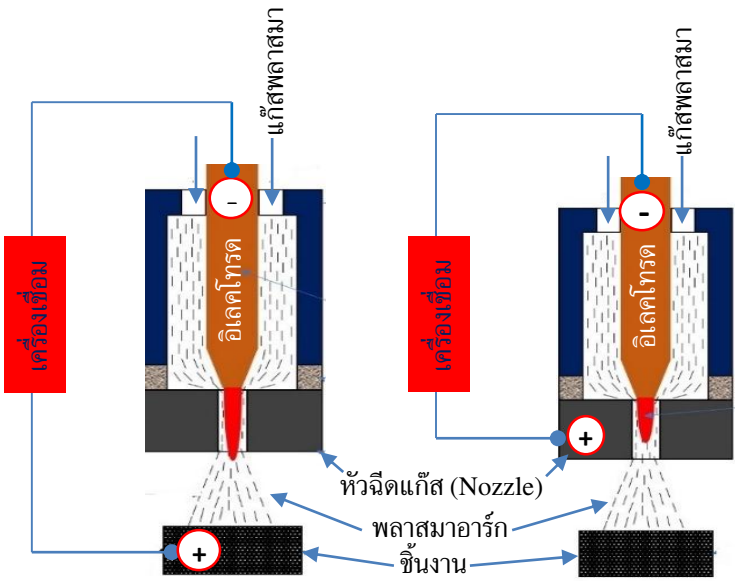
ที่มา : Process Welding Systems, Inc. 2009



(ค) หัวเชื่อมพลาสมาแบบ 7–11 ใช้สำหรับการเชื่อม High Amperage Plasma

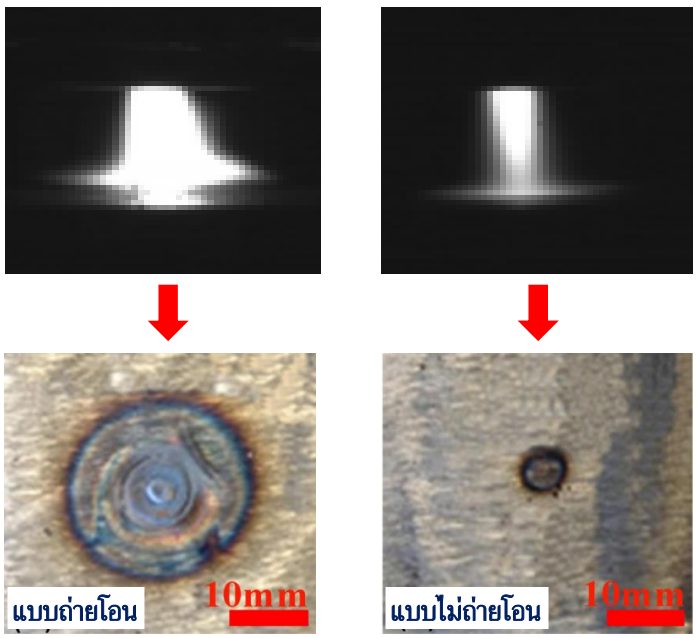
ที่มา : Process Welding Systems, Inc. 2009

รูปที่ 4.98 ส่วนประกอบและชนิดของหัวเชื่อมพลาสมา



(ก) แบบถ่ายโอนพลาสมาอาร์ก (Transferred arc plasma)

(ข) แบบไม่ถ่ายโอนพลาสมาอาร์ก (Non−transferred arc plasma)



(ค) เปรียบเทียบเปลวอาร์กและรอยเชื่อมแบบถ่ายโอนกับไม่ถ่ายโอนของพลาสมาอาร์ก

ที่มา : R. Zhang et al., Journal of Manufacturing Processes 24, 152−160, 2016

รูปที่ 4.99 ความแตกต่างของพลาสมาอาร์กในหัวเชื่อมแบบพลาสมา

ที่มา : Modern Arc Welding Technology : Ador Welding Limited , 2016

● การเชื่อมแบบไม่ถ่ายโอนพลาสมาอาร์กไปยังชิ้นงาน (Non–Transferred plasma arc welding) ดังแสดง ในรูปที่ 4. 99 (ข) โดยกระแสไฟเชื่อมขั้วลบ (–) จากเครื่องเชื่อมจะถูกต่อเข้ากับขั้วแท่งทังสเตนอิเลคโทรด และขั้วบวก (+) จะต่อเข้ากับหัวฉีดแก๊ส (Nozzle) แก๊สพลาสมาจะเกิดการอาร์กที่หัวฉีดแก๊ส โดยสเปร์ยพลาสมาวิ่งผ่านหัวฉีดที่แคบและเล็กด้วยความเร็วที่สูงมากเป็นรูปแบบของสเปร์ยที่เรียกว่า “สเปร์ยอาร์ก (Plasma spary arc)” ผ่านไปยังชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานจะหลอมละลายเป็นจุดรวมของปลายสเปร์ย นิยมใช้เชื่อมโลหะที่บาง ๆ ซึ่งไม่ต้องการความร้อนมาก วิธีการพลาสมาสเปร์ยนี้ยังเป็นที่นิยมสำหรับการพ่นเคลือบหรือพ่นพอก (Thermal spary) บนพื้นผิวโลหะ

3. ชุดคอนโซลควบคุม (Control console) เป็นชุดอุปกรณ์สั่งการควบคุมปัจจัยการเชื่อมพลาสมา ได้แก่ ควบคุมการไหลของแก๊สพลาสมา (Plasma gas flow) ควบคุมการไหลของแก๊สปกคลุม (Shielding gas flow) และควบคุมปัจจัยทางพลังงานไฟฟ้า (Current and Arc volte) โดยชุดคอนโซลนี้เป็นระบบหน่วยที่แยกส่วนกับระบบของตัวเครื่องเชื่อม ซึ่งอาจออกแบบประกอบร่วมไว้กับตัวของเครื่องเชื่อม (Built in unit) หรือบางครั้งอาจแยกส่วนออกมาจากตัวเครื่องเชื่อม (External unit)

4. ระบบน้ำระบายความร้อน (Water recirculator) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าระบายความร้อนของหัวเชื่อม ซึ่งการเชื่อมพลาสมาเกิดความร้อนขณะเชื่อมสูงมาก จึงจำเป็นต้องตรวจสอบระบบการไหลวนของน้ำเข้าและน้ำออกให้มีความพร้อมเสมอก่อนทำการเชื่อม

แก๊สและแท่งอิเลคโทรดของขบวนการเชื่อมพลาสมา (Gases and electrode of PAW)

การเชื่อมพลาสมามีวัสดุที่สิ้นเปลืองเป็นแก๊สพลาสมา (Plasma gas) และแก๊สปกคลุม (Shielding gas) กับแท่งทังสเตนอิเลคโทรด (Non–Consumsble tungsten electrode) ดังรายละอียดเพิ่มเติมของแต่ละอย่างดังต่อไปนี้

● แก๊สพลาสมา (Plasma gas/Orifice gas) การเลือกใช้แก๊สจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งเชื่อม การออกแบบรอยเชื่อม และชนิดของโลหะชิ้นงานเชื่อม ในทางปฏิบัติส่วนใหญ่มักเลือกใช้แก๊สพลาสมากับแก๊สปกคลุมเป็นชนิดเดียวกัน เว้นแต่ว่าบางลักษณะงานที่มีข้อดีข้อเสียของขบวนการเชื่อม ก็จะสามารถเลือกใช้แก๊สที่ต่างชนิดกันได้ แก๊สพลาสมาที่เลือกใช้จะเป็นกลุ่มประเภทแก๊สเฉื่อย (Inert gas) ที่นิยมเลือกใช้กันมากคือ แก๊สอาร์กอน (Argon) และแก๊สอาร์กอนผสมแก๊สไฮโดรเจน (Argon–Hydrogen mixture) ซึ่งต้องมีความบริสุทธิ์ของแก๊ส 99.99% เพราะช่วยลดอัตราการสิ้นเปลืองของแท่งอิเลคโทรด โดยปกติช่างเชื่อมจะปรับตั้งอัตราการไหลของแก๊สพลาสมาที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 0.1 – 5 ลิตร/นาที

● แก๊สปกคลุม (Shielding gas) เป็นแก๊สทำหน้าที่ปกป้องบ่อหลอมละลายจากแก๊สบรรยากาศภายนอก เช่นเดียวกับการแก๊สปกคลุมของการเชื่อมทิก ซึ่งเป็นจำพวกแก๊สเฉื่อย (Inert gas) เช่น แก๊สอาร์กอน (Ar) แก๊สฮีเลียม (He) แก๊สผสมอาร์กกอน+แก๊สฮีเลียม หรือบางครั้งใช้แก๊สแอคทีฟคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สำหรับการเชื่อมงานวัสดุบางชนิด การปรับอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมจะ

อยู่ที่ระหว่าง 5 – 15 ลิตร/นาที ของการเชื่อมกระแสต่ำ ส่วนกรณีที่เชื่อมกระแสสูงอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมจะอยู่ที่ระหว่าง 15 – 32 ลิตร/นาที

นอกจากแก๊สแล้วแท่งอิเลคโทรดที่เป็นโลหะทังสเตนก็เป็นวัสดุที่สิ้นเปลืองเช่นกัน ถึงแม้ว่าจะเป็น Non–consumable electrode ก็ตาม ชนิดของทังสเตนอิเลคโทรดสำหรับการเชื่อมพลาสมามีให้เลือกใช้เหมือนกันกับทังสเตนอิเลคโทรดของขบวนการเชื่อมทิก ดังแสดงชนิดของแท่งทังสเตนอิเลคโทรดแต่ละชนิดในรูปที่ 4.100 โดยช่างเชื่อมสามารถพิจารณาเลือกจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของทังสเตนอิเลคโทรดที่เหมาะสมกับการเชื่อมแต่ละโลหะงานที่ต้องการเชื่อม ซึ่งผู้ผลิตแท่งอิเลคโทรดจะมีคำแนะนำในการเลือกใช้กับงานเชื่อมที่เหมาะสม โดยต้องพิจารณาร่วมกับปัจจัยการเชื่อมที่สำคัญด้านอื่น ๆ อีกหลายปัจจัย ดังแสดงเป็นตัวอย่างถึงการกำหนดปัจจัยต่าง ๆ ของการเชื่อมพลาสมา ในตารางที่ 4.17



รูปที่ 4.100 แท่งทังสเตนอิเลคโทรดสำหรับการเชื่อมพลาสมา

ที่มา : CK WORLDEIDE : Tungsten Electrodes , 2016

ขบวนการเชื่อมพลาสมาช่างเชื่อมสามารถเชื่อมได้ทั้งแบบเติมลวดเชื่อม (Filler welding) และแบบไม่เติมลวดเชื่อม (Autogenous welding) ซึ่งจะเหมือนกับขบวนการเชื่อมทิก แต่ส่วนใหญ่นิยมใช้เชื่อมชิ้นงานที่ไม่เติมลวดโดยเฉพาะชิ้นงานขนาดเล็ก กรณีเชื่อมแบบเติมลวดก็สามารถเลือกใช้ลวดเชื่อมเปลือย (Filler metals) ที่ใช้กับการเชื่อมทิก ซึ่งมีให้เลือกหลากหลายชนิดวัสดุและหลากหลายขนาดความโตของลวดเชื่อม การเติมลวดเชื่อมด้วยช่างเชื่อมจะต้องสวมชุดป้องกันรังสีความร้อนจากเปลวพลาสมาอย่างมิดชิด เพราะรังสีจากเปลวอาร์กของแก๊สพลาสมามีความเข้มของรังสีมากกว่าการเชื่อมทิกหลายเท่า ช่างเชื่อมจึงต้องระวัดระวังเป็นพิเศษ

ตารางที่ 4.17 ตัวอย่างการกำหนดปัจจัยการเชื่อมพลาสมา

ที่มา : K.S. Prasad et al., Journal of Materials Science, ID. 136318706, 2011

ปัจจัยการเชื่อม (Welding parameters)	วัสดุโลหะชิ้นงาน (Base matels)
	AISI 304 SS (แผ่น 2 มม.)
● สภาพขั้วเครื่องเชื่อม (Polarity)	DCEN
● ระบบกระแสไฟเชื่อม (Mode Current)	ระบบพัลส์ (Pulse mode)
● แท่งทังสเตนอิเลคโทรด (Tungsten electrode)	2% thoriated tungetwn electrode
● ขนาดอิเลคโทรด (Electrode Diameter)	1 มม.
● พลาสมาแก๊ส (Plasma gas)	อาร์กอน +ไอโดรเจน
● อัตราการไหลแก๊สพลาสมา (Plasma gas flow rate)	6 ลิตร/นาที
● แก๊สปกคลุม (Shielding gas)	อาร์กอน
● อัตราการไหลแก๊สปกคลุม (Shielding gas flow rate)	0.4 ลิตร/นาที
● แก๊สทำความสะอาด (Purging gas)	อาร์กอน
● อัตราการไหลแก๊สทำความสะอาด (Purging gas flow rate)	0.4 ลิตร/นาที
● ขนาด Ø ของหัวฉีด (Nozzle diameter)	1 มม.
● ระยะห่างหัวฉีดกับชิ้นงาน (Nozzle ot plate distance)	1 มม.
● ความเร็วเชื่อม (Welding speed)	260 มม./นาที
● ตำแหน่งหัวเชื่อม (Torch position)	แนวตั้ง
● ควบคุมการเชื่อม (Welding control)	แบบอัตโนมัติ (Automatic control)

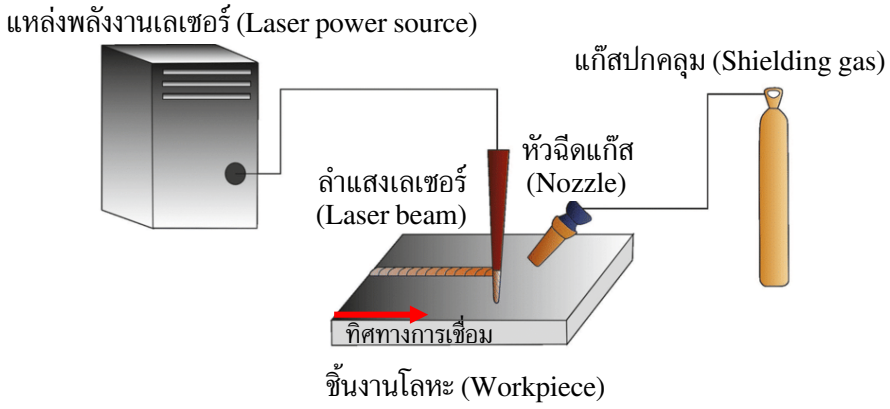
หมายเหตุ DCEP = Direct Current Electrode Negative

4.8 กรรมวิธีการเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์ (Laser Beam Welding : LBW)

กรรมวิธีการเชื่อมนี้เป็นการเชื่อมโลหะด้วยการอาร์กด้วยลำแสงเลเซอร์ โดยคำว่า “Laser” ย่อมาจาก “Light Amplification by Stimulated of Radiation” เป็นเทคโนโลยีการเชื่อมที่อาศัยความร้อนเพื่อการหลอมละลายให้โลหะติดกันจากการตกกระทบของจุดรวมลำแสงเลเซอร์ โดยพลังงานที่กระทบบนชิ้นงานมีความหนาแน่นสูงมาก สามารถจะสร้างความร้อนขึ้นได้อย่างรวดเร็วและเกิดขึ้นบนพื้นที่เล็กและแคบ จึงเป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่เหมาะสำหรับการเชื่อมงานที่ต้องการความแม่นยำสูง ผลกระทบที่เกิดจากการเชื่อมน้อยมาก แนวเชื่อมมีขนาดเล็กและแคบแต่มีความลึก เป็นขบวนการเชื่อมที่สามารถเชื่อมได้ทั้งแบบเติมลวดเชื่อม (มีทั้งเป็นผงโลหะและลวดโลหะ) และแบบไม่เติมลวดเชื่อมเรียกว่า Autogenous welding โดยอ้างอิงตามข้อมูลของ Interesting Engineering –Innovation (2019)

หลักการทำงานของระบบการเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.101 โดยมีองค์ประกอบหลักสำคัญ คือ แหล่งสร้างพลังงานเลเซอร์ (Laser power source) จากนั้นพลังงานก็จะถูกส่งผ่านไปยังหัวเชื่อม ซึ่งภายในหัวเชื่อมทำหน้าที่รวมพลังงานแสงเลเซอร์ให้รวมเป็นจุดเดียวกันเป็น

ลักษณะของลำแสงเลเซอร์ (Laser beam) ด้วยเลนส์รวมแสง แล้วส่งลำแสงผ่านไปยังชิ้นงานเพื่อสร้างบ่อหลอมละลายด้วยความร้อน ซึ่งในขณะเดียวกันก็มีการป้อนแก๊สเฉื่อย (Inert gas) ให้ไหลผ่านหัวฉีดแก๊ส (Nozzle) ออกไปเพื่อใช้ปกคลุมน้ำโลหะที่หลอมละลาย



รูปที่ 4.101 องค์ประกอบของขบวนการเชื่อมเลเซอร์

ที่มา : TVM : Laser Beam Welding–Equipment and Principle, 2017

TVM Laser Beam Welding (2017) ได้อธิบายถึงระบบกลไกของการสร้างลำแสงเลเซอร์ที่เกิดขึ้นภายในหัวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.102 เมื่อรับพลังงานไฟฟ้าแรงสูง (Power supply) ป้อนเข้าสู่หลอดไฟวาบหรือหลอดไฟแฟลช (Flash lamps) หลอดไฟจะปล่อยแสงโปรตอนออกมาในหลอดเลเซอร์ (Laser discharge tube) ซึ่งพลังงานของแสงโปรตรอนจะถูกดูดซับด้วยผลึกทับทิม (Rudy crystal) ทำให้พลังงานมีความเข้มของแสงมากขึ้นและหลังจากนั้นก็ถูกสะท้อนด้วยกระจก (Reflecting mirror) ผ่านไปยังเลนส์รวมแสง (Focused lens) เพื่อส่องลำแสงเลเซอร์ (Laser light beam) ไปยังตำแหน่งชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม

ชนิดของเลเซอร์ที่นิยมใช้งานกัน มี 3 ชนิด ดังนี้

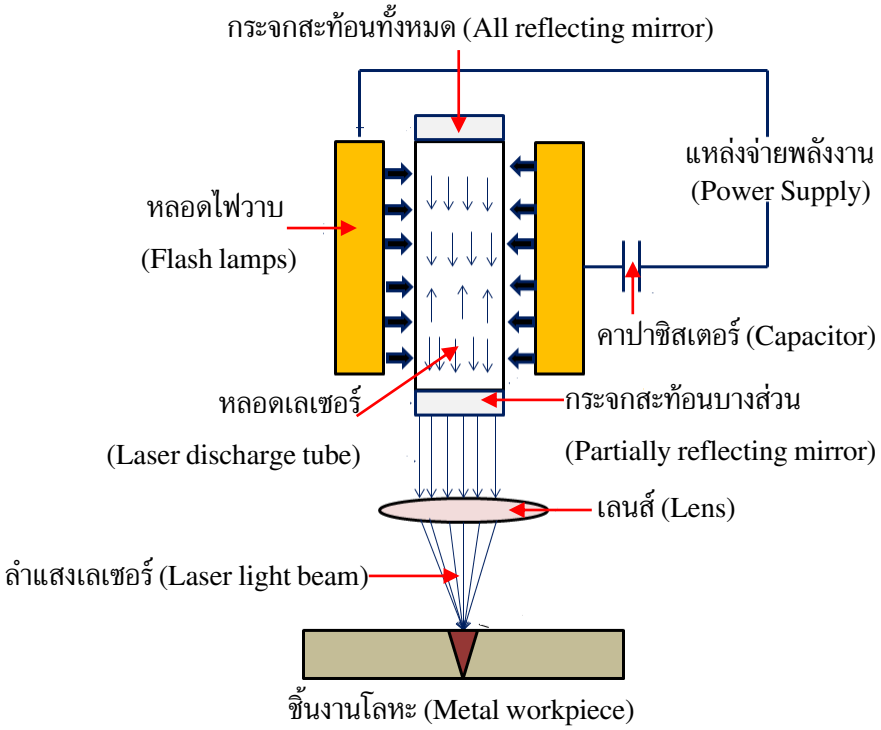
1. เลเซอร์แก๊ส (Gas laser) เป็นเลเซอร์ที่ได้จากการใช้แก๊สผสมเป็นตัวกลางผลิต ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน (N) แก๊สฮีเลียม (He) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

2. เลเซอร์ของแข็ง (Solid–state laser) เป็นเลเซอร์ที่ผลิตได้จากการใช้วัตถุของแข็งเป็นตัวกลาง ได้แก่ ผลึกทับทิมสังเคราะห์ (Chromium in aluminium oxide) นิโอไนเดียมในแก้ว (Nd : Glass) และนิโอไนเดียมในอลูมิเนียมอิตเทรียม (Nd–YAG)

3. เลเซอร์ไฟเบอร์ (Fiber laser) เป็นเลเซอร์ที่ผลิตได้จากการใช้ใยแก้วนำแสง (Optic fiber) เป็นตัวกลาง

โดยเลเซอร์แต่ละชนิดมีหลักการกำเนิดที่แตกต่างกัน ด้วยเพราะสถานะของตัวกลางที่ใช้ผลิตแสงเลเซอร์แตกต่างกัน ดังนั้น การออกแบบหัวเชื่อม (Welding torch) ซึ่งส่วนใหญ่เรียก “Laser

welding machince” เพราะหัวเชื่อมเป็นเครื่องมือหลักที่สำคัญของการผลิตลำแสงเลเซอร์ มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน มีให้เห็นหลากหลายตามการออกแบบของผู้ผลิต



รูปที่ 4.102 ระบบกลไกของการสร้างลำแสงเลเซอร์ (Laser beam) ของหัวเชื่อม

ที่มา : TVM : Laser Beam Welding–Equipment and Principle, 2017

หัวเชื่อมเลเซอร์ (Welding torch / Welding machince)

ขบวนการเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์หัวเชื่อมถือเป็นเครื่องมือหลักที่สำคัญ เพราะเป็นอุปกรณ์ส่วนที่สร้างลำแสงเลเซอร์ขึ้นภายใน จนบางครั้งช่างเชื่อมเรียกว่า “Welding machince” เพราะบทบาทหน้าที่หลักเป็นเปรียบเสมือนเครื่องเชื่อมซึ่งภายในประกอบไปด้วยอุปรณ์ชิ้นส่วนหลายชิ้นและมีความแม่นยำสูง ดังในรูปที่ 4.102 ขณะใช้งานจึงต้องระมัดระวังที่อาจเกิดความเสียหายได้ง่าย และด้วยความหลากหลายของชนิดเลเซอร์ที่ใช้ผลิตลำแสงกับความเหมาะสมและความสะดวกของแต่ละลักษณะงานที่ต้องการเชื่อม ผู้ผลิตจึงได้มีการออกแบบหัวเชื่อมที่รองรับตามประเภทงาน สามารถแยกได้ 2 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 4.103 กล่าวคือ

1. หัวเชื่อมเลเซอร์ประเภทมือถือ (Handheld welding torch) หัวเชื่อมประเภทนี้ใช้กับคนถือเชื่อม ออกแบบมาเหมาะสมและสะดวกในการจับถือน้ำหนักเบา (ประมาณ 800–1,000 กรัม) โดยมีทั้งแบบมีระบบการเติมลวดเชื่อม (Filler rods) หรือผงโลหะ (Power metals) ลงในบ่อหลอมละลายและแบบไม่เติมลวด ซึ่งทั้งสองแบบได้แสดงเปรียบเทียบให้เห็นในรูปที่ 4.103 (ก)

2. หัวเชื่อมเลเซอร์ประเภทหุ่นยนต์ (Robot welding torch) หัวประเภทนี้ออกแบบมาเพื่อใช้งานกับการเชื่อมโดยหุ่นยนต์/แขนกลที่เป็นการเชื่อมด้วยระบบอัตโนมัติ การออกแบบค่อนข้างซับซ้อน เพราะต้องมีอุปกรณ์ช่วยเสริมมากขึ้น เช่น ระบบเซ็นเซอร์ต่าง ๆ เพื่อควบคุมการทำงาน วัสดุที่ประกอบหัวเชื่อมต้องทนต่อความร้อนได้สูง เพราะระบบหุ่นยต์ทำงานเชื่อมได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ดังแสดงลักษณะรูปแบบของหัวเชื่อมในรูปที่ 4.103 (ข)

หัวเชื่อมเลเซอร์จะติดตั้งหัวฉีด (Nozzle) อยู่ที่ปลายของหัวเชื่อมซึ่งทำจากโลหะทองแดงหรือทองแดงผสม โดยมีการออกแบบปลายของหัวฉีดที่หลากหลายรูปแบบเพื่อความสะดวกและเข้าถึงตำแหน่งที่ต้องการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.103 (ค)



หัวเชื่อมเลเซอร์ชนิดเติมลวดเชื่อม

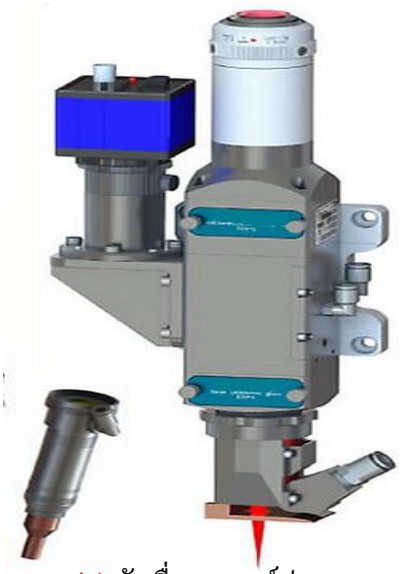
ที่มา : LASER MACH, 2021



หัวเชื่อมเลเซอร์ชนิดไม่เติมลวดเชื่อม

ที่มา : MORN LASER, 2020

(ก) หัวเชื่อมเลเซอร์ประเภทมือถือ (Handheld)



(ข) หัวเชื่อมเลเซอร์ประเภทหุ่นยนต์ (Robot)

ที่มา : LASER MACH, 2021



(ค) หัวฉีดของหัวเชื่อมเลเซอร์ (Nozzle)

ที่มา : DMK Laser welding nozzle, 2019

รูปที่ 4.103 หัวเชื่อมของกรรมวิธีการเชื่อมเลเซอร์ (Laser welding torch)

เครื่องเชื่อมเลเซอร์ (Welding machince)

เครื่องเชื่อมเลเซอร์ในที่นี้หมายถึงชุดเครื่องเชื่อมที่ออกแบบมาใช้งานตามลักษณะของงานที่ต้องการเชื่อม ซึ่งแบ่งเป็นลักษณะของเครื่องเชื่อมตามลักษณะของงานเชื่อม ดังนี้

1. เครื่องเชื่อมเลเซอร์แบบพกพา (Portable welding machince) เครื่องเชื่อมประเภทนี้ออกแบบมาเหมาะสำหรับการใช้กับงานภาคสนามที่ต้องเคลื่อนย้ายเครื่องเชื่อมไปเชื่อมงานในสถานที่ต่าง ๆ เช่น งานซ่อมหรืองานเฉพาะกิจบางอย่าง มีขนาดเครื่องเล็ก น้ำหนักเบา ไม่มีอุปกรณ์เสริม ดังแสดงลักษณะตัวอย่างของเครื่องเชื่อมแบบพกพาในรูปที่ 4.104 (ก)

2. เครื่องเชื่อมเลเซอร์เครื่องประดับ (Jeweelery welding machince) เป็นเครื่องเชื่อมที่ออกแบบมาใช้กับงานเชื่อมผลิตภัณฑ์เครื่องประดับ (Jeweelery) เช่น เชื่อมโลหะทอง โลหะเงิน หรือโลหะมีค่าอื่น ๆ โดยมีจุดเด่นของการเชื่อมงานที่มีขนาดเล็ก ต้องการพื้นที่รอยเชื่อมน้อย การเข้าถึงตำแหน่งเชื่อมลำบาก รอยเชื่อมมีขนาดเล็ก ๆ เป็นต้น ชุดอุปกรณ์ของเครื่องเชื่อมจะมีอุปกรณ์เสริมหลายอย่าง เช่น กล้องที่มีกำลังขยายสูง มีแท่นและอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน พร้อมคอมพิวเตอร์ควบคุมปัจจัยการเชื่อม ดังแสดงลักษณะตัวอย่างของเครื่องเชื่อมเลเซอร์เครื่องประดับ ในรูปที่ 4.104 (ข)

3. เครื่องเชื่อมเลเซอร์แบบ CNC (CNC welding machince) เป็นเครื่องเชื่อมเลเซอร์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมการผลิต โดยมีระบบของขบวนการเชื่อมที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ที่สามารถเชื่อมได้แบบอัตโนมัติ ซึ่งจะมีอุปกรณ์เสริมในขบวนการเชื่อมมากขึ้น มีความแม่นยำสูง เครื่องเชื่อมราคาค่อนข้างสูง ดังแสดงลักษณะตัวอย่างของเครื่องเชื่อมเลเซอร์ CNC ในรูปที่ 4.104 (ค)

4. เครื่องเชื่อมเลเซอร์แบบหุ่นยนต์ (Robot welding machince) เป็นเครื่องเชื่อมที่ใช้กับหุ่นยนต์หรือแขนกล เหมาะกับงานเชื่อมชิ้นส่วนยานยนต์หรืองานโรงงานผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ สามารถเชื่อมได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน มีระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมสั่งการเป็นระบบการเชื่อมที่ใช้หุ่นยนต์แทนแรงงานช่างเชื่อมได้เป็นอย่างดี ระบบการเชื่อมมีความแม่นยำสูง ดังแสดงลักษณะตัวอย่างของเครื่องเชื่อมเลเซอร์ที่ใช้กับหุ่นยนต์ ในรูปที่ 4.104 (ง)

จากที่กล่าวมาข้างต้น งานเชื่อมเลเซอร์มีทั้งลักษณะงานที่มีขนาดเล็กและขนาดใหญ่ จึงได้มีการออกแบบเครื่องเชื่อมเลเซอร์ที่หลากหลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทสามารถเชื่อมได้ทั้งแบบที่ไม่ต้องการแนวเชื่อมที่ซึมลึก เรียกว่า “Heat conduction welding” หมายถึง การเชื่อมที่อาศัยหลักการนำความร้อนของโลหะที่เชื่อมแล้วเกิดการหลอมละลายแล้วทำให้เนื้อโลหะติดกัน ขณะอาร์กไม่จำเป็นต้องมีคีย์โฮล (Key hole) จะเกิดการหลอมละลายที่บริเวณผิวโลหะงาน โดยไม่ต้องการโลหะเติมเนื้อเชื่อม (Non−filler metals) โดยปกติการเชื่อมแบบไม่ซึมลึกนี้จะเป็นการซ่อมโลหะกลุ่มประเภทงานบาง งานที่มีขนาดเล็ก ๆ เป็นต้น ดังกลไกของการเชื่อมแสดงในรูปที่ 4.105 (ก) ส่วนแบบที่ต้องการแนวเชื่อมที่มีการซึมลึกมากที่เรียกว่า “Deep penetration welding” หมายถึง การเชื่อมที่อาศัยความร้อนจากลำแสงเลเซอร์เพื่อการสร้างบ่อหลอมละลายในปริมาณที่มาก เพราะขณะอาร์กจะต้องสร้างคีย์โฮลให้มีความลึกตามที่ต้องการตามระดับของรอยซึมลึก ซึ่งขณะเชื่อมบ่อหลอมละลายจะมีพลาสมาอาร์ก

(Plasma arc) และไอของโลหะ (Metal vapor) ดังแสดงกลไกการเกิดในรูปที่ 4.105 (ข) ส่วนใหญ่แล้วจะใช้เชื่อมโลหะที่มีความหนาหรือเป็นประเภทงานที่มีขนาดใหญ่ ๆ เป็นต้น



(ก) เครื่องเชื่อมเลเซอร์แบบพกพา
(Portable welding machince)
ที่มา : IPG, Photonics , 2020



(ข) เครื่องเชื่อมเลเซอร์เครื่องประดับ
(Jeweelery welding machince)
ที่มา : BCXLASER , 2020



(ค) เครื่องเชื่อมเลเซอร์แบบ CNC
(CNC welding machince)
ที่มา : LASER MACH, 2020

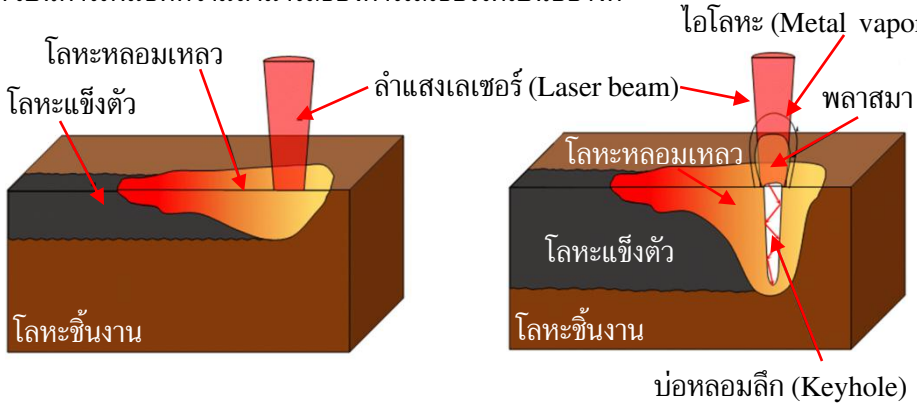


(ง) เครื่องเชื่อมเลเซอร์แบบหุ่นยนต์
(Robot welding machince)
ที่มา : KING LASER, 2021

รูปที่ 4.104 ประเภทของเครื่องเชื่อมเลเซอร์ตามลักษณะของงานที่เชื่อม

การเชื่อมเลเซอร์สามารถเชื่อมได้ทั้งแบบไม่เติมลวด (Autogenous welding) และแบบเติมลวด (Filler metals welding) กรณีที่เชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อมจะคล้ายกับขบวนการเชื่อมทิกและขบวนการเชื่อมพลาสมาดังแสดงในรูปที่ 4.106 (ก) แต่สำหรับกรณีที่เชื่อมแบบเติมลวดจะเป็นการเติมลวดโลหะที่อาศัยวิธีการเชื่อมอื่นมาร่วมด้วย เรียกว่า การเชื่อมแบบไฮบริด (Hybrid welding) ซึ่งสามารถร่วมกับการเชื่อมทิก (GTAW) หรือ มิก/แม็ก (GMAW) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของงานแนวเชื่อมที่ต้องการและปัจจัยของการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.106 (ข) โดยทั้งสองแบบมีกลไกการควบคุมวิธีการ

และองค์ประกอบของเชื่อมที่ต่างกัน ปัจจุบันได้มีการนำกรรมวิธีการเชื่อมเลเซอร์แบบไฮบริดมาใช้งานกันมาก เป็นการเพิ่มขีดความสามารถของการเลเซอร์ได้เป็นอย่างดี

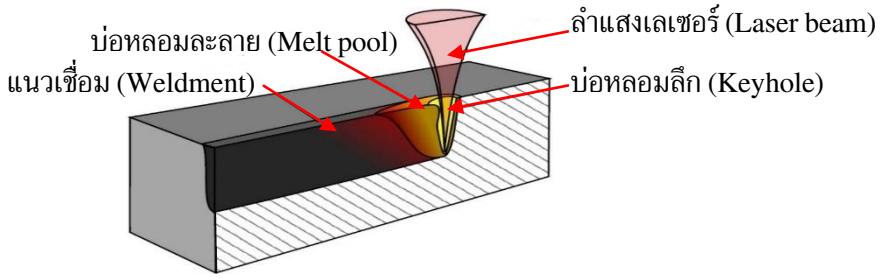


(ก) การเชื่อมเลเซอร์แบบไม่ซึมลึก (Heat conduction welding)

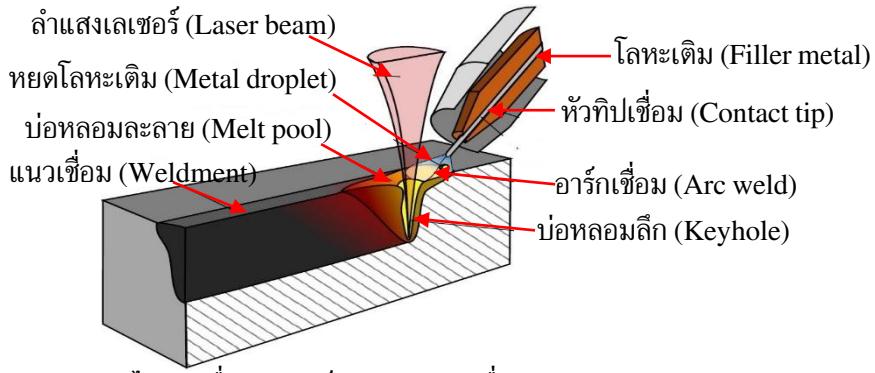
(ข) การเชื่อมเลเซอร์แบบซึมลึก (Deep penetration welding)

รูปที่ 4.105 เปรียบเทียบวิธีการเชื่อมเลเซอร์แบบไม่ซึมลึกกับแบบซึมลึก

ที่มา : Journal of Welding in the world, 64, pp 611–622, 2020



(ก) กลไกการเชื่อมเลเซอร์แบบไม่เติมลวดเชื่อม (Autogenous welding)



(ข) กลไกการเชื่อมเลเซอร์แบบเติมลวดเชื่อม (Filler metal welding)

รูปที่ 4.106 เปรียบเทียบกลไกของการเชื่อมเลเซอร์แบบไม่เติมลวดกับแบบเติมลวด

ที่มา : IONIX : Laser Welding Processing, 2018

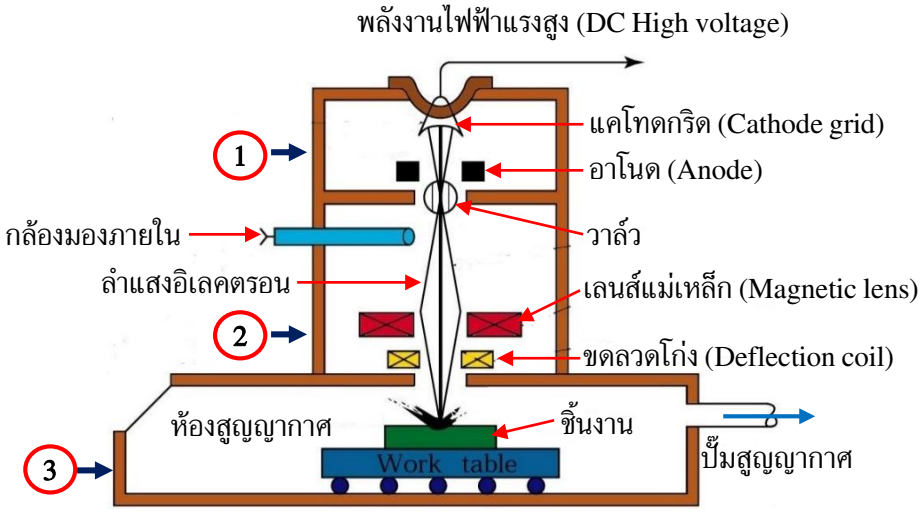
4.9 กรรมวิธีการเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Welding : EBW)

P N Siddharth et al. (2020) ได้ทำการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยของกรรมวิธีการเชื่อมนี้ และได้สรุปไว้ว่า การเชื่อมโลหะด้วยการอาร์กด้วยลำแสงอิเลคตรอน (Electron beam) จะเป็นขบวนการเชื่อมที่แตกต่างจากขบวนการเชื่อมอื่น ๆ มีระบบที่เป็นหน่วยเชื่อม (Unit welding) ดังแสดงในรูปที่ 4.107 โดยระบบประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1. เรียกว่า “Beam generation” เป็นส่วนหลักที่สร้างลำแสงอิเลคตรอน โดยอาศัยแหล่งพลังไฟฟ้าแรงสูง ชนิดกระแสตรง (30 kV : DC) ป้อนเข้าสู่ระบบผ่านขั้วแคโทดและอาโนดจนเกิดเป็นพลังงานลำแสงอิเลคตรอน

ส่วนที่ 2. เรียกว่า “Beam foeming and guidance” เป็นส่วนกลางที่รับลำแสงอิเลคตรอนที่ผ่านวาล์วออกมาแล้วมาตกลงบนเลนส์แม่เหล็ก (Magnetic lens) จะเกิดการรวมลำแสงของอิเลคตรอนทำให้ลำแสงมีพลังงานสูงขึ้น โดยผ่านขดลวดโก่ง (Deflection coil) จะคอยควบคุมลำแสงไม่ให้กระเจิงออกไป ส่วนนี้จะมีกล้องสำหรับมองเห็นระบบการทำงานภายใน

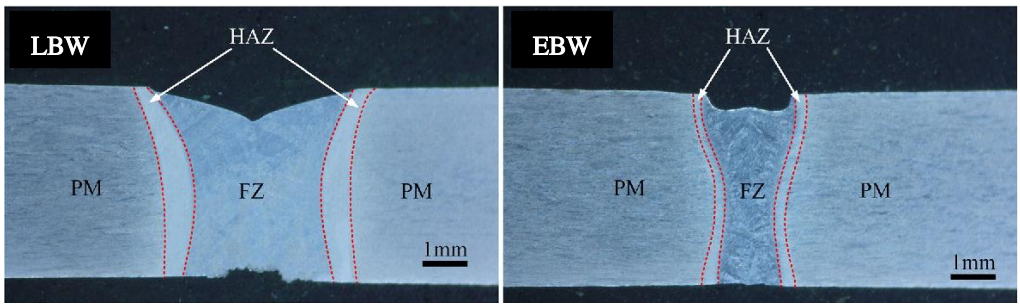
ส่วนที่ 3. เรียกว่า “Working chamber” เป็นส่วนของห้องเชื่อมชิ้นงานที่เป็นระบบสูญญากาศ (Vacuum chamber) โดยมีระบบปั๊มสร้างสูญญากาศ เหตุผลจำเป็นสำคัญที่การเชื่อมต้องทำงานภายใต้สภาวะสูญญากาศ เพราะว่าอิเลคตรอนของลำแสงเมื่อปะทะกับโมเลกุลของอากาศจะเกิดการกระเจิงทำให้ประสิทธิภาพของการรวมลำแสงอิเลคตรอนลดลง ขาดความแม่นยำและเที่ยงตรง ซึ่งถ้าอิเลคตรอนเคลื่อนที่ไม่ผ่านอากาศ (Vacuum chamber) สามารถรวมลำแสงอิเลคตรอนได้เล็กมากถึง 0.3–0.8 มิลลิเมตร ภายในห้องสูญญากาศจะมีชุดอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานสามารถเคลื่อนที่นำชิ้นงานเข้าและออก



รูปที่ 4.107 ระบบหน่วยเชื่อมด้วยลำแสงอิเลคตรอน (Unit welding)

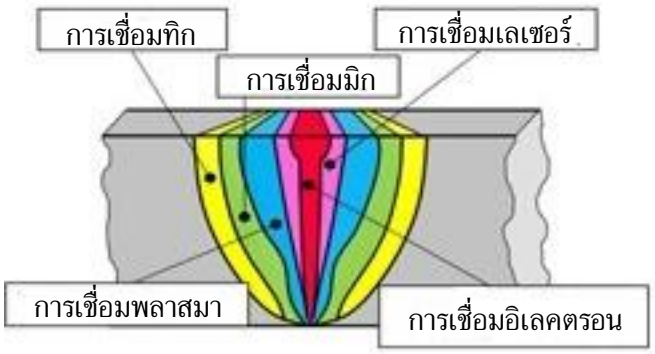
ที่มา : Mechanical Engineering : Electron Beam Machining (EBM) Principles, 2016

การเชื่อมด้วยลำแสงอิเลคตรอน (EBW) เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาเพื่อรองรับกับลักษณะงานที่ขบวนการเชื่อมอื่น ๆ ไม่สามารถเชื่อมได้ โดยขีดความสามารถการเชื่อมคล้ายกับขบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ ต่างที่การเชื่อมด้วยลำแสงอิเลคตรอนจะทำการเชื่อมในระบบสูญญากาศ และมีขนาดแนวเชื่อมที่เกิดการหลอมละลายที่เล็กกว่าจึงเหมาะกับงานที่บางและเล็ก โดยปราศจากปัญหาอากาศเข้ามารวมตัวกับแนวเชื่อม ดังตัวอย่าง เปรียบเทียบขนาดของแนวเชื่อมของการเชื่อมโลหะอลูมิเนียมด้วยกรรมวิธี EBW กับLBW ในรูปที่ 4.108 จะเห็นได้ชัดเจนว่า แนวเชื่อมที่เกิดจากขบวนการเชื่อมด้วยลำแสงอิเลคตรอนจะมีส่วนหลอมละลาย (FZ) และโซนที่กระทบจากความร้อน (HAZ) ที่แคบและเล็ก ถ้าจะเปรียบเทียบกับขบวนการเชื่อมอื่น ๆ ดังแสดงรูปที่ 4.109



รูปที่ 4.108 เปรียบเทียบขนาดแนวเชื่อมของการเชื่อมด้วยกรรมวิธี EBW กับ LBW

ที่มา : Metal and Meterials International. 2020.



รูปที่ 4.109 เปรียบเทียบขนาดแนวเชื่อมของการเชื่อมด้วยกรรมวิธี EBW กับ ขบวนการเชื่อมอื่น ๆ

ที่มา : Journal of Vacuum , Vol. 130, pp. 72–92, 2016

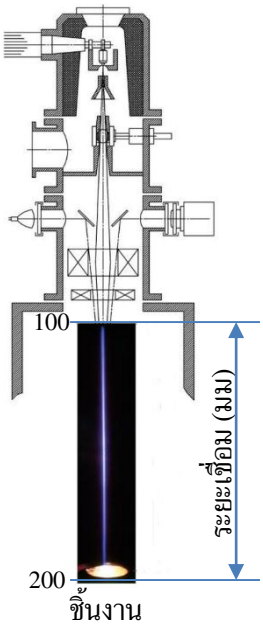
เครื่องเชื่อมสำหรับขบวนการเชื่อมด้วยลำแสงอิเลคตรอนจะเป็นระบบหน่วยเชื่อมที่เป็นชุดเดียวกัน (Unit welding) ไม่ได้แยกออกจากกันเหมือนขบวนการเชื่อมอื่น ๆ ด้วยเพราะขบวนการปฏิบัติการเชื่อมจะกระทำอย่างต่อเนื่องในระบบปิด ดังแสดงตัวอย่างของชุดหน่วยเครื่องเชื่อมในรูปที่ 4.110 โดยชุดหน่วยเชื่อมได้มีการออกแบบไว้หลายขนาดตามระดับของชุดสร้างระบบสูญญากาศ (Vacuum levels) ซึ่งปัจุบันมีการเชื่อมด้วยลำแสงอิเลคตรอนในระดับของสูญญากาศ 3 ระดับ คือ

- การเชื่อมที่ระดับสูญญากาศสูง (High –vacuum welding : EBW–HV) เป็นชุดเครื่องเชื่อมที่สามารถสร้างระดับสูญญากาศได้สูง การควบคุมลำแสงอิเลคตรอนจึงมีประสิทธิภาพสูง ส่งผลให้คุณภาพของแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ ซึ่งเหมาะกับการเชื่อมงานที่ต้องการความแม่นยำสูงและเน้นคุณภาพแนวเชื่อม แต่มีต้นทุนการเชื่อมที่สูงเช่นกัน ระดับสูญญากาศอยู่ที่ 0.13 ถึง 133 MPa (10^{-6} ถึง 10^{-3} torr)
- การเชื่อมที่ระดับสูญญากาศปานกลาง (Medium –vacuum welding : EBW–MV) เป็นชุดเครื่องเชื่อมที่สร้างสูญญากาศได้ในระดับปานกลาง การควบคุมลำแสงอิเลคตรอนและคุณภาพของแนวเชื่อมก็ลดลงอยู่ในระดับปานกลาง แต่ต้นทุนการเชื่อมลดลงมาก ระดับสูญญากาศอยู่ที่ 133 ถึง 3.3 x 10^{6} MPa (10^{-3} ถึง 25 torr)
- การเชื่อมที่ระดับสูญญากาศต่ำ/ไม่มีระบบสูญญากาศ (Non /Near atmospheric–vacuum welding : EBW–NV) เป็นชุดเครื่องเชื่อมด้วยลำแสงอิเลคตรอนที่มีระบบปั๊มสร้างสูญญากาศที่ไม่สูงเพราะต้องการบรรยากาศภายในห้องเชื่อม (Vacuum chamber) เพียงแค่ต่ำกว่าบรรยากาศเพียงเล็กน้อยหรือเท่ากับบรรยากาศ ซึ่งช่วยลดเวลาและต้นทุนของการสร้างระบบสูญญากาศได้มาก จึงเหมาะกับการเชื่อมที่ไม่ต้องการคุณภาพหรือความแม่นยำเที่ยงตรงมากนัก เพราะการควบคุมลำแสงอิเลคตรอนกระทำได้ไม่ดีในบรรยากาศที่สูญญากาศต่ำ ๆ ระดับสูญญากาศอยู่ที่ 1 atm (101.325 kPa)

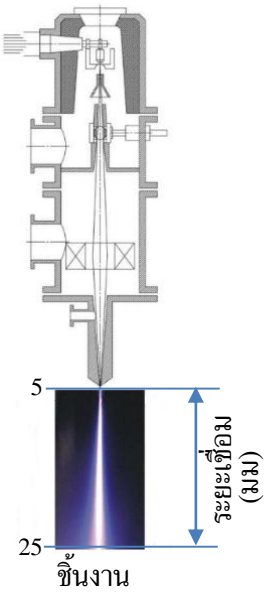
ดังนั้น การเชื่อมในห้องระบบสูญญากาศที่ระดับสูง (EBW–HV) จะเหมาะสมกับการเชื่อมด้วยลำแสงอิเลคตรอนและเหมาะกับการเชื่อมงานที่มีต้องการความแม่นยำและมีประสิทธิภาพสูง เพราะควบคุมลำแสงอิเลคตรอนได้ดี ดังแสดงเปรียบเทียบ ความแตกต่างของลำแสงอิเลคตรอนและระยะเชื่อมที่ต่างกันของการเชื่อมภายใต้ระดับสูญญากาศสูงกับระดับสูญญากาศ (EBW–NV)ต่ำ ในรูปที่ 4.111 (ก) และ (ข) ตามลำดับ นอกจากนี้ในรูปที่ 4.111 (ค) แสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าการควบคุมลำแสงอิเลคตรอนภายใต้สภาวะสูญญากาศที่ต่ำลำแสงจะกระเจิงและโฟกัสได้ยากกว่าที่ระดับสูญญากาศสูง



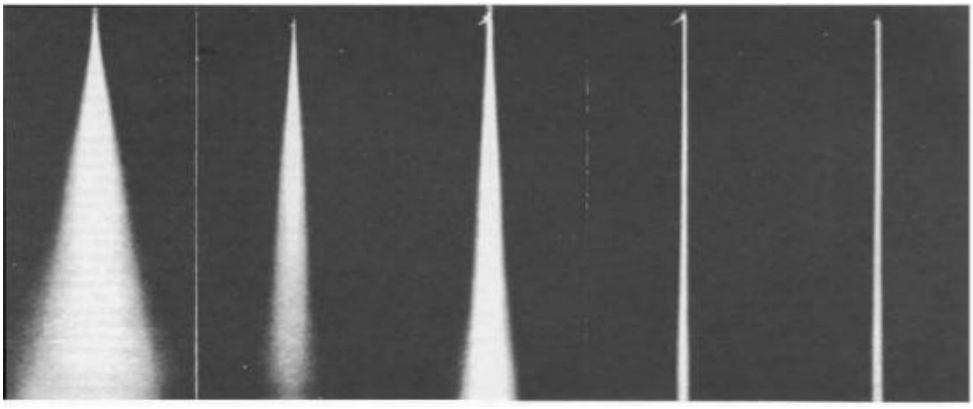
รูปที่ 4.110 ชุดระบบเครื่องเชื่อมลำแสงอิเลคตรอน (EBM)
ที่มา : PTR Precision Technologies : Electron beam welding system, 2008



(ก) การเชื่อมที่ระดับสูญญากาศสูง (EBW–HV)



(ข) การเชื่อมที่ระดับสูญญากาศต่ำ/ไม่มี (EBW–NV)



750 torr 500 torr 250 torr 50 torr 5 torr

(ค) ลักษณะของลำแสงอิเลคตรอนที่ระดับสูญญากาศจากต่ำไปสูง

รูปที่ 4.111 เปรียบเทียบการเชื่อมลำแสงอิเลคตรอนที่ระดับสูญญากาศต่างกัน

ที่มา : GLOBA Beam Technologies AG: Electron beam welding system, 2007

ลำดับขั้นตอนโดยปกติที่เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นและสิ้นสุดการเชื่อมภายในห้องเชื่อม (Chamber welding) ของขบวนการเชื่อมด้วยลำแสงอิเลคตรอน มี 4 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 4.112 โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอน ดังนี้ โดยอ้างอิงจาก Aman P Kaur (2016)

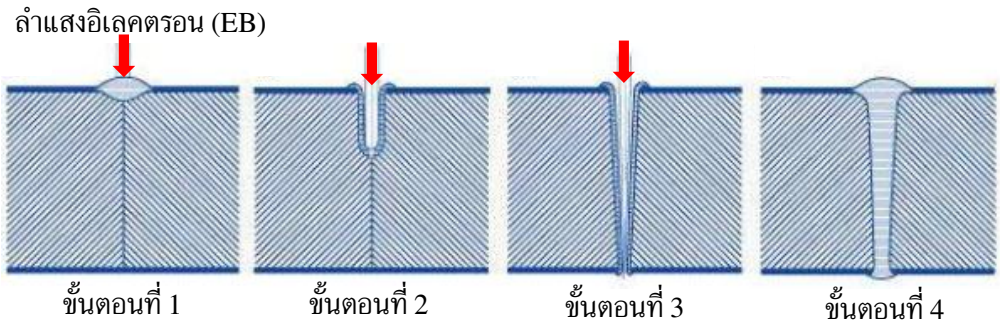
ขั้นตอนที่ 1 เมื่อนำชิ้นงานโลหะที่ต้องการเชื่อมมาจับยึดบนโต๊ะวางชิ้นงานภายในห้องเชื่อมสูญญากาศเป็นที่เรียบร้อย ก็ปล่อยลำแสงอิเลคตรอนมากระทบกับผิวบนตำแหน่งที่ต้องการเชื่อม เกิดการเริ่มต้นหลอมละลายทันทีที่บริเวณผิวโลหะชิ้นงาน

ขั้นตอนที่ 2 ชิ้นงานเกิดการหลอมละลายมากขึ้น และลงไปในแนวลึกเกิดเป็นลักษณะของรูที่มีรูปคล้ายกุญแจ ที่เรียกกันว่า “Keyhole”

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนนี้รอยหลอมลึกจะมากขึ้นจนทะลุอีกด้านของชิ้นงานเชื่อม และเนื้อโลหะที่หลอมเหลวก็จะเริ่มไหลเข้ามาผสานกันตลอดความลึกของความหนาชิ้นงาน

ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนนี้เนื้อโลหะที่หลอมละลายจะรวมตัวกัน และจะเริ่มแข็งตัวได้เป็นแนวเชื่อมที่สมบูรณ์

โดยลำดับขั้นตอนที่เกิดขึ้นทั้ง 4 ขั้นตอนนี้เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้นมากเพราะอัตราการหลอมเหลวด้วยลำแสงอิเลคตรอนจะมีพลังงานความร้อนสูงมาก สามารถสร้างความร้อนได้อย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุโลหะและความหนาของโลหะที่เชื่อม



รูปที่ 4.112 ลำดับขั้นตอนการเชื่อมด้วยลำแสงอิเลคตรอน

ที่มา : Aman P Kaur : Electron beam welding, Thesis Ph.D., 2016

ดัชนีคำศัพท์บทที่ 4

Autogenous welding – การเชื่อมต่อแบบไม่ใช้ลวดเชื่อม

ACHF welding – การเชื่อมด้วยกระแสสลับความถี่สูง

Arc force – การรักษาระยะอาร์กของการเชื่อมทิก

Beam generation – ส่วนหลักของแหล่งกำ เนิดอิเล็กตรอน

Capacitor discharge stud welding (CD Stud) – การเชื่อมสลักเกลียวแบบปล่อยประจุ

Carburizing flame – เปลวไฟเชื่อมที่คาร์บอนมาก (เปลวลด)

EBW – กรรมวิธีการเชื่อมด้วยลำแสงอิเล็กตรอน

EBW–HV – การเชื่อมด้วยลำแสงอิเล็กตรอนที่ระดับสูญญากาศสูง

EBW–NV – การเชื่อมด้วยลำแสงอิเล็กตรอนที่ระดับสูญญากาศต่ำ

Electrode collet – หัวจับล๊อคแท่งลวดทังสเตน

Electrode force gauge – เครื่องวัดแรงกดของการเชื่อมจุด (Spot)

Electrode mushrooming – แท่งอิเลคโทรดที่เสียหายหัวบานคล้ายดอกเห็ด

Ferrule – หัวครอบเซรามิกส์สวมแท่งอาร์กสตัด

FRW – กรรมวิธีการเชื่อมแบบเสียดทาน

Generators welding machine – เครื่องเชื่อมที่จ่ายไฟทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ (AD และ AC)

GTAW – กรรมวิธีการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม

Heliweld / Heliarc– การเชื่อมอาร์กด้วยลวดทังสเตนที่ใช้แก๊สฮีเลียมปกคลุม

Heterogenous welding – การเชื่อมที่ลวดเชื่อมกับโลหะงานต่างชนิดกัน

Homogenous welding – การเชื่อมที่ลวดเชื่อมกับโลหะงานเป็นชนิดเดียวกัน

Hot start – การเพิ่มกระแสขณะเริ่มอาร์กของการเชื่อมทิก

Laser – เป็นคำย่อมาจาก Light Amplification by Stimulated of Radiation

LBW – กรรมวิธีการเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์

Leftward welding – การเดินหัวเชื่อมไปทางด้านซ้ายมือ

Linear friction welding : LFW – การเสียดเชื่อมทานแบบเส้นตรง

Massive electrode – แท่งขั้วอิเลคโทรดแบบเนื้อเดียวทั้งแท่ง

Micro plasma welding machine – เครื่องเชื่อมพลาสมาสำหรับงานขนาดเล็ก

Mixing chamber – ห้องผสมแก๊สภายในหัวเชื่อม

Neutral flame – เปลวไฟเชื่อมที่คาร์บอนกับออกซิเจนสมดุล (เปลวกลาง)

Nugget diameter – ขนาดของวงกลมแนวเชื่อมจุด

OAW – กรรมวิธีการเชื่อมออกซิอะเซทิลีน

Oxidizing flame – เปลวไฟเชื่อมที่ออกซิเจนมาก (เปลวเพิ่ม)

Particular area heating – การสร้างความร้อนเฉพาะตำแหน่งเชื่อม

PAW – กรรมวิธีการเชื่อมด้วยอาร์กพลาสมา

Plasma nozzle – การหัวควบคุมการไหลของเปลวแก๊สพลาสมา

Pressure regulator – อุปกรณ์มาตรวัดความดันที่ป้อนเข้าสู่หัวตัดพลาสมา

Projection – รอยเชื่อมที่เป็นปุ่มยื่นหรือนูนออกมา

Refill–FSS welding – การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบเติมเนื้อเชื่อม

Resistance flash welding : FW – การเชื่อมวาบด้วยความต้านทาน

Resistance percussion welding : PW – การเชื่อมกระทบด้วยความต้านทาน

Resistance upset welding : UW – การเชื่อมยู่ด้วยความต้านทาน

Rightward welding – การเดินหัวเชื่อมไปทางด้านขวามือ

Roller electrode – แท่งขั้วอิเลคโทรดที่เป็นแบบล้อกลม

Rotary friction welding : RFW – การเชื่อมเสียดทานแบบหมุน

RW – กรรมวิธีการเชื่อมด้วยความต้านทาน

RWMA – สมาคมจัดแบ่งชนิดของแท่งขั้วอิเลคโทรดของการเชื่อมความต้านทาน

Shank and Cap – แท่งขั้วอิเลคโทรดแบบแท่งประกอบหัว

Spot welding cycles – วัฏจักรของการเชื่อมแบบจุด

Spot welding time – ระยะเวลาที่แท่งอิเลคโทรดกดบนชิ้นงาน

STD. ACET – ข้อต่อที่ใช้กับแก๊สอะเซทิลีน

STD. OXY – ข้อต่อที่ไช้กับแก๊สออกซิเจน

Step–down transformer – เครื่องเชื่อมแบบความต้านทาน (แรงดันต่ำ–กระแสสูง)

SW – กรรมวิธีการเชื่อมสลักเกลียว

Thermit power– ผงสารเคมีสำหรับการเชื่อมเทอร์มิต

Thermit rail welding – การเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ

TIG welding – การเชื่อมอาร์กด้วยลวดทังสเตน

Transformer welding machine – เครื่องเชื่อมที่จ่ายไฟกระแสสลับ (AC)

Transformer–rectifiers welding machine – เครื่องเชื่อมที่จ่ายไฟกระแสตรง (DC)

Tungsten electrode – โลหะลวดทังสเตนสำหรับการอาร์กเชื่อม

Tungsten grinder – เครื่องมือลับมุมลวดทังสเตน

TW – กรรมวิธีการเชื่อมเทอร์มิต

Weave patterns – รูปแบบการส่ายลวดเชื่อม

WIG – (Wolfram Inert Gas) การเชื่อมชนิดอาร์กด้วยลวดทังสเตนที่นิยมเรียกกันในแถบยุโรป

Working chamber – ห้องเชื่อมชิ้นงานสูญญากาศของการเชื่อม EBW

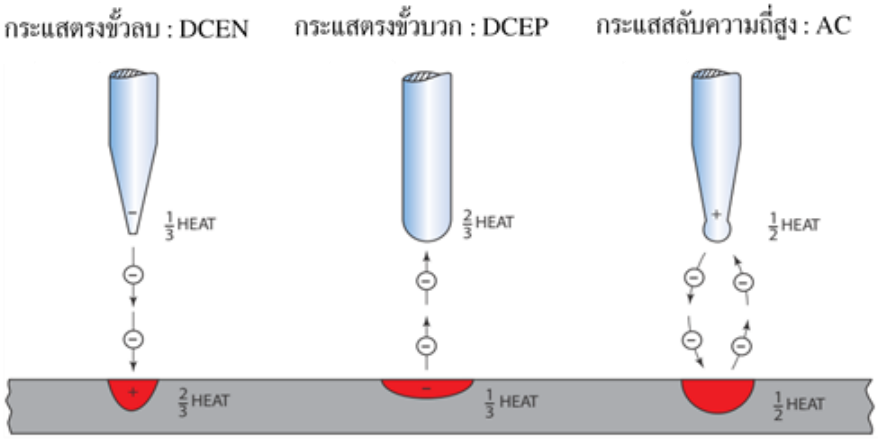
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 4

ข้อที่ 1. จงอธิบายหลักการเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม (Autogenous) พร้อมยกตัวอย่างมา 3 กรรมวิธีการเชื่อมเพื่อประกอบการอธิบาย

ข้อที่ 2. จงอธิบายหลักการเชื่อมแก๊สออกซิอะเซทิลีนมาพอเข้าใจ พร้อมบอกชนิดและหลักการปรับเปลวไฟเชื่อมที่สามารถสร้างขึ้นได้ (วาดรูปประกอบการบรรยายรูปแบบของเปลวไฟเชื่อม)

ข้อที่ 3. จงอธิบายเทคนิคการเชื่อมแก๊สออกซิอะเซทิลีน (OAW) แบบ Leftward technique กับแบบ Rightward technique ของทั้งสองเทคนิคมาพอสังเขป

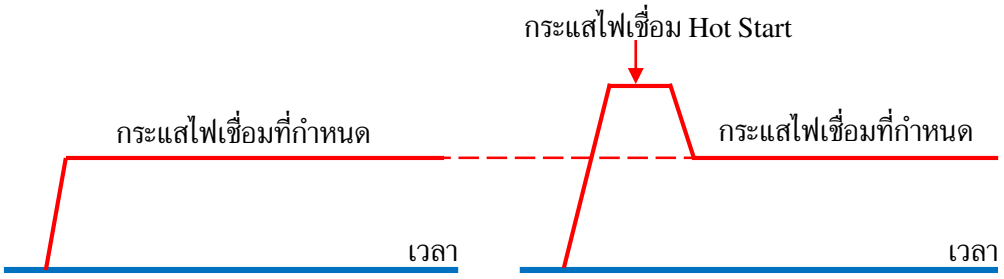
ข้อที่ 4. จากรูปจงอธิบายถึงพฤติกรรมการอาร์กของลวดทังสเตนที่มีความแตกต่างกันของกระแสไฟเชื่อม และสภาพขั้วต่อที่ต่างกันของกรรมวิธีการเชื่อม GATW



เปรียบเทียบชนิดของกระแสไฟเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม (TIG)

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metal Fabrication, 2012

ข้อที่ 5. จากรูปข้างล่างจงอธิบายลักษณะการอาร์กแบบมาตรฐานปกติ กับการอาร์กด้วย Hot Start



(ก) มาตรฐานกระแสไฟเชื่อมเริ่มต้น **(ข)** กระแสไฟเชื่อมเริ่มต้นด้วย Hot Start

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metal Fabrication, 2011

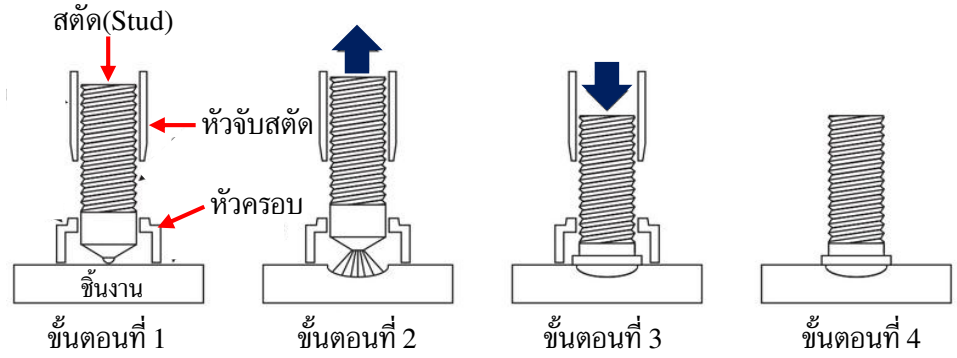
ข้อที่ 6. จงบอกวัฏจักรของการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด (Spot welding cycles) โดยเขียนเป็นลำดับ พร้อมวาดภาพประกอบการอธิบาย

ข้อที่ 7. จงอธิบายความเสียหายของแท่งอิเลคโทรดที่เรียกว่า “ Electrode mushrooming” (วาดภาพประกอบการอธิบาย)

ข้อที่ 8. จงอธิบายหลักการเชื่อมตะเข็บแบบแนวเชื่อมเกยทับ แบบแนวเชื่อมไม่เกยทับ และแบบแนวเชื่อมต่อเนื่องมาพอเข้าใจ และบอกถึงลักษณะของประเภทงานที่เหมาะกับแนวเชื่อมของแต่ละแบบมาอย่างน้อยแบบละ 2 งาน

ข้อที่ 9. จงอธิบายความแตกต่างของกรรมวิธีการเชื่อมยู่ด้วยความต้านทาน (Resistance upset welding) กับกรรมวิธีการเชื่อมวาบด้วยความต้านทาน (Resistance flash welding) (ควรยกตัวอย่างลักษณะงานประกอบการอธิบาย)

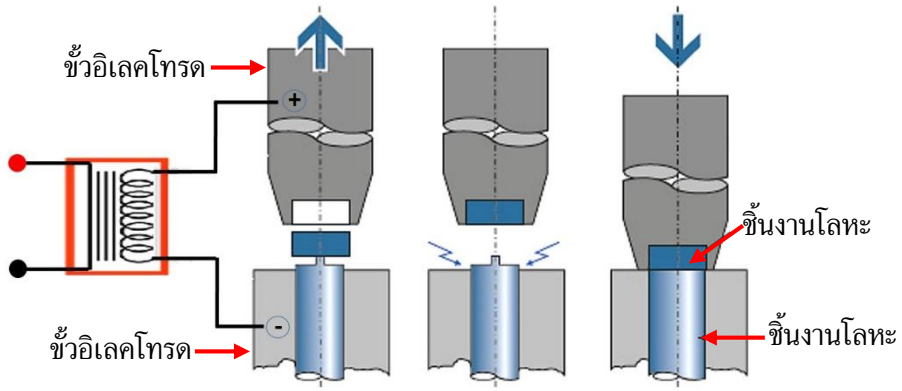
ข้อที่ 10. จากรูปข้างล่างจงอธิบายลำดับขั้นตอนของการเชื่อมสลักเกลียว (Stud arc welding)



ขั้นตอนของเทคนิคการเชื่อมสลักเกลียว/สตัดด้วยการอาร์ก (Arc stud welding)

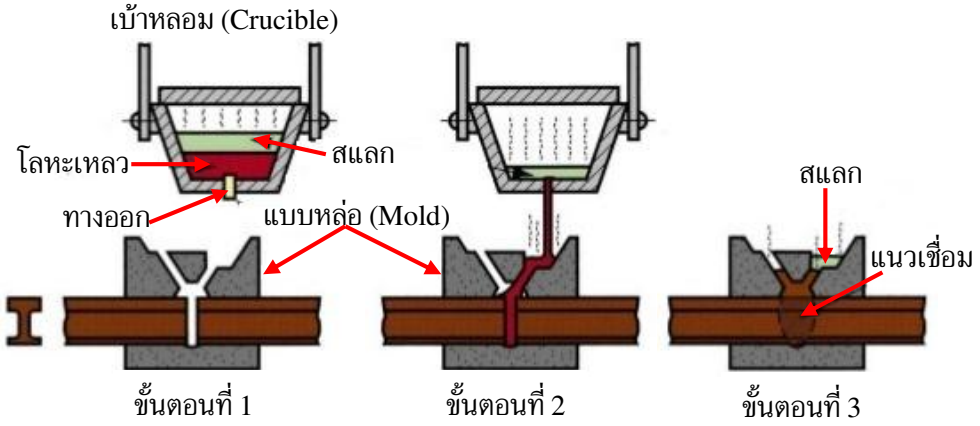
ที่มา : K. Hartz–Behrend et.al., Journal of Physic : Conference Series 550, 2014. (ปรับปรุงใหม่)

ข้อที่ 11. จงอธิบายหลักการเชื่อมกระทบด้วยความต้านทาน (Resistance percussion welding)



ที่มา : SNS Institutions, Welding Technology, 2019 (เขียนใหม่)

ข้อที่ 12. จงอธิบายขั้นตอนการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ โดยอ้างอิงจากภาพข้างล่างนี้

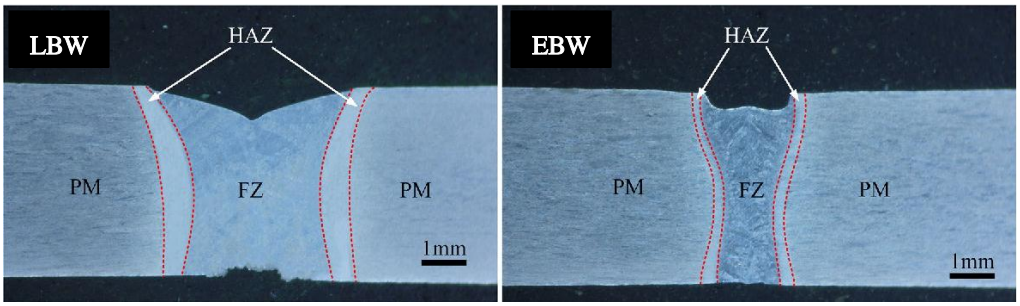


ขั้นตอนการเชื่อมเทอร์มิตรางรถไฟ (Thermit rail welding process)

ที่มา : Thermite Welding : Principle, Working, Equipment and Application, 2017

ข้อที่ 13. จงอธิบายระบบกลไกของการสร้างลำแสงเลเซอร์ (Laser beam) ภายในของหัวเชื่อม LBW

ข้อที่ 14. จงอธิบายเชิงหลักการถึงเหตุผลที่ขนาดของแนวเชื่อมต่างกันของการเชื่อม EBW กับ LBW



เปรียบเทียบขนาดแนวเชื่อมของการเชื่อมด้วยกรรมวิธี EBW กับ LBW

ที่มา : Metal and Meterials International, 2020

บรรณานุกรมบทที่ 4

วรพจน์ ศิริรักษ์; จรวยพร แสนทวีสุข; จริยาภรณ์ อุ่นวงษ์ และ รุ่งวสันต์ ไกรทอง *การเชื่อมเสียดทานแบบกวนอลูมิเนียมอัลลอย* : การทบทวนและมุมมองสู่อนาคต วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 23 (3) หน้า 64–82 ปี 2016

อรวรรณ สัมฤทธิ์เดชขจร; *บทความ เรื่องน่ารู้เกี่ยวกับ ปฏิกิริยาเทอร์ไมต์* วารสาร MTEC; ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ มกราคม–มีนาคม 2553

A.C. Davies. *The Science and Practice of Welding–The practice of Welding*. Publisher : Cambridge University Press. Vol.2 10th Edition, May, 2010.

A magda, M Burca and M Lego. *Research Regarding Capacitor Discharge Stud Welding with Tip Ignition on Galvanized Thin Sheets*. Conference on Advance Materials and Structure. IOP Publishing, 2018.

AMADA WELD TECH INC. *Fundamentals of Small Parts Resistance Welding*. 2020.

AMADA WELD TECH INC. *Laser Welding Fundamentals*. 2020.

Aman P Kaur. *Electron Beam Diagnosis for Weld Quality Assurance*. Thesis Ph.D., 2016.

American Petroleum Institute (API). *Welding Processes, Inspection, and Metallurgy*. API Recommended Practice 577. 2nd Edition, December, 2013.

American Welding Society (AWS). *Publication Catalog of Standards*, Reference Books, Online Education, and More. Summer/Fall. 2017.

B.J. Moniz and R.T. Miller. *Welding Skills*. American Technical Publishers, INC (ATP), 2004.

Behrouz Abnar and Hosseln Aghajani. *Thermit Welding of Aluminum Conductor by Addition of Copper*. Processding of Iran International Aluminum Conferrence (IIAC). May 15–16, Arak, I.R. Iran, 2012.

Bharat Raj Singh. *A Hand Book on Friction Stir Welding*. 2012.

BOC. *A member of the linde Group. Guideline for Welding and Cutting*. 2012.

C.S. Wu, L. Wang, W.J. Ren, X.Y. Zhang. *Plasma Arc Welding–Process, Sensing, Control and Modeling*. Journal of Manufacturing Processes, Vol.16, 74–85, 2014.

Camille A. Lssa and Antoine Nasr. *An Experimental Study of Welded Splices of Reinforcing Bars. Journal of Building and Environment*. Vol. 41, Issue 10, pp.1394–1405, 2006.

CK Worldwide. *The Standard in TIG Welding– Technical Guide Specifications for TIG Welding*. May, 2017.

Complete Stud Welding. *Arc Stud Welding–General & Technical Details–Section 2*, 2017.

D.I. Pantelis. *Friction Stir Welding*. School of Naval Architecture and Marine Engineering National Technical University of Athens Greece. Technical Meeting, May 29, 2014.

Daniela Lohwasser and Zhan Chen. *Friction Stir Welding–From Basics to Application*. Woodhead Publishing Limited. CRC Press. First Published, 2010.

Eder paduan Alves, Francisco Piorino Neto, Chen Ying An. and Euclides Castorino da Silva. *Experimental Determination of Temperture during Rotary Friction Welding of AA1050 Aluminum with AISI 304 Stainless Steel*. Journal of Aersp. Technol. Manag. Vol. 1 No. 1. Pp. 61–67, 2012.

ENTRON Controls. LLC. *Resistance Welding Basics–Welding Sequence, Definitions, Machine Set–Up, and Rules for Making Good Welds*. 04–2014.

F. Khalfallah, Z. Boumerzoug, S. Rajakumar and E. Raouache. *Optimization by RSM on Rotary Friction Welding of AA110 Aluminum Alloy and Mild Steel*. International Review of applied Sciences and Engineering. Vol. 11 No.1 pp. 34–42, 2020.

Girish P. Kelkar. *Process Basics and Projection Design–Projection Welding 101*. Ph.D., 2017

GOLDSCHMIDT Smart Rail Solutions. *Original Thermit–The Best Choice for Your Railways*. Goldschmidt Thermit GmbH, Leipzig, Germany. 2020.

GSI SLV. *The Welding Engineer's Current Knowledge–International Welding Engineer (IWE)*. SLV Duisburg–branch of GSI mbH. 2015.

HOBART Filler Metals. *Guide for Aluminum Welding*. 2014.

INTERESTING ENGINEERING– INNOVATION. *Laser Welding : Types, Advantages, and Applications*. Aug 25, 2019.

Jinsong Chen and Ym Zhang. *Gas Tungsten Arc Welding Using an Arcing Wire–An Innovative GTAW Process Attains High–Speed Filler Metal Melting to Compete With GMAW in Deposition*. Supplement to the Welding Journal, October, 2012.

John Norrish. *Advance Welding processes–Technologies and Process Control*. Woodhead Publishing in Materials. Published, 2006.

K Hartz–Behrend, J L Marques et al. *Stud Arc Welding in a Mangnetic Field –Investigation of the Influences on the Arc Motion*. Journal of Physics : Conference Series 550. IOP Publishing, 2014.

Kashyap Vyas. Laser Welding : *Types, Advantages, and Applications. Innovation*, Aug. 25, 2019.

Larry Jeffus. *Welding and Metal Fabrication*, Delmar Dengage Learning, 2011.

Larry Jeffus. *Welding Principles and Applications*. Fifth Edition, Thomson Delmar Learning, 2004.

Liang CHEN and Dr. Reiichi SUZUKI. *Dissimilar Welding Process–Element Arc Spot Welding*. Kobelco Technology Review No. 36, Nov, 2018.

Liu Yang and et.al. *Mechanical Properties and Microstructural Analysis of Rail Thermite Welding Joints*. Conference Paper, December, 2018.

Luo Yi, Rui Wan, Xie Xiaojian and Zhu Yang. *Study on the Nugget Growth in Single Phase AC Resistance Spot Welding Base on the Calculation of Dynamic Resistance*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 229, pp. 492–500, 2016.

M. Pouranvari. *Effect of Resistance Spot Welding Parameters on the HAZ Softening of DP980 Ferrite–Martensite Dual Phase Steel Welds*. World Applied Sciences Journal 15, Vol.10:1454–1458, 2011.

M.C. Chaturvedi. *Welding and Joining of Aerospace Materials*. 2nd Edition, 2012.

Malur Srinivasan. *Assessment of Resistivity Effect in Resistance butt Welding of Wire Rods*. 2007.

Manufacturing Technology, Inc. *Rotational Friction Welding*, 2014.

Mikhail Sokolov and Antti Salminen. *Improving Laser Beam Welding Efficiency*. Scientific

Miller Electric Mfg.LLC. *Guideline for Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)–Processes*, 215994 F. 01–2018.

Miller Electric Mfg.LLC. *Guideline for Resistance Sport Welding.–Processes*, 003335 E. 08–2018.

Nasir Ahmed. *New Developments in Advanced Welding*. Wood head Publishing Limited. CRC Press. First Published, 2005.

Nirmal S. Kalsi and Vishal S. Sharma. *A Statistical Analysis of Rotary Friction Welding of Steel with Varying Carbon in Workpieces*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer, Vol. 57, May, 2011.

P N Siddharth and Sathiya narayanan. *A Review on Electron Beam Welding Process*. First International Conference on Advances in Physiscal in Sciences and Materials. Journal of Physics : Conference Series. IOP Publishing, 2020.

Rafael Lucas, Jonas Reis and Luis Felipe Barbosa Marques. *Development of the Oxyacetylene Welding Process for PEI/Glass Fiber Laminates*. Welding Research–Welding Journal. Vol. 100, April, 2021.

Rajeev Satsangi and V M Sai Prem Tammana. *Experimental Investigation of Friction Stir Welding and its Effect on Mechanical and Microstructure of A1–6063 Alloy*. International Journal of Engineering Research in Mechanical and Civil Engineering, Vol.3, Issue 4, April, 2018.

Ramakant Sharma. *Thermit Welding Process, Operation and Uses : Operation and Steps (With Set–Up Diagram)*. Published July 26, 2020.

Resistance Welding Manufacturers Alloance (RWMA). *Resistance Welding Manual*. Revised 4th Edition, 2003.

Riccardo Campanella. *Laser Welding for Automotive Components*, Final Project of Masters' Degree in Automotive Engineering. Politechico Di Torino, 2019.

Robert W. Messler, Jr. *Principles of Welding–Process, Physics, Chemistry and Metallurgy*. WILEY–VCH Verlag GmbH&Co.KGaA, Weinheim, 2004.

Roger Timings. *Fabrication and Welding Engineering*. Published by Elsevier Ltd., 2008.

Ruiying Zhang, Fan Jiang and Shujun Chen. *Comparison of Energy Acted on Workpiece among Twin–body Plasma Arc Welding, Non–Transferred Plasma Arc Welding and Plasma Arc Welding*. Journal of manufacturing Processes. Vol. 24, Part 1 pp. 152–160, 2016.

RWMA–Resistance Welding Machine & Accessory. *Resistance Welding Product Catalog & Resistance Guide*. 2019.

SanRex. *Plasma Welding Handbook*. From No. 087520PWH, 2014.

Sergey B. Turanov and Alexey N. Yakovlev. *Laser Welding Technology*. Conference Paper. March, 2012.

THERMAL ARC. *The Plasma Welding Handbook–Plasma the Fourth State of Matter*, 2009.

Total Material. *Beam Welding and Thermit Welding*. Date Published, May, 2002.

TVM. *Laser Beam Welding–Equipment, Principle, Working with Advantages and Disadvantages*. Published on May 4, 2017.

W. M. Steen, J. Mazumder. *Laser Material Processing*. Published by Springer, 2010

Weld Guru. *Oxy Fuel Welding (OFW)*. August 19, 2021.

Welding & NDT. *Oxy-Fuel Welding (Gas Welding/Oxy-Acetylene Welding)*. February 5, 2019.

Westermans International Ltd. *Resistance Seam Welding-Together we Weld the World*, 2013.

Y. Chen, F. Lawrence and J. Dantzig. *Heat Transfer Modelling of Rail Thermite Welding*. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineering, part F : Journal of Rail and Rapid Transit. May 1, 2006.

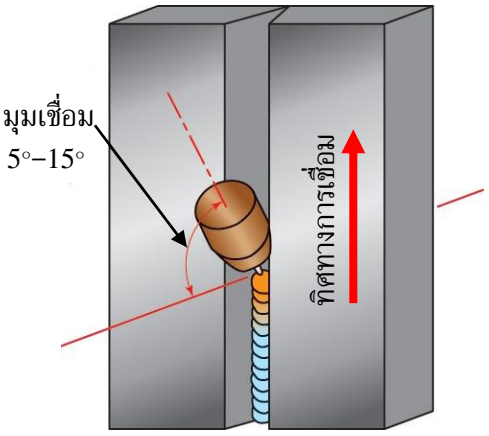
บทที่ 5

องค์ประกอบหรือปัจจัยในการเชื่อม

Welding Parameter



ที่มา : 3 IN 1 Welding Machine, 2011



ที่มา : HALVERSON CTS, 2012

จุดประสงค์การเรียนรู้ บทที่ 5 องค์ประกอบ หรือปัจจัยในการเชื่อม

- รู้และเข้าใจถึงความหมายและความสำคัญขององค์ประกอบหรือปัจจัยของขบวนการเชื่อม
- รู้และเข้าใจถึงองค์ประกอบหรือปัจจัยของขบวนการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์
- รู้และเข้าใจถึงองค์ประกอบหรือปัจจัยของขบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม
- รู้และเข้าใจถึงองค์ประกอบหรือปัจจัยของขบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม
- สามารถอธิบายถึงเหตุผลความบกพร่องของการเชื่อมที่เกิดจากความผิดพลาดของการปรับตั้งค่าองค์ประกอบหรือปัจจัยของขบวนการเชื่อม
- ตระหนักและมีจิตใต้สำนึกในการกำหนดองค์ประกอบการเชื่อมที่ถูกต้องกับงานเชื่อมที่ต้องปฏิบัติ
- มีจรรยาบรรณในการพิจารณาและตัดสินใจกับปัญหาการกำหนดปัจจัยการเชื่อมเมื่อต้องปฏิบัติงานร่วมกับเพื่อนร่วมงาน หรือผู้อื่นที่มีส่วนได้ส่วนเสียกับงานที่ปฏิบัติการเชื่อม

"Welding Parameter" คือ องค์ประกอบหรือปัจจัยต่าง ๆ ที่นำมาใช้ร่วมกันแล้วสร้างเป็นงานเชื่อมโลหะที่สมบูรณ์ ซึ่งแต่ละองค์ประกอบหรือแต่ละปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อคุณภาพของงานเชื่อมในแต่ละด้านแตกต่างกัน เช่น มีผลกระทบในด้านรูปร่างของแนวเชื่อม ด้านโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อม ด้านคุณสมบัติทางกล ทางเคมี ทางกายภาพของแนวเชื่อม ด้านความบกพร่องของแนวเชื่อม ซึ่งรวมไปถึงด้านความสามารถในการเชื่อม และด้านต้นทุนของการเชื่อมประกอบ เป็นต้น โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าผลกระทบแต่ในละด้านนั้นได้รับการเอาใจใส่หรือให้ความสำคัญที่ไม่เท่ากัน ก็ขึ้นอยู่กับความจำเป็นและความต้องการของการนำแนวเชื่อมไปใช้ประโยชน์ ซึ่งในบางลักษณะงานอาจต้องเน้นความสำคัญผลกระทบด้านหนึ่งด้านใดเป็นพิเศษ เช่น งานเชื่อมประเภทถังภาชนะความดัน (Pressure vessel) เน้นความสำคัญตรวจสอบหาข้อบกพร่องของแนวเชื่อม งานเชื่อมประเภทโครงสร้างที่เน้นคุณสมบัติทางกลเป็นสำคัญ หรืองานเชื่อมประเภทประกอบชิ้นส่วนซึ่งเน้นความสามารถในการเชื่อมและต้นทุนในการผลิต อย่างไรก็ตามการที่วิศวกรงานเชื่อมหรือช่างเชื่อมจะสามารถสร้างเนื้อเชื่อมที่สมบูรณ์ตามวัตถุประสงค์ได้นั้น ต้องรู้ถึงวิธีการเลือกและควบคุมองค์ประกอบหรือปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการเชื่อมได้เป็นอย่างดีและถูกต้องแม่นยำ ดังนั้น สาระสำคัญในบทนี้เน้นการถ่ายทอดองค์ความรู้ เทคนิคต่าง ๆ ที่ได้จากประสบการณ์ และกรณีศึกษาจากผลงานวิจัยองค์ประกอบหรือปัจจัยต่าง ๆ ของการเชื่อมโลหะที่มีประโยชน์ต่อวิศวกร ช่างเชื่อม และผู้ที่สนใจในเทคโนโลยีการเชื่อมโลหะ

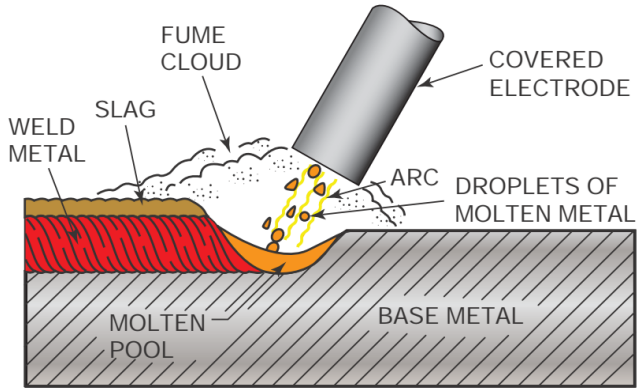
5.1 องค์ประกอบการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding : SMAW)

เป็นกรรมวิธีการเชื่อมด้วยไฟฟ้าในลักษณะรูปแบบที่ทำให้เกิดอาร์ก และได้รับความร้อนจากการอาร์กระหว่างลวดเชื่อมที่มีสารพอกหุ้ม (Electrode) กับชิ้นงาน (Metal) โดยสารพอกหุ้มบนลวดเชื่อมเมื่อละลายทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันบรรยากาศ ส่วนตัวของลวดเชื่อมทำหน้าที่เป็นโลหะเติมเนื้อเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งพบว่าปัจจัยที่สำคัญที่ต้องควบคุมของกรรมวิธีการเชื่อมวิธีนี้ ซึ่งทำการอ้างอิงตาม William A. Bowditch et al. (2017) ที่ได้กล่าวไว้ในหนังสือ Welding Fundamentals ได้แก่

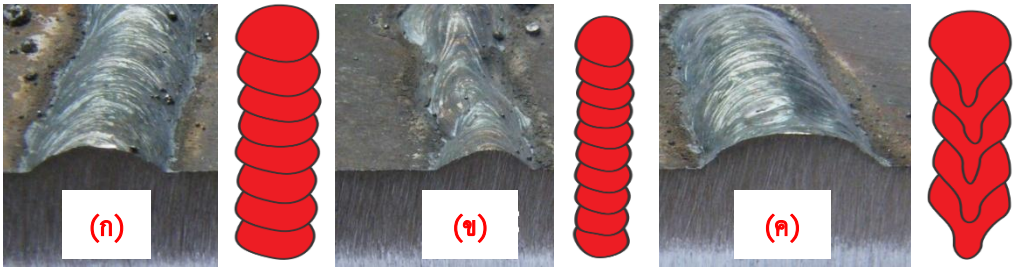
5.1.1 กระแสเชื่อม (Welding current) มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

กระแสไฟฟ้าที่ใช้เป็นกระแสเชื่อมของวิธีการเชื่อมอาร์ลวดหุ้มฟลักซ์ มีทั้งแบบกระแสตรง (Direct current : DC) และกระแสสลับ (Alternating current : AC) ที่อาศัยแหล่งความร้อนจากผลของความต้านทานต่อการไหลของอิเลคตรอนของกระแสไฟฟ้า (จาก – ไป +) ที่กระโดดข้ามช่องว่างระหว่างปลายของลวดเชื่อม (Electrode) กับโลหะที่ถูกเชื่อม (Base metals) ยิ่งความต้านทานกระแสไฟฟ้ามากขึ้นเท่าใดก็ยิ่งสร้างความร้อน และอุณหภูมิของการอาร์กก็มากขึ้นเท่านั้น ซึ่งปกติอากาศเป็นตัวต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนไฟฟ้าที่สูง ดังนั้น ถ้าช่องว่างระหว่างปลายลวดเชื่อมกับชิ้นงานเชื่อมนั้นมีมาก ก็ย่อมทำให้เกิดความร้อนจากการอาร์กมากขึ้น จากหลักการนี้เมื่อตั้งกระแสเชื่อมที่สูงอัตราความต้านทานก็สูงตาม จึงเป็นเหตุทำให้ความร้อนในระหว่างการเชื่อมสูงขึ้น โลหะเกิดการ

หลอมละลายได้ง่ายและเร็ว ในทางกลับกัน ถ้าตั้งกระแสไฟเชื่อมที่ระดับต่ำอัตราความต้านทานก็ต่ำตาม และค่าความร้อนที่ได้ก็ลดลง อาร์กยาก หลอมละลายช้า บ่อหลอมละลายเล็ก ดังนั้นการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่ต่างกันย่อมส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อม โดยสังเกตได้ว่ารูปทรงของหยดน้ำโลหะของบ่อหลอมละลายมีความแตกต่างอย่างชัดเจน ดังแสดงการเปรียบเทียบจากแนวเชื่อมในรูปที่ 5.2 อ้างอิงตาม AWS Welding Handbook (2001)



รูปที่ 5.1 การเชื่อมอาร์ลวดหุ้มฟลักซ์ (Shielded metal arc welding : SMAW)
ที่มา : American Welding Society : SMAW, 2001.



รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบแนวเชื่อมที่ใช้กระแสเชื่อมต่างกัน (ก) กระแสเหมาะสม (ข) กระแสต่ำ และ (ค) กระแสสูง *ที่มา : Howard B. Cary. Modern welding technology, 6th, 2004.*

จากประสบการณ์ของช่างเชื่อมและข้อมูลที่อ้างอิงจาก Larry Jeffus (2012) พบว่ากระแสเชื่อมที่ถูกต้องและเหมาะสม ช่างเชื่อมพิจารณาจากคำแนะของผู้ผลิตลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ซึ่งปกติมีการระบุชัดเจนที่ข้างกล่องบรรจุลวดเชื่อม โดยจะสัมพันธ์กับขนาดของลวดเชื่อมกล่าวคือ ลวดเชื่อมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตขึ้น ต้องเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมที่สูงมากขึ้นตาม ดังตัวอย่างในตารางที่ 5.1 หากช่างเชื่อมตั้งค่ากระแสเชื่อมไม่เหมาะสม อันได้แก่

1. การเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่ต่ำเกินไป (Welding current too low) มักพบปัญหาว่า เกิดการอาร์กไม่สม่ำเสมอ บ่อหลอมละลายไม่สมบูรณ์ อัตราส่วนของ D/W ไม่เหมาะสม และเกิดสแลกหรือแก๊ส

ฝังใน ด้วยเหตุเพราะว่าบ่อหลอมละลายมีเวลาไม่หลอมเหลวนานมากพอที่จะให้ฟลักซ์ที่หุ้มลวดทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะเหลวได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลทำให้ได้ปริมาณแก๊สปกคลุมบ่อหลอมน้อยเกินไป และนอกจากนี้ยังพบอุปสรรคในการควบคุมระยะอาร์ก ซึ่งพบว่ากระแสเชื่อมต่ำระยะอาร์กต้องชิดจึงมีโอกาสมากที่ปลายลวดเชื่อมจะดูดติดกับชิ้นงานเชื่อม และเกิดเป็นบ่อหลอมละลายแคบ ๆ และสุดท้ายแนวเชื่อมที่ได้จะเป็นรูปทรงที่มีความนูนสูงแต่เล็ก ดังแสดงตัวอย่างลักษณะของการเชื่อมที่กระแสต่ำเกินไปในรูปที่ 5.3 (ก)

2. การเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่สูงเกินไป (Welding current too high) ด้วยเหตุที่ปริมาณกระแสไฟที่เชื่อมสูงมีผลกระทบโดยตรงต่อแกนลวดโลหะที่เป็นตัวนำกระแส กล่าวคือ แกนลวดมีขีดจำกัดในการเป็นตัวนำ ดังนั้น ถ้ากระแสไหลผ่านมากเกินไป ตัวลวดจะเกิดการต้านกระแสที่สูงขึ้น ส่งผลทำให้มีความร้อนที่แกนลวดเพิ่มมากขึ้น จนเป็นเหตุให้ธาตุหรือสารเคมีที่ประกอบในฟลักซ์หุ้มเกิดการไหม้เป็นสีแดง พร้อมกับการสูญเสียไป และเกิดควันเชื่อมปริมาณมาก (Smoke) นอกจากนี้ยังพบปัญหาว่า การอาร์กมีความรุนแรงจนเกิดการกระเด็นของน้ำโลหะมากและมักหลอมติดแข็ง (Hard spatter) มีบ่อหลอมละลายกว้างลึก จึงมักได้แนวเชื่อมที่มีรูปทรงของส่วนด้านหน้า ต่ำแบน (Face side) และส่วนด้านหลังย้อยมากเกินไป (Root side) ดังแสดงตัวอย่างลักษณะของการเชื่อมที่กระแสสูงเกินไปในรูปที่ 5.3 (ข)

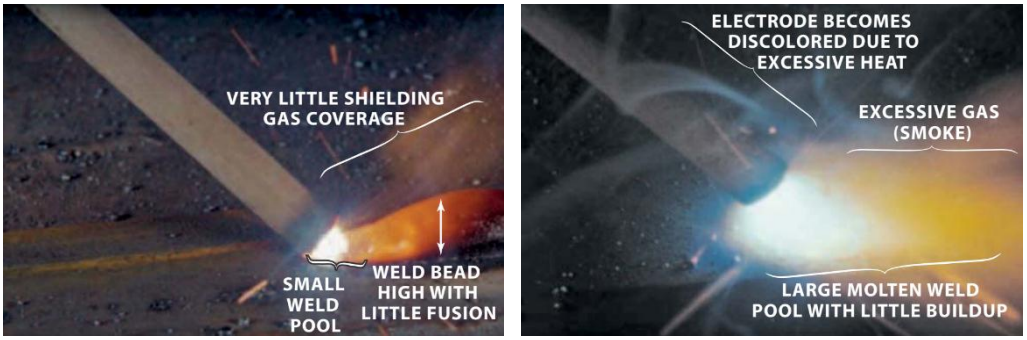
ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างการเลือกขนาดของลวดเชื่อมที่สัมพันธ์กับช่วงของกระแสเชื่อม

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metals Fabrication, 2011

ชนิดของลวดเชื่อม	ขนาด Ø ของลวดเชื่อม และ กระแสเชื่อม (แอมแปร์)		
มาตรฐาน (AWS)	2.4 (มม)	3.2 (มม)	4.0 (มม)
E6010	40–80	70–130	110–165
E6011	50–70	85–125	130–160
E6012	40–90	75–130	120–200
E6013	40–85	70–120	130–160
E6016	75–105	100–150	140–190
E6018	70–110	90–165	125–220

จากที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าการที่ช่างเชื่อมปรับตั้งกระแสไฟเชื่อมที่ผิดพลาดหรือไม่เหมาะสม เกิดผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพของแนวเชื่อม ดังนั้นช่างเชื่อมจึงต้องมีความละเอียดแม่นยำและรอบคอบขณะทำการปรับตั้งในแต่ละครั้ง ในทางปฏิบัติส่วนใหญ่ค่ากระแสเชื่อมมักยึดปฏิบัติตามข้อแนะนำจากผู้ผลิตลวดเชื่อมเป็นสำคัญ แต่พบว่าค่ากระแสนั้นมักระบุเป็นช่วงของกระแส เช่น ลวด E6016 ขนาด Ø ของลวดเชื่อม 2.4 มม ควรปรับตั้งกระแสเชื่อมให้อยู่ในช่วงระหว่าง 75–105

แอมแปร์ ช่วงของกระแสเชื่อมที่ห่างกันสามารถควบคุมให้ได้กระแสที่ค่าใดค่าหนึ่งที่เหมาะสมนั้น ช่างเชื่อมสามารถกำหนดได้ โดยการควบคุมระยะอาร์กระหว่างปลายลวดกับชิ้นงานในระหว่างการเชื่อม (Arc length) ความหมายคือ ถ้าเกิดความร้อนมากเนื่องจากกระแสสูงต้องปรับระยะอาร์กชิด (Short arc length) และถ้าเกิดความร้อนน้อยเนื่องจากกระแสต่ำต้องปรับระยะอาร์กห่าง (Long arc length) ซึ่งเทคนิคการปรับระยะอาร์กขณะเชื่อมก็เสมือนหนึ่งว่าเป็นการปรับปริมาณกระแสเชื่อม เพราะมีความสัมพันธ์กัน



(ก) การเชื่อมด้วยกระแสที่ต่ำเกินไป **(ข)** การเชื่อมด้วยกระแสที่สูงเกินไป

รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมด้วยกระแสที่ต่ำและสูงเกินไป

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metals Fabrication, 2011

5.1.2 ระยะอาร์ก (Arc length) มีหน่วยเป็น โวลท์ (V)

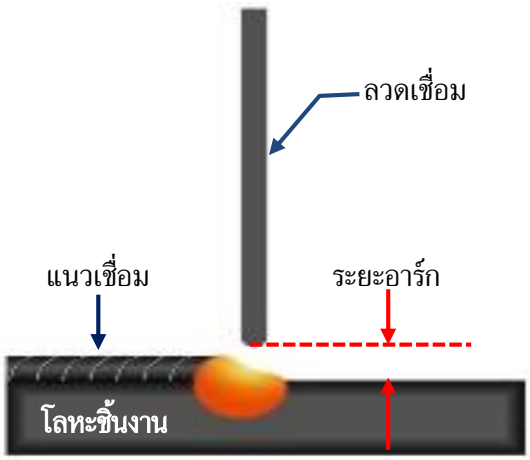
Hobart (2008) ได้ให้คำแนะนำไว้ในคู่มือปฏิบัติการแนวทางการเชื่อมว่า ระยะอาร์ก หมายถึง ช่องระยะห่างระหว่างปลายของลวดเชื่อม (Electrode) กับผิวของชิ้นงาน (Base metals) ซึ่งกรรมวิธีการเชื่อมอาร์ลวดหุ้มฟลักซ์นี้ ตัวลวดเชื่อมทำหน้าที่เป็นตัวเติมเนื้อโลหะลงไปในบ่อหลอมละลาย โดยในขณะที่อาร์กแกนของลวดเชื่อมเกิดการหลอมละลายและสั้นลงเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่อง เราจึงเรียกลวดเชื่อมในลักษณะนี้ว่า ลวดเชื่อมแบบสิ้นเปลือง (Consumable) ดังนั้น ช่างเชื่อมต้องป้อนลวดเชื่อมเข้าหาบ่อหลอมละลายอย่างต่อเนื่อง เพื่อควบคุมระยะอาร์กให้สม่ำเสมอและคงที่ตลอดการเชื่อม ดังแสดงรายละเอียดเพิ่มเติมในรูปที่ 5.4 ซึ่งทักษะนี้กรณีที่เชื่อมด้วยมือช่างเชื่อมต้องผ่านการฝึกฝนมาอย่างชำนาญ ถ้าควบคุมได้ไม่ดีหรือไม่คงที่อย่างสม่ำเสมอจะมีผลต่องานเชื่อม ดังที่กล่าวต่อไปนี้

1. กรณีที่เชื่อมระยะอาร์กสั้นเกินไป (Arc length too short) พบว่า ระยะของช่องว่างระหว่างปลายของลวดเชื่อมกับบ่อหลอมละลายบนชิ้นงานจะแคบและชิด ซึ่งส่งผลทำให้ระยะการถ่ายโอนน้ำโลหะจากปลายลวดสั้นลง หรือจะให้ความหมายว่าน้ำโลหะหยดลงบนชิ้นงานเร็วเกินไปประจวบกับบ่อหลอมละลายที่มีขนาดเล็ก จึงได้แนวเชื่อมที่มีลักษณะรูปทรงนูนสูงและแคบบริเวณรอบ ๆ แนวเชื่อมเกิด

สะเก็ดเชื่อมน้อย นอกจากนี้ ยังพบปัญหาว่ามีโอกาสที่ปลายลวดเชื่อมจะดูดติดกับชิ้นงานเชื่อมนั้นมีสูงมาก โดยเฉพาะช่างเชื่อมฝึกหัดหรือช่างที่ยังมีความชำนาญในการควบคุมหัวเชื่อมไม่มากพอ ซึ่งสร้างความเสียหายแก่ลวดเชื่อมและผิวชิ้นงานเชื่อมเป็นอย่างมาก ดังแสดงรูปตัวอย่างการเชื่อมที่ตั้งระยะอาร์กสั้นเกินไปในรูปที่ 5.5 (ก)

2. กรณีที่เชื่อมระยะอาร์กยาวเกินไป (Arc length too long) รูปแบบจะตรงกันข้ามกับระยะอาร์กสั้น กล่าวคือ ระยะช่องว่างของปลายลวดเชื่อมกับผิวชิ้นงานเชื่อมมีความกว้าง การถ่ายโอนของน้ำโลหะจากปลายลวดตกลงในบ่อหลอมละลายที่กว้างจะเกิดได้ช้า เพราะความห่างของปลายลวดเชื่อมจึงทำให้แนวเชื่อมมีรูปทรงที่ใหญ่และแบน และด้วยเหตุที่ระยะอาร์กยาวเกินไปยังจะส่งผลทำให้เกิดการอาร์กที่รุนแรงมีน้ำโลหะบางส่วนตกนอกบ่อหลอมละลายเป็นสะเก็ดโลหะ (Spatter) กระจายทั่วบริเวณรอบข้าง ๆ ของแนวเชื่อม ดังแสดงรูปตัวอย่างการเชื่อมที่ตั้งระยะอาร์กสั้นเกินไปในรูปที่ 5.5 (ข)

เมื่อศึกษาถึงพฤติกรรมหรือกลไกของการอาร์กระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 5.6 โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อเคลื่อนปลายลวดเข้าหาชิ้นงานจนได้ระยะที่สามารถทำการอาร์กได้ ลำของการอาร์กจะกระโดดเข้าไปหาตัวนำไฟฟ้า (ชิ้นงานเชื่อม) ในตำแหน่งที่อยู่ใกล้มากที่สุด ดังนั้นถ้าทำการเชื่อมในระยะที่สั้นโอกาสที่ลำอาร์กจะอาร์กกับผิวรอยบากที่เอียง (Bevel) มีสูงมาก และจะไม่อาร์กกับส่วนที่ลึกลงไปจึงพบว่าเกิดการไม่หลอมหรือหลอมน้อยเกินไปที่บริเวณด้านล่างของรอยต่อ (Root) ทำให้ส่วนหลอมละลายไม่มากพอที่ซึมลึกไปถึงผิวรอยต่อด้านหลังของชิ้นงานเชื่อม ในทางกลับกันถ้ากรณีระยะอาร์กยาวเกินไปลำอาร์กก็จะเกิดการอาร์กับผิวส่วนบนของก่อนด้านลึกของรอยบาก และกระจายบ่อหลอมออกด้านกว้างมากกว่าด้านลึกทำให้แนวเชื่อมแบนและกว้าง ส่วนแนวซึมลึกก็ไม่สมบูรณ์ ดังตัวอย่างลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยระยะอาร์กที่แตกต่างกันในรูปที่ 5.7

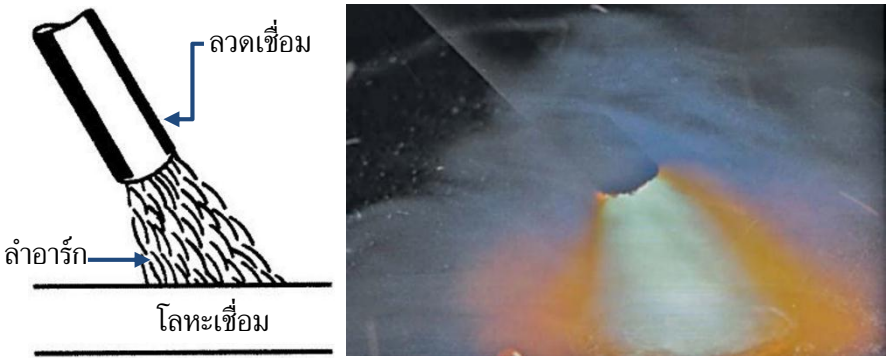


รูปที่ 5.4 องค์ประกอบของระยะอาร์กในการเชื่อม

ที่มา : Wc Welding. Com, 2018



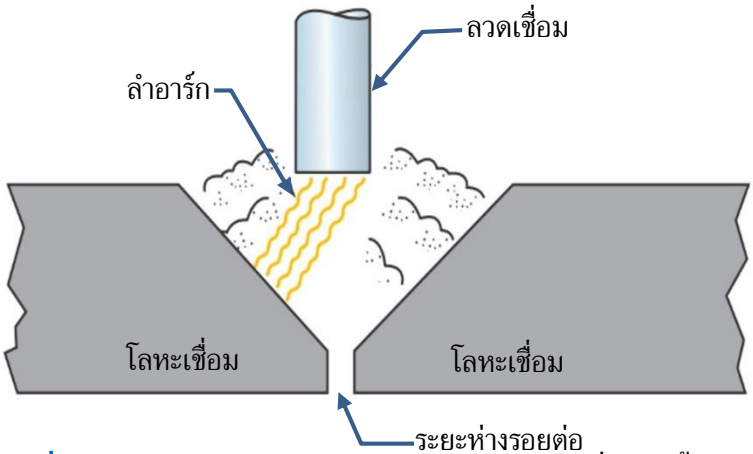
(ก) การเชื่อมที่ระยะอาร์กสั้นเกินไป (Arc length too short)



(ข) การเชื่อมที่ระยะอาร์กยาวเกินไป (Arc length too long)

รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมที่ระยะอาร์กสั้นและยาวเกินไป

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metals Fabrication, 2011



รูปที่ 5.6 พฤติกรรมหรือกลไกของการอาร์กระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metals Fabrication, 2011



รูปที่ 5.7 ลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยระยะอาร์กที่แตกต่างกัน

ที่มา : Welding guide, 2017

การปรับตั้งระยะอาร์กที่เหมาะสมช่างเชื่อมต้องพิจารณาร่วมกับองค์ประกอบอื่น ๆ ที่มีความสัมพันธ์ต่อกันโดยมีหลักการพิจารณาของแต่ละองค์ประกอบ ดังนี้

ก. องค์ประกอบของความหนาของชิ้นงานโลหะเชื่อม (Thickness of base metal) โดยถ้าชิ้นงานโลหะที่บางต้องปรับตั้งระยะอาร์กอยู่ในช่วงอาร์กสั้นหรืออาร์กชิด (Short arc length) ส่วนกรณีที่ชิ้นงานโลหะมีความหนาที่มากต้องปรับตั้งระยะอาร์กอยู่ในช่วงของอาร์กยาว (Long arc length) หรืออาร์กห่างกับโลหะที่ต้องการเชื่อม

ข. องค์ประกอบของกระแสไฟเชื่อม (Welding current) การเชื่อมด้วยกระแสที่ต่ำต้องตั้งระยะอาร์กยาวหรือห่าง และในทางกลับกันการเชื่อมด้วยกระแสที่สูงต้องตั้งระยะอาร์กสั้นหรือชิดกับโลหะที่ต้องการเชื่อม

ค. องค์ประกอบของความเร็วในการเชื่อม (Welding speed) การเชื่อมด้วยความเร็วต่ำหรือเดินลวดช้าต้องตั้งระยะอาร์กสั้นหรือชิด ส่วนการเชื่อมด้วยความเร็วสูงหรือเดินลวดเร็วต้องตั้งระยะอาร์กยาวหรือห่างกับโลหะที่ต้องการเชื่อม

นอกจากที่กล่าวมาข้างต้น ยังมีองค์ประกอบหรือปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจไม่กระทบโดยตรง เช่น ท่าเชื่อมต่าง ๆ ชนิดของฟลักซ์ อุณหภูมิของลวดเชื่อม อุณหภูมิของโลหะงาน และ สภาพแวดล้อมของแรงลมบริวณที่เชื่อม เป็นต้น สิ่งเหล่านี้ต้องนำมาพิจารณาร่วมด้วยในบางงานเชื่อมที่อาจมีโอกาสเกิดข้อบกพร่องในแนวเชื่อมได้ง่าย หรืองานเชื่อมที่ต้องการคุณภาพของแนวเชื่อมที่สูง

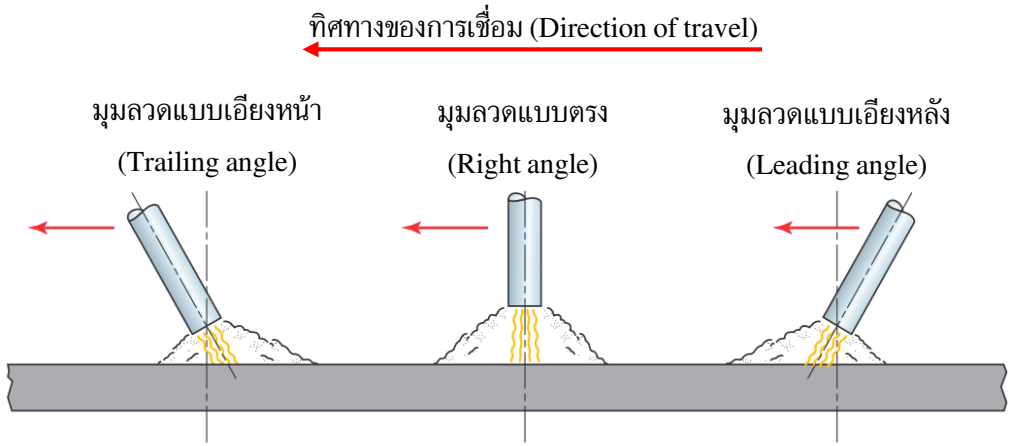
5.1.3 มุมลวดเชื่อมและการส่ายลวดเชื่อม (Electrode angle and Electrode weaving)

James Scott (2013) กล่าวถึงลวดเชื่อมสำหรับกรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์นี้ว่ามีบทบาทสำคัญอย่างยิ่ง เพราะขั้วอาร์ก โลหะเติม และแก๊สปกคลุม ทั้งหมดอยู่รวมกันที่ลวดเชื่อม ดังนั้น ลวดเชื่อมจึงเป็นองค์ประกอบหรือปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมขบวนการเชื่อมและคุณภาพของแนวเชื่อม นอกจากนี้การส่ายของลวดเชื่อมขณะที่ทำการเชื่อมก็เป็นองค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อรูปร่าง

หรือรูปทรงของแนวเชื่อมโดยตรง โดยจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดที่เกี่ยวกับบทบาทของลวดเชื่อมในแง่มุมต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. มุมลวดเชื่อม (Electrode angle)

ขณะทำการเชื่อมช่างเชื่อมต้องควบคุมมุมองศาของลวดเชื่อมให้คงที่สม่ำเสมอตลอดเวลาขณะอาร์ก ซึ่งต้องใช้ทักษะที่ชำนาญมากพอสมควรและไม่ใช่เรื่องง่ายสำหรับช่างเชื่อมฝึกหัด โดยมุมของลวดเชื่อมคือ มุมองศาระหว่างลวดเชื่อมกับผิวชิ้นงานโลหะเชื่อม ซึ่งขนาดของมุมลวดเชื่อมมีได้ 3 แบบที่อ้างอิงกับทิศทางของการเชื่อม (Direction of travel) ได้แก่ มุมลวดแบบเอียงหน้า (Trailing angle) มุมลวดตรงหรือตั้งฉาก (Right angle) และมุมลวดแบบเอียงหลัง (Leading angle) ดังแสดงในรูปที่ 5.8 โดยรูปแบบการเอียงของมุมลวดมีอิทธิพลต่อการเชื่อม เพราะมุมต่างกันจะเกิดแรงเป่าน้ำโลหะเหลวและ ฟลักซ์เหลวออกจากปลายลวดเชื่อมไปยังบ่อหลอมละลายแตกต่างกัน ดังรายละเอียดเพิ่มเติมดังนี้

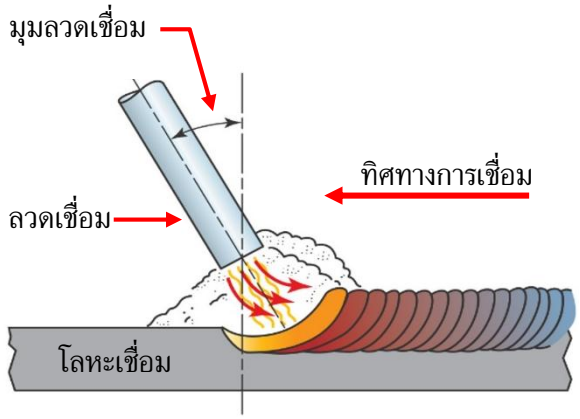


รูปที่ 5.8 รูปแบบการเอียงของมุมลวดเชื่อมที่อ้างอิงกับทิศทางการเชื่อม

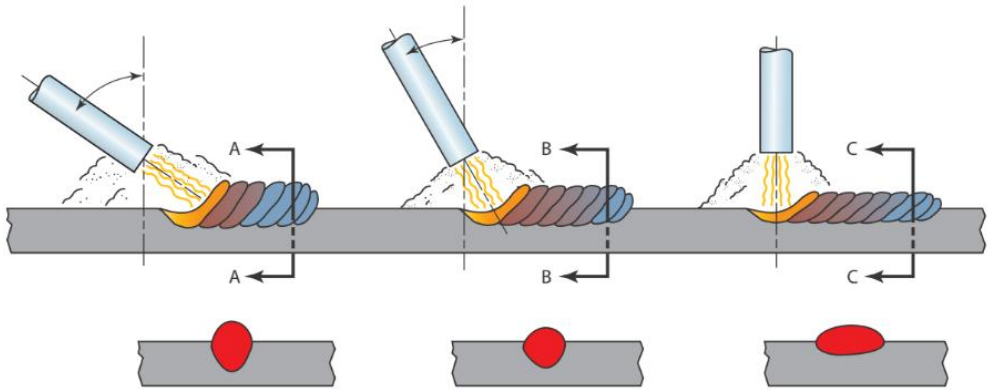
ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metals Fabrication, 2011

ก. มุมลวดแบบเอียงหน้า (Trailing electrode angle) การเอียงมุมลวดเชื่อมแบบนี้พฤติกรรมของน้ำโลหะเหลวกับฟลักซ์เหลวจากการอาร์กของปลายลวดเชื่อมจะถูกแรงพลักดันให้ออกไปในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการเชื่อม (ดันออกไปด้านหลัง) ดังแสดงในรูปที่ 5.9 ทำให้แนวเชื่อมไม่เกิดปัญหาของเหลวจากบ่อหลอมล้นไปเกยทับกับแนวเชื่อมที่แข็งตัวไปแล้ว ที่เรียกกันว่า Cold lap ซึ่งเป็นที่มาของข้อบกพร่องชนิดสแลกฝังใน (Slag inclusions) นอกจากนี้ การเอียงมุมลวดแบบนี้ยังทำให้เกิดแรงพลักดันที่พุ่งลงไปสู่ด้านล่างของบ่อหลอมละลาย (Weld pool bottom) เป็นเหตุให้เกิดการเพิ่มส่วนหลอมละลายบริเวณด้านล่างของบ่อหลอมได้มากขึ้น ส่งผลทำให้แนวเชื่อมเกิดการหลอมลึก (Deeper penetration) โดยที่องศาของการเอียงไปข้างหน้ายิ่งมากขึ้น การหลอมลึกก็ยิ่งลึกมากขึ้น ดังแสดงการ

เปรียบเทียบองศามุมลวดเชื่อมแบบเอียงหน้าที่ต่างกันและได้แนวเชื่อมหลอมลึกต่างกัน ที่ปรากฏในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.9 การเชื่อมแบบมุมลวดเชื่อมเอียงหน้า (Trailing electrode angle)
ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metals Fabrication, 2011



(ก) ภาพตัด A–A **(ข)** ภาพตัด B–B **(ค)** ภาพตัด C–C

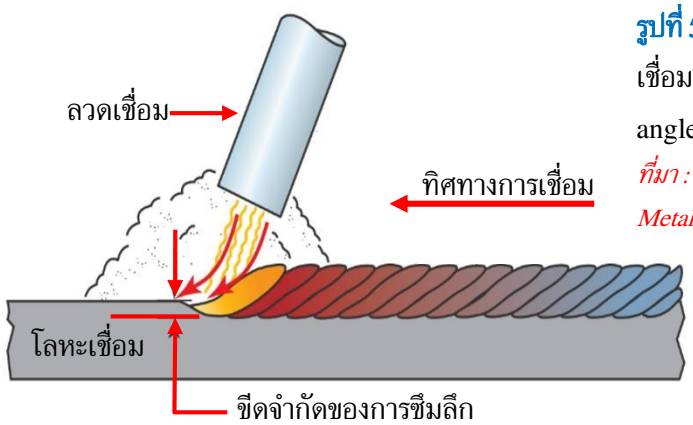
รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบการซึมลึกของแนวเชื่อมที่ใช้มุมลวดเชื่อมเอียงหน้าองศาต่างกัน
ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metals Fabrication, 2011

ข. มุมลวดแบบเอียงหลัง (Leading electrode angle) เป็นการเอียงมุมลวดเชื่อมที่มีพฤติกรรมในลักษณะเกิดแรงพลักดันน้ำโลหะกับฟลักซ์ที่หลอมเหลวจากการอาร์กของปลายลวดเชื่อมให้ออกไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเชื่อม (ดันออกไปด้านหน้า) ดังแสดงในรูปที่ 5.11 การเอียงลวดเชื่อมแบบนี้ต้องระมัดระวังไม่ให้น้ำโลหะเหลวกระเพื่อมหรือล้นย้อนมาทับกับแนวเชื่อมที่แข็งตัวผ่านมาแล้ว ที่เรียกกันว่า Cold lap ซึ่งเป็นปัญหาก่อให้เกิดข้อบกพร่องชนิดสแลกฝังในแนวเชื่อม (Slag inclusions) นอกจากนี้ยังต้องควบคุมมุมลวดไม่ให้เอียงหลังมากเกินไป เพราะจะเกิดการพลักดันน้ำโลหะเหลวกับน้ำฟลักซ์ที่เหลวกระเด็นหรือล้นออกไปทับผิวชิ้นงานโลหะที่ยังไม่หลอมบนบริเวณด้านหน้าทิศทางเชื่อม

และเกิดการแข็งตัวกลายเป็นสแลก ซึ่งเมื่ออาร์กทับไป สแลกดังกล่าวจะไม่หลอมละลายแต่กลับฝังตัวอยู่ในแนวเชื่อมจนเกิดเป็นข้อบกพร่องขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.12 จากประสบการณ์มีข้อแนะนำเทคนิควิธีการป้องกันการเกิด Cold lap และ Slag inclusions ดังนี้

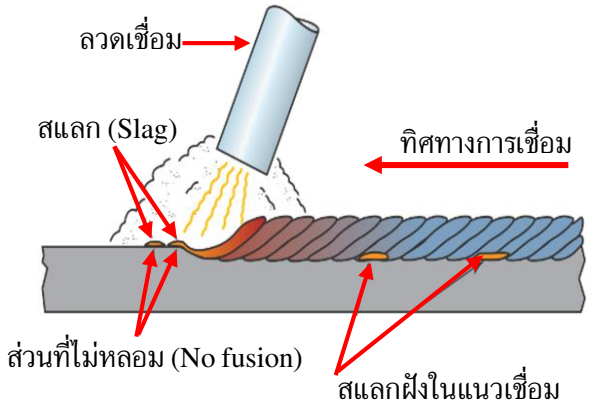
- ควบคุมมุมลวดแบบเอียงหลังให้น้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้
- ต้องควบคุมบ่อหลอมละลายของโลหะเชื่อมให้สมบูรณ์
- เลือกใช้ลวดเชื่อมแบบเน้นการซึมลึกเพื่อลดความนูนของแนวด้านบน (Face weld)
- ส่ายลวดเชื่อมไปหน้าและหลังเพื่อหลอมบริเวณขอบของบ่อหลอมละลาย (ขอบหน้าคือโลหะที่ยังไม่หลอม และขอบหลังคือโลหะแนวเชื่อมที่แข็งตัวแล้ว)

การเอียงมุมลวดเชื่อมแบบเอียงหลังในระดับองศาเอียงต่างกัน มีผลต่อขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 5.13 เห็นได้ชัดว่ามุมลวดเชื่อมเอียงหลังมากดังรูปที่ 5.13 (ก) แนวเชื่อมเล็ก ส่วนนูนต่ำ การซึมลึกน้อย และในทางกลับกันถ้ามุมลวดเอียงหลังน้อยหรือไม่เอียง (90°) ดังรูปที่ 5.13 (ค) แนวเชื่อมมีขนาดใหญ่ นูนสูง ซึมลึกมาก ส่วนมุมลวดเอียงที่เหมาะสม ดังรูปที่ 5.13 (ข) ที่มีขนาดความกว้าง ความลึก และความสูงของแนวเชื่อมเป็นไปตามเกณฑ์ที่ยอมรับ อย่างไรก็ตามการปรับเอียงมุมของลวดเชื่อมที่เหมาะสม อาจมีขีดจำกัดตามลักษณะของการออกแบบรอยต่อหรือขีดจำกัดตามสภาพแวดล้อมของสถานที่ปฏิบัติงาน โดยช่างเชื่อมสามารถใช้ดุลพินิจในการตัดสินใจเลือกใช้ขนาดองศาการเอียงของมุมลวดได้ตามความเหมาะสม

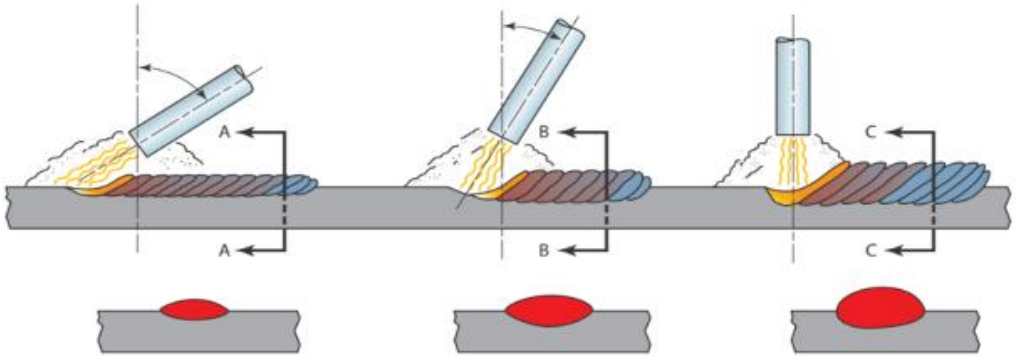


รูปที่ 5.11 การเชื่อมแบบมุมลวดเชื่อมเอียงหลัง (Leading electrode angle)

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metals Fabrication, 2011



รูปที่ 5.12 การเชื่อมแบบมุมลวดเชื่อมเอียงหลัง (Leading electrode angle)
ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metals Fabrication, 2011



(ก) ภาพตัด A–A **(ข)** ภาพตัด B–B **(ค)** ภาพตัด C–C

รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบการซึมลึกของแนวเชื่อมที่ใช้มุมลวดเชื่อมเอียงหลังองศาต่างกัน
ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metals Fabrication, 2011

2. การส่ายลวดเชื่อม (Electrode weaving)

จัดเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่งที่ช่างเชื่อมทุกคนต้องรู้และเข้าใจเป็นอย่างดี เพราะเป็นหลักการที่คู่กับทักษะของการควบคุมการเคลื่อนของลวดเชื่อม (Electrode manipulation) ในขณะที่กำลังทำการเชื่อม โดยภาษานิยมที่ใช้เรียกสื่อสารกัน คือ “การส่ายลวดเชื่อม” ซึ่งการส่ายลวดเชื่อมของช่างเชื่อม Edward R. Bohnart (2017) ได้กล่าวว่ามีบทบาทสำคัญที่ซึ่งสามารถที่จะกำหนดหรือควบคุมลักษณะของแนวเชื่อมในด้านต่าง ๆ ได้ อันได้แก่ ขนาดของความกว้าง ความนูน การซึมลึก รวมไปถึง ข้อพกพร่อง จำพวกรูพรุน รอยกัดแหว่ง รอยเกยทับ และสแลกฝังในของแนวเชื่อม จากบทบาทที่สำคัญดังกล่าวนั้นจึงได้มีการพยายามคิดค้นหารูปแบบทักษะการส่ายลวดเชื่อม (Weave pattern) ที่ถูกต้องเหมาะสมกับชนิดของรอยต่อและท่าเชื่อมในตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงรูปแบบการส่ายลวดในแบบต่าง ๆ ที่นิยมใช้กัน ในรูปที่ 5.14 โดยช่างเชื่อมจะพิจารณาเลือกรูปแบบการส่ายลวดด้วยตนเองตาม

ประโยชน์และความต้องการของลักษณะแนวเชื่อมที่ออกแบบตามชนิดของรอยต่อ ซึ่งรอยต่อเหมือนกันอาจเลือกรูปแบบการส่ายลวดต่างกันได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอื่นที่นำมาพิจารณาร่วม เช่น ขีดจำกัดของพื้นที่เชื่อม หรือความไม่สะดวกในตำแหน่งท่าเชื่อม เป็นต้น

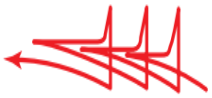
จากประสบการณ์ของผู้เขียนพบว่า การส่ายลวดเชื่อมแบบวงกลม (Circular pattern) เป็นรูปแบบที่ใช้กันมากในการเชื่อมท่าราบของรอยต่อแบบ ต่อชน ต่อตัวที และ ต่อมุมด้านนอก รวมถึง การสร้างขนาดและรูปร่างของผิวแนวเชื่อม โดยการควบคุมขนาดของวงกลมในการส่าย กล่าวคือ ถ้าส่ายลวดเชื่อมเป็นวงกลมเล็ก ถี่ ๆ จะได้แนวเชื่อมที่แคบ (Narrow bead) แต่มีการซึมลึกที่มาก ในทางกลับกัน ถ้าส่ายเป็นวงกว้าง ใหญ่ ๆ จะได้แนวเชื่อมที่กว้าง (Wide bead) แต่การซึมลึกจะน้อยหรือตื้น

การส่ายลวดเชื่อมแบบตัว ซี (“C” pattern) และแบบสี่เหลี่ยม (Square pattern) เหมาะสำหรับการเชื่อมในตำแหน่งท่าราบ (1G) มากที่สุด แต่ก็ยังสามารถที่จะนำไปใช้กับการเชื่อมในตำแหน่งท่าตั้ง (3G) ซึ่งมีประโยชน์มากสำหรับกรณีการต่อชิ้นงานที่มีช่องว่างระหว่างชิ้นงานมากเกินไป (Large gap) การส่ายลวดจะเป็นการเพิ่มเนื้อโลหะในช่องว่างได้เป็นอย่างดี หรืออาจใช้กับกรณีที่ชิ้นงานหนา–บางแตกต่างกันก็สามารถเพิ่มเนื้อโลหะบริเวณรอยต่อให้หนาใกล้เคียงกันได้ และสามารถทำการเชื่อมได้ง่ายขึ้นพร้อมกับยังควบคุมขนาดของแนวเชื่อมให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้

สำหรับรูปแบบการส่ายลวดเชื่อมแบบตัว เจ (“J” pattern) การส่ายลวดเชื่อมแบบนี้ใช้ได้ดีในการเชื่อมท่าราบต่อเกย (1F) กับท่าตั้ง (3G) ทั้งหมด และ ท่าขนานนอนต่อชน (2G) รวมถึงต่อเกย(2F) โดยรูปแบบการส่ายจะช่วยควบคุมความร้อนให้สะสมอยู่ที่แผ่นที่มีความหนามากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 5.15 ตลอดจนยังช่วยควบคุมการเสริมสร้างเนื้อเชื่อม (Reinforcement) ให้พอกติดอยู่ในรูปแบบของลักษณะรูปทรงของแนวเชื่อมที่ต้องการและมีความสม่ำเสมอของขนาดแนวเชื่อม

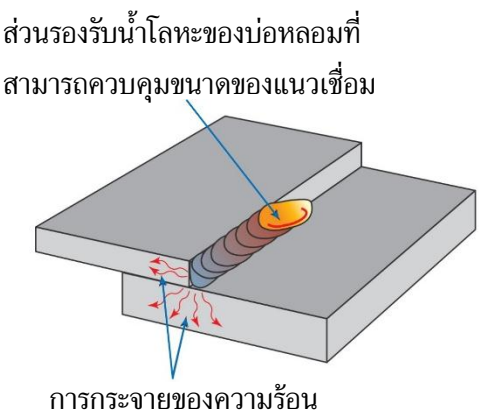
การส่ายลวดเชื่อมรูปแบบตัว T (“T” pattern) เหมาะสำหรับการเชื่อมมุม (Fillet welds) ในตำแหน่งท่าเชื่อมท่าตั้ง (3F) และ ตำแหน่งท่าเชื่อมท่าเหนือศีรษะ (4F) ดังแสดงรูปแบบการส่ายลวดในรูปที่ 5.16 ซึ่งนิยมใช้ในการเชื่อมรอยต่อที่มีความลึกที่เชื่อมด้วยกระแสไฟสูง ๆ (Hot pass) การส่ายลวดแบบนี้ป้องกันการเกิดข้อบกพร่องรอยแหว่งของขอบแนวเชื่อมได้เป็นอย่างดี

นอกจากรูปแบบการส่ายลวดเชื่อมที่กล่าวมาข้างต้นนั้น พบว่าในเชิงเทคนิคการปฏิบัติยังมีรูปแบบการส่ายลวดอีกหลากหลายรูปแบบ ที่ซึ่งอาจเกิดจากขีดจำกัดหรือข้อกำหนดบางอย่างในทางการเชื่อมต่อ ดังแสดงเพิ่มเติมเป็นตัวอย่างในรูปที่ 5.17

 ส่ายแบบวงกลม	 ส่ายแบบสี่เหลี่ยม
 ส่ายแบบซิกแซก	 ส่ายแบบเดินหน้า–ถอยหลัง
 ส่ายแบบรูปเลข 8	 ส่ายแบบรูปตัว T
 ส่ายแบบรูปตัว V	 ส่ายแบบรูปตัว V คว่ำ
 ส่ายแบบรูปตัว C	 ส่ายแบบรูปตัว J

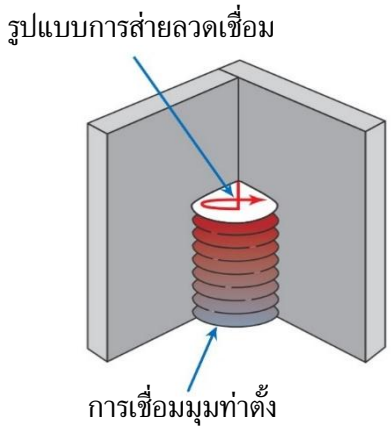
รูปที่ 5.14 การส่ายลวดเชื่อมในรูปแบบต่าง ๆ ที่ช่างเชื่อมนิยมเลือกใช้งาน

ที่มา : Cengage Learning, 2012



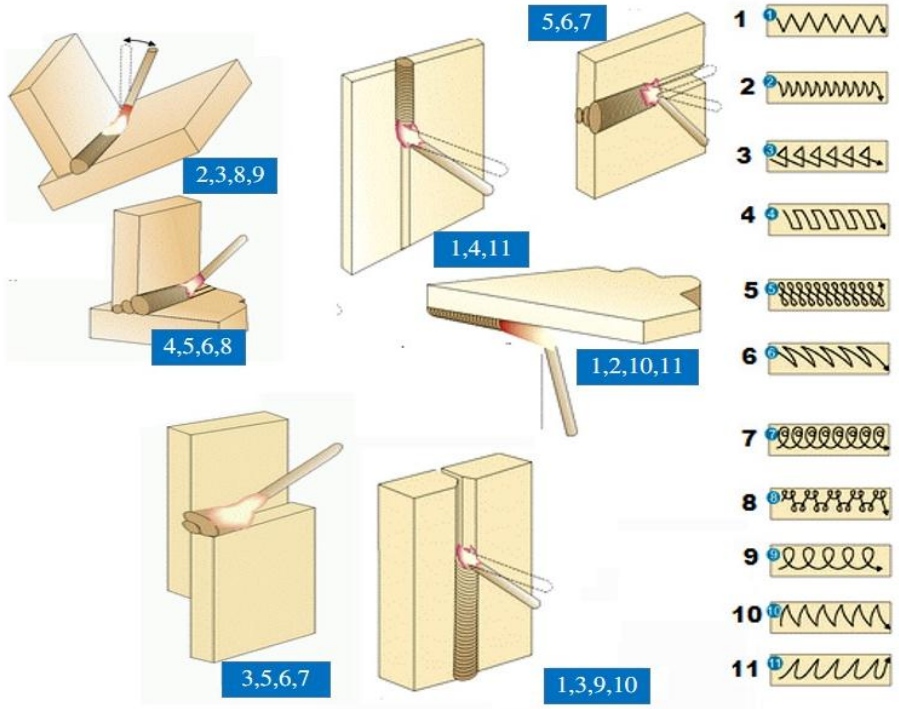
รูปที่ 5.15 การส่ายลวดรูปแบบตัว J ที่กระจายความร้อนไปยังแผ่นที่หนา

ที่มา : Cengage Learning, 2012



รูปที่ 5.16 การส่ายลวดเชื่อมในรูปแบบต่าง ๆ ที่ช่างเชื่อมนิยมเลือกใช้งาน

ที่มา : Cengage Learning, 2012



รูปที่ 5.17 รูปแบบการส่ายลวดเชื่อมที่หลากหลายรูปแบบที่แนะนำในตำแหน่งท่าเชื่อมต่าง ๆ

ที่มา : Welding Beads–An introduction welders universe, 2018

5.1.4 ความเร็วเชื่อม (Welding speed or Travel speed)

หมายถึง อัตราความเร็วในการเคลื่อนที่ของลวดเชื่อมต่อหน่วยเวลา เช่น มิลลิเมตร/วินาที (mm/s) เซนติเมตร/นาที (cm/min)) นิ้ว/นาที (in/min) และ เมตร/ชั่วโมง (m/h) เป็นต้น ช่างเชื่อมสามารถเลือกหน่วยวัดตามค่าความละเอียดของงานที่เหมาะสม และความถนัดของผู้เชื่อม โดยความเร็วจะถูกกำหนดโดยมือของผู้ควบคุมหัวเชื่อม หรือชุดอุปกรณ์ควบคุมความเร็วในกรณีเชื่อมแบบ

อัตโนมัติ (Automatic welding) ซึ่งเป็นที่ทราบกันทั่วไปว่า ความเร็วในการเชื่อมมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบอื่นในการเชื่อม อ้างอิงจาก Miller Welds. (2018) ได้แก่ กระแสเชื่อม (Welding current) ระยะอาร์ก (Arc voltage) และ ค่าความร้อนที่ป้อนสู่ชิ้นงาน (Heat input) ดังแสดงในสมการที่ 5.1

$$\text{ความเร็วเชื่อม } (\text{mm/min}) = \frac{\text{กระแสเชื่อม}(\text{A}) \boldsymbol{x} \text{ ระยะอาร์ก}(\text{V}) \boldsymbol{x}\ 60}{\text{ค่าความร้อนที่ป้อนสู่ชิ้นงาน } (\text{J/mm})}$$

สมการที่ **5.1**

โดยที่ – ความเร็วเชื่อม มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร/นาที (mm/min)
– กระแสเชื่อม มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (Ampere)
– ระยะอาร์ก มีหน่วยเป็น โวลท์ (Voltage)
– ค่าความร้อนที่ป้อนสู่ชิ้นงานต่อความยาว มีหน่วยเป็น จูล/มิลลิเมตร (J/mm)

ในทางปฏิบัติถ้าช่างเชื่อมต้องการเพิ่มความเร็วในการเชื่อมสามารถทำได้โดยการปรับเพิ่มกระแสเชื่อมที่เครื่องเชื่อม กล่าวคือ กระแสที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าปริมาณความร้อนที่ป้อนสู่ชิ้นงานเพื่อการหลอมละลายสูงขึ้น โลหะเชื่อมจะหลอมละลายได้ง่ายและเกิดบ่อหลอมละลายที่กว้าง แนวเชื่อมมีขนาดโตและอาจทะลุเป็นรูได้ แต่ถ้าช่างเชื่อมปรับเพิ่มความเร็วในการเชื่อมให้เร็วขึ้น ก็จะสามารถควบคุมความสมดุลของบ่อหลอมละลายได้ดีและมีแนวเชื่อมที่เหมาะสม ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการที่จะเพิ่มความเร็วในการเชื่อมเพื่อการเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตรอยเชื่อม (Weld joint productivity)

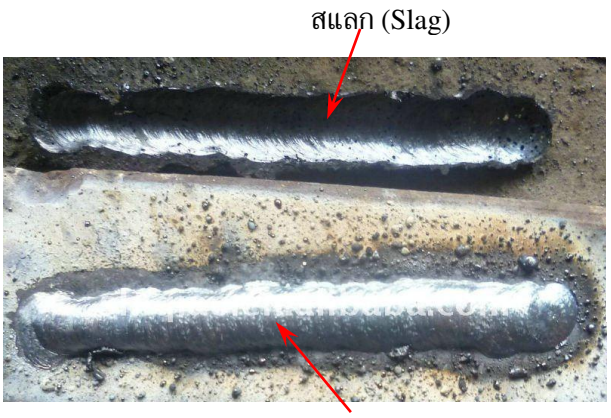
อย่างไรก็ตาม อัตราความเร็วในการเชื่อมที่ถูกต้องและเหมาะสมนั้น ถูกกำหนดขึ้นโดยวิศวกรงานเชื่อม ที่ระบุไว้ในข้อกำหนดขั้นตอนในการเชื่อมที่รู้จักกันดีในนามของ WPS (Welding Procedure Specification) ที่มีการพิจารณาร่วมกับองค์ประกอบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อม อันได้แก่

1. ชนิดและขนาดของกระแสไฟเชื่อม
2. ชนิดของการต่อขั้วของอิเลคโทรดเชื่อม
3. ตำแหน่งและท่าเชื่อม
4. อัตราการหลอมละลายของอิเลคโทรดเชื่อม
5. ความหนาและชนิดของโลหะเชื่อม
6. ชนิดของการออกแบบรอยต่อ
7. การถ่ายเทโลหะอิเลคโทรดไปยังชิ้นงาน
8. สภาพพื้นผิวของโลหะเชื่อม

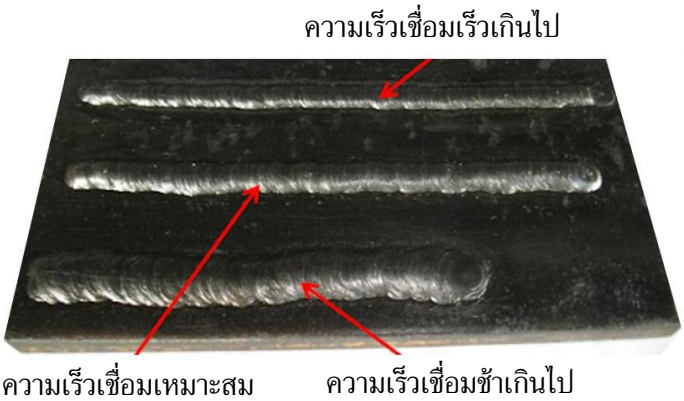
ถ้าช่างเชื่อมปฏิบัติการตามลำดับขั้นตอนที่กำหนดไว้ใน WPS อย่างละอียดและถูกต้องจะได้แนวเชื่อมที่สมบูรณ์แบบ ดังลักษณะของแนวเชื่อมที่สแลกหลุดออกมาเองโดยไม่ต้องใช้ฆ้อนเคาะแสดงไว้ในรูปที่ 5.18

จากการทดลองทำการเชื่อมด้วยอัตราความเร็วแตกต่างกัน เพื่อศึกษาเปรียบเทียบลักษณะของแนวเชื่อม โดยเปรียบเทียบแนวเชื่อมที่ทำการทดลองเชื่อมที่ระดับความเร็วต่ำเกินไป (Travel too slow) ความเร็วที่เหมาะสมหรือถูกต้อง (Travel suitable/correct) และความเร็วที่สูงเกินไป (Travel too fast) พบว่า ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดง ในรูปที่ 5.19

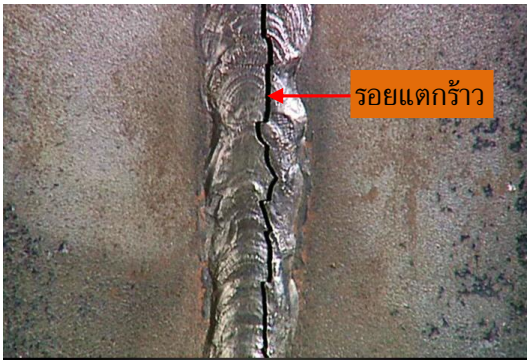
กล่าวคือ ในกรณีที่ช่างเชื่อมเลือกใช้ระดับอัตราความเร็วเชื่อมที่ช้าเกินไป บ่อหลอมละลายกว้างมาก ความร้อนสะสมในชิ้นงานสูง แนวเชื่อมที่ได้มีขนาดใหญ่และนูน ส่วนซึมลึกสูงมาก ขณะเชื่อมน้ำโลหะเชื่อมจะถูกทับถมซ้อน ๆ กันตลอดแนว ส่วนของขอบเขตบริเวณของผลกระทบร้อน (HAZ) ก็กว้างมาก ซึ่งไม่เป็นที่พึงประสงค์ของรอยเชื่อมต่อโลหะ และในทางกลับกันถ้าเชื่อมด้วยระดับอัตราความเร็วเชื่อมที่เร็วเกินไป พบว่าบ่อหลอมละลายแคบ ส่วนซึมลึกน้อย แนวเชื่อมเล็ก อัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะสูงมาก จึงมักเป็นเหตุให้เกิดสารมลทินและแก๊สสะสมอยู่ตรงกลางของแนวเชื่อม เพราะสารมลทินและแก๊สดังกล่าวไม่สามารถหนีออกมาได้ทันเวลากับการเย็นตัว จึงมักเกิดการฝังตัวอยู่ในแนวเชื่อม เป็นฉนวนเหตุที่เกิดการแตกร้าวของตรงกลางแนวเชื่อม ดังแสดงรอยแตกร้าวในรูปที่ 5.20 ส่วนในกรณีที่อัตราความเร็วเชื่อมที่เหมาะสมถูกต้องแนวเชื่อมก็สมบูรณ์



รูปที่ 5.18 ลักษณะของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยที่องค์ประกอบของการเชื่อมที่เหมาะสมและถูกต้อง
ที่มา : วิชาญ ช่วยพันธ์ เอกสารประกอบการสอน วิชาเทคโนโลยีการเชื่อม, 2016



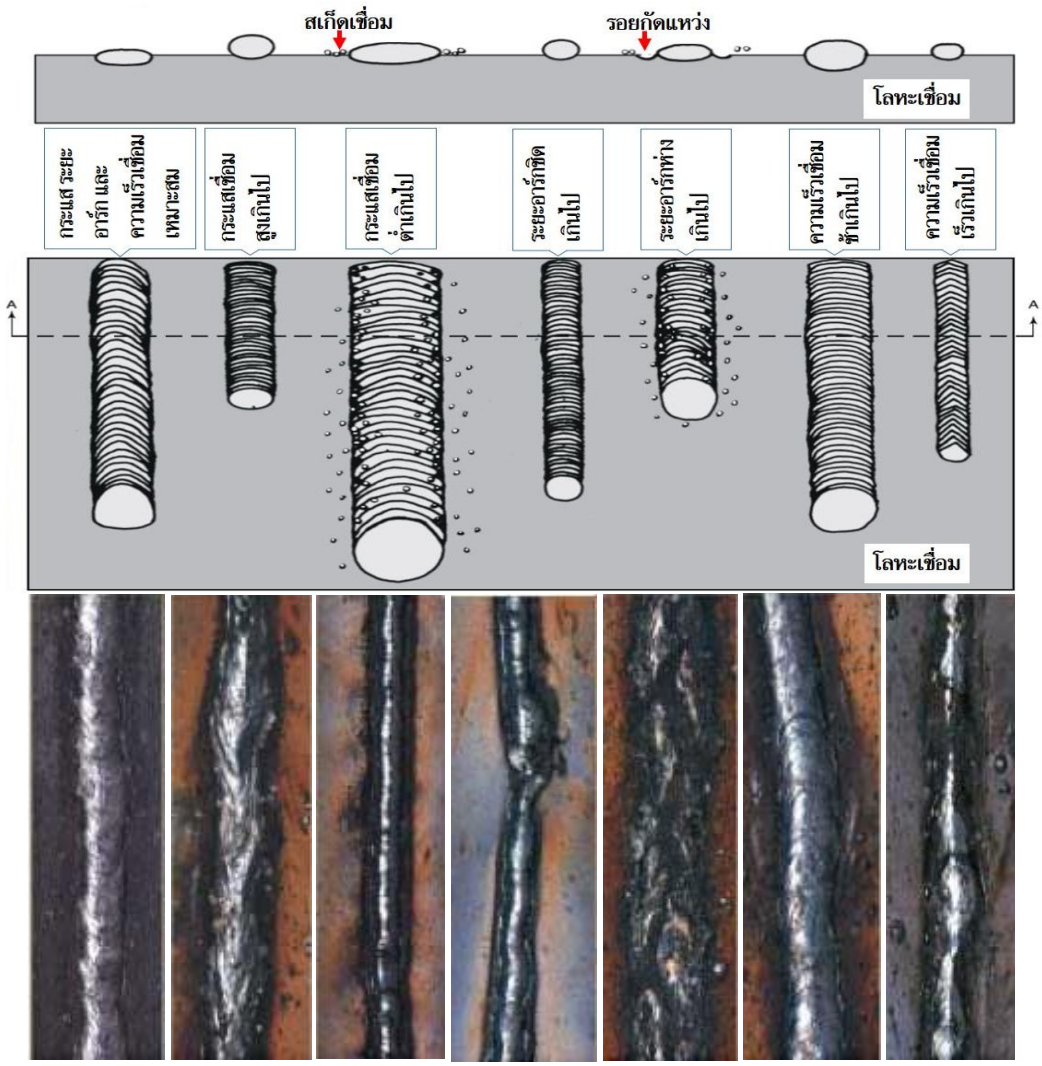
รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน
ที่มา : วิชาญ ช่วยพันธ์ เอกสารประกอบการสอน วิชาเทคโนโลยีการเชื่อม, 2562



รูปที่ 5.20 ลักษณะของการแตกร้าวที่เกิดตรงกลางของแนวเชื่อม
ที่มา : วิชาญ ช่วยพันธ์ เอกสารประกอบการสอน วิชาเทคโนโลยีการเชื่อม, 2562

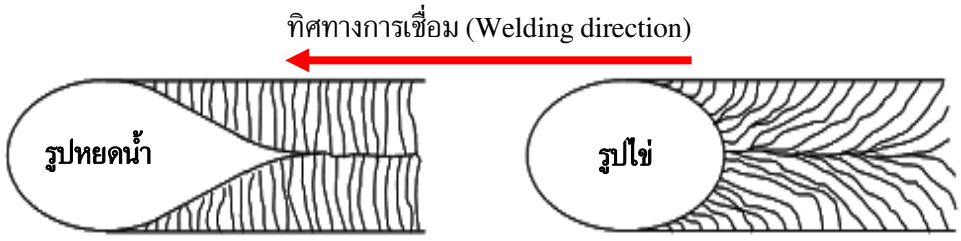
จากสมการ ที่ 5.1 ที่ได้กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่า องค์ประกอบหรือปัจจัยของการเชื่อมมีความสัมพันธ์ต่อกันของ ความเร็วเชื่อม กระแสเชื่อม และระยะอาร์กลวดเชื่อม ดังนั้น วิศวกรงานเชื่อม หรือช่างเชื่อมสามารถที่จะควบคุมหรือระบุองค์ประกอบของการเชื่อมเพียงตัวใดตัวหนึ่งใน WPS ก็จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบตัวอื่น ๆ ตามไปด้วย เพื่อทำการเชื่อมให้ได้แนวเชื่อมที่เกิดความสมบูรณ์ ตัวอย่างเช่น ถ้าช่างเชื่อมปรับกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่าความร้อนที่ป้อนสู่ชิ้นงานสูงขึ้นตาม ต้องทำการเพิ่มความเร็วในการเชื่อมไม่เช่นนั้นแนวเชื่อมจะเกิดบ่อหลอมที่ใหญ่ แนวเชื่อมแบนราบ สะเก็ดโลหะกระจายไปทั่วหรืออาจเกิดชิ้นงานทะลุเป็นรูได้ เป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบหรือปัจจัยของการเชื่อมที่กล่าวมามีผลกระทบโดยตรงต่อลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อม ดังแสดงลักษณะของแนวเชื่อมออกมาเป็นภาพสเก็ตและชิ้นงานทดลองเชื่อมจริงที่ปัจจัยการเชื่อมที่แตกต่างกันในรูปที่ 5.21

R.S. Parmar (1996) ได้แสดงความคิดเห็นไว้ว่า องค์ประกอบของความเร็วในการเชื่อมนอกจากจะมีผลต่อรูปทรงทางกายภาพภายนอกของแนวเชื่อมแล้วยังมีผลต่อรูปร่างของทิศทางการเย็นตัว (Direction of solidification) โดยเมื่อพิจารณาจากโครงสร้างระดับมหาภาค (Macrostructure) จะเห็นได้ชัดเจนว่าแนวเชื่อมที่เกิดจากความเร็วในการเชื่อมสูง บ่อหลอมละลายของโลหะเชื่อมมีรูปทรงเป็นรูปหยดน้ำ (Teardrop shape) เป็นเหตุให้เกิดทิศทางการเย็นตัวที่วิ่งเข้าหากึ่งกลางของแนวเชื่อมที่ค่อนข้างตั้งฉากกับทิศทางการเชื่อม (Welding direction) ดังแสดงในรูปที่ 5.22 (ก) ในทางกลับกัน ถ้าความเร็วในการเชื่อมต่ำบ่อหลอมละลายจะมีรูปทรงเป็นรูปคล้ายไข่ (Elliptical shape) ทิศทางการเย็นตัวจะตั้งฉากน้อยลงมากจนเกือบเป็นมุม 45 องศา ที่วิ่งเข้าหาจุดศูนย์กลางของแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 5.22 (ข) ซึ่งกลไกของทิศทางการเย็นตัวที่ต่างกันนี้มีผลต่อการโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และอาณาเขตของผลกระทบจากความร้อน (Heat affected zone) โดยจะอธิบายถึงรายละเอียดในบทของเรื่องโลหะวิทยางานเชื่อม



รูปที่ 5.21 ลักษณะของแนวเชื่อมบนภาพสเก็ตและชิ้นงานทดลองเชื่อมจริงที่มีปัจจัยการเชื่อมที่แตกต่างกัน

ที่มา : Material Handling Blog– How to spot a good weld VS Bad weld, 2020



(ก) ความเร็วเชื่อมสูง (High speed) (ข) ความเร็วเชื่อมต่ำ (Low speed)

รูปที่ 5.22 เปรียบเทียบรูปทรงบ่อหลอมละลายและทิศทางการเย็นตัวของแนวเชื่อมที่ต่างความเร็วเชื่อม

ที่มา :WJM Technologies–Excellence in material joining, 2013

5.2 องค์ประกอบการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding : GMAW)

เป็นกรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กที่ใช้แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม ซึ่งเป็นทราบกันดีว่าเป็นกระบวนการเชื่อมที่พัฒนาจากพื้นฐานของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์ โดยที่รู้จักกันในชื่อของการเชื่อมมิก/แม็ก (Metal Inert Gases : MIG / Metal Active Gases : MAG) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่นิยมนำมาใช้งานกันมากเพราะทำงานได้สะดวกและรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ด้วยเหตุที่เป็นการเชื่อมที่อาศัยเทคโนโลยีการเชื่อมที่สูงขึ้นและทันสมัยมากขึ้น ช่างเชื่อมที่จะปฏิบัติการเชื่อมจำเป็นต้องมีทั้งทักษะการเชื่อมและความรู้ในการปรับตั้งองค์ประกอบของการเชื่อม (Welding parameters) ตัวอย่างเช่น ทักษะในการสังเกตหรือดูบ่อหลอมละลาย ทักษะการควบคุมขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อม รวมถึงสัดส่วนของปริมาณการซึมลึก ส่วนความรู้ความเข้าใจในการกำหนดหรือปรับตั้งค่าองค์ประกอบของการเชื่อมบนเครื่องเชื่อม (Welding machine) ได้แก่

1. กระแสไฟเชื่อม (Welding current)
2. แรงดันอาร์ก (Arc voltage)
3. ความเร็วป้อนลวด (Wire feed speed)
4. มุมเอียงหัวเชื่อม (Gun angle)
5. ความเร็วเชื่อม (Welding speed)
6. ระยะโผล่ลวด (Wire electrode extension)

องค์ประกอบหรือปัจจัยการเชื่อมดังกล่าวข้างต้นเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของรอยเชื่อมต่อและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ รวมถึงการเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตที่สูงขึ้น ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงพยายามเน้นถึงการสร้างความรู้ความเข้าใจถึงวิธีการปรับหรือกำหนดปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเชื่อม รวมไปถึงข้อจำกัดและข้อควรระวังไว้ในแต่ละองค์ประกอบจากประสบการณ์การทำงานโดยตรงดังต่อไปนี้

5.2.1 กระแสไฟเชื่อม (Welding current)

ปริมาณของกระแสไฟที่ใช้เชื่อมมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่ออัตรการป้อนเติมเนื้อลวดเชื่อม รูปทรงและขนาดของแนวเชื่อม รวมไปถึงระยะการซึมลึกของแนวเชื่อมซึ่งอ้างอิงตาม FRONIUS

(2018) โดยในทางปฏิบัติถ้าเลือกการเชื่อมแบบระบบแรงดันอาร์กคงที่กระแสไฟเชื่อมจะถูกควบคุมด้วยปุ่มปรับอัตราการป้อนลวด คือเมื่ออัตราการป้อนลวดเร็วเพิ่มขึ้น กระแสไฟเชื่อมก็จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ถ้าเลือกการเชื่อมแบบระบบที่กระแสคงที่กระแสเชื่อมจะปรับตั้งที่ปุ่มหน้าชุดควบคุมของเครื่องเชื่อม กระแสไฟเชื่อมที่เพิ่มสูงขึ้นจะเพิ่มอัตราการหลอมละลายของลวดเชื่อมมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.23 เส้นกราฟอัตราการหลอมละลายจะมีความชันมากเมื่อกระแสไฟเชื่อมปริมาณสูง และค่อนข้างราบที่ระดับปริมาณกระแสไฟเชื่อมต่ำ ซึ่งเป็นเหตุผลที่ปลายของลวดเชื่อมที่โผล่ออกมาจากท่อนำกระแสจึงมีความต้านทานต่อความร้อนโดยไม่หลอมย้อนกลับเข้าไปในท่อนำกระแส

ปริมาณกระแสไฟเชื่อมที่เพิ่มขึ้น ทำให้ต้องป้อนลวดด้วยอัตราที่เร็วขึ้น เพราะเกิดบ่อหลอมละลายที่กว้าง ย่อมส่งผลโดยตรงต่อขนาดแนวเชื่อมที่ใหญ่ขึ้น นูนขึ้น และมีการซึมลึกของแนวเชื่อมที่มากขึ้น ดังแสดงการเปรียบเทียบขนาดของแนวเชื่อมที่ ใช้กระแสไฟเชื่อมที่แตกต่างกันแต่ขนาดของลวดเชื่อมเท่ากัน ในรูปที่ 5.24 นอกจากนี้กระแสไฟเชื่อมยังต้องคำนึงถึง ความหนาแน่นของกระแส (Current density) ซึ่งจะหมายถึงจำนวนแอมแปร์ของกระแสต่อขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดเชื่อม ดังสมการที่ 5.2 เป็นไปตามคำแนะของผู้ผลิตเครื่องเชื่อม Lincoln Electric–GMAW (2014)

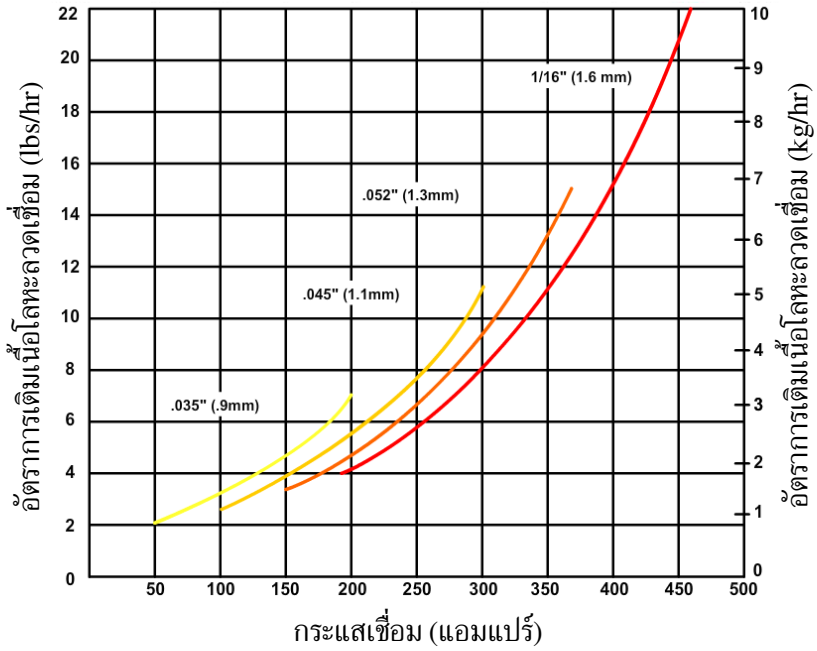
ยกตัวอย่าง เช่น ถ้าช่างเชื่อมปรับตั้งให้ปริมาณของกระแสคงที่ 200 แอมแปร์ แล้วทดลองเลือกใช้ลวดเชื่อมที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 และ 1.2 มม. ทำการเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในตารางที่ 5.2 จะพบว่ากระแสไฟเชื่อมที่ใช้กับลวดเชื่อมขนาด 0.9 มม. จะมีความหนาแน่นของกระแสมากกว่าขนาดลวดเชื่อม 1.2 มม. และนอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าขนาดของลวดเชื่อมที่มีขนาดเล็ก (0.9 มม) มีระยะของการซึมลึกได้มากว่าขนาดใหญ่ (1.2 มม) ที่ระดับปริมาณกระแสเชื่อมที่เท่ากัน กล่าวคือ เนื่องจากความร้อนที่ได้จากกระแสที่เท่ากัน ลวดขนาดเล็กใช้ความร้อนเพื่อหลอมละลายลวดน้อยกว่าลวดที่มีขนาดใหญ่ จึงเหลือปริมาณความร้อนที่มากว่าที่จะนำไปใช้หลอมละลายชิ้นงานโลหะเชื่อม จึงทำให้เกิดระยะการซึมลึกได้มากว่า ซึ่งแสดงเปรียบเทียบให้เห็นส่วนการซึมลึกที่แตกต่างกันดังในรูปที่ 5.25 ดังนั้น จะพบว่าในทางปฏิบัติการที่ช่างเชื่อมจะเลือกใช้ลวดเชื่อมตามขนาดต่าง ๆ ที่มีอยู่นั้นต้องเลือกให้มีความเหมาะสมสัมพันธ์กันกับปริมาณของกระแสไฟเชื่อม ต้องไม่น้อยหรือมากจนเกินไป โดยทั่วไปผู้ผลิตลวดเชื่อมมักจะมีข้อแนะนำการเลือกกระแสไฟเชื่อมกับขนาดของลวดเชื่อมที่เหมาะสมดังตัวอย่าง ข้อแนะนำในตารางที่ 5.3

$$\text{ความหนาแน่นกระแส } (\text{A}/mm^2) = \frac{\text{จำนวนแอมแปร์ (A)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดลวดเชื่อม } (mm^2)} \qquad \textit{สมการที่ } 5.2$$

ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างแสดงเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสที่ขนาดลวดเชื่อมต่างกัน

ที่มา : มานะศิษฎ์ พิมพ์สาร คู่มือการเชื่อม มิก–แม็ก พิมพ์โดย เอ็มแอนด์อี 2554

ขนาด Ø ของลวดเชื่อม (mm)	พื้นที่หน้าตัดลวดเชื่อม (mm^2)	กระแสเชื่อม (A)	ความหนาแน่นกระแส (A/mm^2)	อัตราการเติมเนื้อโลหะ (kg/hr)
0.9	0.636	200	200/0.036 = 314.46	3.2
1.2	1.130	200	200/1.13 = 176.99	2.8



รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ของค่ากระแสเชื่อมกับอัตราการเติมเนื้อโลหะเชื่อมด้วยแก๊ส CO_2

ที่มา : Richard L. Tittle, Welding and Welding Technology, 1973

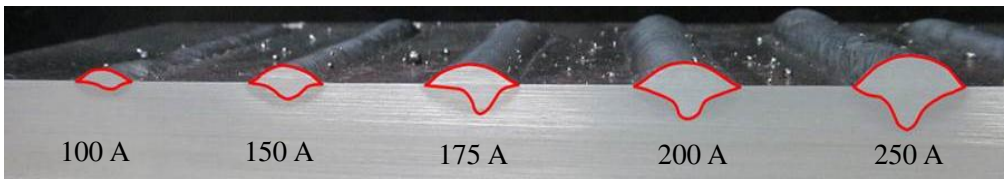
ตารางที่ 5.3 ตัวอย่างแนะนำการเลือกขนาดลวดเชื่อมกับกระแสเชื่อมที่เหมาะสม

ที่มา : มานะศิษฎ์ พิมพ์สาร คู่มือการเชื่อม มิก–แม็ก พิมพ์โดย เอ็มแอนด์อี 2554

ขนาด Ø ของลวดเชื่อม (มม)	ช่วงปริมาณกระแสเชื่อมที่เหมาะสม (แอมแปร์)
0.8	50–140
0.9	65–160
1.0	100–220
1.2	105–375
2.4	210–550
3.2	375–600



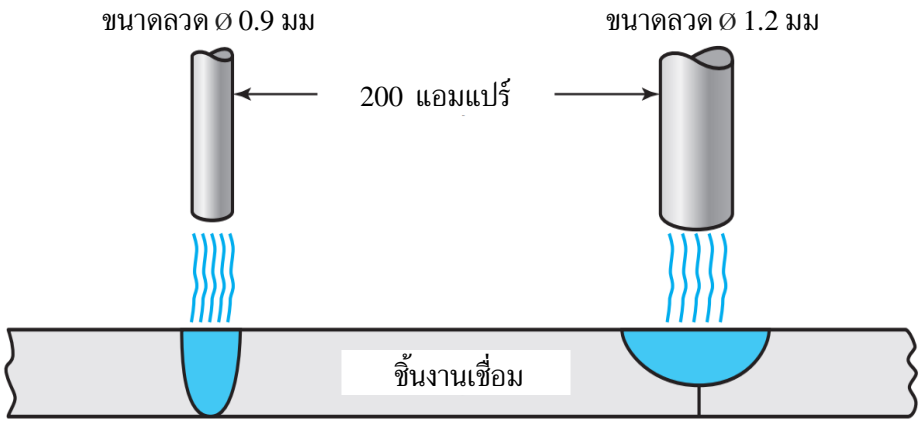
(ก) ภาพแนวเชื่อมด้านบน (Topside view)



(ข) ภาพตัดขวางแนวเชื่อม (Cross section

รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ของค่ากระแสเชื่อมกับอัตราการซึมลึกของแนวเชื่อม

ที่มา : EWI, Gas Metal Arc Welding Basics : Welding Current & Welding Voltage, 2015

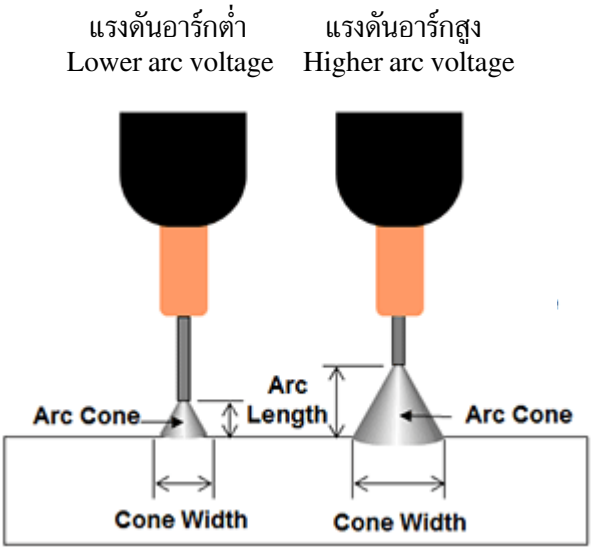


รูปที่ 5.25 เปรียบเทียบระยะการซึมลึกของแนวเชื่อมที่กระแสเท่ากันขนาดลวดต่างกัน

ที่มา : Edward R. Bohnart : Welding Principles and Practices, 2017

5.2.2 แรงดันอาร์ก (Arc voltage)

Lincoln Electric (2019) กรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กที่ใช้แก๊สปกคลุมแนวเชื่อมจะเกิดการอาร์กขึ้นระหว่างลวดเชื่อมที่ไหลโผล่ออกมากับชิ้นงาน ซึ่งระยะห่างของการอาร์กเรียกว่า แรงดันอาร์ก หรือ ระยะอาร์ก ของ กระบวนการเชื่อม ถ้าช่างเชื่อมเลือกใช้ระบบปรับแรงดันคงที่สามารถปรับตั้งได้ที่ชุดควบคุมหน้าปัดของเครื่องเชื่อม โดยเครื่องเชื่อมจะคงระดับแรงดันอาร์กไว้คงที่ตลอดเวลาตามที่ตั้งไว้ และจะคงรักษาระยะของการอาร์กไว้อย่างสม่ำเสมอ หมายถึง ถ้าระยะอาร์กสั้น (Short arc length) แรงดันอาร์กก็จะลดต่ำลง (Low arc voltage) และในทางกลับกันถ้าระยะอาร์กยาว (Long arc length) แรงดันอาร์กก็จะสูงขึ้นตาม (High arc voltage) ดังแสดงในรูปที่ 5.26 ในทางปฏิบัติเป็นที่ทราบกันดีว่าการเลือกปรับตั้งระยะอาร์กมีผลต่อขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อมโดยตรง กล่าวคือ กรณีเชื่อมด้วยระยะอาร์กที่สั้นแนวเชื่อมที่ได้มีขนาดเล็กและนูน แต่ถ้าในกรณีที่เชื่อมด้วยระยะอาร์กที่ยาวจะได้แนวเชื่อมที่กว้างและแบนราบซ้ำยังเกิดเม็ดน้ำโลหะกระเด็นออกมามาก ดังแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นแนวเชื่อมที่แตกต่างกันในรูปที่ 5.27 และในรูปที่ 5.28 แสดงตัวอย่างของลักษณะของแนวเชื่อมที่ผ่านการทดลองเชื่อมด้วยแรงดันอาร์กที่ค่าระดับของแรงดันที่ต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าแรงดันอาร์กที่สูงมีบทบาทต่อการหลอมลึกที่มากขึ้น และมีขนาดของแนวเชื่อมที่กว้าง อย่างไรก็ตาม ที่แรงดันอาร์กที่สูงการควบคุมบ่อหลอมละลายและหัวเชื่อมย่อมยากขึ้นด้วย จึงต้องใช้ช่างเชื่อมที่มีทักษะและความชำนาญการเชื่อมที่ค่อนข้างสูง โดยความถูกต้องและเหมาะสมในการปรับแรงดันอาร์กต้องพิจารณาร่วมกันกับขนาดของลวดเชื่อม ชนิดของแก๊สปกคลุม ตำแหน่งท่าเชื่อม การออกแบบรอยต่อ และขนาดความหนาของชิ้นงานเชื่อม



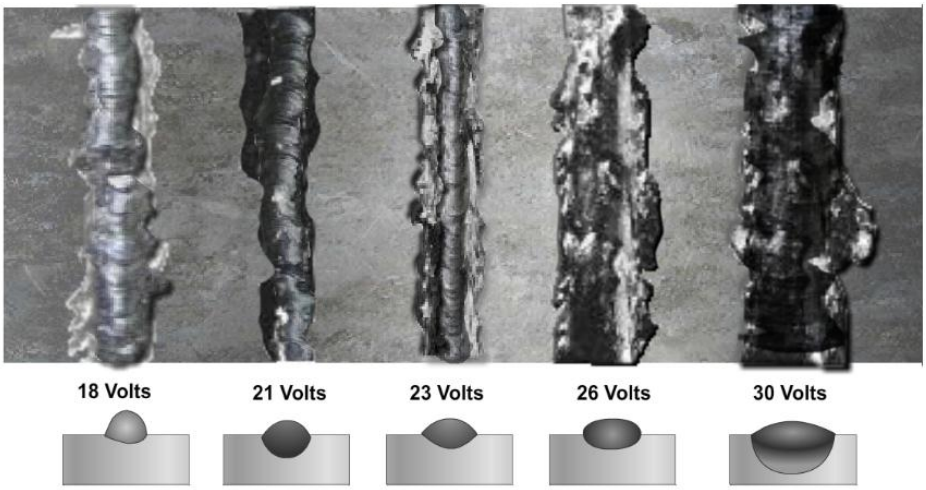
รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ของแรงดันอาร์ก (Arc voltage) กับระยะอาร์ก (Arc length)

ที่มา : Lincoln Electric : Process and theory, 2019



รูปที่ 5.27 ความสัมพันธ์ของระยะอาร์ก (Arc length) ต่อขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อม

ที่มา : Lincoln Electric : Process and theory, 2019



รูปที่ 5.28 ลักษณะของแนวเชื่อมที่ผ่านการทดลองเชื่อมภายใต้แรงดันอาร์กแตกต่างกัน

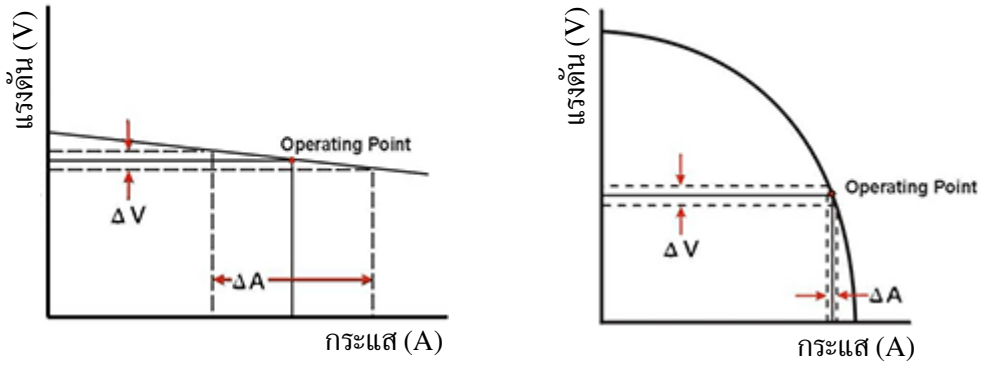
ที่มา : Welding Theory and Application, Army Technical Manual, USA, 1993

5.2.3 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟเชื่อม แรงดันอาร์ก และอัตราการป้อนลวด

(Relationship of welding current, arc voltage, and wire feed speed)

Lincoln Electric (2011) ได้แสดงข้อมูลไว้ในหลักทฤษฎีและขบวนการของกรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กที่ใช้แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม (GMAW) มีหลักการปรับตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับการอาร์กและกระแสไฟเชื่อมที่ดูจะแตกต่างจากกรรมวิธีการเชื่อมแบบอื่น ๆ วิธีการคือ จะตั้งค่าคงที่ของแรงดันอาร์กที่เครื่องเชื่อม และค่ากระแสไฟเชื่อมจะถูกกำหนดให้เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยเกิดจากการควบคุมด้วยความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม (Wire feed speed) กล่าวคือ ถ้าอัตราการป้อนของลวดเข้าสู่ชิ้นงานเร็วมากขึ้น เครื่องเชื่อมจะปรับกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นโดยอัตโนมัติ ในขณะที่ระดับความดันคงที่ ในทางกลับกันถ้าอัตราการป้อนของลวดช้าลง เครื่องเชื่อมก็จะปรับลดกระแสไฟเชื่อมลงอย่างมีสัดส่วนที่เหมาะสม ดังในรูปที่ 5.29 (ก) เป็นการอธิบายเหตุผลว่าทำไมช่างเชื่อมจึงนิยมเลือกกำหนดแรงดันอาร์กที่เครื่องเชื่อม ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงปริมาณกระแสที่ค่อนข้างคงเมื่อกำหนดค่าแรงดันอาร์กบน

เครื่องเชื่อมที่คงที่ โดยการเปลี่ยนแปลงเฉพาะความเร็วของการป้อนลวด วิธีการนี้ค่อนข้างง่ายในการควบคุมบ่อหลอมละลายและขนาดของแนวเชื่อม ส่วนเหตุผลที่ไม่นิยมกำหนดค่าคงที่ของกระแสไฟเชื่อมที่เครื่องเชื่อม ก็เพราะว่าไม่สามารถที่จะสร้างแรงดันอาร์กให้คงที่ได้ โดยมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อกระแสคงที่ในระดับปริมาณที่สูงขึ้น ดังที่แสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 5.29 (ข) ซึ่งวิธีนี้ต้องคอยระมัดระวังในการควบคุมความเร็วของการป้อนลวดที่บางครั้งอาจเกิดการหลอมที่รุนแรงจนหัวเชื่อมไหม้หรือลวดหลอมยากจนลวดติดกับชิ้นงานเชื่อม เป็นเหตุทำให้ควบคุมหรือกำหนดขนาดแนวเชื่อมยากมาก ช่างเชื่อมมักไม่ค่อยเลือกใช้วิธีนี้



(ก) การตั้งค่าแบบวิธีแรงดันคงที่ของเครื่องเชื่อม **(ข)** การตั้งค่าแบบวิธีกระแสคงที่ของเครื่อง

รูปที่ 5.29 เปรียบเทียบหลักวิธีการปรับตั้งค่าแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ กับแบบกระแสไฟเชื่อมคงที่สำหรับการอาร์กแบบ GMAW

ที่มา : LINCON Electric – Process and Theory, 2011

ตามหลักการความสัมพันธ์ข้างต้นที่กล่าวมาว่า กระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนลวดเร็วขึ้น จะมีผลกระทบโดยตรงต่อการเพิ่มความร้อนให้กับชิ้นงานเชื่อม (Heat input) และเพิ่มขนาดของแนวเชื่อมซึมลึก (Weld penetration) แต่ก็ไม่เสมอไป ในสภาวะอัตราการป้อนลวดที่สูงช่างเชื่อมสามารถลดผลกระทบดังกล่าวได้ด้วยการควบคุมแรงดันอาร์ก ซึ่งจะได้งานเชื่อมที่เหมือนกับการปรับลดอัตราการป้อนลวดช้าลง ดังนั้น ช่างเชื่อมสามารถเลือกที่จะควบคุมการเชื่อมด้วยวิธีกำหนดอัตราการป้อนลวดหรือแรงดันอาร์กอย่างใดก็ได้ตามความถนัด โดยปกติผู้ผลิตลวดเชื่อมมักมีข้อมูลแนะนำเพื่อช่วยเป็นแนวทางให้เลือกใช้องค์ประกอบที่ถูกต้องเหมาะสม ดังแสดงเป็นอย่างในตารางที่ 5.4 ซึ่งอ้างอิงจากหนังสือของ Larry Jeffus (2011)

ในทางปฏิบัติช่างเชื่อมต้องปรับตั้งอัตราการป้อนลวดตามข้อกำหนดวิธีดำเนินการเชื่อม (WPS) ในกรณีที่ไม่ได้กำหนดไว้ ช่างเชื่อมสามารถปรับตั้งเองตามความเหมาะสม ร่วมกับองค์ประกอบอื่น ๆ โดยอาจมีผู้ช่วยปรับในขณะที่กำลังทำการเชื่อมอยู่ ซึ่งมีข้อดีที่หาค่าที่เหมาะสมได้ง่ายและรวดเร็ว หรืออาจปรับด้วยตนเองโดยที่ทดลองเชื่อมบนโลหะทดลองก่อนจนกว่าจะได้ค่าอัตราการป้อนลวดที่

เหมาะสม เทคนิคการการปรับค่าของการเชื่อม GMAW แนะนำว่าควรปรับองค์ประกอบทีละตัว ไม่ควรปรับพร้อม ๆ กันหลายตัวในเวลาเดียวกัน โดยมีตัวแปรอื่น ๆ อีกหลายตัวร่วมด้วยที่มีผลต่อการปรับองค์ประกอบในการเชื่อม ได้แก่ ความหนาของชิ้นงานเชื่อม ชนิดของรอยต่อ ตำแหน่งท่าเชื่อม ตำแหน่งรอยต่อ แก๊สปกคลุม อุณหภูมิชิ้นงาน และรวมไปถึงทักษะความชำนาญของช่างเชื่อม

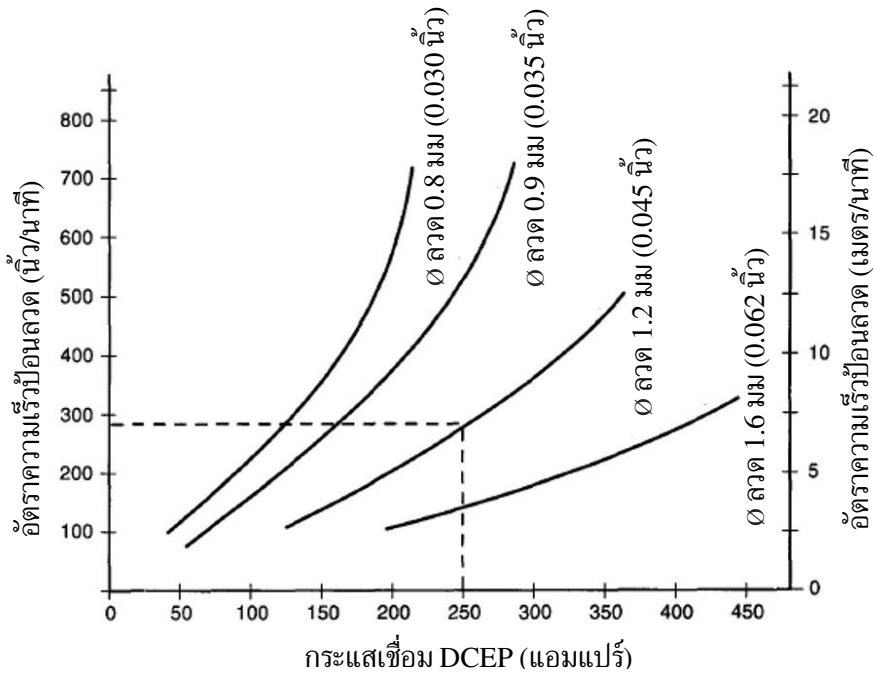
ตารางที่ 5.4 ข้อมูลแนะนำเชิงเทคนิคในการปรับตั้งองค์ประกอบของขบวนการเชื่อมอาร์กใช้แก๊สปกคลุม (Recommended GMAW setup)

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metals Fabrication, 2011

ข้อมูลแนะนำเชิงเทคนิคในการปรับตั้งองค์ประกอบของการเชื่อม (Recommended GMAW setup)			
การถ่ายเทน้ำโลหะแบบ Short circuit arc			
ขนาด Ø ของลวดเชื่อม (นิ้ว)	กระแสเชื่อม (แอมป์)	แรงดัน (โวลท์)	ความเร็วป้อนลวด (นิ้ว/นาที)
0.023	45–70–90	14–15–16	150–300–380
0.030	60–100–140	14–15–16	150–220–350
0.035	90–130–160	15–17–19	180–250–300
0.045	130–160–200	17–18–19	125–150–200
0.052	150–160–200	17–18–20	135–140–190
การถ่ายเทน้ำโลหะแบบ Spray metal arc			
ขนาด Ø ของลวดเชื่อม (นิ้ว)	กระแสเชื่อม (แอมป์)	แรงดัน (โวลท์)	ความเร็วป้อนลวด (นิ้ว/นาที)
0.023	100–110–125	23–23–25	400–450–620
0.030	160–180–200	24–25–26	500–520–650
0.035	180–200–230	25–26–27	400–480–550
0.045	260–300–340	25–27–30	300–350–500
0.052	275–325–400	26–28–33	265–310–390
หมายเหตุ เชื่อมด้วยระบบกระแสตรงขั้วบวก (DCEP) และ อัตราการไหลของแก๊ส 35 ถึง 45 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที			

จากที่กล่าวมาข้างต้นกระแสเชื่อม แรงดันอาร์ก และอัตราการป้อนลวดมีความสัมพันธ์กัน ที่ช่างเชื่อมต้องกำหนดหรือปรับตั้งให้เหมาะสม พบว่ายังมีตัวแปรเรื่องของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดป้อนหรือที่เข้าใจกัน คือขนาดความโตของลวดนั่นเอง ซึ่งมีความสำคัญต่ออัตราการป้อนลวดโดยตรง ซึ่งผู้ผลิตลวดเชื่อม KOBELCO (2015) ได้แสดงข้อมูลไว้และได้นำมาอ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 5.30 เป็นการยกตัวอย่างของลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel wires) ที่ขนาดต่าง ๆ กัน เห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อลวดมีขนาดที่โตขึ้นต้องลดอัตราการป้อนให้ช้าลง ในทางกลับกันถ้าต้องการเพิ่ม

อัตราการป้อนลวดเพื่อที่จะเชื่อมได้รวดเร็วมากขึ้นต้องทำการปรับเพิ่มกระแสเชื่อมควบคู่กัน โดยความสัมพันธ์นี้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันชนิดเกรดวัสดุลวดเชื่อม เรียกความสัมพันธ์นี้ว่า “Burn off Characteristic” คือ คุณลักษณะการหลอมละลาย



รูปที่ 5.30 ความสัมพันธ์ของขนาดลวด อัตราการป้อนลวด และกระแสเชื่อมของ GMAW

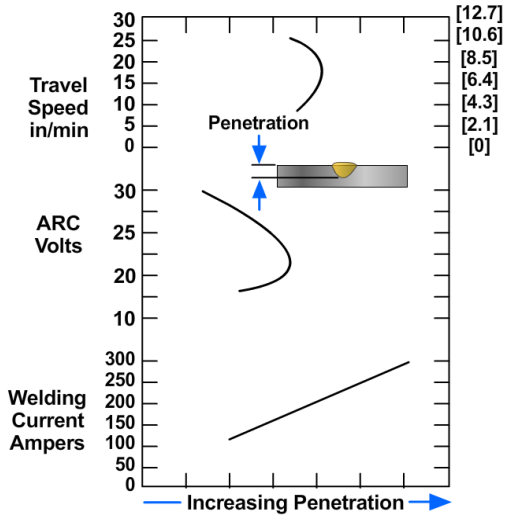
ที่มา : KOBELCO–Essential factors in gas shielding metal arc welding, 2015

5.2.4 ความเร็วเชื่อม (Welding speed)

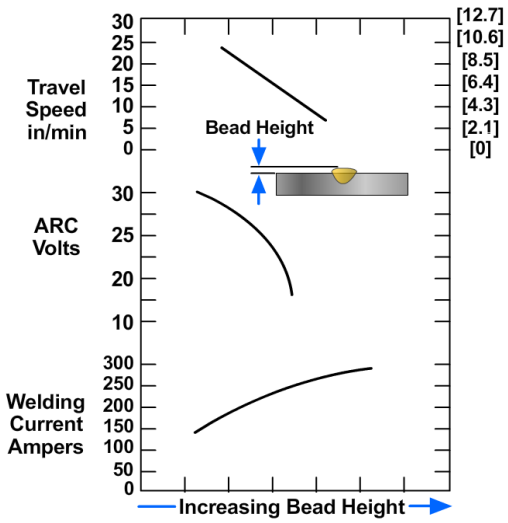
หมายถึง อัตราการความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมต่อหน่วยเวลาในระหว่างการเชื่อม ซึ่งวัดเป็นหน่วยของความยาวของแนวเชื่อมต่อเวลาที่การเชื่อม โดยอาจวัดเป็นหน่วยนิ้วต่อนาที (in/min) มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) หรือ มิลลิเมตรต่อวินาที (mm/sec) ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของงานที่ทำการเชื่อม หรือตามข้อกำหนดของวิศวกรออกแบบงานเชื่อม (WPS) กรณีการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ ความเร็วในการเชื่อมถูกควบคุมโดยมือของช่างเชื่อม ส่วนกรณีการเชื่อมแบบอัตโนมัติจะถูกควบคุมโดยระบบกลไกจักรกล ซึ่งความเร็วของการเชื่อมนั้นจะมีความสัมพันธ์กับแรงดันอาร์ก และกระแสเชื่อมที่ต้องนำมาพิจารณาประกอบร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.31 ที่อ้างอิงจาก NAVEDTRA (2011) โดยระบุว่าจะส่งผลกระทบโดยต่อ (ก) ระยะการซึมลึกของแนวเชื่อม (Penetration) (ข) ความสูงหรือนูนของแนวเชื่อม (Bead height) และ(ค) ความกว้างของแนวเชื่อม (Bead width) กล่าวคือ

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.31 ถ้าความเร็วในการเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นปริมาณความร้อนถ่ายโอนไปละลายชิ้นงานได้น้อยลง ส่งผลทำให้บ่อหลอมละลายเล็กลง เพราะเกิดการหลอมละลายเฉพาะบริเวณผิว

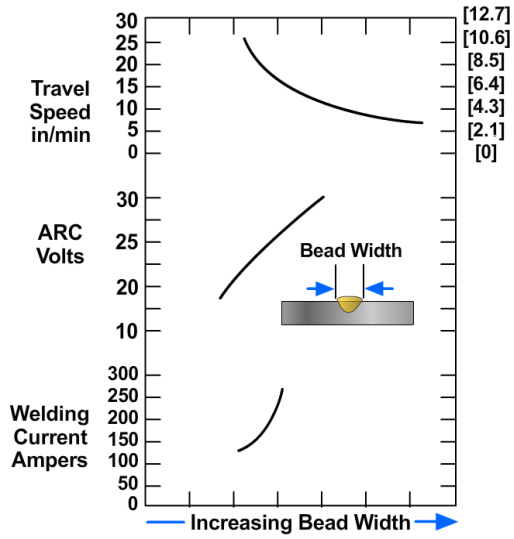
ของชิ้นงานอันเป็นเหตุให้ระยะซึมลึกน้อย และแนวเชื่อมมีความนูนสูงมาก ซึ่งปัญหานี้แก้ไขโดยช่างเชื่อมต้องควบคุมให้เกิดการอาร์กที่ขอบด้านหน้าของบ่อหลอมละลายเสมอ (Puddle) ในทางกลับกันถ้าความเร็วเชื่อมลดต่ำลงหรือช้าลง ชิ้นงานมีเวลารับความร้อนได้มากขึ้น อัตราการป้อนเติมลวดต่อหน่วยความยาวจะเพิ่มขึ้น บ่อหลอมจะละลายกว้างขึ้นและตื้น ส่งผลให้แนวเชื่อมมีขนาดโตและมีระยะการซึมลึกที่มากขึ้น จากบทบาทที่กล่าวมาข้างต้นของความเร็วในการเชื่อมที่มีผลกระทบต่อขนาดและลักษณะของแนวเชื่อมนั้น ได้มีการทดลองเชื่อมชิ้นงานที่ระดับอัตราความเร็วเชื่อมที่ต่างกัน พบว่า ได้แนวเชื่อมที่มีความแตกต่างกันเป็นไปตามหลักการที่กล่าวมาอย่างชัดเจน ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 5.32



(ก) ระยะซึมลึกของแนวเชื่อม



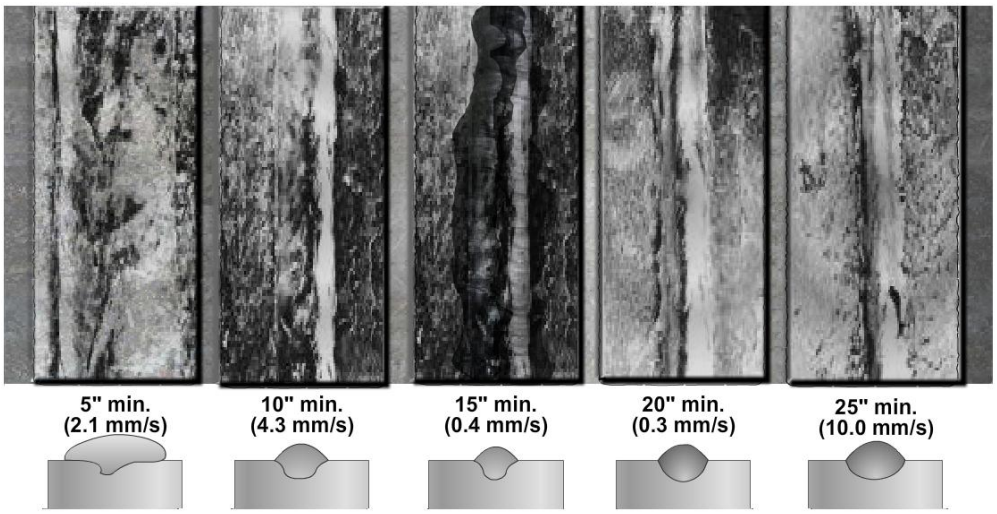
(ข) ความสูงหรือนูนของแนวเชื่อม



(ค) ความกว้างของแนวเชื่อม

รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชื่อม แรงดันอาร์กและกระแสเชื่อมที่มีผลต่อแนวเชื่อม

ที่มา : NAVEDTRA 14250A, 2011



รูปที่ 5.32 ขนาดและลักษณะของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอัตราความเร็วแตกต่างกัน

ที่มา : NAVEDTRA 14250A, 2011

5.2.5 ระยะโผล่ลวดเชื่อม (Electrode extension)

ระยะโผล่ของลวดเชื่อมเป็นองค์ประกอบการเชื่อมที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการเชื่อมแบบมิก–แม๊ก โดยบางครั้งอาจเรียกว่า Wire extension หรือ Actual stickout ซึ่งหมายถึงระยะห่างระหว่างปลายของท่อนำกระแส (Contact tube) กับปลายของลวดเชื่อม (Eelectrode) โดยเป็นช่วงระยะที่ใช้สำหรับการอุ่นลวดเชื่อมเพื่อเตรียมอาร์กกับชิ้นงานเชื่อม ความร้อนที่ใช้อุ่นลวดเกิดจากค่าความต้านทานกระแสเชื่อม ซึ่งมีสูตรการหาค่าความร้อนได้ดังนี้ อ้างอิงจาก NAVEDTRA 14250A, 2011

$$\text{ค่าความร้อนจากความต้านทาน} = I^2 x\, R \qquad \textit{สมการที่}\ (5.3)$$

เมื่อ I = กระแสเชื่อม

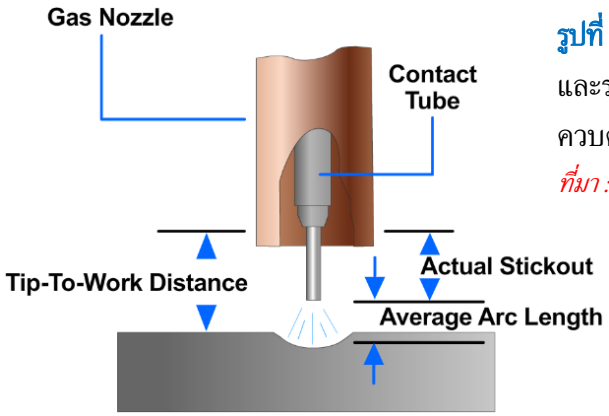
R = ความต้านทานกระแสเชื่อม

นอกจากนี้ ยังมีองค์ประกอบร่วมอื่นที่เกี่ยวข้องกับระยะโผล่ลวดเชื่อมที่ต้องควบคุมไปพร้อม ๆ กันบนชุดของหัวเชื่อม ได้แก่ ระยะห่างจากปลายของท่อนำกระแสถึงชิ้นงานเชื่อม (Tip–to–work distance) และ ระยะเฉลี่ยจากปลายของลวดเชื่อมถึงชิ้นงานเชื่อม (Average arc length) หรือที่เข้าใจกันดีว่าคือระยะอาร์กของการเชื่อม ดังแสดงรายละเอียดของของระยะต่าง ๆ ของหัวเชื่อมในรูปที่ 5.33

อิทธิพลของระยะโผล่ของลวดเชื่อมมีผลกระทบโดยตรงกับปริมาณกระแสเชื่อมที่แปรเปลี่ยนและระยะซึมลึกที่เปลี่ยนแปลงของแนวเชื่อมภายใต้ระยะอาร์กที่คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 5.34 (ก) และ (ข) ตามลำดับ พบว่า ระยะโผล่ของลวดเชื่อมที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อกระแสเชื่อมเพิ่มมากขึ้นตาม และทำให้ปริมาณของกระแสเชื่อมสามารถไหลผ่านได้น้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 5.34 (ก) ซึ่ง

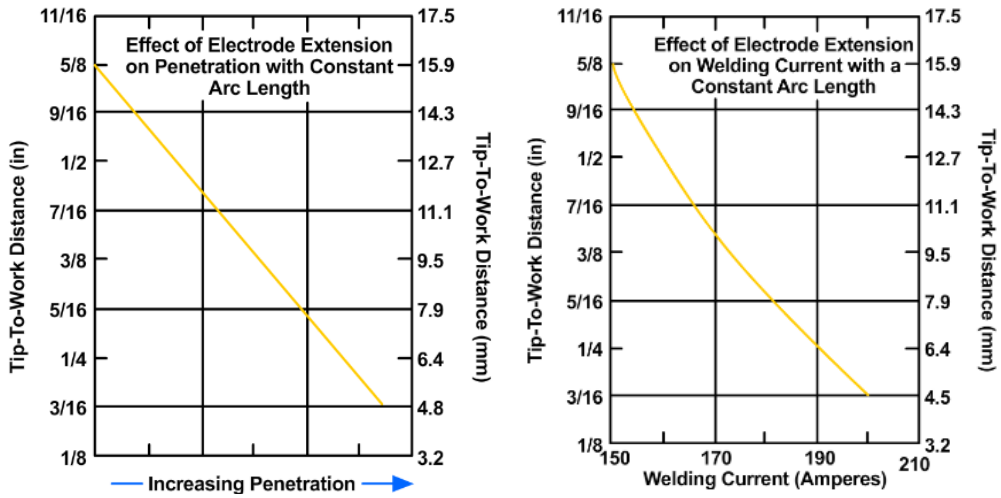
เป็นต้นเหตุให้แหล่งของความร้อนที่ใช้อุ่นลวดเชื่อมก่อนการอาร์กเพื่อการหลอมเหลวลดต่ำลงแบบอัตโนมัติ (Automatic decreased) ลวดเชื่อมหลอมยากขึ้น ในขณะที่อัตราการป้อนลวดคงเดิมและระยะอาร์กคงที่ ดังนั้น แนวเชื่อมที่ได้จึงมีระยะการหลอมซึมลึกที่น้อย แนวเชื่อมเล็ก และนูนสูง ในทางตรงกันข้ามถ้าระยะโผล่ของลวดเชื่อมลดต่ำลงค่าความต้านทานต่อกระแสเชื่อมลดลง กระแสไหลผ่านได้มากขึ้นสร้างความร้อนเพื่ออุ่นลวดได้มากและเร็วขึ้น ลวดหลอมง่ายบ่อหลอมละลายกว้างขึ้น แนวเชื่อมที่ได้จึงมีระยะซึมลึกที่มากและแนวเชื่อมมีขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 5.34 (ข)

ได้มีการทดลองหาอัตราการเติมเนื้อโลหะจากการหลอมละลายของลวดเชื่อมที่ระยะโผล่ของลวดเชื่อมแตกต่างกัน พบว่า ระยะโผล่ของลวดเชื่อมที่เพิ่มมากขึ้นมีแนวโน้มของปริมาณการเติมเนื้อโลหะที่มีอัตราที่สูงขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ของกระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นแบบอัตโนมัติขณะปฏิบัติการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 5.35



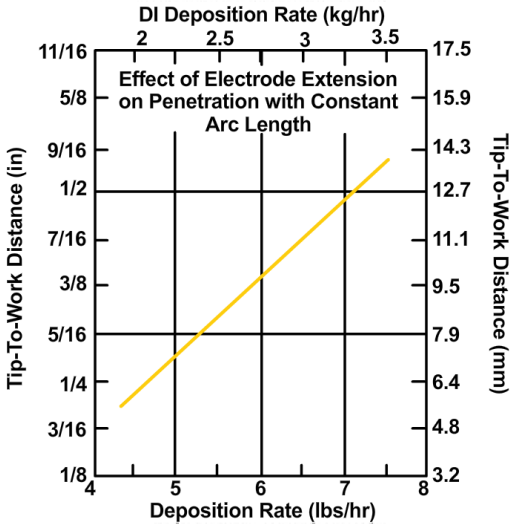
รูปที่ 5.33 ระยะโผล่ของลวดเชื่อมและระยะอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในการควบคุมหัวเชื่อม

ที่มา : NAVEDTRA 14250A, 2011



รูปที่ 5.34 ผลกระทบของระยะโผล่ลวดเชื่อมต่อ (ก) ระยะซึมลึก และ (ข) กระแสเชื่อม

ที่มา : NAVEDTRA 14250A, 2011



รูปที่ 5.35 ผลกระทบของระยะโผล่ลวดเชื่อมต่ออัตราการเติมเนื้อโลหะ (ที่กระแสเชื่อม 145 แอมแปร์ และ ระยะอาร์กคงที่)
ที่มา : NAVEDTRA 14250A, 2011

จากคำแนะของผู้ผลิตเครื่องเชื่อมแบบอาร์กที่ใช้แก๊สปกคลุมหรือ มิก–แม็ก ระบุไว้ในกระบวนการเชื่อมทุกชนิดของการถ่ายโอนน้ำโลหะ จะกำหนดให้ตั้งระยะโผล่ของลวดเชื่อมที่ถูกต้องและเหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 5.5 ซึ่งระยะโผล่ลวดที่แนะนำต้องพิจารณาควบคู่กับขนาดของลวดเชื่อม โดยลวดเชื่อมขนาดเล็กต้องเลือกระยะโผล่ลวดที่น้อย และเพิ่มระยะโผล่ลวดมากขึ้นเมื่อขนาดของลวดเชื่อมโตขึ้น เช่น ขนาดลวดเชื่อม 0.8 – 1.2 มิลลิเมตร ตั้งระยะโผล่ลวดที่เหมาะสมอยู่ที่ 3.2 –10 มิลลิเมตร หรือ ถ้าขนาดของลวดเชื่อมโตขึ้นเป็น 2.0 – 2.4 มิลลิเมตร ตั้งระยะโผล่ลวดที่เหมาะสมอยู่ที่ 25.4 –31.8 มิลลิเมตร เป็นต้น

ตารางที่ 5.5 ระยะโผล่ลวดเชื่อมที่ถูกต้องและเหมาะสมของแต่ละชนิดของการถ่ายโอนโลหะ
ที่มา : Andrew D. Althouse and et. al., Modern Welding, 2020

ระยะโผล่ลวดเชื่อมที่ถูกต้องและเหมาะสมของการเชื่อมแบบอาร์กที่ใช้แก๊สปกคลุม หรือ มิก–แม็ก	
ชนิดของการถ่ายโอนโลหะ (Metal transfer)	ระยะโผล่ลวดเชื่อม (Electrode extension)
แบบ Short Circuting	6 – 13 มิลลิเมตร หรือ 1/4 – 1/2 นิ้ว
แบบ Spay transfer	13 – 25 มิลลิเมตร หรือ 1/2 – 1 นิ้ว

*** หมายเหตุ ระยะโผล่ลวดเชื่อมจะแปรผันตรงกับขนาดลวดเชื่อม*

5.2.6 มุมหัวเชื่อม (Nozzle angles)

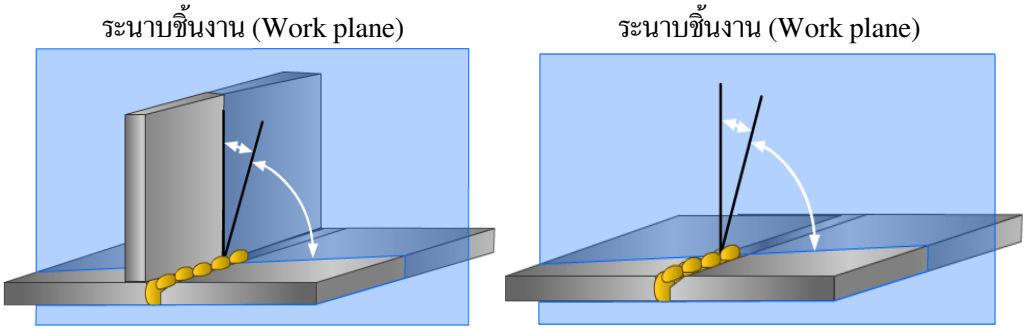
มุมหัวเชื่อมในกรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กที่ใช้แก๊สปกคลุม หรือ มิก–แม็ก มีความหมายเดียวกันกับมุมของลวดเชื่อม (Electrpde angles) ด้วยเหตุที่ลวดเชื่อมอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของหัวเชื่อมเสมอ โดยที่มุมของหัวเชื่อมที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการเชื่อมจะมี 2 มุมเสมอ ที่กล่าวไว้ในผลงาน

เขียนของ Andrew D. Althouse et al. (2020) ที่ระบุว่าช่างเชื่อมต้องคอยควบคุมให้อยู่ในมุมองศาที่ถูกต้องและเหมาะสมทั้งคู่ เพราะเป็นตัวแปรที่สำคัญในการสร้างความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม ซึ่ง 2 มุม ซึ่งสอดคล้องกับคำอธิบายในเอกสารของ NAVEDTRA 14250A, 2011 มุมดังกล่าวก็คือ

1. มุมหัวเชื่อมตามแนวขวาง (Transverse nozzle angles) หรือ บางครั้งเรียกว่า มุมชิ้นงาน (Work angle) เป็นมุมที่เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อมหรือลวดเชื่อมวัดทำมุมกับพื้นผิวของชิ้นงานเชื่อมในแนวระนาบที่ตั้งฉากกับแนวแกนของแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 5.36 (ก) และ (ข) เป็นการแสดงให้เห็นภาพของมุมองศาในแนวขวาง ของแนวเชื่อมมุม (Fillet weld) และแนวเชื่อมร่อง (Groove weld) ตามลำดับ ส่วนกรณีการเชื่อมท่อ (Pipe) มุมตามแนวขวางจะวัดจากมุมที่เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อมหรือลวดเชื่อมวัดทำมุมกับผิวท่อในแนวระนาบที่เลยออกไปจากศูนย์กลางท่อเรื่อย ๆ ไปกับบ่อหลอมละลายจากการเชื่อม

2. มุมหัวเชื่อมตามแนวยาว (Longitudinal nozzle angles) หรือบางครั้งเรียกว่า มุมการเคลื่อนที่หัวเชื่อม (Travel angle) เป็นมุมที่เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อมหรือลวดเชื่อมวัดทำมุมกับเส้นอ้างอิงที่ตั้งฉากแนวแกนของรอยต่อเชื่อมในแนวระนาบของการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 5.37 (ก) และ (ข) เป็นการแสดงให้เห็นมุมองศาของการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมหรือลวดเชื่อม ในการเชื่อมแบบเชื่อมมุม (Fillet weld) และแนวเชื่อมร่อง (Groove weld) ตามลำดับ สำหรับการเชื่อมท่อมุมการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมจะวัดกับเส้นอ้างอิงเลยออกไปจากศูนย์กลางของท่อตลอดการเชื่อมในแนวระนาบของแกนแนวเชื่อม (Axis of weld) ซึ่งมุมของหัวเชื่อมตามแนวยาวในขณะทำการเชื่อมสามารถเอียงมุมหัวเชื่อมหรือมุมของลวดเชื่อมให้อยู่ในท่าเชื่อมได้ทั้งแบบเชื่อมถอยหลัง (Backhand welding) และเชื่อมเดินหน้า (Forehand welding)

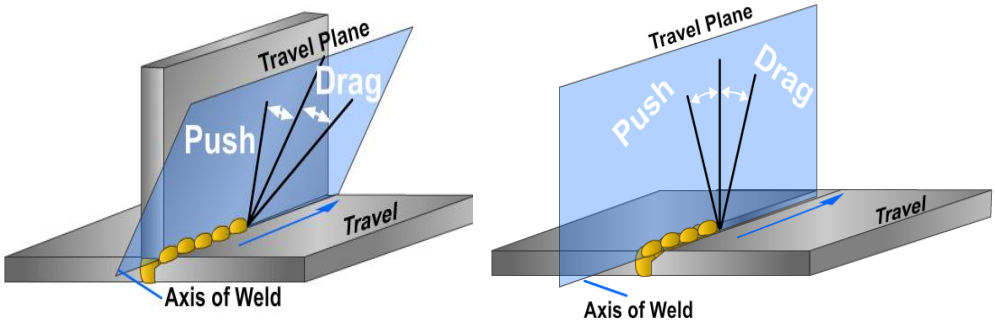
มุมหัวเชื่อมตามแนวยาวจะมีทั้งมุมเชื่อมที่เป็นแบบดึงหรือลาก (Pulling angle) โดยมุมแบบนี้หัวเชื่อมจะเอียงไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเชื่อม (Welding direction) จึงเรียกมุมเชื่อมแบบนี้ว่า Backhand welding และมุมเชื่อมที่เป็นแบบดันหรือผลัก (Pushing angle) มุมลักษณะนี้หัวเชื่อมจะเอียงไปในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการเชื่อม ดังนั้น จึงเรียกมุมเชื่อมแบบนี้ว่า Forehand welding ซึ่งแสดงเปรียบเทียบความแตกต่างของมุมเชื่อมทั้งสองในรูปที่ 5.38 นอกจากนี้ยังพบว่าระดับมุมเอียงของหัวเชื่อมมีผลต่อระยะการซึมลึกของแนวเชื่อม กล่าวคือ มุมเชื่อมแบบดึงหรือลากจะให้ระยะซึมลึกมากที่สุดต้องอยู่ในช่วงมุมเอียงระหว่าง 15 ถึง 20 องศา ส่วนมุมเชื่อมแบบดันหรือผลักต้องอยู่ในช่วง 15 ถึง 30 องศา นอกจากมีผลต่อระยะซึมลึกแล้ว มุมหัวเชื่อมในการเคลื่อนที่ยังมีผลกระทบโดยตรงต่อขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 5.39 ซึ่งเปรียบให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของทิศทางการเอียงของมุมหัวเชื่อมกับระยะการซึมลึกและลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อม ตัวอย่างเช่น การเชื่อมที่มุมดึงหรือลากลวดลดลง ความนูนสูงของแนวเชื่อมจะลดลงส่วนความกว้างจะเพิ่มขึ้น เป็นต้น



(ก) มุมชิ้นงานแบบเชื่อมมุม (Fillet weld) **(ข)** มุมชิ้นงานแบบเชื่อมร่อง (Groove weld)

รูปที่ 5.36 ลักษณะของมุมเชื่อมตามขวาง ของงานเชื่อมมุม และ งานเชื่อมร่อง

ที่มา : NAVEDTRA 14250A, 2011



(ค) มุมการเคลื่อนที่แบบเชื่อมมุม (Filler weld)

(ง) มุมการเคลื่อนที่แบบเชื่อมร่อง (Groove weld)

รูปที่ 5.37 ลักษณะของมุมเชื่อมตามแนวยาวของงานเชื่อมมุม และงานเชื่อมร่อง

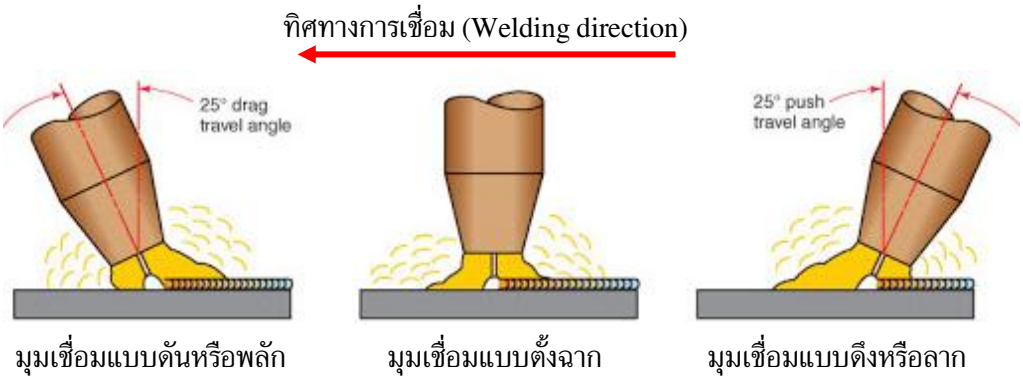
ที่มา : NAVEDTRA 14250A, 2011

ข้อเสนอแนะสำหรับการเลือกใช้มุมของหัวเชื่อมจากประสบการณ์ของช่างเชื่อม

1. มุมเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมระหว่าง 5 ถึง 15 องศา เป็นช่วงมุมที่เหมาะสมกับทุกตำแหน่งท่าเชื่อม ซึ่งช่างเชื่อมสามารถควบคุมบ่อหลอมละลายได้ง่าย แนวเชื่อมมีโอกาสเกิดข้อบกพร่องน้อย

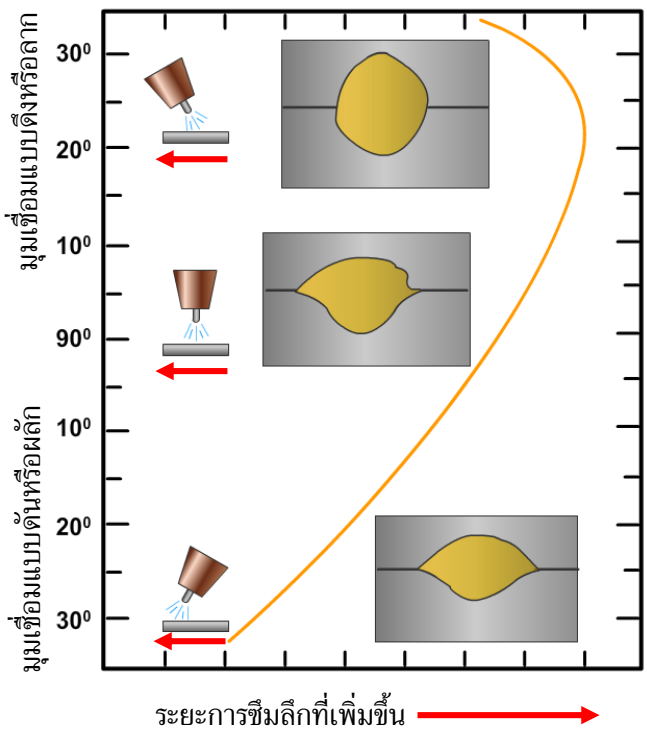
2. มุมหัวเชื่อมเคลื่อนที่แบบดันหรือผลัก (Forehand welding) เหมาะที่จะเลือกใช้กับการเชื่อมโลหะอลูมิเนียม เพราะความร้อนป้อนเข้าสู่ชิ้นงานค่อนข้างต่ำ แต่ให้ระยะการซึมลึกดี

3. มุมหัวเชื่อมเคลื่อนที่แบบดึงหรือลาก (Backhand welding) เป็นมุมหัวเชื่อมที่นิยมเลือกใช้กันเหมาะสมที่จะเลือกใช้กับการเชื่อมจำพวกเหล็กกล้าทั่ว ๆ ไปได้ดี ให้ระยะซึมลึกมาก



รูปที่ 5.38 ลักษณะความแตกต่างของมุมเอียงหัวเชื่อม

ที่มา : Andrew D. Althouse, et. al., Modern Welding, 12th, 2020



รูปที่ 5.39 ความสัมพันธ์ของทิศทางการเอียงของมุมหัวเชื่อมกับระยะการซึมลึกและลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อม

ที่มา : NAVEDTRA 14250A, 2011

จากข้อมูลรายละเอียดที่กล่าวมาข้างต้นเกี่ยวกับมุมการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อม พอจะสรุปลักษณะเฉพาะตัวหรือพฤติกรรมของการเอียงมุมหัวเชื่อมแบบดึงหรือลากกับแบบดันหรือผลักได้ดังต่อไปนี้

ลักษณะเฉพาะของมุมหัวเชื่อมเคลื่อนที่แบบดึงหรือลาก (Backhand welding) มีดังนี้

1. รูปร่างของแนวเชื่อมนูนสูงและแคบ
2. ระยะซึมลึกมากเนื่องจากพฤติกรรมบ่อหลอมละลายอยู่หลังเปลวอาร์กเชื่อม
3. แนวทิศทางที่จะทำการเชื่อมมองเห็นได้ยาก เหตุเพราะมีหัวฉีดแก๊ส (Gas nozzle) มาปิดบัง
4. มุมเอียงของหัวเชื่อมมากเกินไปโอกาสเกิดโพรงอากาศได้มากด้วยเหตุจากเกิดการดูดอากาศเข้าหาบ่อหลอมละลายสูง
5. ช่างเชื่อมมองเห็นบ่อหลอมละลายได้ชัดเจนจึงง่ายต่อการควบคุมขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อมได้ดี
6. ขณะทำการเชื่อมจะเกิดประกายไฟจากอาร์กเชื่อมที่น้อย

ลักษณะเฉพาะของมุมหัวเชื่อมเคลื่อนที่แบบดันหรือผลัก (Forehand welding) มีดังนี้

1. รูปร่างของแนวเชื่อมมีลักษณะแบนราบและกว้าง
2. ระยะซึมลึกน้อยเนื่องจากพฤติกรรมบ่อหลอมละลายอยู่นำหน้าเปลวอาร์กเชื่อม
3. แนวทิศทางที่ทำการเชื่อมมองเห็นได้ง่าย เหตุเพราะไม่โดนปิดบังด้วยหัวฉีดแก๊ส (Gas nozzle)
4. มุมเอียงของหัวเชื่อมมากเกินไปโอกาสเกิดประกายไฟมาก และกระเด็นนำหน้าทิศทางเชื่อม (ยิ่งมุมเอียงมากประกายไฟจะยิ่งมากขึ้น และมีขนาดเม็ดประกายไฟที่ใหญ่ขึ้น)
5. ช่างเชื่อมมองเห็นบ่อหลอมละลายได้ยากเพราะปิดบังด้วยหัวฉีดแก๊ส จึงยากต่อการควบคุมขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อม

5.2.6 แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม (Shielding gas)

กรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กที่ใช้แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม (GMAW) ชนิดของแก๊สที่ใช้และอัตราการไหลไปปกคลุมแนวเชื่อมจึงมีความสำคัญและต้องพิจารณาเลือกใช้ให้ถูกต้องและเหมาะสม ด้วยเหตุเพราะแก๊สปกคลุมมีผลกระทบโดยตรงต่อ รูปร่างและขนาดของแนวเชื่อม ระยะซึมลึก อัตราการป้อนเติมลวด ปริมาณการเกิดควันเชื่อม ประกายไฟ อัตราความเร็วของการเชื่อม ชนิดการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะ และสมบัติของแนวเชื่อมที่ได้ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับคำกล่าวของ Andrew D. Althouse (2020) และจากข้อมูลประสบการณ์ของช่างเชื่อม พบว่า การเชื่อมโลหะประเภทที่เป็นพวกกลุ่มเหล็ก (Ferrous metals) นิยมใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สอาร์กอน + แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($Ar + CO_2$) และ แก๊สอาร์กอน + แก๊สออกซิเจน ($Ar + O_2$) โดยเป็นที่ทราบกันดีว่ากรณีช่างเชื่อมเลือกใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อย่างเดียว (100% CO_2) ปริมาณความร้อนป้อนสู่ชิ้นงานเชื่อมสูงมาก อัตราการสิ้นเปลืองลวดสูง (Burn off rate) เกิดระยะซึมลึกมาก อัตราความเร็วการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมสูง แนวเชื่อมกว้างและนูน ขณะเชื่อมเกิดประกายไฟกระเด็นปริมาณมาก เป็นที่นิยมกันมากเหตุเพราะราคาค่อนข้างต่ำ ส่วนกรณีเลือกแก๊สปกคลุมชนิดอาร์กอนอย่างเดียว (100% Ar)

หรือ แก๊สอาร์กอนผสมแก๊สออกซิเจน ($Ar + O_2$) พบว่า ปริมาณความร้อนที่ป้อนสู่ชิ้นงานเชื่อมค่อนข้างน้อย อัตราการสิ้นเปลืองลวดต่ำ ระยะซึมลึกไม่มาก แนวเชื่อมที่ได้จึงมีลักษณะรูปร่างแคบและแบนราบ ซ้ำยังเกิดควันขณะเชื่อมน้อย และประกายไฟจากการอาร์กน้อยเช่นกัน สำหรับการเลือกใช้แก๊สปกคลุมชนิดแก๊สอาร์กอนผสมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($Ar + CO_2$) พฤติกรรมโดยรวมจะให้ผลต่อการเชื่อมอยู่ระดับกลาง ๆ ระหว่างแก๊สปกคลุมทั้งสองชนิดที่กล่าวมาข้างต้น

สำหรับโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non−ferrous metals) แก๊สปกคลุมแนวเชื่อมที่ช่างเชื่อมนิยมเลือกใช้เป็นชนิดแก๊สอาร์กอนอย่างเดียว (100% Ar) และแก๊สอาร์กอนผสมฮีเลียม ($Ar + He$) กรณีที่ใช้แก๊สอาร์กอนอย่างเดียวพบว่าเกิดระยะซึมลึกน้อยและอัตราการสิ้นเปลืองลวดต่ำ รูปร่างแนวเชื่อมแคบและแบนราบ มีประกายไฟจากการอาร์กปริมาณน้อย แต่ราคาค่อนข้างต่ำและหาซื้อได้ง่าย ส่วนกรณีเลือกแก๊สชนิดอาร์กอนผสมฮีเลียม จะให้ปริมาณความร้อนที่ป้อนสู่ชิ้นงานสูง ทำให้เกิดระยะซึมลึกมาก อัตราการสิ้นเปลืองลวดสูง แนวเชื่อมจึงมีลักษณะที่กว้างและนูนโค้ง ราคาแก๊สฮีเลียมค่อนข้างแพงจึงมีการใช้งานน้อย

นอกจากการพิจารณาเลือกชนิดของแก๊สสำหรับปกคลุมแล้วช่างเชื่อมจะต้องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส (Flow rate) ผ่านหัวฉีดแก๊ส (Gas nozzle) ให้แก๊สไหลกระจายออกมาปกคลุมบ่อหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ ซึ่งอัตราการไหลที่เหมาะสมต้องราบเรียบสม่ำเสมอ และมีแนวไหลเป็นเส้นตรง (Laminar flow) ถ้าอัตราการไหลสูงมากเกินไปจะเกิดปรากฏการแก๊สหมุนปั่นป่วน (Turbulent flow) ซึ่งขณะหมุนจะมีการดูดอากาศจากภายนอกเข้ามามาก ทำให้เกิดโพรงอากาศและข้อพกพร่องในแนวเชื่อม แต่ถ้ากำหนดอัตราการไหลของแก๊สน้อยเกินไปจะไม่สามารถปกคลุมแนวเชื่อมได้ทั่วทุกส่วน แก๊สจากภายนอกก็มีโอกาสเข้ามารวมตัวกับบ่อหลอมละลายเกิดเป็นรูพรุนต่อแนวเชื่อมได้ ดังนั้น ช่างเชื่อมต้องตระหนักและพิจารณาเลือกองค์ประกอบที่เกี่ยวกับแก๊สปกคลุมให้ถูกต้องและเหมาะสม โดยมีองค์ประกอบอื่น ๆ ร่วมด้วย ได้แก่ ชนิดของโลหะเชื่อม (Base metals) ความหนาของโลหะเชื่อม เป็นต้น ซึ่งปกติจะมีข้อมูลคำข้อแนะนำจากผู้ผลิตแก๊สที่สามารถสืบค้นได้ทั่วไป หรือ ตัวอย่างคำแนะนำการเลือกใช้ชนิดของแก๊ส อัตราการไหลของแก๊ส ที่สัมพันธ์กับชนิดของโลหะเชื่อมและความหนาโลหะ ดังแสดงในตารางที่ 5.6 และรูปร่างของแนวเชื่อมที่เลือกใช้แก๊สแตกต่างกันในรูปที่ 5.40

ปัจจัยสำคัญอีกประการที่ต้องพิจารณาให้สัมพันธ์กับอัตราการไหลของแก๊สปกคลุม นั่นก็คือ ระยะห่างของหัวฉีดแก๊ส (Tip−to−Work Distance) ซึ่งมีผลกระทบต่อการเกิดโพรงอากาศ และ ปริมาณแก๊สไนโตรเจนเข้าไปรวมตัวในแนวเชื่อม ยิ่งระยะห่างมากก็ยิ่งจะสร้างโอกาสให้ไนโตรเจนและแก๊สที่ไม่พึงประสงค์อย่างอื่นเข้ามารวมตัวกับน้ำโลหะเหลวของบ่อหลอมละลายได้มากยิ่งขึ้น ดังตัวอย่างการเลือกอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมกับระยะห่างของหัวฉีดแก๊สที่เหมาะสม ที่ขนาดลวดและกระแสเชื่อมที่ต่างกันในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.6 คำแนะนำการเลือกใช้ชนิดแก๊สปกคลุมและอัตราการไหลสำหรับกลุ่มชนิดโลหะเชื่อม

ที่มา : Andrew D. Althouse and et. al. , Modern Welding, 12th, 2020

ชนิดโลหะ	ความหนา		อัตราการไหลของแก๊ส		ชนิดของแก๊ส
	นิ้ว (Inches)	มิลลิเมตร (mm)	ลูกบาศก์ฟุต/ชม Ft^3/hr	ลิตร/นาที lmp	
อลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม	1/16	1.6	25	12	100% Ar
	1/8	3.2	35	16	
	1/4	6.3	35	16	
	3/8	9.6	40	19	
	3/4	19	90	42	75% Ar + 25% He
เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม	1/16	1.6	25	12	75% Ar + 25% CO_2 (สำหรับ Short circuiting transfer) 98% Ar + 2% O_2 (สำหรับ Spay transfer)
	1/8	3.2	25	12	
	1/4	6.3	30	14	
	3/8	9.6	35	16	
	3/4	19	50	24	
เหล็กกล้าไร้สนิมและโลหะนิเกิลผสม	1/16	1.6	30	14	90% He + 7.5% Ar + 2.5% CO_2 (สำหรับ Short circuiting transfer) 98% Ar + 2% O_2 (สำหรับ Spay transfer)
	1/8	3.2	30	14	
	1/4	6.3	35	16	
	3/8	9.6	35	16	
	1/2	12.7	40	19	
แมกนีเซียมและแมกนีเซียมผสม	1/16	1.6	50	24	100% Ar
	1/8	3.2	50	24	Ar หรือ 75% Ar + 25% He
	1/4	6.3	60	28	
	3/8	9.6	60	28	
ทองแดงและทองแดงผสม	1/8	3.2	25	12	Ar หรือ 75% Ar + 25% He
	1/4	6.3	35	16	
	3/8	9.6	40	19	

ตารางที่ 5.7 ตัวอย่างการเลือกอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมกับระยะห่างของหัวฉีดแก๊สที่เหมาะสม

ที่มา : มานะศิษฎ์ พิมพ์สาร คู่มือการเชื่อม มิก–แม็ก 2554

ขนาด Ø ลวดเชื่อม (mm)	กระแสเชื่อม (A)	ระยะห่างของหัวฉีดแก๊ส (mm)	อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม (L/min)
1.2	100 ถึง 200	10 ถึง 15	15 ถึง 25
	200 ถึง 300	15 ถึง 20	20 ถึง 30
1.6	200 ถึง 300	15 ถึง 20	20 ถึง 30
	300 ถึง 450	20 ถึง 25	20 ถึง 30



รูปที่ 5.40 รูปร่างกับระยะการซึมลึกของแนวเชื่อมที่เลือกใช้แก๊สปกคลุมต่างชนิดกัน

ที่มา : NAVEDTRA 14250A, 2011

5.3 องค์ประกอบการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW)

กรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กทังสเตนที่ใช้แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม หรือการเชื่อมทิก (TIG) นี้ เป็นการเชื่อมแบบหลอมละลายที่อาศัยการอาร์กของลวดทังสเตน (Non– consumable) โดยมีแก๊สเฉื่อยช่วยปกคลุมบ่อหลอมละลายของแนวเชื่อม ซึ่งการควบคุมกระบวนการเชื่อมและคุณภาพของแนวเชื่อมต้องอาศัยการเลือกองค์ประกอบในการเชื่อมให้ถูกต้องและเหมาะสม จากประสบการณ์จริงของช่างเชื่อม TIG และ CK Worldwide (2016) พอจะจัดกลุ่มขององค์ประกอบที่เป็นตัวแปรสำคัญ ๆ ออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1. กลุ่มตัวแปรที่เลือกขั้นต้น หรือเลือกกำหนดก่อน (Reselected or fixed variables)
2. กลุ่มตัวแปรที่สามารถปรับได้ขั้นแรก (Primary adjustable variables)
3. กลุ่มตัวแปรที่สามารถปรับได้ขั้นที่สอง (Secondary adjustable variables)

ในทางปฏิบัติช่างเชื่อมต้องเลือกตัวแปรขั้นต้นขึ้นมาก่อน หรือที่ต้องเลือกกำหนดขึ้นก่อนการเชื่อมให้เรียบร้อย จากนั้นก็มาปรับตัวแปรลำดับขั้นแรกที่กระทำเมื่อเปิดระบบของเครื่องเชื่อมแล้ว ส่วนตัว

แปรขั้นที่สองเป็นการปรับในระหว่างที่กำลังทำการเชื่อม โดยจะอธิบายเพิ่มในรายละเอียดของตัวแปรต่าง ๆ ของแต่ละกลุ่มดังต่อไปนี้

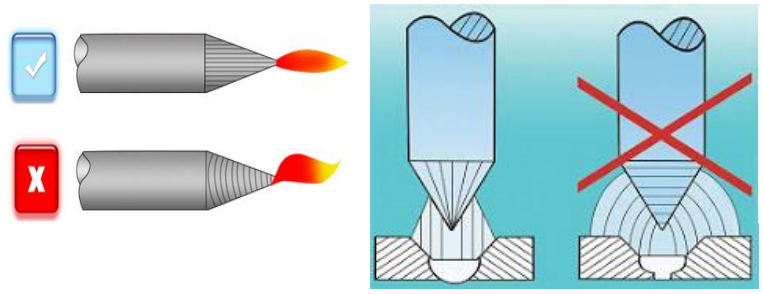
กลุ่มตัวแปรที่เลือกขั้นต้นหรือเลือกกำหนดก่อน (Reselected or fixed variables) ตัวแปรกลุ่มนี้จะถูกกำหนดขึ้นมาก่อนที่จะทำการเชื่อม ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ในขณะทำการเชื่อม โดยมีองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับชนิดของลวดทังสเตนและรูปทรง (Tungsten electrodes and shape) ชนิดและขนาดของลวดเชื่อมเติม (Filler metals and sizes) ชนิดของกระแสเชื่อม (Welding current) และชนิดของแก๊สปกคลุม (Shielding gases)

กลุ่มตัวแปรที่สามารถปรับได้ขั้นแรก (Primary adjustable variables) เป็นตัวแปรที่ใช้สำหรับควบคุมกระบวนการเชื่อมหลังจากได้กำหนดเลือกตัวแปรขั้นต้นไปเรียบร้อยแล้ว เพื่อให้ได้มาซึ่งขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อม ความกว้างและความสูงของแนวเชื่อม การซึมลึก ความสม่ำเสมอของการอาร์กและความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม ตัวแปรเหล่านี้ ได้แก่ ปริมาณช่วงกระแสไฟเชื่อม (Welding current range) แรงดันอาร์ก (Arc voltage) และ ความเร็วในการเชื่อม (Welding speed)

กลุ่มตัวแปรที่สามารถปรับได้ขั้นที่สอง (Secondary adjustable variables) ตัวแปรกลุ่มนี้การปรับจะเกิดขึ้นในขณะระหว่างทำการเชื่อม ได้แก่ มุมเอียงของลวดทังสเตนกับชิ้นงาน (Tungsten electrodes angle) มุมเอียงของลวดเชื่อมเติมและการป้อนลวด (Filler metal angle and filler metal feed)

5.3.1 ลวดทังสเตน และมุมหัวเชื่อมลวดทังสเตน (Tungsten electrodes and Torch angle)

ลวดทังสเตนในการเชื่อมทิก (TIG) ทำหน้าที่เป็นอิเลคโทรดที่สำคัญต่อการอาร์กเพื่อสร้างบ่อหลอมละลายบนชิ้นงานโหละเชื่อม โดยที่ตัวลวดทังสเตนเองไม่หลอมละลายเพราะ ทังสเตนมีจุดหลอมเหลวสูงถึง 3,410 °C ลวดทังสเตนที่นิยมใช้กันมีทั้งที่เป็นลวดทังสเตนบริสุทธิ์และทังสเตนผสม ซึ่งสามารถแบ่งเป็นชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.8 อ้างอิงจาก Moniz B.J. and Miller R.J. (2004) ซึ่งแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่เหมาะสมกับการเลือกใช้งานแตกต่างกัน นอกจากช่างเชื่อมจะต้องพิจารณาเลือกชนิดของลวดทังสเตนให้ถูกต้องแล้วนั้น ยังต้องทำการลับปลายของแท่งทังสเตนให้ถูกวิธี ซึ่งต้องลับในแบบทิศทางตามแนวยาวของแท่งทังสเตน (Lengthwise grinding) ห้ามลับแบบตามขวางของแท่งทังสเตน (Crosswise grinding) ดังแสดงการลับปลายทังสเตนที่ถูกต้องในรูปที่ 5.41



รูปที่ 5.41 วิธีการลับปลายลวดทังสเตน
ที่มา : Becken Technology, 2019

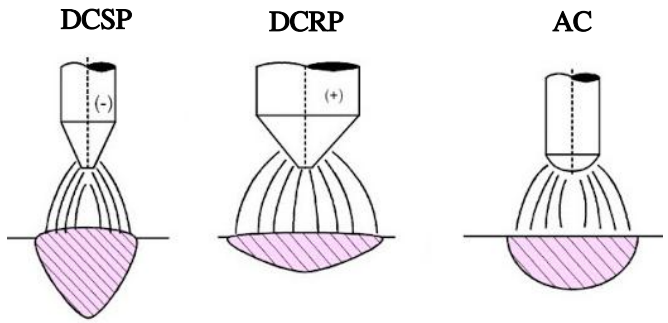
ตารางที่ 5.8 ชนิดของลวดทังสเตนสำหรับการเชื่อมทิก (TIG)

ที่มา : Moniz B.J. and Miller R.J. Welding skills, 2004

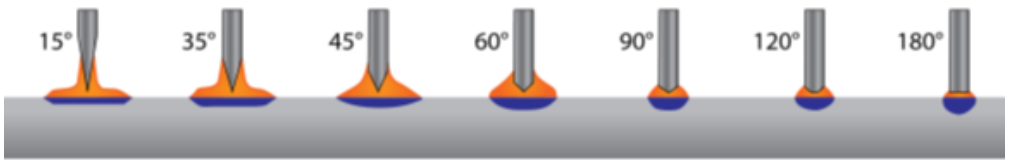
ชนิดของลวดทังสเตน	มาตรฐาน AWS–ASTM	สัญลักษณ์สี	การใช้งาน
ทังสเตนบริสุทธิ์	EWP	เขียว	ใช้กับการเชื่อมกระแสไฟ AC มีความสามารถในการนำกระแสต่ำกว่าชนิดอื่น ใช้เชื่อมอลูมิเนียม แมกนีเซียม ด้วยการแต่งปลายลวดมนเรียบ อาร์กสม่ำเสมอ
ทังสเทนผสมทอเรียมออกไซด์			ใช้กับการเชื่อมกระแสไฟ DC มีความสามารถนำกระแสสูง อาร์กได้ดีกว่า EWP มีอายุการใช้งานสูง ละลายฝังในบ่อหลอมได้ยาก เหมาะกับการเชื่อมเหล็กกล้าด้วยกระแส DCEN ไม่เหมาะกับกระแสไฟ AC เพราะแต่งปลายลวดได้ไม่โค้งมน อาร์กได้ดีกว่า EWP และ EWZr
0.9–1.2 Tho_2	EWTh1	เหลือง	
1.8–2.2 Tho_2	EWTh2	แดง	
2.8–3.2 Tho_2	EWTh3	ม่วงแดง	
3.8–4.2 Tho_2	EWTh4	ส้ม	
ทังสเตนผสมเซอร์โคเนียมออกไซด์			ใช้กับการเชื่อมกระแส AC อาร์กเรียบและปลายลวดโค้งมนดีความสามารถในการนำไปใช้งานมีสมบัติอยู่ระหว่าง EWP กับ EWTh ละลายฝังในบ่อหลอมได้ยากกว่า EWP
0.3–0.5 ZrO_2	EWZr–1	น้ำตาล	
0.7–0.9 ZrO_2	EWZr–2	ขาว	
ทังสเตนผสมแลนแทนออกไซด์			ใช้กับการเชื่อมและตัดด้วยพลาสม่า ไม่แผ่รังสี อายุการใช้งานยาวนานกว่า EWTh
0.9–1.2 LaO_2	EWLa–1	ดำ	
ทังสเตนผสมซีเรียมออกไซด์			ใช้กับการเชื่อมได้ทั้งกระแสไฟ AC และ DC ใช้งานได้ดีเทียบเคียงได้กับ EWTh ไม่แผ่รังสี อายุการใช้งานยาวนานกว่า EWP
1.0 CeO_2	EWCe–1	ชมพู	
2.0 CeO_2	EWCe–2	เทา	
ทังสเตนผสมโลหะอื่น	EWG	–	ถูกระบุโดยผู้ผลิต ที่เฉพาะเจาะจงสำหรับการใช้งานเฉพาะอย่าง
E = Electrode , W = Tungsten			

การลับปลายลวดทังสเตนตามแนวยาวของแท่งลวด มีข้อดีช่วยให้การส่งถ่ายกระแสไฟเชื่อมไปในทิศทางเดียวกันอย่างสม่ำเสมอ และราบเรียบทำให้สามารถควบคุมบ่อหลอมละลายได้ง่าย เปลวไฟอาร์กมีขนาดเล็ก ง่ายต่อการควบคุมขนาดและทิศทางการเชื่อม ส่วนถ้าลับปลายลวดตามแนวขวางของแท่งลวด การส่งถ่ายกระแสไฟเชื่อมจะไม่สม่ำเสมอ และมักเกิดการแตกหรือหลุดของเนื้อทังสเตนเข้าไปฝังในตัวอยู่ในบ่อหลอมละลายได้ง่าย

นอกจากการพิจารณาถึงทิศทางการลับปลายของแท่งลวดทังสเตนแล้ว ค่ามุมองศาของการลับก็มีความสัมพันธ์ต่อชนิดของกระแสไฟเชื่อม กล่าวคือ กระแสไฟเชื่อมชนิด DC มุมของปลายลวดจะต้องเป็นมุมแหลม ส่วนกระแสไฟเชื่อมชนิด AC จะเป็นมุมโค้งมนดังแสดงในรูปที่ 5.42 และมุมองศาของปลายลวดทังสเตนที่ยิ่งน้อยหรือเป็นปลายแหลมจะได้แนวเชื่อมที่มีระยะซึมลึกน้อยแต่แนวกว้าง ในทางกลับกันยิ่งมุมปลายลวดมากหรือเป็นปลายมนก็จะได้แนวเชื่อมที่มีระยะซึมลึกมากแต่แนวเชื่อมแคบ ดังแสดงการเปรียบเทียบแนวเชื่อมที่มุมปลายลวดทังสเตนแตกต่างกันในรูปที่ 5.43

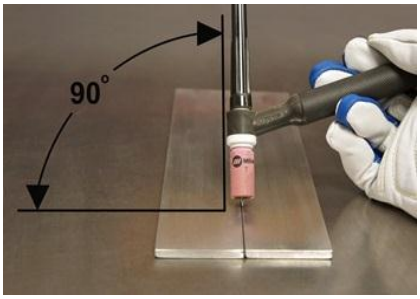


รูปที่ 5.42 ลักษณะรูปทรงของการลับปลายลวดทังสเตนกับชนิดของกระแสไฟเชื่อม
ที่มา : TIG Welding Project , 2016

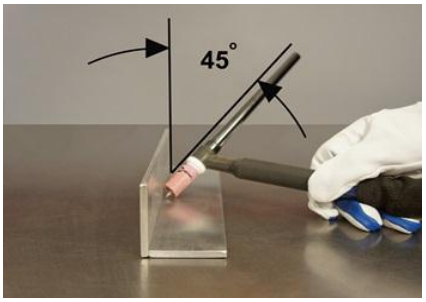


รูปที่ 5.43 เปรียบเทียบลักษณะของแนวเชื่อมที่สัมพันธ์กับมุมองศาปลายลวดทังสเตน
ที่มา : Andrew D. Althouse, et. al., Modern Welding, 12th, 2020

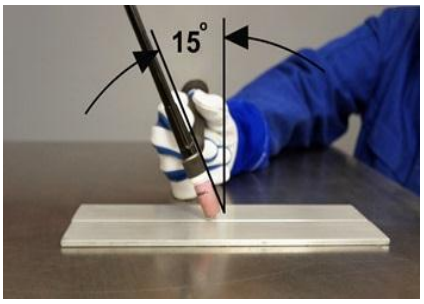
มุมหัวเชื่อมลวดทังสเตน ซึ่งจะหมายถึง มุมของหัวเชื่อมที่ประกอบกับลวดทังสเตน (Torch) โดยถูกควบคุมด้วยช่างเชื่อม มุมที่ต้องควบคุม มี 2 มุมคือ มุมระหว่างลวดทังสเตนกับระนาบของชิ้นงานเชื่อม ที่เรียกว่า มุมชิ้นงาน (Work angle) โดยมุมชิ้นงานของการเชื่อมแบบต่อชน (Butt weld) หัวเชื่อมจะทำมุม 90° แต่สำหรับมุมชิ้นงานของการเชื่อมต่อแบบเชื่อมมุม หัวเชื่อมจะทำมุม 45° ส่วน มุมระหว่างลวดทังสเตนกับรอยต่อตามแนวยาวของแนวเชื่อม เรียกว่า มุมการเคลื่อนที่หัวเชื่อม (Travel angle) ซึ่งจะทำมุม 15° เท่ากันทั้งเชื่อมแบบต่อชนและแบบเชื่อมมุม ดังแสดงตัวอย่างมุมเชื่อมแต่ละแบบในรูปที่ 5.44 ขณะทำการเชื่อมช่างเชื่อมแต่ละคนอาจมีทักษะการควบคุมหัวเชื่อมได้แม่นยำแตกต่างกัน โดยสามารถยอมให้ผิดพลาดได้เล็กน้อย เพราะมุมเอียงของหัวเชื่อมมีผลต่อขนาดและคุณสมบัติของแนวเชื่อมอย่างชัดเจน เช่น ถ้ามุมหัวเชื่อมเอียงทังสเตนให้อาร์กพุ่งเข้าหาชิ้นงานข้างใดข้างหนึ่ง จะเกิดการกัดขอบแนวเชื่อมด้านตรงข้ามและเกิดการหลอมไม่ละลายไม่สมบูรณ์ขึ้นในแนวเชื่อม เป็นต้น สำหรับมุมการเคลื่อนของหัวเชื่อมถ้ามุมองศามากแนวเชื่อมที่ได้มีระยะซึมลึกมากด้วยและมีรูปร่างแนวเชื่อมนูนสูง ในทางกลับกันถ้ามุมองศาลดจะเกิดผลตรงกันข้าม



(ก) มุมชิ้นงาน เชื่อมต่อชน (Butt weld)



(ข) มุมชิ้นงาน เชื่อมมุม (Fillet weld)



(ค) มุมการเคลื่อนหัวเชื่อม (Travel angle)

รูปที่ 5.44 มุมชิ้นงาน (Work angle) และมุมการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อม (Travel angle)

ที่มา : Miller Welding tips, 2018

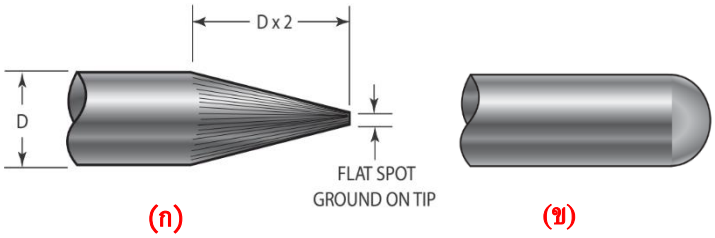
5.3.2 ชนิดของลวดป้อนเติมและโลหะเชื่อม (Filler metals and base metals)

การเชื่อมทิกสามารถเชื่อมได้ทั้งแบบเติมลวดเชื่อม (Filler metal process) และแบบไม่เติมลวดเชื่อม (Non–filler metal process) หรือที่เรียกกันว่า Autogenous welding process กรณีที่เชื่อมแบบเติมลวดต้องเลือกลวดเชื่อมให้เหมาะสมกับโลหะที่เชื่อม โดยปกติจะเลือกลวดเชื่อมที่เป็นชนิดและเกรดเดียวกันกับโลหะที่เชื่อม ซึ่งบางครั้งนิยมเรียกลวดเชื่อมทิกว่า “ลวดเชื่อมเปลือย” หมายถึงเป็นแท่งลวดโลหะที่ไม่มีสารพอกหุ้มนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 5.45 ส่วนขนาดของลวดเชื่อมมีหลายขนาดสามารถเลือกใช้ตามความเหมาะสม สำหรับชนิดของโลหะเชื่อมต้องเลือกใช้ให้สัมพันธ์กันกับรูปทรงของปลายลวดทังสเตน โดยกรณีเชื่อมโลหะกลุ่มที่เป็นชนิดเหล็กกล้าและเหล็กกล้าไร้สนิมจะเลือกใช้ปลายลวดทังสเตนแบบแหลม ส่วนกรณีเชื่อมโลหะอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสมจะต้องเลือกใช้ปลายลวดทังสเตนแบบโค้งมน ดังแสดงในรูปที่ 5.46



รูปที่ 5.45 ชนิดของลวดเชื่อมป้อนเติมของการเชื่อมทิก

ที่มา : Arc–Zone. Com®, 2014



รูปที่ 5.46 ปลายลวดทังสเตน (ก) สำหรับเชื่อมเหล็กกล้าและเหล็กกล้าไร้สนิม (ข) สำหรับเชื่อมอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม *ที่มา : Cengage learning, 2012*

การป้อนเติมลวดลงในบ่อหลอมละลายของกระบวนการเชื่อมทิก จะเกิดขึ้นหลังจากที่ปลายลวดอาร์กทังสเตนสร้างบ่อหลอมละลายบนชิ้นงานที่มีขนาดโตเพียงพอและสามารถที่จะซึมลึกได้ตามต้องการ ซึ่งจากประสบการณ์ของช่างเชื่อมพบว่าเทคนิคการป้อนเติมลวดมี 2 วิธี คือ

1. เทคนิคการป้อนเติมลวดแบบหยด (Drop by Drop) เป็นเทคนิคการป้อนลวดแบบดึงเข้า–ออกจากบ่อหลอมละลาย ดังแสดงในรูปที่ 5.47 (ก) โดยควบคุมให้ปลายลวดหลอมเหลวแล้วเติมลงในบ่อหลอมละลาย แล้วดึงปลายลวดออกจากบ่อหลอม เพื่อให้อาร์กหลอมละลายลวดที่เติมเข้าไปหลอมละลายเข้ากันได้ดีกับเนื้อโลหะในบ่อหลอมละลาย จากนั้นป้อนเติมลวดรอบใหม่ โดยทำซ้ำ ๆ ในลักษณะนี้ไปจนกว่าจะได้แนวเชื่อมที่ป้อนเติมลวดอย่างสมบูรณ์ แต่ต้องระวังอย่าดึงปลายลวดเติมออกจากบ่อหลอมละลายจนเลยอาณาเขตของแก๊สปกคลุม เพราะทำให้ปลายลวดเติมสัมผัสกับบรรยากาศและเกิดออกไซด์ขึ้นได้

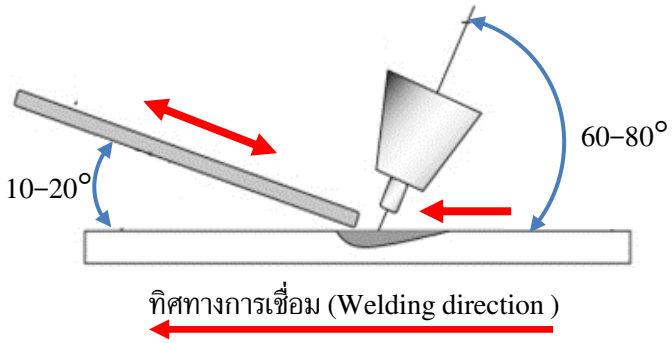
2. เทคนิคการป้อนเติมแบบต่อเนื่อง (Continuous) เป็นเทคนิคการป้อนเติมลวดแบบที่ป้อนลวดเติมเข้าไปที่ด้านหน้าของบ่อหลอมละลายชิ้นงานอย่างต่อเนื่อง และทำการส่ายหัวเชื่อมในลักษณะเดินหน้า–ถอยหลัง เหตุผลเพื่อต้องการให้เนื้อโลหะป้อนเติมกับเนื้อโลหะบ่อหลอม ผสมสผานเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีทุกบริเวณของแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 5.47 (ข)

5.3.3 ระยะยื่นของปลายแท่งลวดทังสเตน (Tungsten electrode extension)

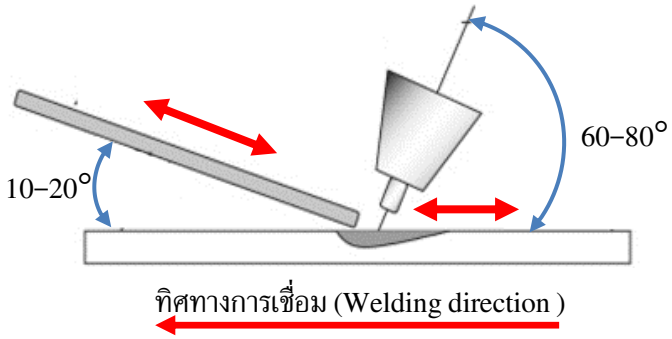
การเชื่อมทิกอาศัยการอาร์กของปลายแท่งลวดทังสเตนกับชิ้นงาน โดยมีการกำหนดระยะของปลายลวดทังสเตนที่ยื่นเลยออกจากหัวฉีดแก๊ส (Nozzle) ให้เหมาะสม ซึ่งโดยทั่วไปมีขนาดเท่ากับ 1–2 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทังสเตน ดังแสดงในรูปที่ 5.48 ถ้าระยะยื่นของลวดทังสเตนออกมามากเกินไป จะทำให้ปลายของลวดทังสเตนมีโอกาสสัมผัสกับบ่อหลอมละลายหรือลวดเติมได้ง่าย ซ้ำยังต้องใช้แก๊สเพื่อปกคลุมในปริมาณที่มากกว่าปกติ ในทางกลับกันถ้าระยะยื่นของลวดทังสเตนยื่นออกมาน้อย โอกาสที่ปลายลวดทังสเตนจะสัมผัสกับบ่อหลอมละลายและลวดเติมก็ลดน้อยลง ปลายลวดไม่ค่อยสกปรก แต่มีผลกระทบกับหัวฉีดแก๊ส เพราะอยู่ชิดกับบ่อหลอมลละลาย ซึ่งโอกาสที่เม็ดน้ำโลหะกระเด็นมาติดที่ปลายหัวฉีดแก๊สก็มากขึ้น อาจสร้างความเสียหายต่อรูฉีดพ่นแก๊ส

ได้ นอกจากนี้ยังมีข้อด้อยที่ขณะทำการเชื่อมช่างเชื่อมมองเห็นบ่อหลอมละลายได้ยากมาก เพราะถูกปิดบังด้วยเงาของหัวเชื่อม จึงต้องอาศัยทักษะและความชำนาญในการควบคุมหัวเชื่อมที่ค่อนข้างสูง

จากประสบการณ์ที่ช่างเชื่อมพบเจอ พบว่าระยะยื่นของลวดทังสเตนที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับลักษณะของรอยเชื่อมต่อ ตัวอย่างเช่น ถ้าเป็นการเชื่อมต่อแบบเชื่อมมุม (Fillet weld) ดังแสดงในรูปที่ 5.49 (ก) ระยะยื่นของปลายลวดทังสเตนต้องมาก โดยปลายลวดต้องเกือบจรดส่วนลึกสุดของรอยต่อและสามารถเห็นบ่อหลอมละลายได้ชัดเจน ส่วนรอยเชื่อมต่อที่ใช้ระยะยื่นของลวดทังสเตนน้อยมากจะเป็นการเชื่อมแบบต่อขอบ (Edge flange) รูปที่ 5.49 (ข) นอกจากนี้ระยะยื่นของลวดทังสเตนยังขึ้นอยู่กับชนิดของกระแสเชื่อม AC หรือ DC และขนาด Ø ของลวดทังสเตน

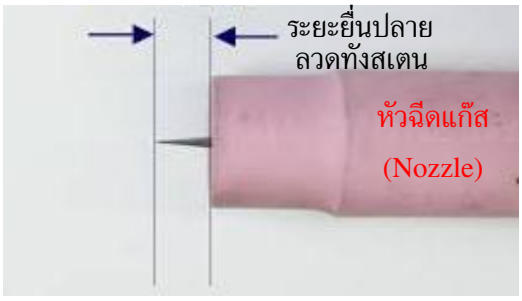


(ก) เทคนิคการป้อนเติมลวดแบบหยด (Drop by Drop)



(ข) เทคนิคการป้อนเติมแบบต่อเนื่อง (Continuous)

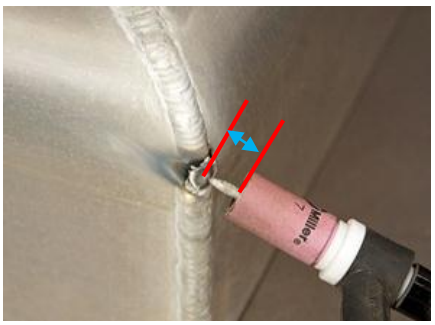
รูปที่ 5.47 เทคนิคการป้อนลวดเติม (Filler metal) แบบหยด (Drop by Drop) กับ แบบต่อเนื่อง (Continuous) ของกระบวนการเชื่อมทิก
ที่มา : Gene Mathers. The Welding of Aluminium and its Alloys, 2002



รูปที่ 5.48 ระยะยื่นของปลายแท่งลวดทังสเตน (Tungsten electrode extension) ของกระบวนการเชื่อมทิก
ที่มา : Gene Mathers. The Welding of Aluminium and its Alloys, 2002



(ก) ระยะยื่นลวดทังสเตนแบบเชื่อมมุม



(ข) ระยะยื่นลวดทังสเตนแบบเชื่อมขอบ

รูปที่ 5.49 เปรียบเทียบระยะยื่นของปลายลวดทังสเตนที่สัมพันธ์กับลักษณะของแนวเชื่อมต่อ

ที่มา : Andrew D. Althouse, et al., Modern Welding, 2020

5.3.4 กระแสไฟเชื่อม (Welding current)

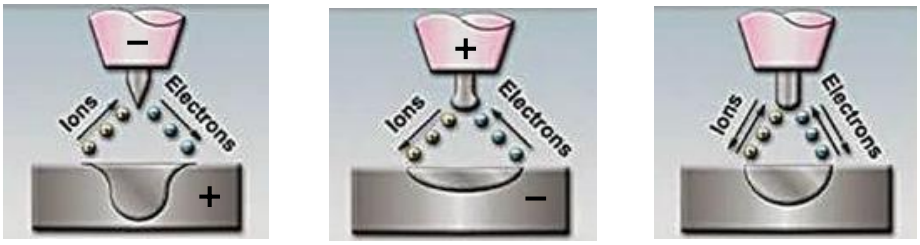
การเชื่อมทิก ช่างเชื่อมสามารถเลือกชนิดกระแสไฟเชื่อมตามลักษณะการเชื่อมต่อและชนิดของโลหะเชื่อม โดยชนิดของกระแสที่นิยมเลือกใช้กันมี 3 ชนิด อ้างอิงตาม Priyanka Chougale et al. (2018) ดังนี้

1. ชนิดกระแสตรงขั้วลบ (Direct Current Electrode Negative : DCEN) หัวเชื่อมหรือลวดทังสเตนเป็นขั้วลบ (−) และชิ้นงานเป็นขั้วบวก (+) เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงานมากกว่าที่ลวดทังสเตน แนวเชื่อมที่ได้จึงมีระยะซึมลึกมากและรูปร่างแนวเชื่อมที่เล็กแคบ เหมาะกับการเชื่อมงานที่เป็นกลุ่มโลหะเหล็ก ไม่เหมาะกับโลหะชนิดที่หลอมละลายง่ายจำพวกโลหะอลูมิเนียมหรือแมกนีเซียม ดังแสดงในรูปที่ 5.50 (ก)

2. ชนิดกระแสตรงขั้วบวก (Direct Current Electrode Positive : DCEP) กระแสไฟเชื่อมชนิดนี้ หัวเชื่อมหรือลวดทังสเตนเป็นขั้วลบ (+) และชิ้นงานเป็นขั้วบวก (−) เกิดความร้อนขึ้นที่ลวดทังสเตนมากกว่าที่ชิ้นงาน ดังนั้นจึงเหมาะกับการเชื่อมงานที่ต้องการแนวเชื่อมกว้างแต่ระยะซึมลึกน้อย นิยมใช้เชื่อมโลหะกลุ่มอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม โลหะแมกนีเซียมและแมกนีเซียมผสม เพราะกระแสไฟเชื่อมชนิดนี้ขณะอาร์กจะเกิดปฏิกิริยาทำความสะอาดผิวออกไซด์บนผิวชิ้นงานเชื่อมได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 5.50 (ข)

3. ชนิดกระแสสลับความถี่สูง (Alternative Current & High Frequency : ACHF) เป็นกระแสไฟเชื่อมชนิดกระแสสลับที่ครึ่งรอบแรก (First half cycle) ทังสเตนเป็นขั้วบวก (+) ออกไซด์ที่ผิวชิ้นงานตรงที่อาร์กจะถูกขจัดออกไป (Clean) ส่วนครึ่งรอบหลัง (Second half cycle) ทังสเตนเป็นขั้วลบ (−) ชิ้นงานจะเกิดความร้อน (Heat) โดยมีระบบความถี่สูงมาช่วยกระตุ้นการอาร์ก เหมาะกับการเชื่อมโลหะกลุ่มอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม โลหะแมกนีเซียมและแมกนีเซียมผสม ซึ่งต้องขจัดออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวชิ้นงานออกก่อนที่ชิ้นงานจะหลอมละลายดังแสดงในรูปที่ 5.50 (ค)

นอกจากเลือกชนิดของกระแสไฟเชื่อมที่ถูกต้องและเหมาะสมแล้วนั้น การกำหนดขนาดของกระแสเชื่อมก็มีผลต่อแนวเชื่อมอย่างมาก โดยควบคุมได้จากชุดควบคุมหน้าเครื่องเชื่อมหรือปรับที่ปุ่มมือกดหรือเท้าเหยียบ ส่วนการเชื่อมแบบอัตโนมัติจะถูกควบคุมด้วยโปรแกรมการเชื่อม ขนาดของกระแสเชื่อมกำหนดได้จากขนาดและชนิดของลวดทังสเตน ชนิดกระแสเชื่อม ตำแหน่งท่าเชื่อม การออกแบบรอยต่อ ความหนาของชิ้นงานและช่วงกระแสของเครื่องเชื่อม ถ้าขนาดกระแสสูงขึ้นระยะการซึมลึกและขนาดของแนวเชื่อมจะเพิ่มขึ้นตาม แต่ถ้าสูงมากเกินไปก็จะเกิดรอยกัดแหว่ง (Undercut) และซึมลึกมากเกินไปผิวแนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ ส่วนกรณีขนาดกระแสเชื่อมต่ำการซึมลึกและขนาดของแนวเชื่อมจะตรงกันข้าม ในตารางที่ 5.9 ตัวอย่างความสัมพันธ์ของขนาดและชนิดกระแสไฟเชื่อมที่ลวดทังสเตนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน



(ก) DCEN, DC− **(ข)** DCEN, DC+ **(ค)** ACHF

รูปที่ 5.50 ชนิดของกระแสไฟเชื่อมของกระบวนการเชื่อมทิก

ที่มา : Miller Electric Guideline to GTAW, 2020

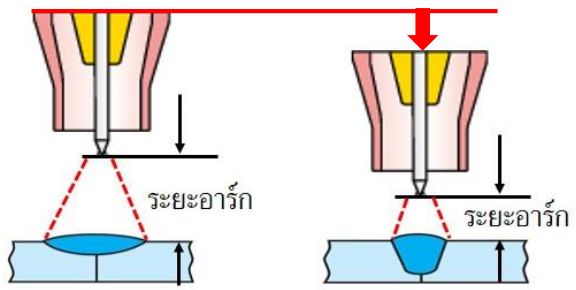
ตารางที่ 5.9 ชนิดและขนาดของกระแสไฟเชื่อมที่ขนาด Ø ลวดทังสเตนแตกต่างกัน

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metal Fabrication, 2012

ขนาด Ø ของลวดทังสเตน		ชนิดกระแสไฟเชื่อม		
นิ้ว (in)	มิลลิเมตร (mm)	DCEN	DCEP	AC
0.04	1	15–60	ไม่แนะนำ	10–50
1/16	2	70–100	10–20	50–90
3/32	2.4	90–200	15–30	80–130
1/8	3	150–350	25–40	100–200
5/32	4	300–450	40–55	160–300

5.3.5 แรงดันอาร์ก (Arc voltage)

Wichan Chuaiphan et al. (2020) ได้ข้อมูลจากผลการวิจัยในการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกด้วยขบวนการเชื่อมทิก พบว่า แรงดันอาร์กในการเชื่อมขึ้นอยู่กับปัจจัยของชนิดแก๊สปกคลุม และช่องว่างระยะห่างของปลายลวดทังสเตนกับผิวชิ้นงานโลหะเชื่อม โดยเมื่อระยะอาร์กเปลี่ยนจะแสดงผลออกมาที่ค่าของโวลต์ (Voltage) ที่หน้าชุดควบคุมที่เครื่องเชื่อม ซึ่งค่าโวลต์จะเปลี่ยนแปลงขึ้น–ลง ตามระยะห่างของปลายลวดทังสเตนกับชิ้นงานที่ถูกควบคุมโดยช่างเชื่อม ถ้าเป็นการเชื่อมด้วยระบบอัตโนมัติจะถูกควบคุมด้วยโปรแกรมที่ตั้งกำหนดไว้ แรงดันอาร์กมีความสัมพันธ์กับชนิดของแก๊สปกคลุม เช่น แก๊สปกคลุมชนิดแก๊สฮีเลียม (He) จำเป็นต้องใช้แรงดันอาร์กที่สูงและให้ระยะการซึมลึกที่มากกว่าแก๊สปกคุลมชนิดอาร์กอน (Ar) ส่วนระยะของการอาร์ก (Arc length) มีผลกระทบโดยต่อระดับแรงดันอาร์ก กล่าวคือ ระยะอาร์กจะแปรผันตรงกับแรงดันอาร์ก โดยถ้าสร้างระยะอาร์กสูงมากเกินไป (Too long arc length) จะเกิดผลเสียกับแนวเชื่อมที่ผิวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ ระยะการซึมลึกน้อย แก๊สปกคลุมจะกระจายออกไปเป็นวงกว้างไม่เพียงพอที่จะปกคลุม ซึ่งสังเกตได้ชัดเจนจากสีของผิวแนวเชื่อม (โดยเฉพาะในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม) ในทางตรงกันข้าม ถ้าระยะอาร์กสั้นเกินไป (Too short arc length) มักพบปัญหาปลายของแท่งลวดทังสเตนจุ่มลงไปในบ่อหลอมละลายทำให้ปลายลวดสกปรก ซึ่งลดประสิทธิภาพการอาร์กของลวดลง ซ้ำร้ายยังทำให้หัวเชื่อมได้รับความร้อนสูงมากเกินไป และเกิดความเสียด้านอายุการใช้งาน เพราะขณะเชื่อมจะใกล้ชิดติดกับบ่อหลอมละลายมากจนเกินไป โดยในรูปที่ 5.51 (ก) และ (ข) แสดงเปรียบเทียบให้เห็นถึงระยะอาร์กแบบยาวกับระยะอาร์กแบบสั้นตามลำดับ จากประสบการณ์ในการเชื่อมด้วยมือของช่างเชื่อม พบว่ากรณีทำการเชื่อมแบบเติมลวด (Filler metal) ระยะอาร์กที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 1.5–6.0 มิลลิเมตร แต่ถ้าเป็นกรณีที่เชื่อมแบบไม่เติมลวด (Autogenous welding) ระยะอาร์กจะสั้นลงเพราะไม่ต้องการบ่อหลอมละลายที่กว้างมาก



(ก) ระยะอาร์กแบบยาว (ข) ระยะอาร์กแบบสั้น

รูปที่ 5.51 เปรียบเทียบให้เห็นถึงระยะอาร์กแบบยาวกับระยะอาร์กแบบสั้น

ที่มา : ASM Handbook Vol. 06A–Gas Tungsten Arc Welding, 2017

5.3.6 ชนิดแก๊สปกคลุม และอัตราการไหล (Type and flow rate of shielding gases)

Miller guidelines for GTAW (2018) แนะนำเกี่ยวกับแก๊สปกคลุมแนวเชื่อมสำหรับการเชื่อมทิกว่า มีทั้งเป็นชนิดบริสุทธิ์ (Pure gas 99.99%) และชนิดผสม (Mixtures gas) โดยแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่โดดเด่นแตกต่างกันไป สามารถเลือกใช้ตามความเหมาะสมของลักษณะงานที่จะเชื่อม โดยจะต้องพิจารณาร่วมกับปัจจัยการเชื่อมอื่น ๆ ด้วย ซึ่งแก๊สปกคลุมที่นิยมเลือกใช้งานกัน ดังนี้

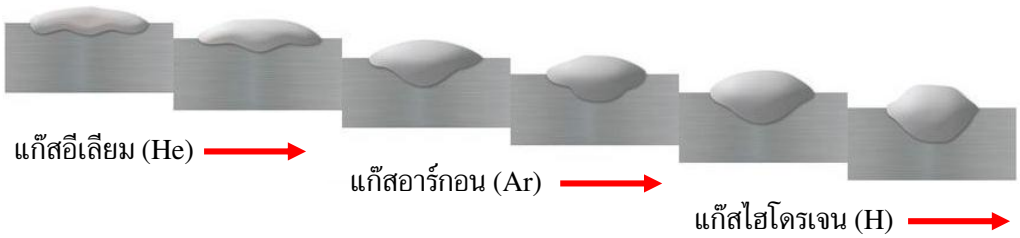
1. แก๊สอาร์กอน (Argon gas) เหมาะกับการเชื่อมโลหะทุกชนิด ที่ความบริสุทธิ์ 99.95% จะอาร์กเรียบสม่ำเสมอ ซึมลึกน้อย ขจัดออกไซด์บนผิวโลหะได้ดี อัตราการไหลของแก๊สไม่ต้องมาก และช่วยในการเริ่มต้นอาร์กได้ดี ที่สำคัญคือราคาถูกหาซื้อง่าย

2. แก๊สฮีเลียม (Helium gas) มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เปลวอาร์กกว้างและให้ค่าความร้อนสูง เชื่อมได้รวดเร็ว เหมาะกับการเชื่อมแบบอัตโนมัติใช้เชื่อมได้ทุกชนิดโลหะ มีความบริสุทธิ์ 99.99% ราคาแพงกว่าอาร์กอน

3. แก๊สอาร์กอนผสมฮีเลียม (Ar + He 15−75%) แก๊สผสมนี้เหมาะกับการเชื่อมแบบอัตโนมัติและกับโลหะงานทุกชนิด โดยฮีเลียมช่วยรูพรุนและแตกขณะร้อน เดินหัวเชื่อมได้รวดเร็วลดการบิดงอ แต่อัตราการไหลสูงทำให้สิ้นเปลืองแก๊สมาก

4. แก๊สอาร์กอนผสมไฮโดรเจน (Ar + H 7%) แก๊สผสมนี้เหมาะกับการเชื่อมโลหะกลุ่มเหล็กกล้าผสม เช่น กลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิม กลุ่มเหล็กกล้าผสมนิกเกิลสูงและโมลิบดินัมสูง ซึ่งแก๊สชนิดนี้ช่วยลดรูพรุนและสามารถเพิ่มความเร็วเชื่อมได้สูง

จากคุณสมบัติของแก๊สปกคลุมแต่ละชนิดที่กล่าวมาเมื่อนำมาทำการเขียนภาพลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อมจะเห็นภาพได้ชัดเจนถึงความกว้าง ระยะซึมลึกและความนูนของแนวเชื่อม ดังตัวอย่างภาพแสดงเปรียบเทียบแนวเชื่อมของการใช้แก๊สปกคลุมในการเชื่อมแต่ละชนิดในรูปที่ 5.52

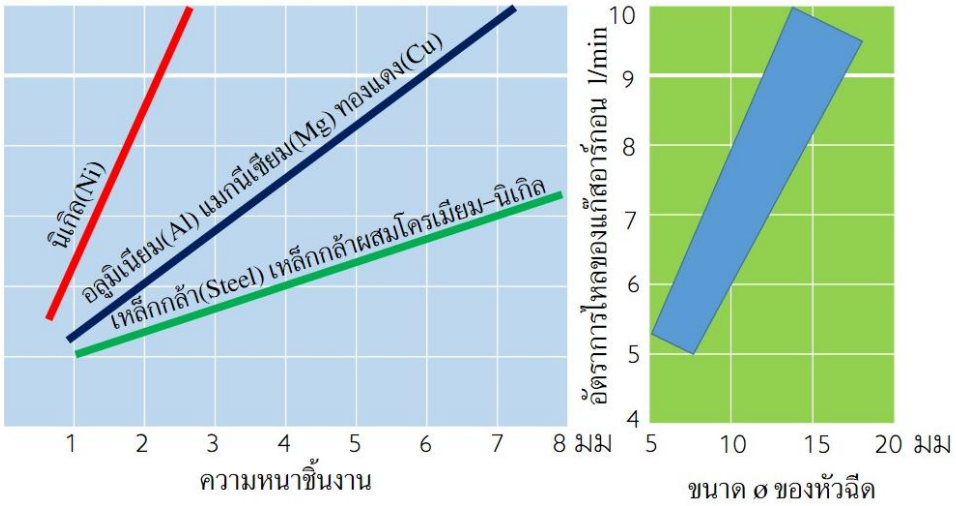


รูปที่ 5.52 ภาพเปรียบเทียบลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อมที่ใช้แก๊สปกคลุมต่างชนิดกัน

ที่มา : Fabricating and Welding, 2019

สำหรับอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมต้องปล่อยให้ไหลออกมามากเพียงพอในการที่จะกระจายคลอบคลุมบ่อหลอมละลาย โดยขึ้นอยู่กับขนาด Ø ของหัวฉีดแก๊ส (Nozzle) ความเร็วในการเชื่อม และชนิดกับความหนาของโลหะเชื่อม ซึ่งชิ้นงานยิ่งหนามากยิ่งต้องเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สที่มากขึ้น

เช่นเดียวกับขนาดของหัวฉีดแก๊สที่โตขึ้นต้องปรับอัตราการไหลของแก๊สที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงตัวอย่างการปรับอัตราการไหลของแก๊สที่สัมพันธ์กันกับชนิดของโลหะเชื่อมและขนาดของหัวฉีดแก๊สในรูปที่ 5.53



รูปที่ 5.53 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนกับชนิดโลหะและขนาดหัวฉีดแก๊ส

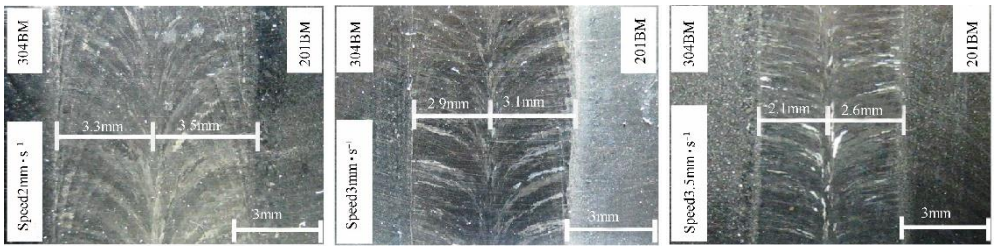
ที่มา : Fabricating and Welding, 2019 (เขียนภาพใหม่)

5.3.7 ความเร็วเชื่อม (Welding speed)

อัตราความเร็วของการเชื่อมที่สูงเป็นความต้องการของช่างเชื่อมเพราะเป็นการเพิ่มขีดความสามารถของการผลิต แต่ไม่ได้หมายความว่าสามารถเพิ่มความเร็วได้ตามต้องการเพราะถ้าเลือกใช้ความเร็วในการเชื่อมที่สูงเกินไปก็เกิดปัญหาขึ้นกับแนวเชื่อมได้ ซึ่งต้องพิจารณาร่วมกับปัจจัยการเชื่อมตัวอื่น ๆ ได้แก่ กระแสเชื่อมและแรงดันอาร์ก โดยความสัมพันธ์เหล่านี้มีผลกระทบต่อค่าพลังงานความร้อนที่จะป้อนเข้าสู่ชิ้นงานเชื่อม (Heat input) ดังนั้น จึงเป็นที่ทราบกันดีของช่างเชื่อมว่า ถ้าความเร็วเชื่อมสูงจะได้แนวเชื่อมที่มีขนาดเล็กและการซึมลึกน้อย และจะเกิดผลตรงกันข้ามเมื่อความเร็วเชื่อมลดต่ำลง ดังผลการวิจัยการเชื่อมทิกในเหล็กกล้าไร้สนิมที่ความเร็วเชื่อมแตกต่างกัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าที่ความเร็วเชื่อมต่ำขนาดแนวเชื่อมจะโตกว่าความเร็วเชื่อมสูง สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Wichan Chuaiphan et al. (2019) ดังแสดงผลอยู่ในรูปที่ 5.54 และนอกจากนี้ ปัจจัยของความหนาชิ้นงานเชื่อมก็มีผลต่อความเร็วในการเชื่อม โดยชิ้นงานที่มีความหนาเพิ่มขึ้นจะต้องปรับความเร็วในการเชื่อมที่ลดต่ำลง ดังแสดงเปรียบเทียบความหนาที่เพิ่มขึ้นกับความเร็วเชื่อมที่ลดลงของกระบวนการเชื่อมทิกและการเชื่อมพลาสมาในรูปที่ 5.55

ซึ่งโดยหลักของการเชื่อมทิก (GTAW) กับการเชื่อมพลาสมา (PAW) มีกลไกของขบวนการเชื่อมที่คล้ายกันมาก เพราะการเชื่อมพลาสมาเกิดจากการพัฒนาขบวนการเชื่อมทิก โดยอาศัยพลังงานความร้อนจากการอาร์กของแก๊สกับแท่งอิเลคโทรดเพื่อสร้างแก๊สพลาสมา ที่ให้พลังความร้อนที่สูงและรวดเร็วกว่าการเชื่อมทิก แต่มีต้นทุนการเชื่อมที่สูงกว่าอาจไม่เป็นที่นิยมเท่ากับขบวนการเชื่อมทิก แต่ใน

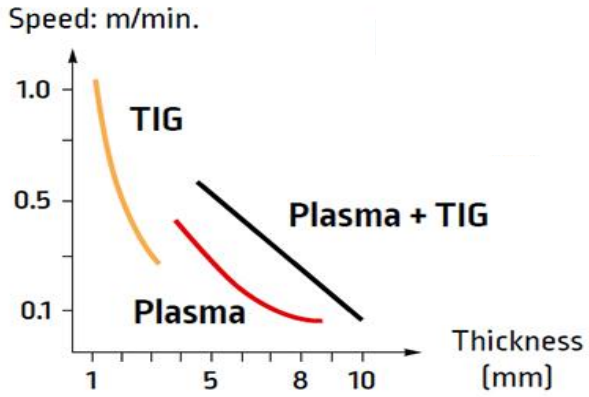
ปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้ขบวนการเชื่อมทั้งคู่เชื่อมร่วมกันที่เรียกกันว่า “ Hybrid welding” ซึ่งจะเพิ่มความเร็วในเชื่อมได้เร็วขึ้นอย่างมาก ดังแสดงการร่วมกันของการเชื่อมในรูปที่ 5.56



(ก) ความเร็วเชื่อมต่ำ (2 mm/sec) **(ข)** ความเร็วเชื่อมปานกลาง (2.5 mm/sec) **(ค)** ความเร็วเชื่อมสูง (3 mm/sec)

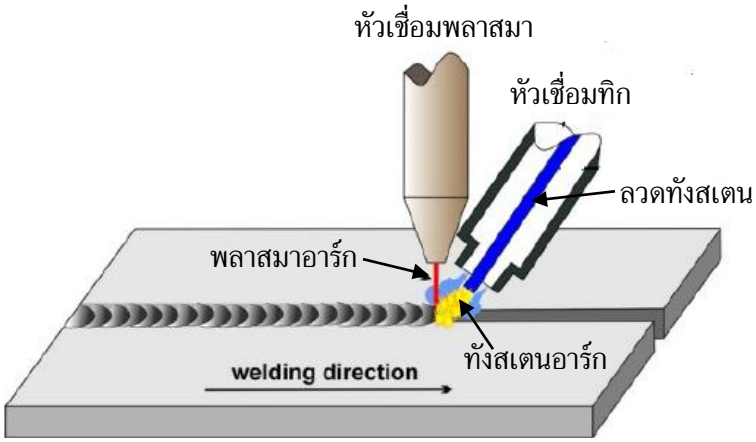
รูปที่ 5.54 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชื่อมกับขนาดของแนวเชื่อม

ที่มา : Wichan Chuaiphan, Journal of Defence Technology, Vol.15 Issue 2, 170–178, 2019



รูปที่ 5.55 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชื่อมกับความหนาของชิ้นงานของการเชื่อมทิกและการเชื่อมพลาสมา

ที่มา : Lincoln Electric , TIG & Plasma Installation, 2018



รูปที่ 5.56 การเชื่อมแบบ Hybrid ของ TIG กับ PAW

ที่มา : Lincoln Electric , TIG & Plasma Installation, 2018

จากที่กล่าวมาตั้งแต่ต้นของบทเรียนนี้ ได้อธิบายและยกตัวอย่างงานวิจัยประกอบการอธิบายถึงองค์ประกอบของขบวนการเชื่อม ไม่ว่าเป็นองค์ประกอบของการเชื่อม MMAW การเชื่อม GMAW และ GTAW จะเห็นได้ว่าแต่ละขบวนการเชื่อมมีองค์ประกอบหลักที่คล้ายกัน แต่ก็จะมีส่วนประกอบย่อยที่เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละขบวนการเชื่อมที่แตกต่างแยกย่อยกันออกไป ซึ่งโดยภาพรวมขององค์ประกอบการเชื่อมที่มีพื้นฐานแตกต่างกัน แต่ก็จะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันละกัน และยังมีอิทธิพลต่อกันของแต่ละองค์ประกอบในหลากหลายแง่มุมในมิติต่าง ๆ มากมาย ด้วยข้อมูลที่มากนี้ผู้เขียนไม่สามารถนำเสนอได้ทุกขบวนการเชื่อม ซึ่งในบทเรียนนี้ผู้เขียนได้พยายามนำเสนอถึงขบวนการเชื่อมสำคัญ ๆ ที่เป็นที่นิยมและมีการเลือกใช้งานกันมากทั้งในสถานประกอบการขนาดเล็ก โรงงานประกอบชิ้นส่วนขนาดใหญ่และบุคคลที่เป็นช่างเชื่อมทั่ว ๆ ไป ซึ่งยังมีอีกหลายขบวนการเชื่อมที่ยังไม่ได้กล่าวถึงในบทเรียนนี้ โดยผู้เขียนได้นำไปเสนอสอดแทรกและกล่าวถึงไว้แล้วในบทเรียนที่ 3 และบทเรียนที่ 4 ของหัวข้อที่ว่าด้วยกรรมวิธีการเชื่อมกลุ่มเติมลวดเชื่อม (Welding processes– Consumable) และกรรมวิธีการเชื่อมกลุ่มที่ไม่มีการเติมลวดเชื่อม (Welding processes– Non Consumable) ซึ่งได้นำเสนอไว้ทุกขบวนการเชื่อม

ดัชนีคำศัพท์บทที่ 5

Arc length – ระยะอาร์ก
Autogenous welding – การเชื่อมแบบไม่เติมลวด
Backhand welding – การเชื่อมถอยหลัง
Backhand welding – การเชื่อมถอยหลัง
Bead height – ความนูนของแนวเชื่อม
Burn off characteristic – คุณลักษณะการหลอมละลาย
Burn off rate – อัตราการสิ้นเปลืองลวดสูง
Consumable – ลวดเชื่อมชนิดสิ้นเปลือง
Contact tube – ท่อนำกระแสเชื่อม
Continuous filler – การป้อนลวดแบบต่อเนื่อง
Current density – ความหนาแน่นของกระแสเชื่อม
Direction travel – ทิศทางการเชื่อม
Drop by drop filler – การป้อนลวดแบบหยด
Electrode angle – มุมลวดเชื่อม
Electrode manipulation – การควบคุมการเคลื่อนที่ลวดเชื่อม
Electrode weaving – การส่ายลวดเชื่อม
Elliptical shape –บ่อหลอมที่ความเร็วเชื่อมต่ำ (รูปไข่ไก่)
First half cycle – กระแสสลับครึ่งรอบแรก
Forehand welding – การเชื่อมเดินหน้า
Gas Metal Arc Welding – การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม
Gas nozzle – หัวฉีดแก๊ส
Gas Tungsten Arc Welding – การเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม
Laminar flow – แก๊สไหลแบบราบเรียบ
Leading angle – มุมลวดเชื่อมเอียงหลัง
Long arc length – ระยะอาร์กห่าง
Longitudinal nozzle angles – มุมการเชื่อมตามแนวยาว
Metal transfer – การถ่ายโอนน้ำโลหะ
Mixture gases – แก๊สปกคลุมแบบผสม
Narrow bead –แนวเชื่อมที่แคบ
Non–Consumable – ลวดทังสเตนอาร์ก
Penetration – ระยะซึมลึกแนวเชื่อม
Primary adjustable variable – ตัวแปรที่สามารถปรับได้ขั้นลำดับแรก
Pulling angle – มุมการเชื่อมแบบดึง/ลาก
Pushing angle – มุมการเชื่อมแบบดัน/ผลัก
Reselected variables – ตัวแปรเลือกขั้นต้น/เลือกก่อน
Right angle – มุมลวดเชื่อมตรง/ตั้งฉาก
Second half cycle – กระแสสลับครึ่งรอบหลัง
Secondary adjustable variable – ตัวแปรทีสามารถปรับได้ขั้นลำดับสอง
Shielded Metal Arc Welding – การเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์
Short arc length – ระยะอาร์กชิด
Teardrop shape – บ่อหลอมที่ความเร็วเชื่อมสูง (รูปหยดน้ำ)
Tip – to – Work distance– ระยะห่างปลายท่อนำกระแสถึงชิ้นงานเชื่อม
Trailing angle – มุมลวดเชื่อมเอียงหน้า
Transverse nozzle angles – มุมหัวเชื่อมตามแนวขวาง

Turbulent flow – แก๊สไหลแบบปั่นป่วน

Weld pool – บ่อหลอมละลาย

Welding current – กระแสเชื่อม

Welding parameter – องค์ประกอบการเชื่อม

Welding speed – ความเร็วเชื่อม

Wide bead – แนวเชื่อมที่กว้าง

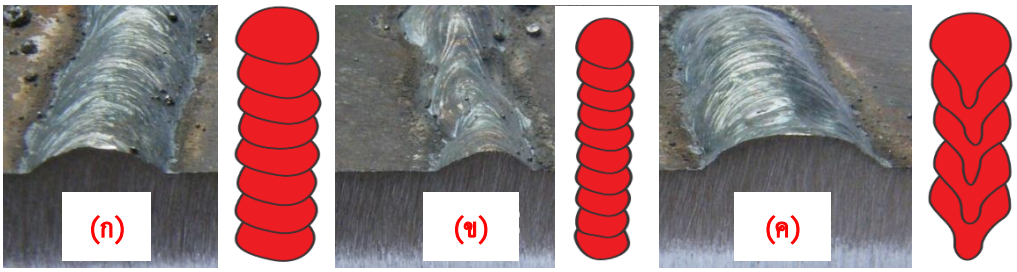
Wire electrode extension – ระยะโผล่ลวด

Wire feed speed – ความเร็วการป้อนลวด

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 5

ข้อที่1. จงอธิบายถึงความหมายของ “ Welding parameter” พร้อมบอกถึงผลกระทบที่เกิดอาจเกิดขึ้นต่อคุณภาพของแนวเชื่อม (พยายามยกตัวอย่างประกอบการอธิบาย)

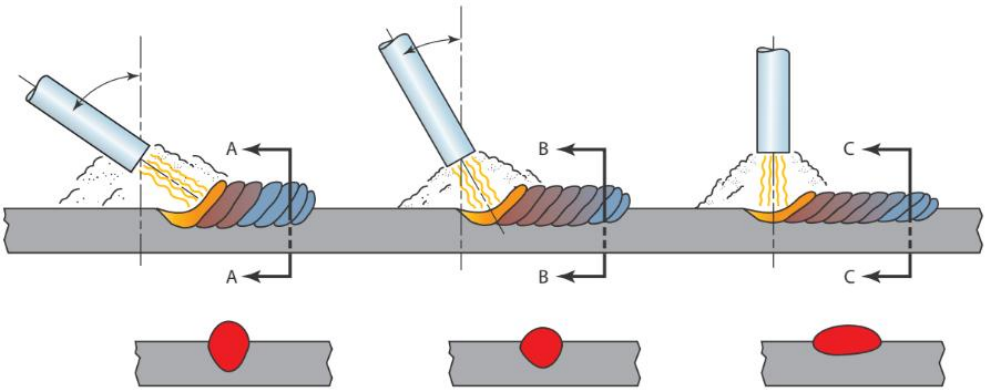
ข้อที่ 2. จงอธิบายถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยกระแสไฟเชื่อมต่างกันของการเชื่อม SMAW ต่อลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อม โดยใช้รูปข้างล่างนี้ประกอบการอธิบาย



แนวเชื่อมที่ใช้กระแสเชื่อมต่างกัน (ก) กระแสเหมาะสม (ข) กระแสต่ำ และ (ค) กระแสสูง

ที่มา : Howard B. Cary. Modern welding technology, 6th 2004.

ข้อที่ 3. จากรูปข้างล่างนี้ จงอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยของการเอียงมุมของลวดเชื่อม (Electrode angle) ที่มีต่อรูปร่างของแนวเชื่อม (Weld bead) ของขบวนการเชื่อม SMAW



(ก) ภาพตัด A–A (ข) ภาพตัด B–B (ค) ภาพตัด C–C

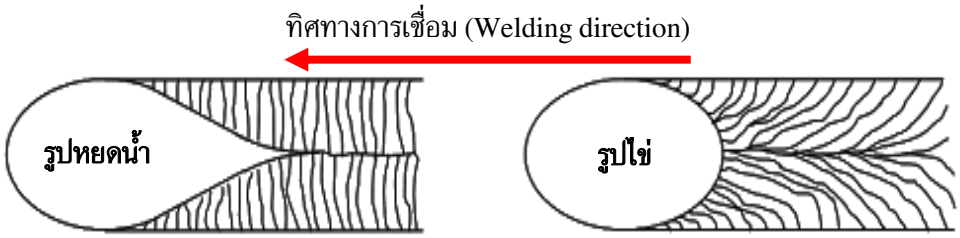
รูปเปรียบเทียบการซึมลึกของแนวเชื่อมที่ใช้มุมลวดเชื่อมเอียงหน้าองศาต่างกัน

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metals Fabrication, 2011

ข้อที่ 4. จงบอกรูปแบบการส่ายลวดเชื่อม (Electrode weaving) ที่นิยมเลือกใช้กัน (ตอบด้วยวิธีการวาดรูปเพื่อแสดงทิศทางการส่ายลวดเชื่อม)

ข้อที่ 5. จงเขียนสูตรสมการสำหรับการคำนวณหาความเร็วของการเชื่อม (Welding speed)

ข้อที่ 6. จากรูปจงอธิบายถึงกลไกทิศทางการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายที่แตกต่างกันของการเชื่อมที่ปัจจัยความเร็วในการเชื่อมต่างกัน



(ก) ความเร็วเชื่อมสูง (High speed) **(ข)** ความเร็วเชื่อมต่ำ (Low speed)

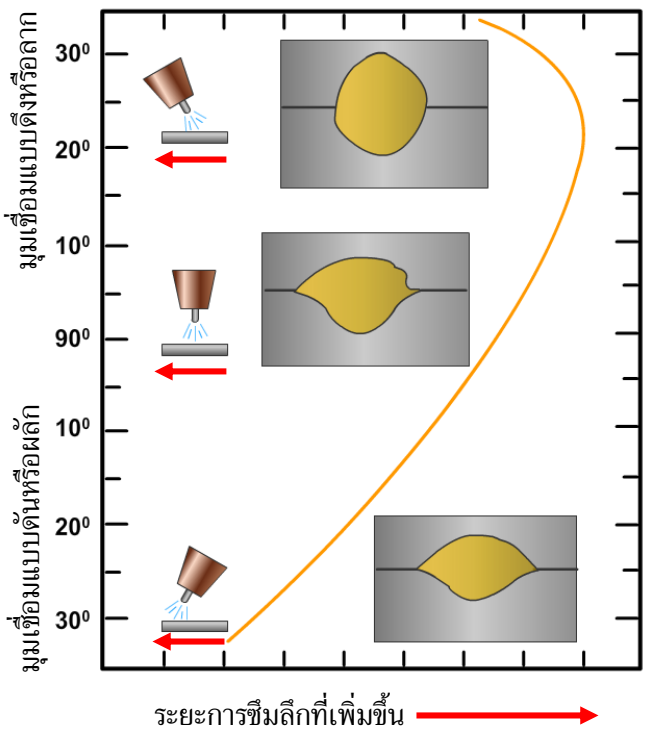
รูปเปรียบเทียบรูปทรงบ่อหลอมละลายและทิศทางการเย็นตัวที่ความเร็วเชื่อมต่างกัน

ที่มา : WJM Technologies–Excellence in material joining, 2013

ข้อที่ 7. จงอธิบายความแตกต่างของการตั้งค่าแบบวิธีแรงดันคงที่ กับแบบวิธีกระแสคงที่บนเครื่องเชื่อมของขบวนการเชื่อม GMAW

ข้อที่ 8. ระยะโผล่ของปลายลวดเชื่อม (Electrode extension) ของขบวนการเชื่อม MIG/MAG มีผลกระทบอย่างไรกับประสิทธิภาพของการเชื่อม

ข้อที่ 9. จากรูปข้างล่างนี้จงอธิบายความสัมพันธ์ของมุมหัวเชื่อม (Nozzle angle) กับอัตราการซึมลึกของขบวนการเชื่อม MIG/MAG



รูปความสัมพันธ์ของทิศทางการเอียงของมุมหัวเชื่อมกับระยะการซึมลึกและลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อม

ที่มา : NAVEDTRA 14250A, 2011

ข้อที่ 10. จงอธิบายการเคลื่อนหัวเชื่อมแบบดันหรือผลัก (Forehand welding) กับการเคลื่อนหัวเชื่อมแบบดึงหรือลาก (Backhand welding) (วาดรูปประกอบการอธิบาย)

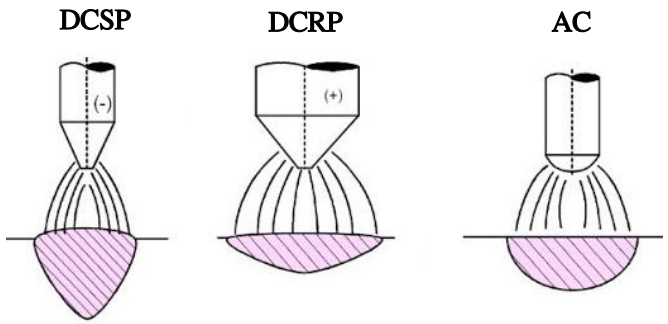
ข้อที่ 11. ขบวนการเชื่อม GMAW จะต้องใช้แก๊สปกคลุม (Shielding gas) ซึ่งเป็นปัจจัยการเชื่อมที่สำคัญ และมีผลต่อแนวเชื่อม จงอธิบายถึงสมบัติของแก๊สปกคลุมแต่ละชนิดที่มีต่อลักษณะของแนวเชื่อม โดยใช้รูปข้างล่างนี้ประกอบการอธิบาย



รูปร่างกับระยะการซึมลึกของแนวเชื่อมที่เลือกใช้แก๊สปกคลุมต่างชนิดกัน

ที่มา : NAVEDTRA 14250A, 2011

ข้อที่ 12. จากรูปข้างล่างนี้จงอธิบายถึงความสัมพันธ์ของค่ามุมองศาการปลายลวดทังสเตนกับชนิดของกระแสไฟฟ้าที่เชื่อม



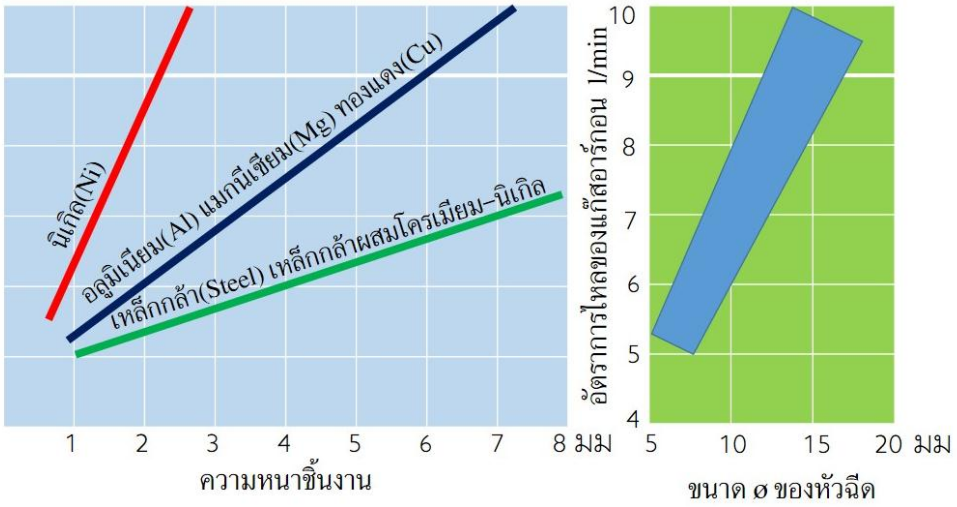
รูปลักษณะรูปทรงของการลับปลายลวดทังสเตนกับชนิดของกระแสไฟเชื่อม

ที่มา : TIG Welding Project ,2016

ข้อที่ 13. ขบวนการเชื่อมทิก (GTAW) สามารถเชื่อมได้ทั้ง DCEN หรือ DCEP และ ACHF จงบอกเหตุผลที่จะใช้ในการพิจาณาเลือกชนิดของกระแสไฟเชื่อมดังกล่าวให้เหมาะสมกับงานที่จะเชื่อม (ยกตัวอย่างประกอบการอธิบายเหตุผล)

ข้อที่ 14. จงให้เหตุผลว่าเหตุใดระยะยื่นของปลายแท่งลวดทังสเตนอิเลคโทรดของการเชื่อมทิกต่างกันระหว่างการเชื่อมขอบ (Edge flange welding) กับการเชื่อมมุม (Fillet welding)

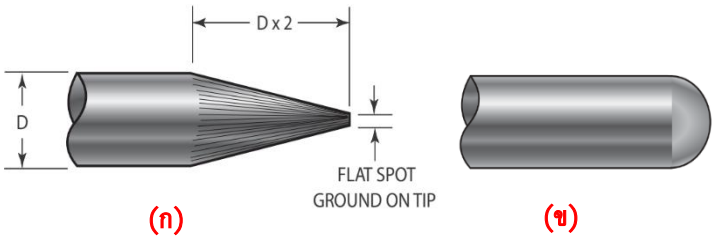
ข้อที่ 15. จากรูปกราฟข้างล่างนี้อธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยการเชื่อมทิกระหว่างอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมและขนาดหัวฉีดเมื่อต้องเชื่อมกับโลหะต่างชนิดกัน



รูปความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนกับชนิดโลหะและขนาดหัวฉีดแก๊ส

ที่มา : Fabricating and Welding, 2019 (เขียนภาพใหม่)

ข้อที่ 16. การลับปลายลวดทังสเตนสำหรับการเชื่อมโลหะแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ตามรูปข้างล่างนี้เป็นการเปรียบเทียบการลับปลายลวดทังสเตนสำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมกับโลหะอลูมิเนียม จงให้เหตุถึงความแตกต่างของมุมที่ลับ



รูปปลายลวดทังสเตน (ก) สำหรับเชื่อมเหล็กกล้าและเหล็กกล้าไร้สนิม (ข) สำหรับเชื่อมอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม

ที่มา : Cengage learning, 2012

บรรณานุกรมบทที่ 5

American Welding Society (AWS), *Welding Handbook – Welding Science & Technology* Volume 1, Ninth Edition, AWS publisher, 2001.

American Welding Society, A 5.1/A5.1−*Specification for carbon steel electrodes for shielding metal arc welding*. American Welding Society, UAS, 2004.

Andrew D. Althouse, Carl H. Turnquist, William A. Bowditch, Kevin E. Bowditch and Mark A. Bowditch.*Modern Welding*. Goodheart−Willcox Publisher, 12th Edition, Manufactured in the United States of America, 2020.

CK WORLDWIDE. *Technical Specifications for TIG Welding*. By CK Master TIG. August, 2016.

Department of the Army. *Welding Theory and Application*, TC 9−237, Department of the Army Technical Manual, Headquarters, Washington D.C., 1993.

Edward R. Bohnart, *Welding−Principles and Practices*. 5th Edition, McGraw−Hill Education, New York, United States, 2017.

EWM−We Are Welding. *MIG/MAG Welding Dictionary*. 11−2020.

FRONIUS. *Training Documentation –Metal Inert Gas Welding (MIG) / Metal Active Gas Welding (MAG)* "MIG/MAG Welding", 2018.

FRONIUS. *Training Documentation –Tungsten Inert Gas Welding* "TIG Welding", 2019.

G.K. Vijayaraghavan and S. Sundaravalli, *Welding Technology*. Suchitra publications, Anna University, Chennai, India, 2013.

Gabriella Cristina da Silva Costa and Andre Alves de Resende. *Evaluation of TIG−MIG/MAG Welding Process in Direct Polarity*. Research Article, SN Applied Sciences. 8 January, 2020.

Hobart Institute of Welding Technology. *Technical Guides EW−472−Shielded Metal Arc Welding*. Hobart welding school publisher, 2008.

Howard B. Cary, *Modern Welding Technology Welding*, 6th Edition, Pearson education. NJ, USA, 2004.

James Scott, *A basic handbook for arc welding applications*. Kindle Edition, 2013.

JASIC. *The Power in Inverter Technology. Guide to MIG/MAG Welding*. By Wilkinson Star, 10−2017.

Joseph Abbott and Karen Mitchell Smith. *Tech Careers–Welding Technology*. TSTC Publishing, 2011.

KOBELCO Steel. *Essential Factors in Gas Shielding Metal Arc Welding*. Kobe steel, LTD, Tokyo, Japan, 2015.

Larry Jeffus and Lawrence Bower. *Welding: Skill, Processes and Practices for Entry–Level Welders*. 1st Edition. Delmar Cengage Learning. Cliftan Park, New York, UAS, 2010.

Larry Jeffus. *Welding and Metal Fabrication*. Delmar Cengage Learning publisher, Clifton Park NY. USA, 2011.

LINCOLN ELECTRIC. *Gas Metal Arc Welding–Product and Procedure Selection*. Editor by : Jeff Nadzam, Senior Application Engineering. Issue date 08–2014.

Miller Electric. *The Booklet Guidelines to Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)*. UG–215 994, July, 2003.

Miller Welds. *Guidelines for Gas Tungsten arc welding (GTAW)* –Processes. International Headquarters, USA, 215994 F, 01–2018.

Miller Welds. *Guidelines for shielded metal arc welding (SMAW)*. International Headquarters, WI 54914 USA, 2018.

Moniz B.J. and Miller R.J. *Welding Skills*. 3rd Edition. American Technical Publisher, Inc., USA, 2004.

NAVEDTRA. *User Manual–Chapter 10 Gas Metal Arc Welding*. Nevedtra 14250A, 2011.

O.P. Khanna. *A Text Book of Welding Technology*. Dhanpat Rai Publications, India, Reprinted, 2017.

Priyanka Chougale and Prof. M.A. Sutar. *A Comparative Study of Metal Inert Gas Welding and Tungsten Inert Gas Welding Processes: A Review*. International Journal of Advance Research in Science and Engineering. Vol. 07, Special Issue No. 03, February, 2018.

R.S. Parmar. *Welding Processes and Technology*. Khanna Publishers, 1996.

Richard L. Tittle, *Welding and Welding Technology*. McGraw–Hill, Inc. Publishers, 1973.

Roger Timings, *Fabrication and Welding Engineering*. 1sr Edition, 2017.

SOLAS. *Thermal Processes Module 2–Metak Active Gas Shielded Welding (MAGA/MIG): Unit 4 Trade of Pipefitting Phase 2*. SOLAS Education and Training Authority, 2014.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Effect of Hydrogen in Argon Shielding Gas for Welding Stainless Steel Grade SUS 201 by GTA Welding Process*. Journal of Advance Joining Processes. Vol. 1, 2020.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Microstructure, Mechanical Properties and Pitting Corrosion of TIG Welding Joints Alternative Low-Cost Austenite Stainless Steel Grade 216*. Journal of Advance Joining Processes. Vol. 2, 100027, 2020.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Optimization of TIG Welding Parameter in Dissimilar Joints of Low Nickel Stainless Steel AISI 205 and AISI 216*. Journal of Manufacturing processes. Vol. 58, 163-178, 2020.

William A. Bowditch, Kevin E. Bowditch and Mark A. Bowditch, *Welding Technology Fundamentals*. Fourth Edition, 2014.

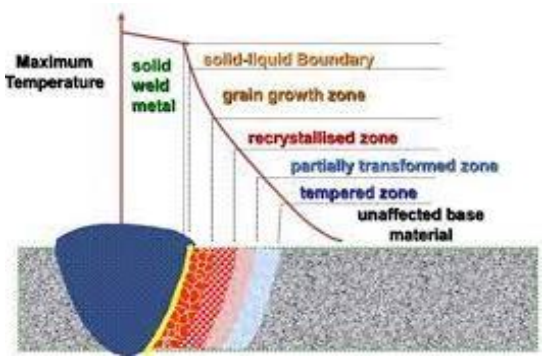
William A. Bowditch, Kevin E. Bowditch and Mark A. Bowditch. *Welding Fundamentals*, Goodheart-Willcox Publisher, 5th Edition, Manufactured in the United States of America, 2017.

WWS Group-Weldability. *An Introduction to MIG Welding*, 2011.

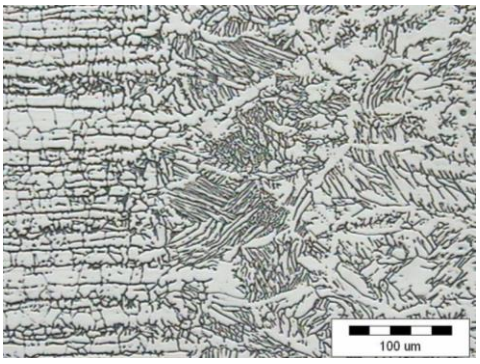
บทที่ 6

โลหะวิทยาในการเชื่อม

Welding Metallurgy



ที่มา : IJESIT–Prediction of HAZ, 2015



ที่มา : วิชาญ ช่วยพันธ์ – โลหะการวิศวกรรม 2560

จุดประสงค์การเรียนรู้ บทที่ 6 โลหะวิทยาในการเชื่อม

- รู้และเข้าใจถึงความหมายและความสำคัญของอิทธิพลทางด้านโลหะวิทยาที่มีต่อขบวนการเชื่อม
- รู้และเข้าใจถึงปัจจัยการเชื่อมที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาของเนื้อเชื่อม
- สามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนที่จะป้อนเข้าในระหว่างการเชื่อมและมีผลกระทบในเชิงโลหะวิทยาของเนื้อเชื่อม
- รู้และเข้าใจถึงกลไกการเกิดโครงสร้างเกรนที่เกิดขึ้นจากการแข็งตัวของบ่อหลอมละลาย
- เข้าใจและสามารถอธิบายถึงผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อมที่มีต่อโลหะงานที่นำมาเชื่อม
- เข้าใจและสามารถคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางของส่วนผสมทางเคมีในเนื้อเชื่อม
- ตระหนักและมีจิตใต้สำนึกในการให้ความสำคัญกับความเสียหายของงานเชื่อมที่เกิดจากความบกพร่องของเนื้อเชื่อมในทางโลหะวิทยา

"Welding Metallurgy" หมายถึง บริบทของวัสดุโลหะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านขบวนของการเชื่อม ซึ่งพฤติกรรมหรือกลไกของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับโลหะ ทั้งระหว่างการเชื่อมและหลังการเชื่อมจะเกิดจากอิทธิพลที่ผสมผสานกันของทั้งขบวนการเชื่อม (Welding processes) และ ลักษณะเฉพาะทางโลหะวิทยาของวัสดุที่เชื่อม (Metallurgical characteristics) ดังนั้น เราจึงเรียกลักษณะการเปลี่ยนแปลงโดยรวมที่เกิดขึ้นนี้ว่า "โลหะวิทยางานเชื่อม" วิศวกรช่างเชื่อมที่เก่ง จะต้องมีความรู้ความเข้าใจถึงโลหะวิทยาของวัสดุที่จะนำมาทำการเชื่อม เพราะอิทธิพลทางโลหะวิทยาของวัสดุจะมีบทบาทสำคัญในการที่จะกำหนดหรือเลือกกรรมวิธีการเชื่อม (Welding processes) ปัจจัยการเชื่อม (Welding parameters) รวมถึงการออกแบบการเชื่อม (Welding design) ที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังมีบทบาทในภาคส่วนของการทดสอบคุณภาพแนวเชื่อมทั้งที่เป็นการทดสอบแบบทำลาย (Destructive testing) และการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non–Destructive testing) ด้วยบทบาททางโลหะวิทยาของวัสดุ ที่มีผลกระทบโดยตรงต่อขบวนการเชื่อมอย่างเด่นชัดดังที่กล่าวมานั้น ประจวบกับจากประสบการณ์ของผู้เขียนเองที่ได้สัมผัสและได้ทำงานร่วมกับวิศวกร รวมถึงช่างเชื่อมฝีมือดีมานาน และเป็นผู้ทดสอบเพื่อออกใบรับรองวิศวกรการเชื่อมสากล (International Welding Engineering : IWE) ภายใต้สถาบันการเชื่อมแห่งประเทศไทย (Thailand Institute of Welding : WIT) พบว่าพื้นฐานองค์ความรู้ทางด้านโลหะวิทยางานเชื่อมของบุคคลากรที่ประกอบอาชีพด้านงานเชื่อมจะค่อนข้างน้อย จนบางครั้งสร้างความเสียหายต่องานเชื่อมอย่างมากมาย เพียงแค่ขาดความรู้ความเข้าใจอันเล็กน้อยของหลักการพื้นฐานทางโลหะวิทยา และบางครั้งยังเข้าใจผิดหรือเชื่อฟังกันมาแบบผิด ๆ ผู้เขียนจึงได้ตระหนักในเรื่องนี้และเล็งเห็นว่าวิศวกร ช่างเชื่อมหรือบุคคลที่สนใจงานด้านเทคโนโลยีการเชื่อม ควรจะต้องมีความรู้ความเข้าใจบทบาททางด้านโลหะวิทยาของวัสดุโลหะที่จะนำมาเชื่อมมากเพียงพอ เพื่อที่จะช่วยในการสร้างบุคลากรด้านงานเชื่อมที่มีคุณภาพและลดปัญหาความเสียหายที่เกิดจากเชื่อมลง รวมไปถึงการก้าวทันกับเทคโนโลยีการเชื่อมที่ปัจจุบันได้มีการพัฒนาก้าวหน้าไปมากแล้ว โดยเนื้อหาสาระของบทเรียนนี้จะได้กล่าวถึงบริบททางโลหะวิทยาที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากกรรมวิธีการเชื่อมและปัจจัยการเชื่อมและอิทธิพลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะแยกเป็นเป็นด้าน ๆเพื่อลดความยากในการทำความเข้าใจดังรายละเอียดต่อไปนี้

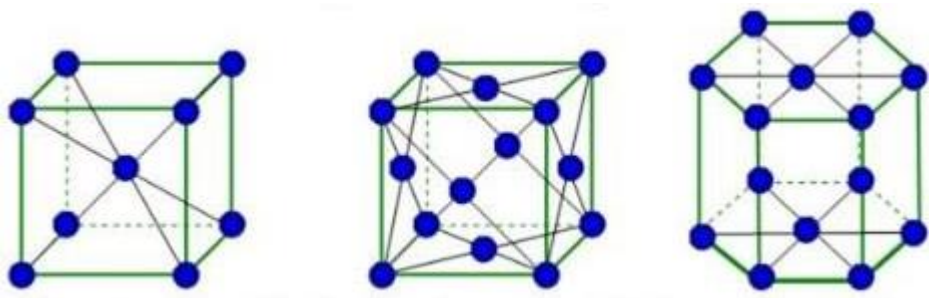
6.1 โครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallurgical structure)

โครงสร้างของโลหะ (Structure) เป็นโลหะวิทยาทางกายภาพ (Physical metallurgy) ของวัสดุที่นำมาเชื่อม ซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลหลักที่สำคัญของการเชื่อม เพราะเป็นตัวบ่งชี้ถึงโครงสร้างภายในของเนื้อโลหะเชื่อมที่ได้ ที่เกี่ยวข้องและสัมพันธ์กับ โครงสร้างของผลึก (Crystal structure) และโครงสร้างของเกรนในแนวเชื่อม (Grain structure) รวมถึงสมบัติทางกล (Mechanical properties) ทางกายภาพ (Physical properties) และทางเคมี (Chemical properties) ของแนวเชื่อมที่ได้หลังการเชื่อมเสร็จสิ้นสมบูรณ์ ดังรายละเอียดเพิ่มเติมของแต่ละด้านดังต่อไปนี้

1. โครงสร้างของผลึก (Crystal structure)

วัสดุโลหะทุกชนิดจะเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างการเกาะยึดกันเป็นแบบระบบผลึก (Crystal system) โดยในทางกายภาพตามธรรมชาติโครงสร้างผลึกของโลหะมีได้ถึง 14 ชนิด แต่ที่พบในวัสดุโลหะทางวิศวกรรมมักจะพบ 3 ชนิดหลัก ๆ คือ ผลึกแบบ BCC แบบ FCC และ แบบ HCP ดังแสดงใน รูปที่ 6.1 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ ปกติธรรมชาติของโลหะจะมีระบบผลึกแบบเดียวเป็นสมบัติพื้นฐาน แต่อาจมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนตำแหน่งการเกาะยึดกัน เช่น โลหะเหล็ก (Fe) ที่มีทั้งการเกาะยึดแบบ BCC และ FCC ขึ้นอยู่กับระดับอุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งความแตกต่างจำนวนอะตอมและรูปทรงของผลึกจะส่งผลต่อพฤติกรรมและสมบัติของวัสดุโลหะได้ชัดเจน ไม่ว่าจะเป็นพฤติกรรมที่มีต่อความร้อน ต่ออัตราการเย็นตัว ต่อสมบัติความเป็นขั้วแม่เหล็ก และต่อสมบัติทางกลในแต่ละด้านในการรับแรง เป็นต้น ซึ่งกล่าวไว้โดย Sindo Kou (2003)

การเชื่อมส่วนใหญ่จะเป็นแบบเชื่อมหลอมละลาย (Fusion welding) ซึ่งก็หมายถึงการทำให้โลหะเกิดการหลอมละลายแล้วต่อติดกันแล้วปล่อยให้แข็งตัว ดังนั้นการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลว แล้วกลับไปเป็นของแข็งอีกครั้งนั้น ถ้ามีปัจจัยอื่น ๆ เข้ามามีส่วนร่วมก็ย่อมส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ไม่เหมือนเดิม ปัจจัยอื่น ๆ ที่ว่าในงานเชื่อม หมายถึง อัตราการเย็นตัว อิทธิพลของแก๊สปกคลุม ส่วนผสมทางเคมีของลวดเติม และสภาพแวดล้อมที่ทำการเชื่อม เป็นต้น ในบางครั้งเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเชื่อมแบบหลอมละลาย ก็ได้มีการหาเทคนิคหรือกรรมวิธีการเชื่อมแบบใหม่ที่ไม่ต้องหลอมละลายโลหะ เช่น การเชื่อมแบบความต้านทานแบบกวน (FSW) ดังนั้นจะเห็นได้ชัดเจนว่ารูปแบบการจัดเรียงของโครงสร้างผลึกที่ได้หลักจากการเชื่อม จะมีผลต่อสมบัติของแนวเชื่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านสมบัติทางกล เช่น แนวเชื่อมที่เย็นตัวเร็วมากจะมีความแข็งสูงกว่าการเย็นตัวช้า เพราะรูปแบบการจัดเรียงตัวของโครงสร้างเป็นระเบียบต่างกัน ซึ่งการเย็นตัวเร็วจะเรียงตัวไม่เป็นระเบียบแต่เมื่อมีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ความแข็งของแนวเชื่อมก็จะลดลง อันเนื่องจากความร้อนมาช่วยลดความไม่เป็นระเบียบของการจัดเรียงโครงสร้างลง อ้างอิงตาม Baldev Raj (2008)

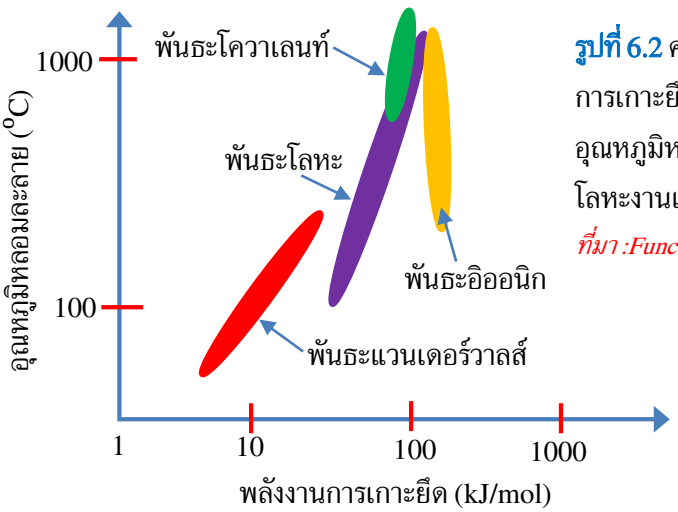


(ก) ผลึกแบบ Body–Center–Cubic (ข) ผลึกแบบ Face–Center–Cubic (ค) ผลึกแบบ Close–Packed–Hexagonal

รูปที่ 6.1 โครงสร้างผลึกของวัสดุโลหะงานเชื่อม

ที่มา : Subtech .com, Under creative commons, 2017

พันธะการเกาะยึดของโครงสร้างผลึกโลหะมีความแตกต่างกันตามธรรมชาติของโลหะแต่ละชนิด ซึ่งพันธะดังกล่าว คือ พันธะโลหะ (Metallic bond) พันธะอิออนิก (Ionic bond) พันธะโควาเลนท์ (Covalent bond) และพันธะแวนเดอร์วาวส์ (Van der Walls) โดยพันธะแต่ละชนิดจะมีพลังงานของการยึดเกาะ (Bond energy) ไม่เท่ากัน พันธะที่มีพลังงานการยึดเกาะน้อยจะมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ ดังแสดงระดับอุณหภูมิหลอมละลายของพันธะต่าง ๆ ในรูปที่ 6.2 ซึ่งเป็นดรรชนีบ่งชี้ถึงการกำหนดปัจจัยการเชื่อมเรื่องการป้อนพลังงานความร้อน (Heat input) เข้าสู่ชิ้นงาน เพื่อทำให้โลหะเชื่อมเกิดการหลอมละลาย โดยจะมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการเชื่อมโลหะแบบโลหะต่างชนิดวัสดุ (Dissimilar welding) ซึ่งรวมไปถึงการเลือกลวดเชื่อมที่จะหลอมละลายเติมเนื้อโลหะในแนวเชื่อมด้วย



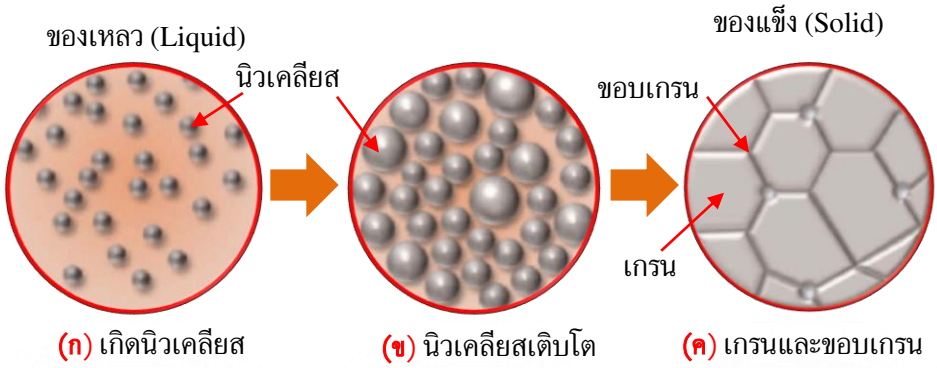
รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ของพันธะการเกาะยึดโครงสร้างผลึกกับอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุโลหะงานเชื่อม

ที่มา :Function materials, 2012

2. โครงสร้างเกรน (Grain structure)

John C. Lippold et al. (2005) ได้กล่าวไว้ว่าวัสดุโลหะทุกชนิดจะมีระบบโครงสร้างที่เป็นแบบผลึก (Crystal structure) โดยมีจำนวนหลาย ๆ ผลึกมารวมตัวกัน (Polycrystalline) เป็นก้อนที่เรียกว่า เกรน (Grain) และในเนื้อของโลหะก็จะประกอบไปด้วยจำนวนเกรนที่มากมายมาวางต่อกัน ซึ่งรอยต่อของระหว่างก้อนเกรนจะเรียกว่าขอบเกรน (Grain boundary) โดยหลักธรรมชาติในวัสดุโลหะเดียวกันทั้งก้อนเกรนและขอบเกรนก็จะมีขนาดที่ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของปัจจัยในการเย็นตัวจากของเหลวไปเป็นของแข็ง ดังแสดงกลไกของการเกิดโครงสร้างเกรนในรูปที่ 6.3 โดยในรูป (ก) แสดงถึงน้ำโลหะหลอมเหลวเมื่อเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิของการเกิดนิวเคลียส ก็จะเกิดเป็นของแข็งเล็ก ๆ ท่ามกลางของเหลว เมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิก็จะลดต่ำลงเรื่อย ๆ นิวเคลียสของแข็งก็จะเติบโตมากขึ้นจนทำให้สัดส่วนของแข็งมากกว่าของเหลว ดังแสดงในรูป (ข) จนเมื่ออุณหภูมิเย็นตัวลงถึงระดับอุณหภูมิห้องก็จะได้เป็นของแข็งทั้งหมดที่มีก้อนเกรนจำนวนมากเกาะติดกัน โดยมีรอยต่อของขอบเกรนที่อยู่ระหว่างก้อนของเกรน ดังแสดงในรูป (ค) ซึ่งกลไกของการเกิดโครงสร้างเกรนที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นหลักการในเชิงทางทฤษฎี (อุดมคติ) กล่าวคือเป็นการเย็นตัวที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่ความร้อนสามารถระบายออกไปได้ทุกทิศทางเท่า ๆ กัน แต่สำหรับการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายในการเชื่อมจะ

มีปัจจัยของทิศทางการระบายความร้อนที่มีความสามารถระบายความร้อนออกไปได้ในแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน ที่จะส่งผลกระทบต่อการจัดเรียงและทิศทางการเติบโตของเกรน อ้างอิงหลักการจาก Kenneth Easterling (2013) ดังที่จะอธิบายรายละเอียดเพิ่มเติมดังต่อไปนี้



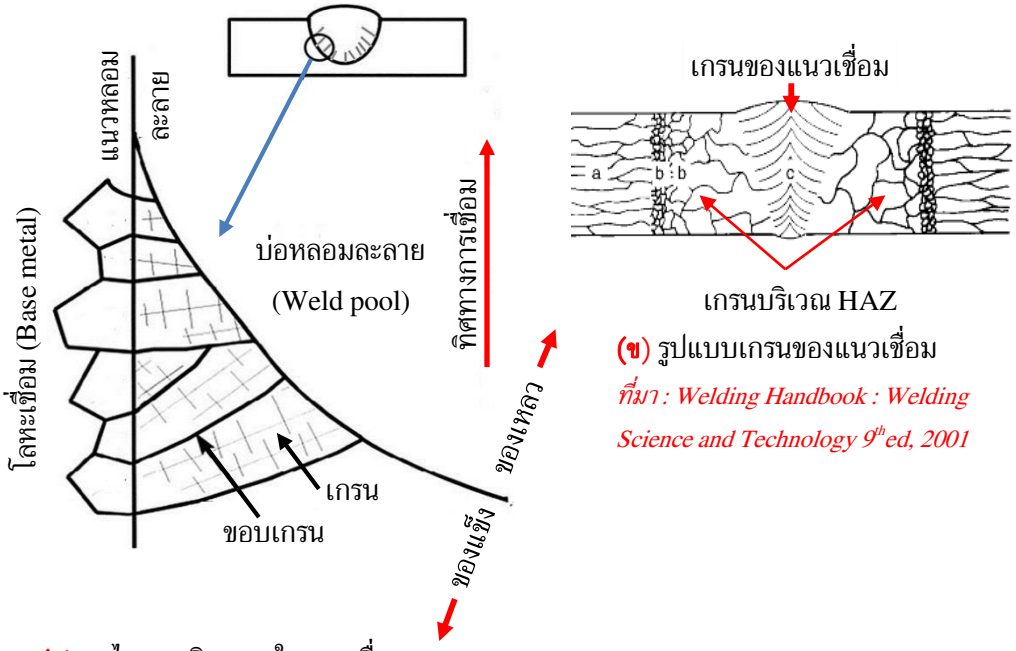
รูปที่ 6.3 กลไกของการเกิดโครงสร้างเกรนในเนื้อโลหะ

ที่มา : Solidification mechanisms 1, 20125

กลไกการเกิดโครงสร้างเกรนของโลหะในแนวเชื่อม ตามคำกล่าวของ Jinliang Zhang et al. (2019) ดังแสดงในรูปที่ 6.4 พบว่าถ้าพิจารณาเพียงลำดับของขั้นตอนในการเกิดก็จะเป็นไปตามหลักการเย็นตัวจากของเหลวไปเป็นของแข็ง (Solidification mechanism) แต่ในทางปฏิบัติพบว่ารูปแบบของการเกิดโครงสร้างเกรนจะแปรเปลี่ยนไปตามพฤติกรรมการระบายความร้อนของบ่อหลอมละลาย โดยความร้อนจะระบายผ่านเนื้อโลหะเชื่อม (Base metals) ได้ดีกว่าทางอากาศ (Environment) ดังนั้น ทิศทางของการเกิดเกรนจึงสวนทางกับทิศทางการระบายของความร้อนที่เข้าหาจุดกึ่งกลางของบ่อหลอมละลาย รูปร่างของเกรนก็จะเป็นแบบก้อนเรียวยาวที่เรียกกันว่า “Columnar grains” ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับสมบัติความสามารถในการนำความร้อนของโลหะเชื่อม โดยอิทธิพลของความร้อนจากการเชื่อมที่ระบายผ่านโลหะเชื่อมยังส่งผลทำให้ส่วนที่ไม่ได้หลอมละลายก็เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเกรน ซึ่งเรียกบริเวณที่โครงสร้างเกรนเปลี่ยนแปลงนี้ว่า บริเวณผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone) หรือที่รู้จักกันดีในชื่อของ “HAZ” นั่นเอง และขนาดความกว้างของ HAZ ของแนวเชื่อมจะขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่ป้อนไปสู่แนวเชื่อม (Heat input) ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

ความเร็วในการเชื่อม (Welding speed) ยังเป็นปัจจัยการเชื่อมที่สำคัญต่อการกำหนดลักษณะรูปทรงของโครงสร้างแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 6.5 (ก) (ข) และ (ค) ที่เชื่อมด้วยระดับความเร็วที่ต่ำ ปานกลาง และสูงตามลำดับ จะเห็นได้ชัดเจนว่าการเชื่อมด้วยความเร็วที่ต่ำอัตราการเย็นตัวจะช้ามาก เนื่องจากความร้อนสะสมในบ่อหลอมละลายสูง ลักษณะของโครงสร้างเกรนจะเป็นแบบ Columnar โค้งค่อย ๆ เข้าจุดกึ่งกลางของบ่อหลอมละลาย (ไม่ตั้งฉาก) ส่งผลทำให้บ่อหลอมละลายมีรูปทรงเป็นรูปไข่หรือวงรี (Elliptical) และในทางกลับกัน ถ้าเชื่อมด้วยความเร็วเชื่อมที่สูง ลักษณะของโครงสร้างเกรนจะเป็นแบบ Columnar ที่ตั้งฉากกับเส้นกึ่งกลางของบ่อหลอมละลาย ซึ่งทำให้บ่อหลอมละลายมีรูปทรง

เป็นรูปหยดน้ำ (Teardrop) ส่วนกรณีที่ความเร็วเชื่อมปานกลางก็จะเกิดลักษณะของโครงสร้างเกรนที่ผสมกันของทั้งความเร็วเชื่อมต่ำและสูง อ้างอิงตามคำอธิบายของ John N. Dupont (2009)



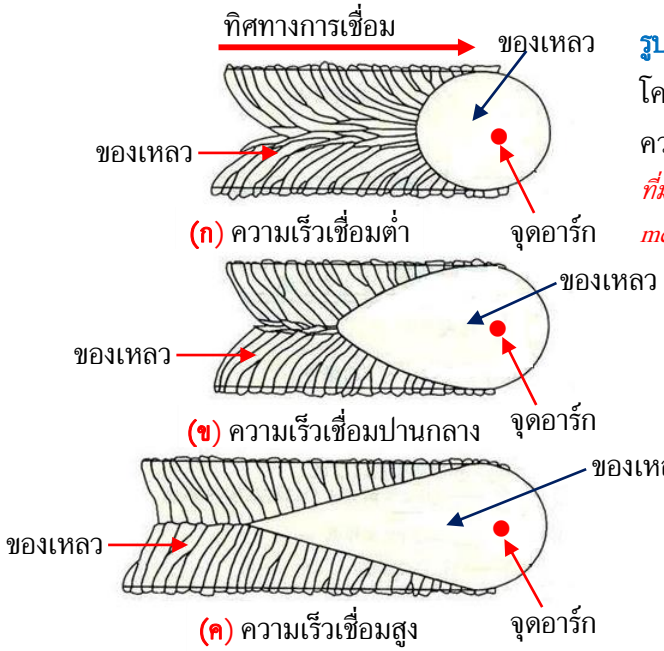
(ก) กลไกการเกิดเกรนในแนวเชื่อม

ที่มา : Journal of Materials Science & Technology, 35, pp. 270–284, 2019

(ข) รูปแบบเกรนของแนวเชื่อม

ที่มา : Welding Handbook : Welding Science and Technology 9th ed, 2001

รูปที่ 6.4 การเกิดโครงสร้างของเกรนจากขบวนการเชื่อม



รูปที่ 6.5 กลไกของการเกิดโครงสร้างเกรนในเนื้อโลหะที่ความเร็วเชื่อมต่างกัน

ที่มา : Solidification mechanisms 1, 2015

3. ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานเชื่อม (Heat input)

ขบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) ต้องอาศัยองค์ประกอบหลักของปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานเชื่อม ที่เรียกมักนิยมกันว่า “Heat input” เป็นสำคัญ เพราะความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ขบวนการเชื่อมจะทำหน้าที่หลอมละลายโลหะชิ้นงาน (Base metals) สร้างเป็นบ่อหลอมละลาย (Weld pool) และยังต้องทำหน้าที่หลอมละลายโลหะเติม (Filler metal) โดยระดับของปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าไปจะต้องสูงมากเพียงพอที่จะหลอมโลหะที่เชื่อมและต้องพิจารณาชดเชยความร้อนบางส่วนที่สูญเสียไปกับสภาพแวดล้อมที่เชื่อม ช่างเชื่อมที่ดีก็ต้องมีความรู้และเข้าใจถึงวิธีการคำนวณปริมาณความร้อนที่จะต้องป้อนเข้าสู่โลหะชิ้นงานเพื่อการหลอมละลายที่สมบูรณ์ แหล่งต้นกำเนิดของพลังงานความร้อนสามารถเกิดได้จากแหล่งต่าง ๆ ตามแต่ละกรรมวิธีของการเชื่อม ได้แก่ แหล่งพลังงานจากการไฟฟ้าอาร์ก (Electric arc) พลาสมาอาร์ก (Plasma arc) ลำแสงเลเซอร์อาร์ก (Laser arc) ลำแสงอิเลคตรอนอาร์ก (Electron arc) และรวมไปถึงความร้อนจากการเผาไหม้ของแก๊สอะเซทิลีนกับออกซิเจน (Oxyacetylene) เป็นต้น โดยความแตกต่างของปริมาณความร้อนที่ต้องเข้าสู่ชิ้นงานขณะเชื่อมขึ้นอยู่กับขบวนการเชื่อม โลหะที่ทำการเชื่อม การออกแบบรอยต่อและรวมไปถึงช่องทางโอกาสต่าง ๆ ที่อาจสูญเสียความร้อนไปในระบบของขบวนการเชื่อม

การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ต้องป้อนเข้าสู่ชิ้นงาน สามารถคำนวนได้จากปัจจัยของการเชื่อม ซึ่งมีสูตรการคำนวนที่เป็นมาตรฐานสากล โดยที่ใช้กัน จะมี 2 ระบบ คือ

1. ระบบการคำนวณตามมาตรฐานของอเมริกา (American system) จะใช้กับมาตรฐานต่าง ๆ ของอเมริกา ได้แก่ AWS D1.1 (2017) กับ ASME Section IX (2019) สูตรการคำนวน คือ

$$\text{ปริมาณความร้อนป้อนเชื่อม (Heat input)} = \frac{\text{แรงดัน } (V) x \text{ กระแส } (A)}{\text{ความเร็วเชื่อม } x\ (60/1000)} \quad \textit{สมการที่}\ (6.1)$$

ภายใต้เงื่อนไข : แรงดัน (V) มีหน่วยเป็น โวลต์ (Volts)
: กระแส (A) มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (Ampere)
: ความเร็ว (S) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร/นาที (mm/min)

- ค่าความร้อนที่ได้จะมีหน่วยเป็น กิโลจูลต่อนิ้ว (kJ/in) เมื่อความเร็วเชื่อมเป็น นิ้วต่อนาที (in/min)
- ค่าความร้อนที่ได้จะมีหน่วยเป็น กิโลจูลต่อมิลลิเมตร (kJ/mm) เมื่อความเร็วเชื่อมเป็นมิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)

2. ระบบการคำนวณตามมาตรฐานของสหภาพยุโรป (European system) จะใช้กับมาตรฐาน EN 1011−1(2009) และ ISO/TR 18491 (2015) สูตรการคำนวณ คือ

ปริมาณความร้อนป้อนเชื่อม (Heat input) = พลังงานอาร์ก (Arc energy : kJ/mm) X ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency : k)

สมการที่ (6.2)

เมื่อ : พลังงานอาร์ก (Arc energy) คือ

$$\text{พลังงานอาร์ก (kJ/mm)} = \frac{\text{แรงดัน } (V) x \text{ กระแส } (A)}{\text{ความเร็วเชื่อม} (S)\ x\ 1000}$$

สมการที่ (6.3)

ภายใต้เงื่อนไข : แรงดัน (V) มีหน่วยเป็น โวลต์ (Volts)

: กระแส (A) มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (Ampere)

: ความเร็ว (S) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร/วินาที (mm/sec)

เมื่อ : ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (k) ขึ้นอยู่กับขบวนการเชื่อม ดังในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (k) ของแต่ละขบวนการเชื่อม

ที่มา : Welding & NDT : How to calculate heat input, 2019

ลำดับ	ขบวนการเชื่อม (Welding process)	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency : k)*
1.	การเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding : SAW)	1.0
2.	การเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding : SMAW)	0.8
3.	การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding : GMAW)	0.8
4.	การเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux Cored Arc Welding : FCAW)	0.8
5.	การเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW)	0.6
6.	กรรมวิธีการเชื่อมด้วยอาร์กพลาสมา (Plasma Arc Welding : PAW)	0.6

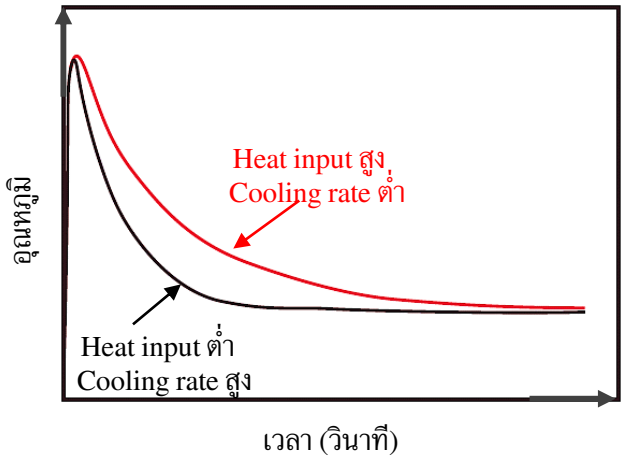
* หมายเหตุ ค่า k มาก แสดงว่าขบวนการเชื่อมมีการสูญเสียพลังงานความร้อนระหว่างการเชื่อมน้อย

จากตารางที่ 6.1 ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (k) ของการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (SAW) จะมีค่าสูงสุด คือมีค่า เท่ากับ 1.0 ซึ่งหมายถึงเป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่ไม่มีการสูญเสียความร้อนในระหว่าง

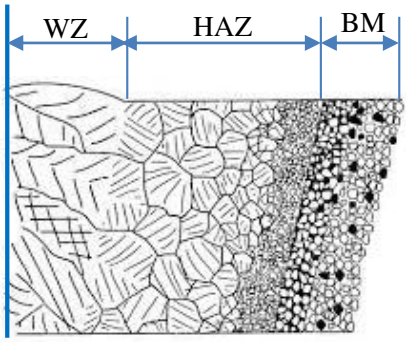
การเชื่อมหรืออาจมีแต่น้อยมาก ด้วยเหตุผลเพราะแหล่งของความร้อนระหว่างการเชื่อมทั้งหมดโดนปกคลุมอยู่ภายใต้ฟลักซ์ที่ค่อนข้างมิดชิด แม้แสงจากการอาร์กก็ยังไม่ลอดออกมา ส่วนกรรมวิธีการเชื่อมแบบอื่น ๆ ก็จะมีค่าตัวเลขที่ลดลงตามแต่ละกรรมวิธีที่มีการสูญเสียความร้อน

จากหลักการคำนวนหาปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานเชื่อม จะเห็นได้ชัดเจนว่าจะมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับปัจจัยการเชื่อมหลัก ๆ ที่สำคัญ คือ กระแสไฟเชื่อม (Welding current) แรงดันอาร์ก (Arc welding) และความเร็วเชื่อม (Welding speed) ดังนั้น การปรับเปลี่ยนตัวแปรใด ๆ ก็ตามจะส่งผลต่อระดับปริมาณของความร้อนที่จะป้อนเข้าสู่ชิ้นงาน ซึ่งจะมีผลกระทบโดยตรงต่อโครงสร้าง และสมบัติทางกลของรอยเชื่อม ที่รวมไปถึงการบิดตัวหรือเสียรูปทรงของชิ้นงานที่เกิดจากความร้อนในการเชื่อม แต่ที่ส่งผลกระทบโดยตรงมากที่สุด ก็คือรูปร่างของรอยเชื่อม (Weld bead shape) ซึ่งได้แก่ ความกว้าง (Weld width) ความนูน (Reinforcement) การหลอมลึก (Penetration) ของแนวเชื่อม และอาจรวมถึงรอยบกพร่องที่เกิดจากการใช้ตัวแปรการเชื่อมที่ไม่เหมาะสม เช่น รอยกัดแหว่ง (Undercut) เม็ดโลหะกระเด็น (Spatter) รอยนูนเกิน (Excess reinforcement)) เป็นต้น อ้างอิงคำอธิบายจากข้อมูลของ Jan Pawel Pilarczyk (2004)

ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานเชื่อม (Heat input volume) จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการเย็นตัว (Cooling rate) ถ้าในกรณีที่มีปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานสูงหรือมาก เมื่อปล่อยให้แนวเชื่อมเย็นตัว จะมีอัตราการเย็นตัวที่ต่ำหรือช้า ในทิศทางตรงกันข้ามถ้าปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานต่ำหรือน้อย แนวเชื่อมจะมีอัตราการเย็นตัวที่สูงหรือเร็ว ดังแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 6.6 ซึ่งอัตราการเย็นตัวจะเป็นตัวการสำคัญที่จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อโครงสร้างของชิ้นงานเชื่อม ทั้งที่เป็นบริเวณแนวเชื่อม (Weld zone : WZ) และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat affected zone : HAZ) ดังแสดงในรูปที่ 6.7 โดยกรณีถ้าปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานสูง WZ และ HAZ จะมีความกว้างมากว่ากรณีปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานต่ำ



รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ของปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงาน (Heat input) กับอัตราการเย็นตัว (Cooling rate)
ที่มา : Review, MAPI : Metals, Metallurgy Journal, 2017



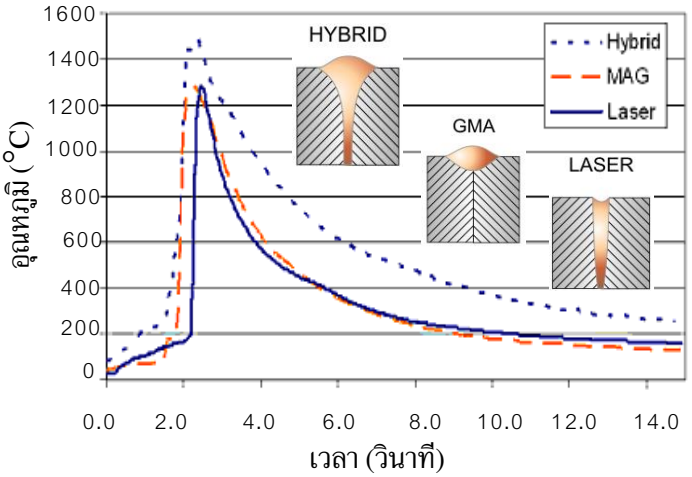
รูปที่ 6.7 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแต่ละโซนที่ได้รับอิทธิพลจากปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงาน (Heat input)
ที่มา : Review, MAPI : Metals, Metallurgy Journal, 2017

3.1 อัตราการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานของการเชื่อม (Heat rate of welding)

V.M. Radhakrishan (2005) ได้กล่าวถึงอัตราการป้อนความร้อนให้แก่ชิ้นงานไว้ว่า เป็นอัตราของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นงานโลหะที่เชื่อมจากที่ระดับอุณหภูมิห้อง (Room temperature) จนถึงระดับอุณหภูมิของการเชื่อม (Welding temperature) ต่อช่วงของเวลา ซึ่งจะมีหน่วยวัดเป็น องศา/เวลา เช่น องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง (^{o}C/h) หรือ องศาเซลเซียสต่อนาที (^{o}C/min) เป็นต้น ซึ่งค่าความละเอียดขึ้นอยู่กับเครื่องมือวัด อัตราการให้ความร้อนแก่ของการเชื่อมขึ้นอยู่กับ กรรมวิธีการเชื่อม (Welding process) ค่าการนำความร้อนของโลหะเชื่อม (Thermal conductivity) และมวลของพื้นที่เนื้อเชื่อม (Mass of joint area) ซึ่งในทางปฏิบัติช่างเชื่อมจะต้องเผื่ออัตราการให้ความร้อนที่ต้องสูญเสียไปในระหว่างการเชื่อม และระหว่างที่โลหะชิ้นงานจะร้อนถึงจุดหลอมเหลว ที่ต้องสูญเสียไปกับบรรยากาศของสภาพแวดล้อม

อัตราการให้ความร้อนเร็วหรือช้าจะมีผลทั้งโครงสร้างภายในที่มีผลต่อขนาดและรูปร่างของเกรน และรูปทรงภายนอกที่มีผลต่อการบิดงอเสียรูปทรง รวมถึงการแตกร้าวของชิ้นงานเชื่อมด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน (Dissimilar welding) ดังนั้น ช่างเชื่อมจึงต้องมีเทคนิคต่าง ๆ ที่จะป้อนความร้อนให้แก่ชิ้นงาน โดยไม่ให้เกิดความเสียหาย เช่น การให้ความร้อนนำแก่ชิ้นงานก่อนเชื่อม (Preheating) การปรับมุมองศาของการเชื่อม (Angle torch) หรือการประยุกต์ใช้การเชื่อมแบบไฮบริด (Hybrid welding) ที่ซึ่งนำข้อดีของกรรมวิธีการเชื่อมมาใช้ร่วมกัน เช่น ไฮบริดทิก–มิก (TIG–MIG) หรือไฮบริดเลซอร์–มิก (LBW–MIG) และอีกหลายกรรมวิธีการเชื่อมเป็นต้น ซึ่งไฮบริดแต่ละคู่ก็จะมีขีดความสามารถในการป้อนความร้อนให้แก่ชิ้นงานในอัตราที่รวดเร็วแตกต่างกัน ดังแสดงตัวอย่างของการเชื่อมแบบไฮบริด เลเซอร์–แม๊ก (LBW–MAG) ในรูปที่ 6.8

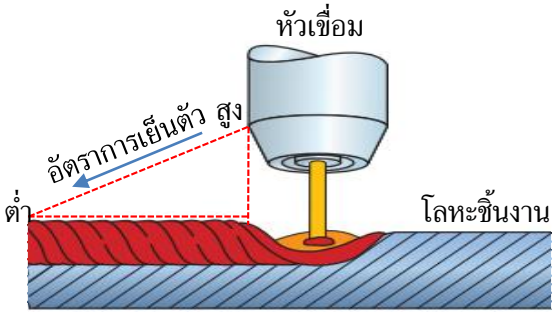
อัตราการให้ความร้อนที่เร็ว (High heating rate) จะมีผลกระทบโดยตรงกับขนาดความกว้างของแนวเชื่อม กล่าวคือ ขนาดของแนวเชื่อมจะแคบเล็ก และมีอัตราการหลอมที่ลึก (Keyhole) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่มีพลังงานลำแสงที่สร้างความร้อนได้สูงและรวดเร็ว เช่น การเชื่อมด้วยอาร์กพลาสมา (Plasma Arc Welding : PAW) การเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์ (Laser Beam Welding : LBW) และ การเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Welding : EBW) เป็นต้น



รูปที่ 6.8 อัตราการป้อนความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานของการเชื่อมแบบไฮบริด *ที่มา : Materials Research Conference, London 17–18 February, 2003*

3.2 อัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อม (Cooling rate of welding)

อัตราการเย็นตัวของการเชื่อม เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในแนวเชื่อมเมื่อเวลาผ่านไป จากระดับอุณหภูมิของน้ำโลหะเหลว (Melting point) ลดลงมาจนถึงระดับอุณหภูมิห้อง (Room temperature) ที่กลายเป็นของแข็งทั้งหมด โดยอัตราการเย็นตัวจะสูงมากที่บริเวณติดกับบ่อหลอมละลายและจะลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะทางที่ห่างออกไปจากบ่อหลอมละลาย ดังแสดงในรูปที่ 6.9 อย่างไรก็ตามเส้นอัตราความเร็วที่เกิดขึ้นของแต่ละงานเชื่อมจะลาดชันมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับความสามารถระบายความร้อนของโลหะชิ้นงานเชื่อม การสูญเสียความร้อน การให้ความร้อนโลหะชิ้นงานก่อนการเชื่อม (Preheat) ซึ่งรวมถึงการควบคุมอัตราการเย็นตัวด้วยอุปกรณ์เครื่องมือพิเศษที่สร้างขึ้น เช่น ชุดอุปกรณ์อุ่นชิ้นงานหรือชุดอุปกรณ์ระบายความร้อนด้วยน้ำ เป็นต้น



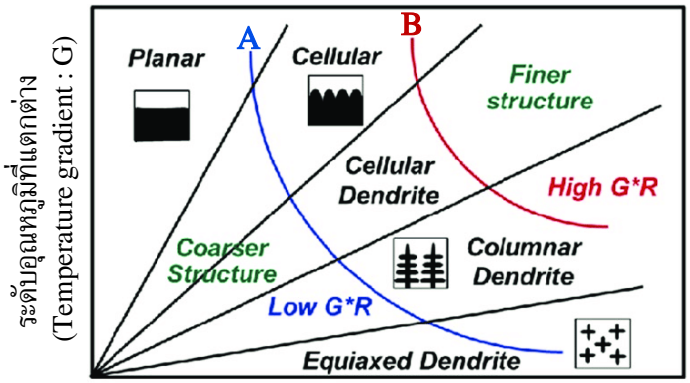
รูปที่ 6.9 อัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อมตามระยะห่างจากบ่อหลอมละลาย *ที่มา : Buried arc transfer mode in welding, 2010*

ในทางโลหะวิทยางานเชื่อม อัตราการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายถือว่ามีอิทธิพลต่อโครงสร้าง (Structure) และสมบัติ (Properties) ของแนวเชื่อมเป็นอย่างยิ่ง คำกล่าวในงานวิจัยของ Chamara Kumara Ph.D. Thesis (2018)

- กรณีที่อัตราการเย็นตัวช้า (Low/Slow cooling rate) กลไกการแข็งตัวจะเกิดสมดุลทางความร้อน ซึ่งที่อัตราความร้อนเข้าและออก เท่ากัน/ใกล้เคียงกัน โดยที่ทำให้น้ำโลหะเหลวในบ่อหลอมละลายมีเวลาในการจัดเรียงโครงสร้างอย่างสมดุล โครงสร้างที่ได้จึงเป็นโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวกัน

อย่างเป็นระเบียบไม่บิดเบี้ยว และจะเป็นโครงสร้างแบบเกรนหยาบ (Coarser structure) ขนาดและรูปทรงใกล้เคียงกัน ไม่เกิดความเครียดในเนื้อโลหะ (Stress Concentration) สมบัติของแนวเชื่อมมีความเหนียว ไม่แตกร้าวขณะเย็นตัว (Hot crack) บ่อหลอมละลายด้วยมีเวลามากเพียงพอในการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง ดังแสดงเส้นโค้งการเย็นตัว เส้น A ในรูปที่ 6.10

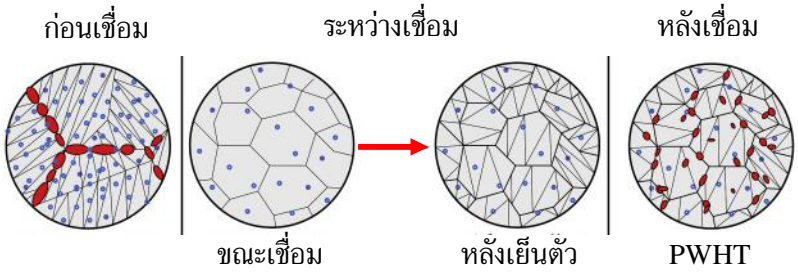
- กรณีที่อัตราการเย็นตัวเร็ว (High/Rapid cooling rate) กลไกการแข็งตัวจะเป็นแบบไม่สมดุลทางความร้อน โดยอัตราการระบายความร้อนออกจะเร็วกว่าอัตราการป้อนความร้อนเข้า ทำให้บ่อหลอมละลายเย็นตัวกลายเป็นของแข็งที่รวดเร็ว (Rapid solid) ด้วยพฤติกรรมในลักษณะนี้โครงสร้างของแนวเชื่อมจะเกิดการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ เกิดการบิดเบี้ยวของโครงสร้าง และเกิดความเครียดภายในเนื้อโลหะเชื่อม แนวเชื่อมจะเกิดความแข็งสูง เกิดการแตกร้าวได้ง่าย หรืออาจบิดงอหรือเสียรูปทรง โครงสร้างที่เย็นตัวเร็วจะมีลักษณะที่เป็นแบบละเอียด (Finer structure) ดังแสดงเส้นโค้งการเย็นตัว เส้น B ในรูปที่ 6.10 โดยปกติแนวเชื่อมที่เย็นตัวเร็วจะต้องผ่านขั้นตอนการทำเทมเปอร์ริ่ง (Tempering) ที่เป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานหลังเชื่อมเพื่อต้องการให้โครงสร้างเกิดการปรับลดความเครียดแข็งลง ซึ่งก็คือการทำ “Post heating”



รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ของอัตราการเย็นตัวต่อกลไกการเกิดโครงสร้างของแนวเชื่อม *ที่มา : Chamara Kumara, Licentiate Thesis Production Technology, 2018*

ขบวนการปรับปรุงโครงสร้างของแนวเชื่อมด้วยการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานหลังเชื่อม (PWTH) มีเจตนาที่ต้องการให้โครงสร้างสร้างของแนวเชื่อมเกิดการปรับตัวใหม่ให้อยู่ในสภาวะสมดุลมากที่สุด ซึ่งพลังงานความร้อนที่ป้อนให้แก่ชิ้นงานนั้นจะต้องไม่สูงมากจนถึงจุดหลอมละลายของโลหะนั้น ๆ โดยปกติในทางปฏิบัติระดับอุณหภูมิจะสัมพันธ์กับระยะเวลา กล่าวคือ ถ้ากรณีเลือกใช้ระดับอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง จะใช้เวลาป้อนความร้อนที่สั้น การปรับเปลี่ยนของโครงสร้างจะเกิดขึ้นแบบรวดเร็ว แต่มีความเสี่ยงที่จะเกิดการรวมตัวของก้อนเกรน กลายเป็นโครงสร้างเกรนขนาดใหญ่สูญเสียสมบัติทางกลที่ดีบางอย่างไป ข้อดีคือ ปฏิบัติงานได้อย่างรวดเร็ว ส่วนในกรณีที่เลือกใช้ระดับอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำ จะใช้เวลาป้อนความร้อนที่ยาวนานขึ้น การปรับเปลี่ยนของโครงสร้างจะเกิดขึ้นแบบช้า ๆ โครงสร้างที่ได้จะมีขนาดเกรนที่ละเอียดเล็ก ๆ สมบัติทางกลโดยรวมจะมีแนวโน้มที่ดี ดังแสดงตัวอย่าง

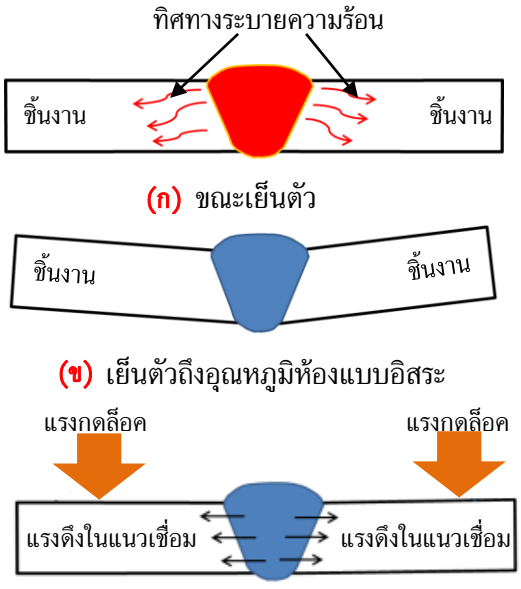
ลำดับของกลไกการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างตลอดขบวนการเชื่อม ของเหล็กกล้าผสมเกรด P 91 ใน รูปที่ 6.11 ที่เปรียบเทียบให้เห็นถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างในสภาพก่อนเชื่อม (As-received) ระหว่างเชื่อม (As-weld condition) และหลังเชื่อม (After weld)



รูปที่ 6.11 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแนวเชื่อมที่ผ่านการให้ความร้อนหลังเชื่อม (PWTH)

ที่มา : Chandan Pandey et al. Journal of Alloy and Compounds, Vol.743, pp. 332-364, 2018

● กรณีที่เกิดการบิดตัวโก่งงอ เสียรูปทรงของชิ้นงานเชื่อม (Distortion of weld metals) กลไกการเย็นตัวและพฤติกรรมการเสียรูปทรงของชิ้นงานเมื่อผ่านขบวนการเชื่อม จะมีผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมอย่างมาก โดยปัจจัยหลัก ๆ ที่มีผลต่อการบิดตัวโก่งงอส่วนใหญ่เกิดจากเรื่องของ การออกแบบรอยเชื่อม (Welding design) ปัจจัยของการเชื่อม (Welding parameter) และรวมถึงชนิดของวัสดุที่ทำการเชื่อม (Welding materials) โดยปกติการบิดตัวโก่งงอจะเกิดขึ้นระหว่างที่แนวเชื่อมกำลังเย็นตัว ดังแสดงในรูปที่ 6.12 รูป (ก) แสดงถึงทิศทางการระบายความร้อนของบ่อหลอมละลายผ่านตัวชิ้นงานโลหะเชื่อมที่ขณะกำลังเย็นตัว รูป (ข) แสดงถึงพฤติกรรมการบิดตัวโก่งงอ และเสียรูปทรงเมื่อชิ้นงานเชื่อมเย็น



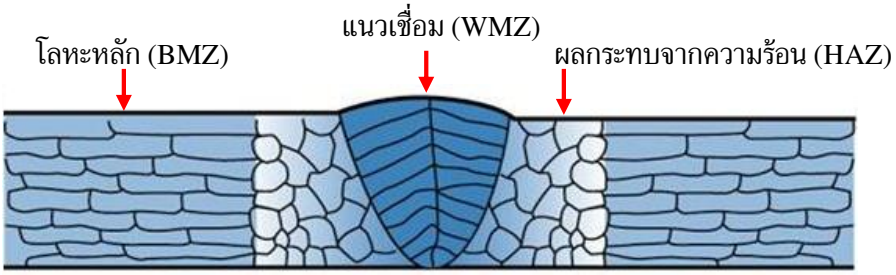
รูปที่ 6.12 พฤติกรรมการบิดตัวโก่งงอเสียรูปทรงของชิ้นงานเมื่อผ่านขบวนการเชื่อม

ที่มา : AWS D1.1/D1.1 : 2015 Structure Welding Code-Steel, 2015

ตัวแบบอิสระ และรูป (ค) แสดงถึงการใช้แรงกดล็อคชิ้นงานเชื่อมเพื่อบังคับไม่ให้เกิดการบิดตัวโก่งงออย่างอิสระ แต่ก็จะเกิดแรงดึงขึ้นภายในแนวเชื่อม (Weld tension) ที่จะทำให้เกิดความเครียดในเนื้อเชื่อมซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดการแตกร้าวได้ จึงต้องนำแนวเชื่อมไปผ่านการให้ความร้อนหลังเชื่อมเพื่อคลายความเครียดลงหรือให้หมดไป ที่เรียกขบวนการนี้ว่า “Post heating”

6.2 บริเวณต่าง ๆ ของแนวเชื่อม (Weld regions/zone)

ปัจจัยของการเชื่อมจะมีผลกระทบโดยตรงต่อแนวเชื่อม ที่ส่งผลทำให้แนวเชื่อมเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ที่ซึ่งสามารถแยกตามความแตกต่างของโครงสร้างเกรนออกเป็นโซนหรือบริเวณได้ 3 บริเวณ ดังแสดงในรูปที่ 6.13 ได้แก่ 1. บริเวณแนวเชื่อม (Weld metals zone : WMZ) 2. บริเวณผลกระทบจากความร้อน (Heat affected zone : HAZ) และ 3. บริเวณไม่กระทบจากความร้อนหรือโลหะหลัก (Base metal/parents zone : BMZ) ซึ่งได้สรุปอ้างอิงจาก Larry Jeffus et al. (2010) และจะอธิบายเพิ่มเติมถึงรายละเอียดของแต่ละโซน ดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.13 ความแตกต่างของโครงสร้างเกรนในชิ้นงานเมื่อผ่านขบวนการเชื่อม

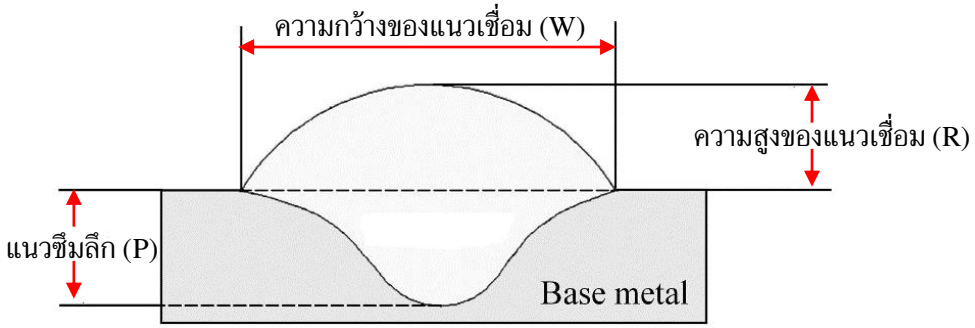
ที่มา :Welding Skill, Processes and Practices for Entry–Level Welders, 2010

1. บริเวณแนวเชื่อม (Weld metals zone : WMZ) หรืออาจเรียกว่า บริเวณหลอมละลาย (Fusion zone) ซึ่งเป็นส่วนบริเวณที่ปลายของโลหะชิ้นงานทั้งคู่เกิดการหลอมเหลวเข้าด้วยกันที่เรียกว่าบ่อหลอมละลาย (Weld pool) เมื่อปล่อยให้น้ำโลหะของบ่อหลอมละลายเย็นตัวลงก็จะได้เป็นของแข็งแนวเชื่อมที่เชื่อมต่อกัน โดยลักษณะของแนวเชื่อมจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 6.14 คือ

ก. ส่วนของความกว้างของแนวเชื่อม (Width of weld metal : W) เป็นระยะขนาดของเนื้อเชื่อมที่วัดจากขอบของรอยเชื่อมด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งตรงข้าม และจะต้องมีขนาดความกว้างที่เท่ากันตลอดความยาวของแนวเชื่อม

ข. ส่วนของความสูงแนวเชื่อม (Reinforcement of weld metal : R) เป็นระยะที่แสดงถึงความนูนสูงของเนื้อเชื่อมที่วัดจากผิวระดับของโลหะงาน

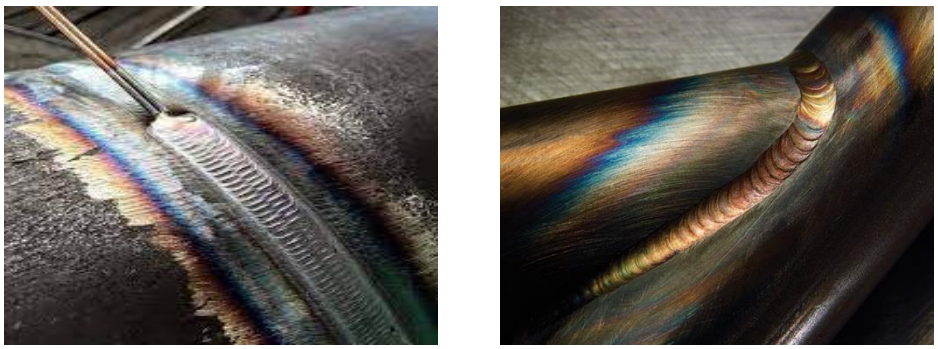
ค. ส่วนของการซึมลึกของแนวเชื่อม (Penetration of weld metal : P) เป็นส่วนที่ระบุระดับความลึกของแนวเชื่อม ซึ่งจะวัดจากระดับผิวของโลหะงานลึกลงไปในแนวเชื่อม



รูปที่ 6.14 ลักษณะส่วนประกอบของแนวเชื่อม (Weld metal)

ที่มา : MDPI–Journal Sensors , 16, 1500, doi : 10.3390/S16091500, 2016

โดยปกติทั่ว ๆ ไปในขบวนการเชื่อมจะมีทั้งแบบวิธีที่มีการเติมเนื้อโลหะลงไปในบ่อหลอมละลายที่เรียกว่า ลวดเชื่อม (Filler metals) กับการเชื่อมที่ไม่ใช้ลวดเติม (Non– filler metals) โดยจะอาศัยเอาเนื้อของโลหะชิ้นงานทั้งคู่หลอมละลายติดกัน ที่เรียกกันว่า การเชื่อมแบบ Autogenous ซึ่งแนวเชื่อมของทั้งสองแบบมีลักษณะรูปทรงที่แตกต่างกัน ดังแสดงการเปรียบเทียบของแนวเชื่อมในรูปที่ 6.15 โดยแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อมจะมีส่วนของความนูนหรือความสูงของแนวเชื่อมที่สูงกว่าพื้นผิวของโลหะงาน ด้วยเพราะได้รับปริมาณของเนื้อโลหะที่เพิ่มเติมจากลวดเชื่อม ดังแสดงเป็นตัวอย่างของการเชื่อมทิกแบบเติมลวดเชื่อมในรูปที่ 6.15 (ก) สำหรับแนวเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม ลักษณะของแนวเชื่อมจะไม่มีความนูนสูงของแนวเชื่อม ด้วยเหตุเพราะการเชื่อมติดกันจะอาศัยเนื้อของโลหะงาน ที่หลอมเหลวแล้วไหลไปรวมกันเป็นแนวเชื่อม ทำให้บริเวณของแนวเชื่อมจึงมีระดับที่ต่ำกว่าระดับผิวของโลหะชิ้นงาน ดังแสดงลักษณะของแนวเชื่อมในรูปที่ 6.15 (ข) ซึ่งการเชื่อมแบบไม่เติมลวดนี้จะรองรับกับขบวนการเชื่อมบางวิธี เช่น การเชื่อมทิก การเชื่อมพลาสมา การเชื่อมเลเซอร์ และการเชื่อมแก๊สอะเซทิลีน เป็นต้น นิยมใช้กับการเชื่อมงานที่ไม่ต้องการความแข็งของแนวเชื่อมมากนัก เน้นความสวยงามของแนวเชื่อม หรือต้องการไม่ให้ปรากฏเห็นแนวเชื่อม โดยทั่วไปจะเป็นเชื่อมประกอบชิ้นงานโลหะแผ่นบางเป็นสำคัญ

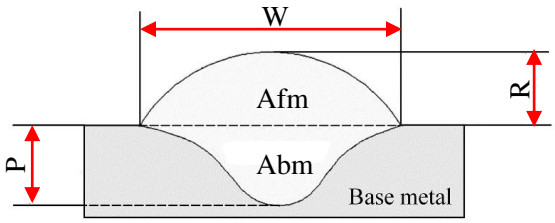


(ก) แนวเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อม **(ข)** แนวเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม

รูปที่ 6.15 เปรียบเทียบการเชื่อมแบบเติมลวดกับแบบไม่เติมลวดของการเชื่อมทิก (GTAW)

ที่มา : The welder : TIG welding–When looks matter, 2014

การเจือจาง (Dilution) ของแนวเชื่อม หรือที่เรียกกันว่า % Dilution จะหมายถึง การที่แนวเชื่อมเกิดการหลอมละลายผสมผสานกันของส่วนผสมทางเคมีที่เกิดจากโลหะชิ้นงาน (Base metals) กับโลหะลวดเชื่อม (Filler metal) ที่อยู่ในรูปของแนวเชื่อม (Weld metal) ดังแสดงในรูปที่ 6.16 ซึ่งเป็นหลักการเชื่อมแบบอุดมคติ กล่าวคือ โลหะเชื่อมกับลวดเชื่อมเป็นโลหะชนิดและเกรดเดียวกัน (Similar welding) จะเห็นได้ชัดเจนว่าเป็นการรวมกันของเนื้อเชื่อมส่วนที่เป็นบริเวณเนื้อโลหะลวดเติม (Afm) กับส่วนที่เป็นบริเวณเนื้อโลหะหลัก (Abm) โดยสามารถที่จะนำเอาพื้นที่เนื้อโลหะของทั้งสองส่วนมาเพื่อการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจาง (% Dilution) ส่วนผสมของแนวเชื่อมได้จากสูตรสมการที่ 6.4 ที่อ้างอิงจาก Janette Brezinova et al. (2016)



W = ความกว้าง (Width) Afm = บริเวณเนื้อโลหะลวดเติม (Filler metal area)

R = ความสูง (Reinforcement) Abm = บริเวณเนื้อโลหะหลัก (Base metal area)

P = แนวซึมลึก (Penetration)

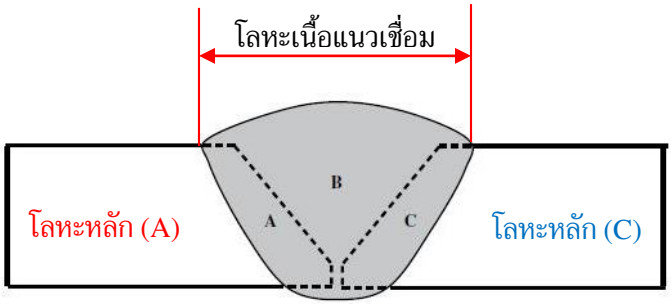
$$\% \text{ การเจือจาง (Dilution)} = [Abm / (Abm + Afm)] \times 100 \qquad \text{สมการที่ } 6.4$$

รูปที่ 6.16 หลักการหาค่าการเจือจาง (Dilution) ของแนวเชื่อม

ที่มา : Weld Overlay – Springer link, 2016

ความสำคัญของค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางจะมีผลกระทบต่อแนวเชื่อมมากในกรณีการเชื่อมของโลหะต่างชนิด (Dissimilar welding) ที่บางครั้งเรียกว่า Black & White welding (แถบยุโรป) ซึ่งการเชื่อมโลหะต่างชนิดนี้ มีทั้งแบบที่ต่างกันบนพื้นฐานของชนิดหรือเกรดของโลหะหลัก (Dissimilar base metal) และต่างกันที่ชนิดหรือเกรดของโลหะลวดเติม (Dissimilar filler metal) โดยหลักและวิธีการหาค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางของแนวเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมโลหะต่างชนิดนี้ (Dissimilar welding) จะแตกต่างจากการเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน (Similar welding) ดังแสดงในรูปที่ 6.17 และสมการของการหาค่าการเจือจางแนวเชื่อมโลหะต่างชนิด (Dilution in dissimilar) ดังแสดงในสมการที่ 6.5

การเชื่อมโลหะที่ต่างกันทั้งแบบต่างกันที่โลหะหลักและต่างกันที่โลหะลวดเติม เมื่อเกิดการหลอมละลายแล้วเย็นตัว จะเรียกขบวนการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายแบบนี้ว่า “ Heterogeneous welding” ด้วยเหตุผลที่ขบวนการเกิดนิวเคลียสของน้ำโลหะเชื่อมขณะเย็นตัวจะถูกกำหนดโดยตัวแปร



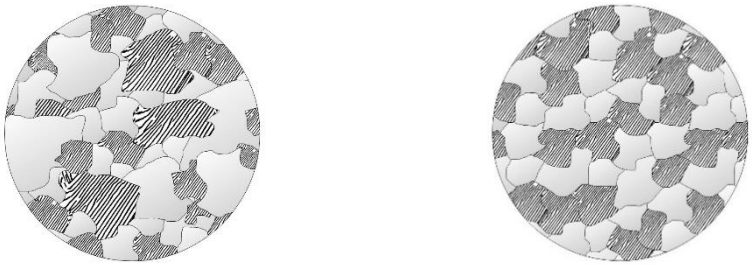
% การเจือจางเชื่อมโลหะต่างชนิด (Dilution in dissimilar)

$$= \frac{A + C}{A + B + C} \times 100 \qquad \text{สมการที่ } 6.5$$

รูปที่ 6.17 หลักการหาค่าการเจือจางแนวเชื่อมโลหะต่างชนิด (Dilution in dissimilar)

ที่มา : Rex Thomas Alexandre. Thesis of Welding Engineering, Ohio State University, 2016

ที่เป็นองค์ประกอบของส่วนผสมทางเคมีของโลหะหลักที่แตกต่างกัน หรือลวดเชื่อมที่แตกต่างกันเป็นสำคัญ ซึ่งโครงสร้างจุลภาคที่ได้จะเกิดเฟสต่าง ๆ ที่กระจายทั่วไปแบบไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 6.18 (ก) และในทางกลับกัน กรณีการเชื่อมโลหะที่เป็นชนิดหรือเกรดเดียวทั้งโลหะหลัก และโลหะลวดเติม จะเรียกขบวนการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายแบบนี้ว่า “ Homogenous welding” โครงสร้างจุลภาคที่ได้หลังการเย็นตัวก็จะเกิดเป็นเฟสต่าง ๆ ที่กระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอเหมือนกันทุกส่วน ก็ด้วยเหตุผลที่ส่วนผสมทางเคมีของบ่อหลอมละลายเกิดจากโลหะหลักและลวดเชื่อมเติมชนิดเดียว ส่วนผสมทางเคมีทุกบริเวณจึงไม่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้ปัจจัยที่กำหนดการเกิดนิวเคลียสขณะเย็นตัวเหมือนกัน ดังแสดงลักษณะของโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 6.18 (ข)



(ก) โครงสร้างจุลภาคแบบ Heterogeneous **(ข)** โครงสร้างจุลภาคแบบ Homogeneous

รูปที่ 6.18 โครงสร้างของแนวเชื่อมแบบ Heterogeneous และแบบ Homogeneous

ที่มา : TECS – Uniform microstructure of weld metal, 2012

ค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจาง (% Dilution) ยังขึ้นอยู่กับชนิดของรอยเชื่อมต่อ (Joint design) และขบวนการเชื่อม (Welding process) ดังแสดงในตารางที่ 6.2 ซึ่งพบว่าการออกแบบชนิดของรอย

เชื่อมต่อจะมีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางของแนวเชื่อม ด้วยเหตุเพราะรูปแบบของรอยต่อจะมีบทบาทในการกำหนดสัดส่วนการหลอมละลายของเนื้อโลหะหลัก (Base metals) และเนื้อโลหะลวดเติม (Filler metal) ตัวอย่างเช่น การออกแบบรอยเชื่อมต่อชนิดบากร่องตัววี (Single vee groove) ค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางจากลวดโลหะเติมมากกว่าจากเนื้อโลหะหลัก ด้วยเพราะรอยร่องบากจะต้องเชื่อมด้วยการเติมเนื้อลวดเชื่อมที่มาก ซึ่งในทางตรงกันข้าม กรณีการออกแบบชนิดรอยต่อเชื่อมแบบต่อชนไม่บากหน้างาน (Square butt joint) ค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางจากโลหะหลักจะมากกว่าจากเนื้อโลหะลวดเติม เพราะพื้นที่ว่างของรอยต่อน้อยอาศัยเนื้อโลหะหลักที่ต้องหลอมละลายออกมาช่วยเชื่อมประสานกันของแนวเชื่อม

นอกจากนี้ขบวนการเชื่อม (Welding process) ก็เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางของเนื้อเชื่อม เพราะแต่ละขบวนเชื่อมมีวิธีที่จะทำให้เนื้อโลหะหลอมละลายแตกต่างกัน เช่น บางขบวนการเชื่อมอาศัยความร้อนจากอาร์กของเนื้อโลหะหลักไปช่วยในการหลอมละลายเนื้อโลหะลวดเติม ส่วนบางขบวนการเชื่อมกลับตรงกันข้าม ที่อาศัยการอาร์กของโลหะลวดเติมเพื่อทำให้เนื้อโลหะหลักหลอมละลาย ซึ่งรวมถึงการเลือกสภาพขั้วของการเชื่อมว่าเป็นการต่อขั้วเชื่อมแบบใด กล่าวคือ แบบ DCEN ความร้อนจะเกิดที่โลหะหลัก 70 % และที่ลวดโลหะเติม 30 % ส่วนแบบ DECP จะตรงกันข้าม คือความร้อนจะเกิดที่โลหะหลัก 30 % และที่ลวดโลหะเติม 70 % ดังนั้นขบวนการเชื่อมที่แตกต่างกันจะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางของเนื้อโลหะเชื่อมแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 6.2 และนอกจากตัวแปรของขบวนการเชื่อมที่กล่าวมาแล้วนั้น ยังมีปัจจัยของพลังงานร้อนที่ป้อนเข้าสู่การเชื่อม (Heat input) ซึ่งเป็นที่ทราบกันว่าเป็นปัจจัยการเชื่อมที่สำคัญต่อการกำหนดอัตราการหลอมละลายของบ่อหลอมละลายขณะทำการเชื่อม

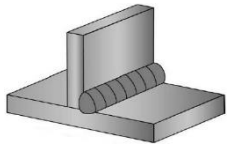
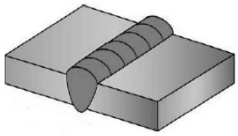
ค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจาง (% Dilution) จะแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของขบวนการเชื่อม ด้วยเหตุผลเพราะแต่ละขบวนการการเชื่อมจะใช้ปริมาณความร้อนไม่เท่ากัน บางขบวนการใช้ปริมาณความร้อนเพื่อการหลอมละลายน้อยบ่อหลอมละลายเล็กและแคบ ค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางจึงต่ำ แต่ในบางขบวนการเชื่อมมีการอาร์กที่รุนแรงเพราะต้องการที่จะสร้างบ่อหลอมละลายที่กว้าง ด้วยต้องการแนวเชื่อมที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งจะต้องเน้นการเติมเนื้อโลหะจากโลหะลวดเชื่อม การเชื่อมแบบนี้จะทำให้เกิด ค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางที่สูง (High dilution) ดังนั้น จึงพอจะสรุปได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางของส่วนผสมทางเคมีในแนวเชื่อมจะขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานของขบวนการเชื่อมในขณะที่เชื่อม (Heat input)

ยกตัวอย่างการหาค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางของแนวเชื่อม

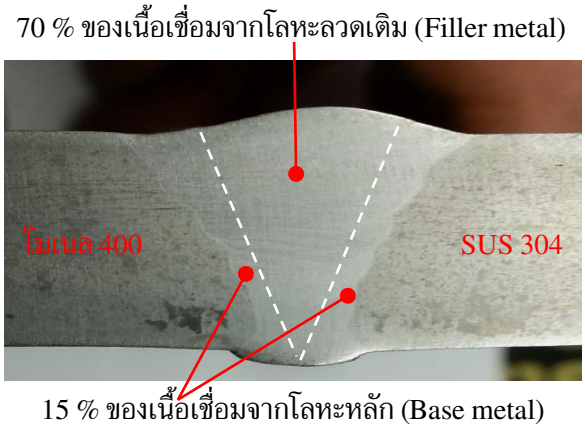
ตัวอย่างวิธีการหาค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางของแนวเชื่อมจากการคำนวณที่ส่วนผสมทางเคมีของการเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดกัน (Dissimilar welding) ระหว่างโลหะผสมเกรดโมเนล 400 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 ใช้โลหะลวดเชื่อม ENiCrFe−2 ด้วยขบวนการเชื่อม SMAW ดังแสดงรายละเอียดของแนวเชื่อมที่ได้ในรูปที่ 6.19 อ้างอิงจาก B.J. Moniz & R.T. Miller (2004)

ตารางที่ 6.2 ชนิดรอยต่อและขบวนการเชื่อมที่สัมพันธ์กับค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางของเนื้อเชื่อม

ที่มา : KWE (Korea Welding Engineer) : Dilution in welding, 2011

ชนิดของรอยเชื่อมต่อ(Joint design)	ค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจาง (% Dilution)
	SMAW ≈ 20 % โลหะหลัก 80 % โลหะลวดเติม GTAW ≈ 20 % โลหะหลัก 80 % โลหะลวดเติม SAW ≈ 80 % โลหะหลัก 20 % โลหะลวดเติม
	ต่อชนบากร่องตัว V 30 – 40 % โลหะหลัก 60 – 70 % โลหะลวดเติม ต่อชนไม่บากร่อง ‖ 75 – 85 % โลหะหลัก 15 – 25 % โลหะลวดเติม

ชนิดของขบวนการเชื่อม (Welding process)	ค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางโดยประมาณ (% Dilution)
SMAW	≈ 25 – 40 %
SAW	≈ 25 – 50 %
FCAW	≈ 20 – 25 %
GMAW	≈ 25 – 50 %
GTAW	≈ 25 – 50 %
ESW	≈ 7 – 12 %



รูปที่ 6.19 ตัวอย่างลักษณะของแนวเชื่อมสำหรับการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจาง

ที่มา : Welding Skill : Welding Metallurgy, 2004

จากรูปที่ 6.19 อัตราการเจือจาง 30 % ใช้ในการคำนวณการเข้ามาผสมของส่วนผสมทางเคมี (Deposited) ในแนวเชื่อมและ 70% ของเนื้อเชื่อมได้จากส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมกับส่วนผสมทางเคมีของโลหะหลักของทั้งสองด้านที่ต่างกัน ซึ่งด้านละ 15 % (เนื่องจากเป็นการเชื่อมโลหะหลักต่างชนิดกัน) โดยที่มีข้อมูลส่วนผสมหลักดังนี้

ก. โลหะหลักโมเนล 400 มีส่วนผสมหลัก 67 % Ni และ 32 % Cu

ข. โลหะหลัก SUS 304 มีส่วนผสมหลัก 8 % Ni 18 % Cr และ 74 % Fe

ค. โลหะลวดเชื่อม ENiCrFe−2 มีส่วนผสมหลัก 70 % Ni 15 % Cr และ 8 % Fe

ทำการเชื่อมแบบหลายแนว (Multi pass welding) ซึ่งส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อม 70 % ได้มาจากโลหะลวดเชื่อม และ 15 % ได้มาจากโลหะหลัก โดยจะมีองค์ประกอบของส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อมตามแต่ละแหล่งที่มาของส่วนผสม ดังนี้

ส่วนผสมทางเคมีในแนวเชื่อมจากลวดเชื่อม ENiCrFe−2 คือ

70 % x 70 % นิกเกิล	=	นิกเกิล 49 %
70 % x 15 % โครเมียม	=	โครเมียม 10.5 %
70 % x 8 % เหล็ก	=	เหล็ก 5.6 %

ส่วนผสมทางเคมีในแนวเชื่อมจากโลหะหลัก โมเนล 400 คือ

15 % x 67 % นิกเกิล	=	การเจือจางนิกเกิล 10 %
15 % x 32 % ทองแดง	=	การเจือจางทองแดง 4.8 %

ส่วนผสมทางเคมีในแนวเชื่อมจากโลหะหลัก เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 คือ

15 % x 8 % นิกเกิล	=	การเจือจางนิกเกิล 1.2 %
15 % x 18 % โครเมียม	=	การเจือจางโครเมียม 2.7 %
15 % x 74 % เหล็ก	=	การเจือจางธาตุเหล็ก 11.1 %

องค์ประกอบส่วนผสมทางเคมีรวมที่คำนวณได้ของเนื้อโลหะแนวเชื่อมได้มาจากการเพิ่มส่วนผสมทางเคมีจากโลหะลวดเชื่อมลงในส่วนโลหะหลัก คือ

ส่วนผสมของนิกเกิล (49 %Ni + 10 %Ni + 1.2 %Ni) = 60.2 %

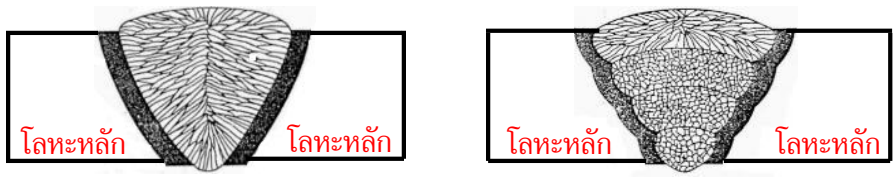
ส่วนผสมของโครเมียม (10.5 %Cr + 2.7% Cr) = 13.2 %

ส่วนผสมของเหล็ก (5.6 % Fe + 11.1 % Fe) = 16.7 %

เพิ่มส่วนผสมของทองแดง 4.8 %

จากการคำนวณพบว่าองค์ประกอบส่วนผสมทางเคมีจะไม่เท่ากับ 100 % ตามหลักการคิดสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ ด้วยเพราะว่ามีเปอร์เซ็นต์เล็กน้อยขององค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ที่เป็นส่วนผสมอยู่ในโลหะหลักและโลหะลวดเติมที่ไม่ได้นำมารวมอยู่ในการคำนวณ

จากการศึกษาวิจัยถึงการเจือจางส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อม D.K. Bhattacharya (2009) เขียนรายงานว่าแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมแบบแนวเดียวหรือรอบเดียว (Single pass weld) จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางของส่วนผสมทางเคมีในเนื้อเชื่อมเท่ากันทุกบริเวณ ส่วนแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมแบบหลายแนวหรือหลายรอบ (Multiple pass weld) จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางของส่วนผสมทางเคมีในเนื้อเชื่อมที่ไม่เท่ากันทุกบริเวณ กล่าวคือ บริเวณเนื้อเชื่อมส่วนของราก (Root bead) จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางที่เท่ากัน ด้วยเพราะร่องของรอยต่อส่วนนี้แคบเชื่อมเพียงรอบเดียวก็เต็มร่องว่าง จึงเป็นแบบ Single pass weld ส่วนถัดมาช่องว่างรอยต่อก็กว้างขึ้นต้องเชื่อมด้วยจำนวนรอบที่มากขึ้น เนื้อโลหะเชื่อมแต่ละรอบก็จะเป็นสัดส่วนผสมทางเคมีจากโลหะลวดเติมมากกว่าส่วนผสมทางเคมีจากโลหะหลัก จึงเป็นต้นเหตุของการที่ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเจืองจางของเนื้อเชื่อมไม่สม่ำเสมอเท่า ๆ กันทุก ๆ บริเวณของแนวเชื่อม โดยสัดส่วนของธาตุผสมทางสารเคมีจะมีแนวโน้มใกล้เคียงหรือเหมือนกันกับส่วนผสมทางเคมีของโลหะลวดเติม ดังแสดงการเปรียบเทียบลักษณะของแนวเชื่อม ที่เชื่อมแบบแนวเดียวหรือรอบเดียว กับแนวเชื่อมแบบหลายแนวหรือหลายรอบ ในรูปที่ 6. 20 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



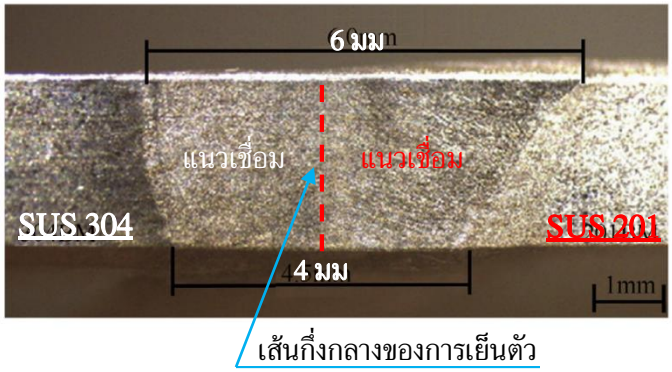
(ก) การเชื่อมแบบแนวเดียวหรือรอบเดียว (Single pass weld)

(ข) การเชื่อมแบบหลายแนวหรือหลายรอบ (Multiple pass weld)

รูปที่ 6.20 ลักษณะของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยจำนวนรอบเชื่อมที่ไม่เท่ากัน

ที่มา : D.K. Bhattacharya : Microstructure of welded joints, 2009

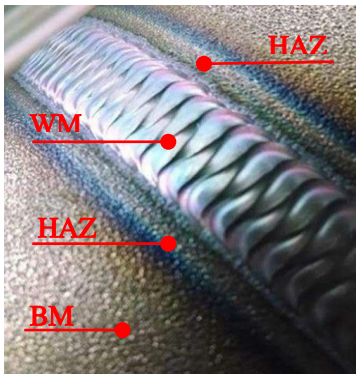
นอกจากนี้ยังมีงานศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเชื่อมโลหะต่างชนิด (Dissimilar welding) โดย Wichan Chuaiphan et al. (2019) มีข้อมูลเผยแพร่ว่า การเชื่อมแบบหลอมละลายของโลหะต่างชนิดกันที่ทั้งคู่มีความแตกต่างของอุณหภูมิจุดหลอม เมื่อทำการเชื่อมพบว่าโลหะที่มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าจะเกิดการหลอมละลายก่อนและบ่อหลอมละลายของการเชื่อม (Weld pool) ก็จะเอียงไปทางนั้น เมื่อน้ำโลหะเย็นตัวลงรูปร่างของแนวเชื่อมจะไม่สมดุล เนื้อเชื่อมจะเอียงและมีสัดส่วนพื้นที่ของเนื้อเชื่อมไปทางโลหะที่จุดหลอมเหลวต่ำกว่า ดังแสดงตัวอย่างของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติกต่างเกรดระหว่าง เกรด SUS 304 กับ SUS 201 ด้วยขบวนการเชื่อมทิก แบบไม่เติมลวดเชื่อม (Autogenous welding) ในรูปที่ 6.21 ซึ่งลักษณะแนวเชื่อมดังกล่าวจะมีผลต่อวิธีการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจาง โดยจะต้องกำหนดสัดส่วนพื้นที่ของการหลอมละลายให้ถูกต้องตามความจริงของเนื้อเชื่อมที่เกิดจากการละลายของส่วนผสมทางเคมีที่ไม่สมดุลของทั้งสองข้างของแนวเชื่อมที่ติดกับโลหะหลักนั้น ๆ ตามหลักการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางของการเชื่อมโลหะต่างชนิด ที่แสดงใน สมการที่ 6.5



รูปที่ 6.21 ลักษณะของแนวเชื่อมโลหะต่างชนิดที่มีอัตราการหลอมละลายไม่เท่ากัน

ที่มา : Wichan Chuaiphan : Journal of Defence Technology, 15, 170–178, 2019

2. บริเวณผลกระทบจากความร้อน (Heat affected zone : HAZ) หมายถึง ส่วนของบริเวณพื้นที่อยู่ใกล้ชิดหรือติดกับแนวเชื่อม ซึ่งบริเวณนี้จะมีอุณหภูมิความร้อนที่สูงมากขณะที่ทำการเชื่อม แต่ถึงแม้จะสูงมาก ก็ไม่มากเพียงพอต่อการที่จะทำให้โลหะหลักเกิดการหลอมละลายกลายเป็นเนื้อเชื่อมได้ และด้วยอิทธิพลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมดังกล่าว จะส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของเนื้อโลหะหลักที่อยู่ในบริเวณถัดมาได้ ซึ่งจะเรียกบริเวณนี้ว่า “บริเวณกระทบร้อน” หรือที่นิยมเรียกกันในกลุ่มของวิศวกรรมการเชื่อมว่า “HAZ” ดังแสดงตำแหน่งของการเกิดบริเวณกระทบร้อนบนแนวเชื่อมในรูปที่ 6.22 จากรูปจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าบริเวณกระทบร้อน หรือ HAZ จะมีขนาดความกว้างที่ห่างจากขอบของแนวเชื่อมเท่ากันตลอดแนว และเหมือนกันทั้งสองข้างของแนวเชื่อม นั่นหมายถึงว่าความร้อนจากบ่อหลอมละลายที่กระจายผ่านเนื้อโลหะหลักจะเท่ากันหรือมีกลไกที่เหมือนกัน แต่สำหรับกรณีการเชื่อมต่อของโลหะต่างชนิด (Dissimilar welding) ก็จะมีโอกาสที่ขนาดของความกว้างและระยะต่าง ๆ ของบริเวณกระทบร้อนของทั้งสองข้างจะแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะของวัสดุนั้น ๆ และมีผลต่อสมบัติของแนวเชื่อมที่เกิดจากอิทธิพลของ HAZ ทั้งสองข้างที่ไม่เหมือนกันหรือไม่เท่ากัน ช่างเชื่อมอาจจะต้องพิจารณาถึงรายละเอียดที่มากขึ้นสำหรับกรณีของการเชื่อมโลหะต่างชนิด

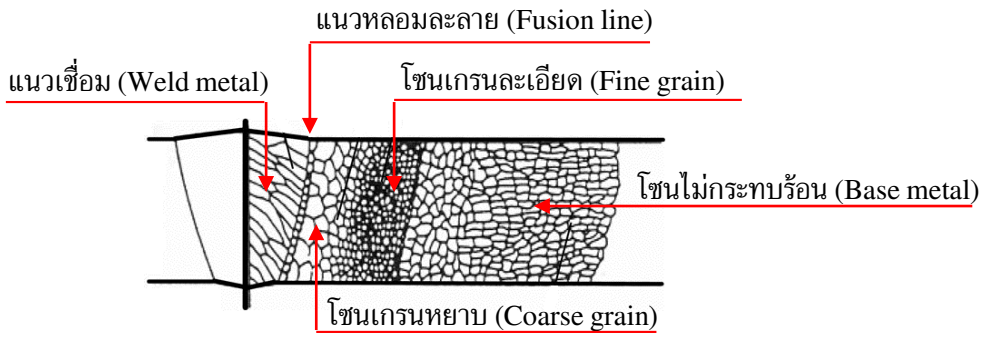


รูปที่ 6.22 ลักษณะของแนวเชื่อมที่เกิดบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนของการเชื่อม

ที่มา : Colossal –Welding, Metal welding , Welding design, 2011.

บริเวณกระทบร้อนหรือว่า HAZ นี้จะเกิดขึ้นเสมอสำหรับขบวนการเชื่อมแบบหลอมละลายอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และมีบทบาทโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเนื้อโลหะหลักที่บริเวณใกล้กับแนวเชื่อมไม่เหมือนกับเนื้อโลหะหลักส่วนอื่น ๆ ซึ่งเป็นผลกระทบที่เกิดจากการเชื่อมที่ไม่พึงประสงค์ จนปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีขบวนการเชื่อมสมัยใหม่ที่ต้องการเชื่อมแล้วไม่เกิดบริเวณกระทบร้อน หรือเกิดน้อยที่สุด เช่น ขบวนการเชื่อมทิก ขบวนการเชื่อมพลาสมา ขบวนการเชื่อมเลเซอร์ เป็นต้น โดยขบวนการเชื่อมเหล่านี้ต้องใช้พลังงานอาร์กที่สูง เพื่อให้โลหะหลอมเหลวอย่างรวดเร็วและเกิดเป็นบ่อหลอมละลายที่แคบ ๆ ความร้อนแพร่ออกไปไม่มากทำให้บริเวณกระทบร้อนแคบและมีพื้นที่น้อยลง แต่ก็มีต้นทุนต่อการเชื่อมที่สูงมาก อาจไม่เหมาะกับการเชื่อมประกอบงานที่เป็นงานอุตสาหกรรมการผลิตต้นทุนต่ำ

อย่างไรก็ตามถ้าวิศวกรงานเชื่อมเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาของโครงสร้างเนื้อโลหะที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อมก็สามารถที่จะออกแบบรอยต่อ เลือกขบวนการเชื่อม รวมถึงควบคุมการเชื่อมที่ลดผลกระทบดังกล่าวได้ โดยจะได้กล่าวถึงรายละเอียดทางโลหะวิทยางานเชื่อม (Welding metallurgy) ของโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในบริเวณกระทบร้อน ดังแสดงในรูปที่ 6.23 ซึ่งจะได้อธิบายถึงกลไกการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของแต่ละโซน ดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.23 การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่บริเวณได้รับผลกระทบจากความร้อนของการเชื่อม

ที่มา : Ali P. Gordon, International of Fracture, 126: 321–344, 2004

จากรูปที่ 6.23 จะประกอบด้วยบริเวณหรือโซนต่าง ๆ อ้างอิงจาก AWS (1994) ดังต่อไปนี้

1. โซนของแนวเชื่อม (Weld metal zone : WMZ) บริเวณนี้เป็นส่วนของแนวเชื่อมที่เกิดจากการที่บ่อหลอมละลายของน้ำโลหะ แล้วเย็นตัวลงมาได้เป็นของแข็งใหม่ที่มีรูปแบบหน้าตาของเกรนจะแตกต่างไปจากเกรนของโลหะหลักที่ก่อนเชื่อม โดยจะถูกกำหนดรูปร่างของเกรนด้วยกลไกและทิศทางการระบายของความร้อนจากบ่อหลอมละลายไปสู่ภายนอก ซึ่งจะผ่านตัวกลางที่เป็นโลหะหลักที่ทำการเชื่อมต่อ ส่วนใหญ่มีลักษณะเกรนเป็นแบบแบนรียาว ที่เรียกกันว่า Columnar grains

2. แนวหลอมละลาย (Fusion line: FL) บริเวณนี้จะอยู่ถัดออกไปที่ติดอยู่กับบ่อหลอมละลาย ซึ่งจะเป็นส่วนที่กั้นอยู่ระหว่างส่วนของโลหะที่เกิดการหลอมเหลว (Melting) กับส่วนที่ไม่เกิดการ

หลอมเหลว (Un–melting) บางครั้งจะเรียกว่า ขอบเขตการหลอมละลาย (Fusion boundary) ส่วนนี้จะแคบและเกรนเล็กยาวตลอดตามขนาดของบ่อหลอมละลาย และจะกว้างขึ้นเมื่อปริมาณความร้อนที่ป้อนเชื่อมสูงและโลหะหลักมีอัตราการนำความร้อนที่ต่ำ อุณหภูมิบริเวณนี้จะต่ำกว่าที่แนวเชื่อมไม่มาก

3. โซนเกรนหยาบ (Coarse grain) ส่วนนี้จะเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ซึ่งมีระดับอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง แต่เป็นส่วนที่เนื้อโลหะไม่หลอมละลาย แต่ด้วยเหตุที่ความร้อนจากการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายมีระดับอุณหภูมิที่สูงส่งผ่านมาในโลหะหลัก เป็นผลทำให้ขอบเกรน (Grain boundary) ของก้อนเกรนเดิมโลหะหลักเกิดการแพร่ซึมเข้าหากันกลายเป็นเกรนเดียวกันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นที่เรียกว่า “Grain growth” ทำให้บริเวณนี้มีจำนวนเกรนที่น้อยลงมีขนาดของก้อนเกรนใหญ่ขึ้น จึงมองเป็นลักษณะว่าเป็นรูปแบบของเกรนหยาบ

4. โซนเกรนละเอียด (Fine grain) ส่วนนี้จะเป็นโซนถัดมาของบริเวณที่ได้รับผลกระทบร้อน อุณภูมิส่วนนี้จะอยู่ที่ระดับของอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization temperature) ของวัสดุโลหะหลัก ซึ่งจะมีกลไกการเกิดผลึกใหม่ของโครงสร้าง (New grain) จึงทำให้เกิดเป็นก้อนเกรนใหม่ขึ้นพร้อม ๆ กันในเวลาเดียวกันหรือไกล้เคียงกันมาก โดยเกิดเป็นจำนวนมากและมีขนาดเท่า ๆ กัน ดังนั้นโซนนี้จึงมีลักษณะของเกรนที่เป็นแบบเล็กละเอียด

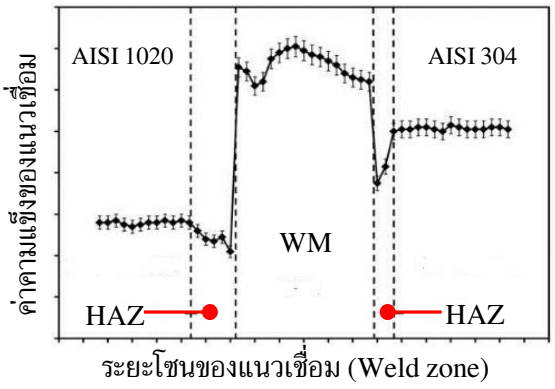
5. โซนไม่กระทบร้อน (Un–affected zone) ส่วนนี้หมายถึงเป็นโครงสร้างเดิมของเนื้อโลหะหลัก (Base metal) ที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ อันเนื่องมาจากอิทธิพลของความร้อนจากการเชื่อม ดังนั้นส่วนนี้จึงมีลักษณะของโครงสร้างที่ปกติตามแบบเดิมก่อนทำการเชื่อม

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดผลกระทบร้อน (Causes of heat affected zone)

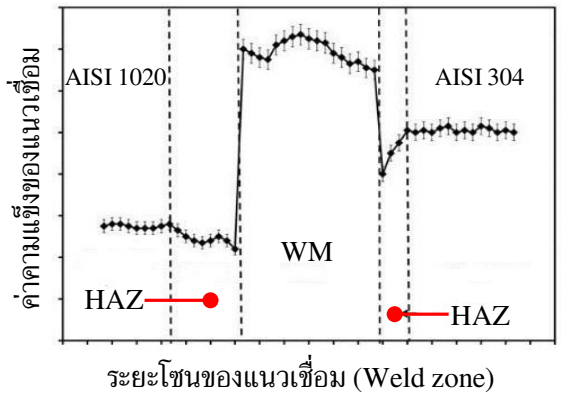
หลักการเชื่อมโลหะหรือตัดโลหะด้วยความร้อน ซึ่งเป็นที่ทราบกันทั่วไปว่าต้องใช้ความร้อนที่ต้องป้อนเข้าไปสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะที่เชื่อมหรือตัด และความร้อนเหล่านี้ก็จะต้องระบายออกไปผ่านตัวกลางโลหะชิ้นงานจึงเป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างโลหะวิทยาขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดผลกระทบร้อน เกิดจากปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้า (Heat input) กับกลไกการกระจายความร้อนของวัสดุโลหะ (Thermal diffusivity) อย่างไรก็ตามทั้งสองปัจจัยนี้ ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่าปัจจัยของการกระจายความร้อนผ่านตัวของวัสดุโลหะที่นำมาเชื่อมจะมีบทบาทและผลกระทบต่อขนาดของโซนต่าง ๆ มากกว่า ดังรายละเอียดของทั้งสองปัจจัย ดังนี้

- ปัจจัยของความร้อนที่ป้อนเข้า (Heat input) จัดว่าเป็นที่กระทบโดยตรง เพราะถ้าความร้อนที่ป้อนเข้าไปในการเชื่อมมีปริมาณที่ต่ำ อัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อมจะเร็ว ส่งผลทำให้ระยะของ HAZ

มีขนาดที่แคบหรือเล็กลง และในทางกลับกันถ้ากรณีที่ความร้อนที่ป้อนเข้าไปในการเชื่อมมีปริมาณที่สูงมากจะส่งผลทำให้อัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อมจะช้าลง ความร้อนทยอยระบายออกได้ช้า สะสมค้างอยู่ในโลหะหลักเป็นเวลานาน จึงเป็นเหตุให้เกิดผลกระทบจากความร้อนมาก ระยะ HAZ จึงมีขนาดที่กว้างขึ้น อย่างไรก็ตามปัจจัยความร้อนที่ป้อนเข้าอาจเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุงแก้ไขยากเพราะถูกกำหนดด้วยขบวนการเชื่อมและปัจจัยของการเชื่อมเป็นสำคัญ ซึ่งอาจพิจารณาเลือกใช้ขบวนการเชื่อมที่มีพลังของการอาร์กที่สูง ๆ ความร้อนจะได้ไม่กระจายเป็นวงกว้าง เช่น การเชื่อมพลาสมา การเชื่อมเลเซอร์หรือการเชื่อมด้วยลำแสงอิเลคตรอน เป็นต้น ดังแสดงการเปรียบเทียบขนาดของ HAZ ระหว่างขบวนการเชื่อม GTAW กับขบวนการเชื่อม SMAW บนกราฟทดสอบความแข็งในการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิม ในรูปที่ 6.24 ซึ่งเป็นผลการวิจัยเชิงทดลองของ Wichan Chuaiphan et al. (2014)



(ก) การเชื่อมแบบ GTAW



(ข) การเชื่อมแบบ SMAW

รูปที่ 6.24 การเปรียบเทียบขนาดของบริเวณได้รับผลกระทบจากความร้อนของการเชื่อม (HAZ) จากขบวนการเชื่อมที่แตกต่างกัน

ที่มา : Wichan Chuaiphan. Thesis of Doctoral Program in Material and Metallurgical Engineering, 2014

● ปัจจัยของการกระจายความร้อนผ่านตัวของวัสดุโลหะ (Thermal diffusivity) ขึ้นอยู่กับสมบัติด้านการนำความร้อนของวัสดุที่นำมาเชื่อม (Thermal conductivity) ซึ่งวัสดุที่มีความสามารถในการนำหรือถ่ายเทความร้อนไปสู่ภายนอกได้รวดเร็วก็จะทำให้บ่อหลอมละลายเย็นตัวเร็วขึ้น ซึ่งจะเป็นช่วยลดความกว้างของ HAZ ลง และในทางกลับกันถ้าวัสดุโลหะหลักมีสมบัติในการระบายความร้อนที่ต่ำบ่อหลอมละลายก็จะคงความร้อนไว้นาน ส่งผลทำให้ขนาดของ HAZ กว้างขึ้น ดังนั้น สำหรับกรณีที่ทำการเชื่อมโลหะที่ต่างชนิดกันที่ซึ่งโลหะหลักมีความสามารถในการนำความร้อนแตกต่างกันก็จะมีอิทธิพลที่จะทำให้ขนาดของ HAZ บนแนวเชื่อมทั้งสองข้างไม่เท่ากัน โดยผู้เขียนได้ทำวิจัยเชิงทดลองของการเชื่อมโลหะต่างชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1020) กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก (AISI 304) ด้วยขบวนการเชื่อมทิกพบว่าขนาด HAZ ของแนวเชื่อมด้านโลหะหลักเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีขนาดที่แคบกว่าทางด้านของโลหะหลักเหล็กกล้าคาร์บอน เหตุเพราะสมบัติทางด้านการนำความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมสูงกว่า ถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอกได้รวดเร็วกว่า ดังแสดง ในรูปที่ 6.24 และเป็นไปในทิศทางเดียวกันถึงแม้จะเชื่อมด้วยขบวนการเชื่อมที่แตกต่างกัน

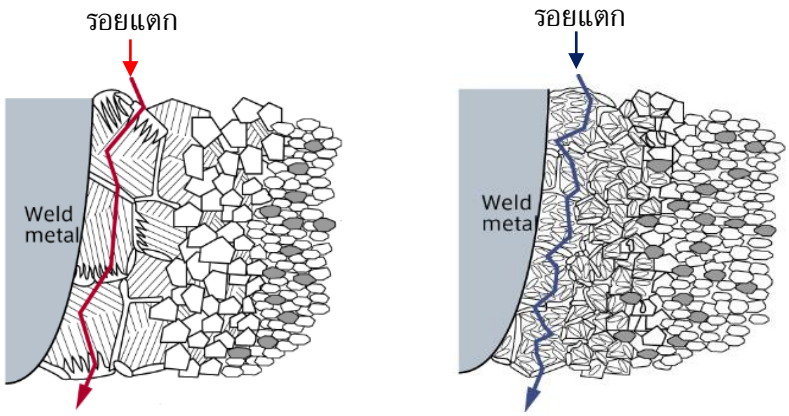
อิทธิพลของผลกระทบร้อนต่อสมบัติของแนวเชื่อม (Effect of heat affected zone)

“HAZ เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ แต่มันต้องมี” รู้จักกันดีในกลุ่มของช่างเชื่อม ที่เชื่อมต่อโลหะด้วยขบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) ซึ่งการเชื่อมจำเป็นต้องใช้ความร้อนเพื่อการหลอมโลหะให้ติดกันหรือต่อกัน แต่ในขณะเดียวกันความร้อนก็ส่งผลกระทบในเชิงลบต่อชิ้นงานที่ทำการเชื่อมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นจึงได้พยายามออกแบบงานเชื่อมและเลือกกรรมวิธีการเชื่อมที่ลดพื้นที่ของ HAZ ให้เกิดน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพราะพื้นที่ดังกล่าวนั้นจะส่งผลต่อสมบัติของแนวเชื่อมโดยตรง ทั้งสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมี ส่วนจะกระทบกับสมบัติด้านใดมากน้อยต่างกันนั้นก็ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุโลหะที่นำมาทำการเชื่อมเป็นสำคัญ ซึ่งสมบัติด้านต่าง ๆ ที่กระทบมากและพบเห็นอยู่บ่อย ๆ ในการเชื่อมพอจะรวบรวมได้ดังนี้

- ความแข็งแรงลดลง
- เกิดความเค้นตกค้าง
- ความเหนียวลดต่ำลง
- ลดความต้านทานการกัดกร่อน
- เกิดความไวต่อการแตกร้าว
- เกิดความแข็งเปราะจากไฮโดรเจน
- เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟสโครงสร้าง
- เกิดการออกซิเดชั่น (Oxidation)
- เกิดความแข็งเฉพาะที่ (Localized hardening)
- เกิดไนไตรดิ้งที่ผิว (Surface nitriding)

จากการศึกษาข้อมูลงานวิจัยทางด้านโลหะวิทยางานเชื่อม ได้มีการกล่าวถึงความเสียหายที่เกิดจากการแตกร้าว (Cracking) ของแนวเชื่อมที่บริเวณ HAZ พร้อมกับการศึกษาทดลองเพื่อหาวิธีการ

แก้ปัญหาการแตกร้าวดังกล่าวกันมากพอสมควร โดยมีงานวิจัยเชิงทดลองได้รายงานผลการทดลองไว้ว่า ขนาดของก้อนเกรน (Grain size) ที่บริเวณกระทบร้อนจะมีผลกระทบโดยตรงต่อความไวในการแตกร้าว (Susceptibility to cracking) กล่าวคือ กรณีที่บริเวณที่กระทบร้อน หรือ HAZ มีขนาดเกรนที่มีหยาบ (Coarse grains) จะมีความไวต่อการแตกร้าวสูงมากและในขณะเดียวกันอัตราการแตกร้าวก็จะสูงเช่นกัน (Crack propagation) เมื่อพิจารณาถึงรอยแตกร้าวจะพบว่า มีลักษณะเป็นรอยแตกร้าวแบบเปราะ (Brittle fracture) แต่สำหรับกรณีที่บริเวณที่กระทบร้อนมีขนาดเกรนที่เล็กหรือละเอียด (Fine grains) จะพบว่าความไวต่อการแตกร้าวของบริเวณ HAZ ต่ำ และมีอัตราการขยายตัวของการแตกร้าวที่ช้า ด้วยเหตุผลเพราะการที่มีขนาดเกรนเล็ก ๆ จะมีจำนวนของขอบเกรน (Grain boundary) ที่มาก ซึ่งปกติการแตกร้าวมักจะเริ่มต้นที่ขอบเกรนและลุกลามขยายการแตกไปตามขอบของเกรน ดังนั้น ขอบเกรนที่มากจะส่งผลให้เพิ่มระยะทางและเพิ่มเวลาของรอยแตกที่ลุกลาม ทำให้รอยแตกหักเกิดช้าลง เสมือน HAZ มีความเหนียวที่มากขึ้น (Toughness) และเมื่อพิจารณาถึงรอยแตกหักก็จะเห็นได้ชัดเจนว่ารอบแตกหักจะมีลักษณะเป็นแบบเหนียว (Ductile fracture) ดังแสดงเปรียบเทียบลักษณะการแตกร้าวของ HAZ ที่มีขนาดเกรนแบบหยาบ กับขนาดเกรนแบบละเอียด ในรูปที่ 6.25



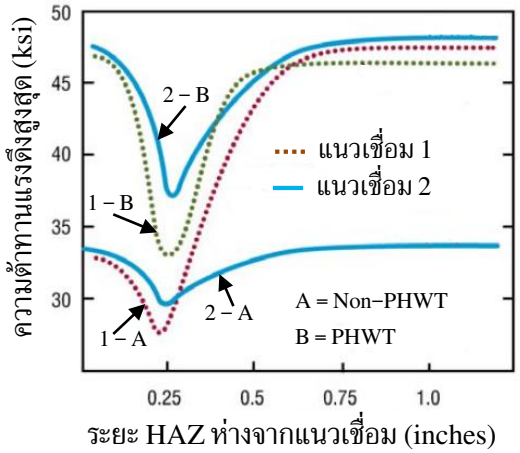
(ก) HAZ แบบเกรนหยาบ (Coarse grains) **(ข)** HAZ แบบเกรนละเอียด (Fine grains)

รูปที่ 6.25 การเปรียบเทียบการแตกร้าวของ HAZ แบบเกรนหยาบ กับ แบบเกรนละเอียด

ที่มา : Jian Yang and et al. Journal of Steel Research International. Vol. 2, Issue 5, 2014

จากคำอธิบายข้างต้น แสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าปัญหาของขนาดเกรนที่ใหญ่ หรือเกรนหยาบ ที่เกิดขึ้นในบริเวณ HAZ ของชิ้นงานเชื่อมจะไม่เกิดผลดีต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม โดยเฉพาะสมบัติด้านความเหนียวแน่น (Toughness) ที่ซึ่งจะทนต่อการแตกร้าวได้น้อย จึงได้มีการวิจัยทดลองพบว่ากรรมวิธีทางความร้อนหลังขบวนการเชื่อม (Post weld heat treatment) หรือที่รู้จักกันในคำย่อที่ว่า “PWHT” เป็นวิธีการที่สามารถแก้ปัญหาได้ โดยใช้หลักการให้ความร้อนกับชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมตรงบริเวณรอยแนวเชื่อม เพื่อที่จะนำความร้อนไปเป็นพลังงานกระตุ้นให้โครงสร้างบริเวณ HAZ ของแนว

เชื่อมเกิดการเปลี่ยนแปลง ระดับของความร้อนต้องสูงเกินระดับอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ของโลหะที่นำมาเชื่อม (Recrystallization temperature) เพื่อต้องการให้เกิดเป็นเกรนใหม่ที่มีขนาดละเอียด และเกิดการจัดเรียงตัวของเกรน มีความเป็นระเบียบ ซึ่งนอกจากนี้พบว่ากรรมวิธีทางความร้อนนี้จะยังช่วยลดความแข็ง ลดความเค้นตกค้าง กำจัดแก๊สไฮโดรเจนที่ละลายอยู่ในเนื้อเชื่อม และเพิ่มความเหนียวกับความแกร่งให้แก่เนื้อเชื่อมอีกด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับ HAZ ของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติกที่นำไปใช้กับงานที่มีสภาพแวดล้อมที่เกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรง จำเป็นต้องทำ PHWT เพื่อละลายอนุภาคโครเมียมคาร์ไบด์ ซึ่งผลการละลายจะช่วยให้เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมได้ดี (Resistance pitting corrosion) ดังตัวอย่างในรูปที่ 6.26 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่บริเวณ HAZ ของแนวเชื่อมโลหะอลูมิเนียมผสมระหว่างแนวเชื่อมที่ผ่านกับไม่ผ่านการทำ PHWT จากผลการทดลองจะเห็นได้ชัดเจนว่า ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของ HAZ เมื่อผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมจะให้ค่าที่เพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 6.26 การเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงของ HAZ ที่ผ่านกับไม่ผ่านขบวนการทำ PHWT

ที่มา : Theory and education, Weld failure, 2018

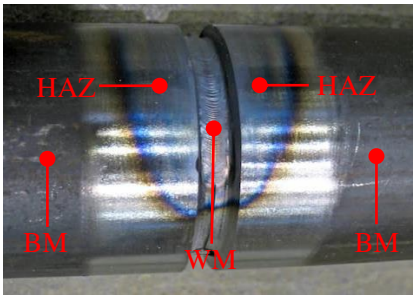
การพิจารณาตรวจสอบหรือประมาณการขนาดของ HAZ ด้วยสายตา

เบื้องต้นของการเชื่อมแบบหลอมละลาย หลังเชื่อมเสร็จผู้ปฏิบัติการเชื่อมหรือผู้ควบคุมการเชื่อมจะสามารถระบุขนาดความกว้างโดยประมาณของบริเวณ HAZ ได้ ด้วยวิธีการสังเกตจากสีของพื้นผิวโลหะหลัก (Base metal) ที่อยู่ถัดจากแนวเชื่อมได้ ซึ่งเป็นสีที่ถูกกำหนดเป็นมาตรฐานบ่งชี้ถึงระดับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะเชื่อม ซึ่งเรียกกันว่า “Heat Tint Colors” ดังแสดงในรูปที่ 6.27 พร้อมตัวอย่างชิ้นงานที่เชื่อมเพื่อแสดงการเกิดสีของบริเวณกระทบร้อน โดยปกติสีของ HAZ จะชัดเจนมากในการเชื่อมวัสดุโลหะกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิม และสีที่เกิดจะแปรเปลี่ยนไปตามปัจจัยของ ปริมาณธาตุโครเมียมที่ผสม ระดับออกซิเจนระหว่างการเชื่อม สภาพความพื้นผิว และสารปนเปื้อนที่บริเวณผิวโลหะเชื่อม เป็นต้น สำหรับมาตรฐาน American Welding Society (AWS) D18.2 ได้สร้างมาตรฐานแนวปฏิบัติการพิจารณาสีของแนวเชื่อม สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ดังแสดงในรูปที่ 6.28 สำหรับบอกขนาดความกว้างของ HAZ และระดับปริมาณออกซิเจนขณะเชื่อมได้ โดยมี No.1 ถึง No.10 นับเบอร์

น้อยจะมีปริมาณออกซิเจนต่ำ (No.1 = 10 ppm) และนับเบอร์มากจะมีปริมาณออกซิเจนสูง (No.10 = 25000 ppm) ส่วนปริมาณออกซิเจนที่นับเบอร์อื่น ๆ แสดงไว้ใต้รูปที่ 6.28 อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ สีของผิวบริเวณแนวเชื่อมที่ใช้บ่งชี้ขนาดของ HAZ อาจคลาดเคลื่อนได้บ้าง เนื่องจากสภาพแวดล้อมของการขบวนการเชื่อมจะมีตัวแปรอื่น ๆ อีกที่ส่งผลกระทบต่อสี เช่น สภาพอากาศ กระแสลม ความชื้น และปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น

Color	Temperature
Light Yellow	550 degrees F/290 degrees C
Straw Yellow	640 degrees F/340 degrees C
Yellow	700 degrees F/370 degrees C
Brown	735 degrees F/390 degrees C
Purple Brown	790 degrees F/420 degrees C
Dark Purple	840 degrees F/450 degrees C
Blue	1,000 degrees F/540 degrees C
Dark Blue	1,110 degrees F/600 degrees C

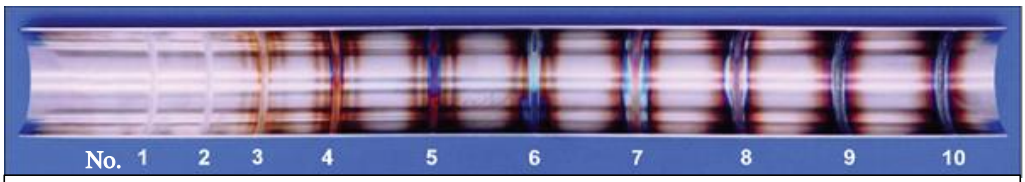
(ก) มาตรฐานสีเทียบอุณหภูมิ Heat Tint Colors



(ข) ตัวอย่างการเกิดสีบริเวณ HAZ

รูปที่ 6.27 มาตรฐานแถบสีอุณหภูมิของบริเวณกระทบร้อน (HAZ) และตัวอย่างการเกิดสี

ที่มา : Andrea Bustreo. All you need to know about the heat affected zone. 2016

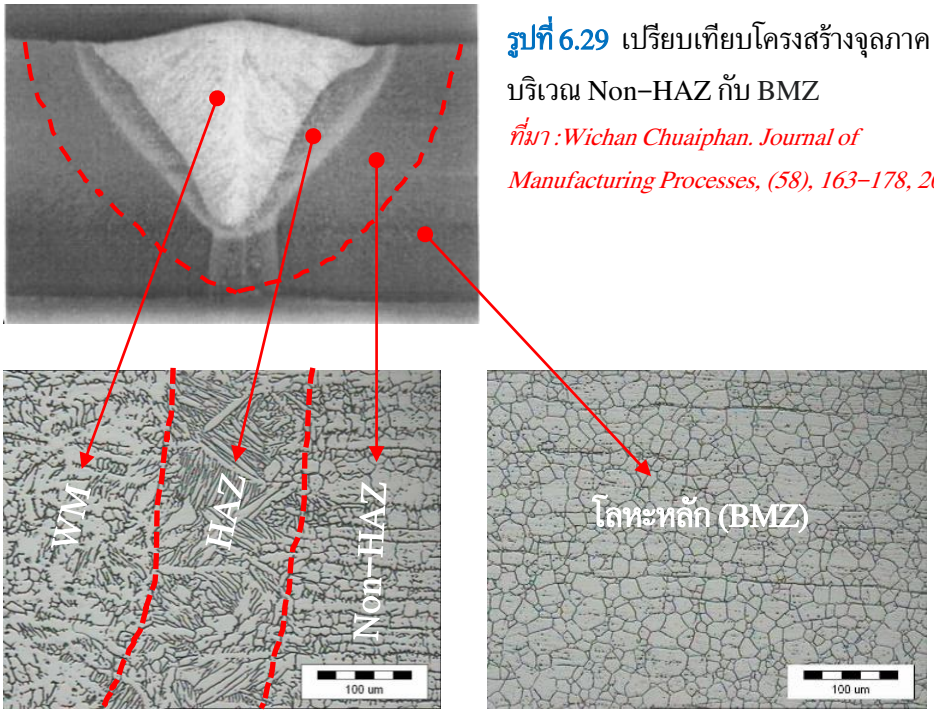


รูปที่ 6.28 มาตรฐาน AWS D18.2 แถบสีที่บอกขนาด HAZ และปริมาณออกซิเจนขณะเชื่อม

ที่มา : American Welding Society : D 18.2 , 2009

3. บริเวณที่ไม่กระทบจากความร้อน (Non–heat affected zone : Non–HAZ) หมายถึง ส่วนของบริเวณพื้นที่เนื้อโลหะเชื่อมที่ไม่ได้รับผลกระทบความร้อนจากการเชื่อม เป็นส่วนบริเวณที่อยู่ถัดออกมาจาก HAZ ซึ่งส่วนนี้ก็คือ ส่วนของเนื้อโลหะหลัก (Base metal/parents zone : BMZ) ถึงแม้ว่าส่วนนี้จะมีหน้าที่เป็นตัวระบายความร้อนที่ผ่านจากบริเวณ HAZ ออกมาไปสู่ภายนอกก็ตาม แต่ด้วยระดับอุณหภูมิของความร้อนที่ระบายออกมานั้นไม่สูงมากพอที่จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางโลหะวิทยา ดังนั้น บริเวณนี้จึงมีสภาพที่เหมือนกับโลหะหลักที่นำมาเชื่อมทุกประการ ทั้งส่วนผสมทางเคมีและสมบัติด้านต่าง ๆ ดังแสดงเปรียบโครงสร้างจุลภาคของบริเวณที่ไม่กระทบจากความร้อน (Non–HAZ) กับบริเวณของโลหะหลัก (BMZ) ในรูปที่ 6.29 จะเห็นได้ชัดเจนว่าโครงสร้าง

จุลภาคของบริเวณที่ไม่ได้ผลกระทบจากความร้อนกับบริเวณของโลหะหลัก จะมีโครงสร้างจุลภาคที่เหมือนกันทุกประการ



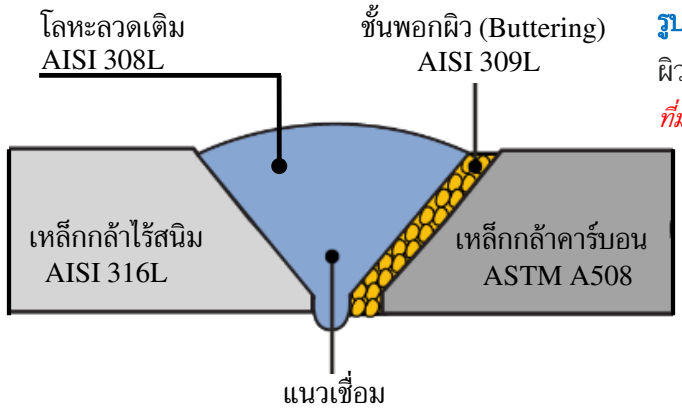
รูปที่ 6.29 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคบริเวณ Non-HAZ กับ BMZ

ที่มา : Wichan Chuaiphan. Journal of Manufacturing Processes, (58), 163-178, 2020

6.3 แนวเชื่อมแบบเชื่อมเสริมเนื้อโลหะ (Adding up weldments)

หลักของการเชื่อมโลหะแบบหลอมละลาย (Fusion welding) ก็เพื่อต้องการนำเอาโลหะอย่างน้อยสองชิ้นมาต่อกันด้วยการหลอมละลายติดกันที่อาจมีหรือไม่มีโลหะลวดเติมก็ได้ โดยถ้าเป็นการเชื่อมโลหะชนิดหรือเกรดเดียวกัน (Similar welding) ถือว่าเป็นการเชื่อมแบบปกติ แต่มีลักษณะของประเภทงานอีกมากมายที่มีความจำเป็นจะต้องทำการเชื่อมโลหะที่ต่างชนิดหรือต่างเกรดกัน (Dissimilar welding) แนวเชื่อมในลักษณะแบบนี้ต้องคำนึงถึงปัจจัยทางด้านโลหะวิทยางานเชื่อมที่มากขึ้น ซึ่งปัจจุบันเทคโนโลยีงานเชื่อมได้มีการนำไปใช้กับการเชื่อมโลหะที่ต่างชนิดกันมากขึ้น ที่มีจุดมุ่งหมายเพื่อนำชิ้นงานไปใช้กับงานอุตสาหกรรมประเภทที่ต้องการสมบัติเฉพาะด้านเช่น ทนการสึกหรอ ทนการกัดกร่อน ทนความน้อน เพิ่มความแข็งของพื้นผิว เพิ่มขนาดของชิ้นงาน ซึ่งรวมถึงเพิ่มขีดความสามารถในการเชื่อมของโลหะต่างชนิดกัน เป็นต้นจากเหตุผลที่กล่าวข้างต้นจึงได้เกิดขบวนการเชื่อมที่เป็นวิธีการเสริมเนื้อโลหะขึ้นหลายวิธีการที่นิยมใช้งานกันในปัจจุบัน โดยแต่ละวิธีการที่จะกล่าวถึงจะคล้าย ๆ กัน ที่เป็นการเสริมเนื้อโลหะลงบนผิวของชิ้นงานโลหะหลัก (Base metal) หรือบางครั้งอาจเสริมลงบนผิวแนวเชื่อมเดิมที่เชื่อมเสร็จสิ้นมาแล้ว ซึ่งต้องพยายามสร้างความเข้าใจและแยกแยะของแต่ละวิธี ซึ่งอาจจะแตกต่างกันในแง่ของวัตถุประสงค์ของการนำใช้งานหรือแตกต่างกันด้วยกรรมวิธีการเชื่อม ดังจะได้กล่าวถึงแต่ละวิธีของการเสริมเนื้อโลหะ ดังต่อไปนี้

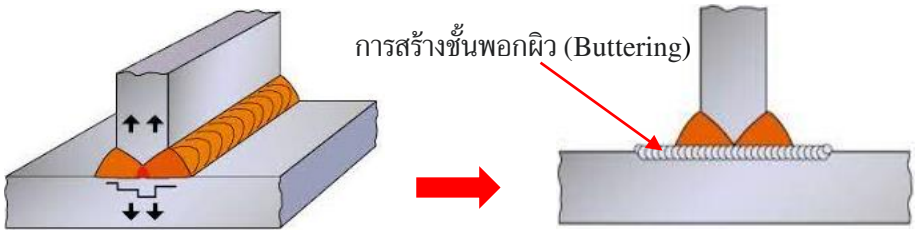
1. การสร้างชั้นพอกผิว (Buttering/Buffer layer) ASM International (1993) ได้กล่าวถึงรูปแบบของการสร้างชั้นพอกผิวลงบนผิวของโลหะหลักบริเวณรอยต่อด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้าน เพื่อใช้เป็นตัวกลางที่จะเพิ่มขีดความสามารถในการเชื่อมหรือปรับปรุงสมบัติของแนวเชื่อมด้านต่าง ๆ ให้ดีขึ้นเหมาะสมกับสภาพการนำไปใช้งาน ซึ่งส่วนใหญ่จะนิยมใช้กับการเชื่อมโลหะต่างชนิด ที่มุ่งเน้นเหตุผลทางด้านโลหะวิทยา เช่น โลหะหลักมีจุดหลอมเหลวที่ต่างกัน (Melting point) ชั้นพอกผิวที่สร้างขึ้นจะเป็นตัวช่วยสร้างสมดุลจุดหลอมเหลวให้ใกล้เคียงกัน หรือกรณีที่โลหะหลักมีอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกัน (Cooling rate) มักจะเกิดการแตกร้าวเนื่องจากความเค้น ซึ่งชั้นพอกผิวก็จะช่วยลดปัญหาการเย็นตัวที่รวดเร็วต่างกันได้ นอกจากนี้ชั้นพอกผิวยังถูกสร้างขึ้นเพื่อทำหน้าที่ช่วยให้แนวเชื่อมมีการเจือจาง (% Dilution) ของส่วนผสมทางเคมีในแนวเชื่อมที่สูง โดยเฉพาะกับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน กับเหล็กกล้าไร้สนิมที่ต้องการแนวเชื่อมที่มีความต้านทานการกัดกร่อน ดังแสดงตัวอย่างรูปแบบของการสร้างชั้นพอกผิวในรูปที่ 6.30 มักจะนิยมสร้างชั้นพอกผิวด้วยลวดโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดที่มีธาตุโครเมียมผสมสูง และพอกผิวด้านเหล็กกล้าคาร์บอนเพื่อเจือจางโครเมียมเข้าไปก่อน เมื่อทำการเชื่อมปริมาณธาตุโครเมียมที่ทนการกัดกร่อนจากลวดเชื่อมที่เติมเข้าไปในเนื้อเชื่อมได้มากขึ้นโดยไม่ต้องเจือจางสูญเสียไปในฝั่งของเหล็กกล้าคาร์บอนอีก เป็นต้น นอกจากนี้จุดประสงค์ของการสร้างชั้นพอกผิวยังครอบคลุมไปถึงเหตุผลทางด้านการช่วยลดขั้นตอนการอุ่นชิ้นงานหลังเชื่อม (PWTH) การป้องกันการแตกขณะร้อน (Hot cracking) และงานเชื่อมที่นิยมนำวิธีการการสร้างชั้นพอกผิวมาใช้ที่พบเห็นมาก เป็นการป้องกันการแตกแบบฉีก (Lamellar tearing) ดังแสดงในรูปที่ 6.31 (ก) แนวเชื่อมมุม (Fillet weld) ที่เมื่อรับแรงมักจะเกิดการแตกแบบฉีกขาด ซึ่งแก้ปัญหาโดยการสร้างชั้นพอกผิวขึ้นก่อนทำการเชื่อมตามแบบงานที่กำหนดก็สามารถขจัดปัญหาการแตกดังกล่าวได้ดี



รูปที่ 6.30 ตัวอย่างการสร้างชั้นพอกผิว (Buttering/Buffer layer)
ที่มา : AWS : Learning – Buttering,

การสร้างชั้นพอกผิวหรือ Buttering ที่ผ่านมาจะพบว่าอาศัยการพอกด้วยการเชื่อมแบบหลอมละลายของลวดโลหะเติมกับผิวหน้าตรงรอยต่อ แต่ปัจจุบันได้มีการวิจัยคิดค้นเทคนิคการ Buttering ด้วยวิธีการเชื่อมแบบการเสียดทาน (Friction stir welding) โดยออกแบบหัวกวนให้ทำหน้าที่กวนเนื้อโลหะพร้อมกับเป็นลวดโลหะเติมด้วย (Consumable rod) เมื่อเชื่อมเสร็จก็จะได้เนื้อโลหะที่เป็นชั้นพอก

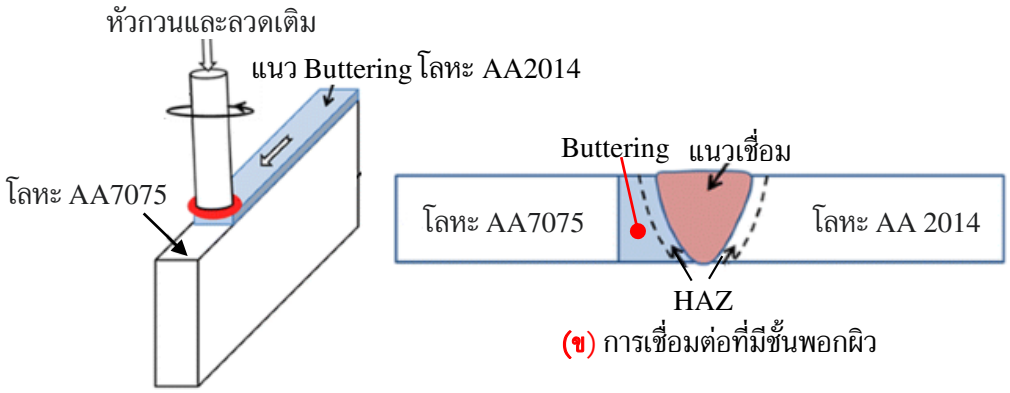
ผิวซึ่งจะนำไปใช้เป็นตัวกลางของการเชื่อมต่อไป ข้อดีของการสร้างชั้นพอกผิวด้วยวิธีนี้จะได้ชั้นพอกที่ไม่มีปัญหาข้อพกพร่องในแนวเชื่อมเหมือนกับการเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่น รูพรุน สแลกฝังใน ความเค้นตกค้าง การแตกร้าวจากการเย็นตัวของแนวเชื่อมและการเกิด HAZ เป็นต้น ซึ่งเป็นข้อดีของการเชื่อมแรงเสียดทาน ดังแสดงการตัวอย่างงานวิจัยที่มีการเผยแพร่ทดลองการเชื่อมโลหะอลูมิเนียมผสมต่างชนิด ที่มีการสร้างชั้นพอกผิวด้วยวิธีการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน ดังแสดงในรูปที่ 6.32



(ก) แนวเชื่อมแตกแบบฉีก (Lamellar tearing) (ข) วิธีป้องกันการแตกแบบฉีก

รูปที่ 6.31 การสร้างชั้นพอกผิว (Buttering) เพื่อลดการแตกร้าวแบบฉีก (Lamellar tearing)

ที่มา : TWI : Cracking mechanisms –Lamella tearing, 2007



(ก) ขั้นตอนการสร้างชั้นพอกผิว (ข) การเชื่อมต่อที่มีชั้นพอกผิว



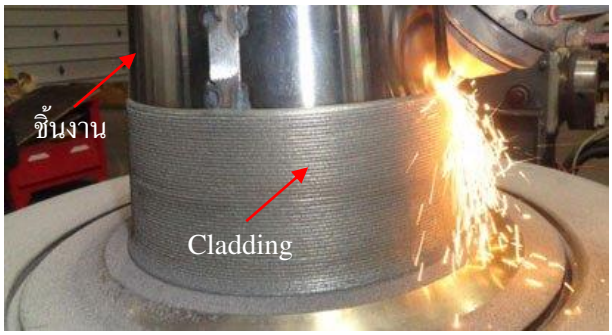
(ค) แนวเชื่อมอลูมิเนียมผสมที่มีชั้นพอกผิว (Butter)

รูปที่ 6.32 การสร้างชั้นพอกผิวด้วยวิธีการเชื่อมแบบการเสียดทาน (Friction stir welding)

ที่มา : Friction buttering : A New Technique for dissimilar welding, (48) 1416–1422, 2017

2. การสร้างชั้นผิวแบบหุ้ม (Cladding welding) Janette Brezinova et al. (2016) ได้อธิบายไว้ว่าเป็นวิธีการที่ต้องการเพิ่มเนื้อโลหะและเพิ่มคุณสมบัติที่บริเวณส่วนเฉพาะผิวของชิ้นงานด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย โดยการเชื่อมจะแตกต่างจากการเชื่อมปกติที่จะหลอมละลายโลหะทั้งหมดตรงรอยต่อเข้าด้วยกัน แต่จะเป็นการเชื่อมแบบฝากหรือแค่เชื่อมติดไว้ที่ผิวด้านนอกของชิ้นส่วน จะไม่ให้ความสำคัญว่าจะเชื่อมติดได้ดีสมบูรณ์มากน้อยอย่างไร เพราะต้องการเอาโลหะที่จะต้องใช้งานมาหุ้มผิวไว้ โดยส่วนที่หุ้มหรือฝากไว้ต้องมีสมบัติตามที่ต้องการ เช่น อาจต้องคาร์ไบด์ที่แข็งมากขึ้น หรืออาจต้องการโครงสร้างทางโลหะวิทยาที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนที่มากขึ้น เป็นต้น ซึ่งโลหะที่นำมาเชื่อมหุ้มนั้นส่วนใหญ่จะเป็นโลหะต่างชนิดกับโลหะชิ้นงาน เช่น การเชื่อมหุ้มผิวเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยลวดอินโคเนล (Inconel electrode) เพื่อให้เนื้อเชื่อมที่หุ้มผิวชิ้นส่วนมีความทนทานต่อการเสียดสี มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน หรือการเชื่อมผิวงานที่ต้องการเพิ่มความแข็งที่ผิวชิ้นงานทนแรงกระแทก เช่น การเชื่อมผิวเหล็กกล้าคาร์บอนสูงด้วยลวดเชื่อมแมงกานีสสูงในงานอุตสาหกรรมเหมืองแร่ เป็นต้น

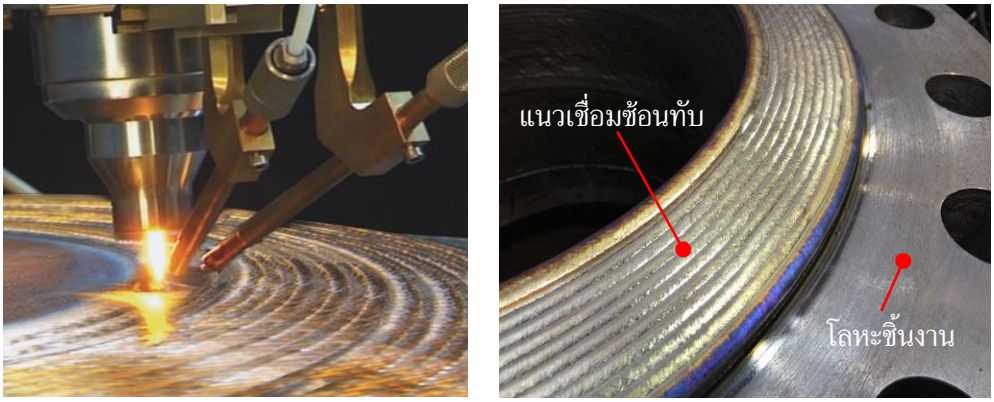
ขบวนการเชื่อมสำหรับการสร้างชั้นผิวแบบหุ้ม (Cladding) สามารถเลือกใช้ขบวนการเชื่อมที่มีใช้อยู่ ได้แก่ SMAW/ GMAW/ FCAW/ PAW/ GTAW และ อื่น ๆ ส่วนข้อบกพร่องของรอยเชื่อมแบบหุ้มก็จะมีให้เห็นปกติเช่นเดียวกับการเชื่อมรอยต่อทั่ว ๆ ไป ดังแสดงตัวอย่างการสร้างชั้นผิวแบบหุ้มด้วยวิธีการเชื่อมแบบเลเซอร์ (Laser cladding welding) ในรูปที่ 6.33



รูปที่ 6.33 การสร้างชั้นผิวแบบหุ้ม (Cladding welding)
ที่มา : TITANOVA– Refurbishing Services : Laser cladding, 2019

3. การสร้างชั้นผิวแบบซ้อนทับ (Overlay welding หรือ Weld overlay : WOL) เป็นวิธีการสร้างชั้นผิวของชิ้นงานด้วยการเชื่อมที่ต้องการให้ผิวของชิ้นงานหนาขึ้น โดยลักษณะของแนวเชื่อมแต่ละแนวจะซ้อนทับกัน มักจะนิยมเรียกว่า “ Weld overlay” วิธีการนี้จะคล้ายกับแบบ Cladding จะต่างกันที่วิธีนี้สามารถเลือกใช้วัสดุลวดเชื่อมที่เป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ และส่วนใหญ่จะนิยมกับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ ๆ โดยวัตถุประสงค์หลักของการสร้างชั้นผิวแบบซ้อนทับก็เพื่อ ปรับปรุงคุณสมบัติของพื้นผิวของโลหะชิ้นงาน กรณีที่ลวดเชื่อมเป็นชนิดเดียวกันกับโลหะชิ้นงานจะเป็นการปรับปรุงผิวของชิ้นงานให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น ส่วนกรณีที่ลวดเชื่อมต่างชนิดก็จะเป็นการสร้างผิวชิ้นงานที่เพิ่มคุณสมบัติบางประการ เช่น ทนอุณหภูมิสูง ต้านทานการขยายตัว ทนการเสียดสีหรือสึกหรอ และทนการกัดกร่อน

เป็นต้น ดังตัวอย่างวิธีการเชื่อมสร้างชั้นผิวแบบซ้อนทับในรูปที่ 6.34 (ก) และ (ข) เป็นตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแบบ Weld overlay



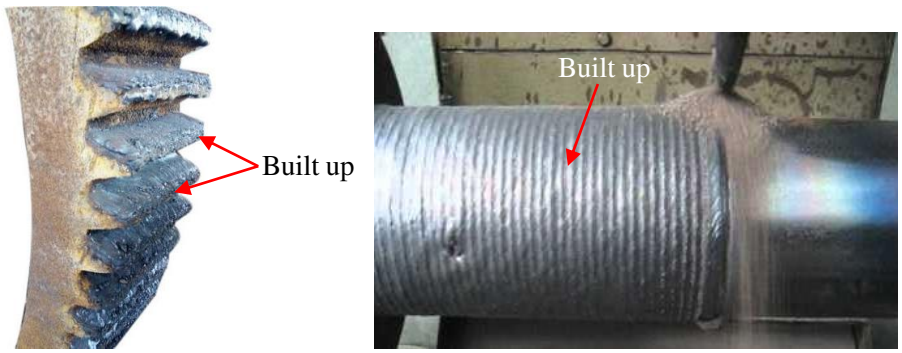
(ก) การเชื่อมแบบซ้อนทับ (Welding overlay) **(ข)** แนวเชื่อมแบบซ้อนทับ (Overlay weld)

รูปที่ 6.34 การสร้างชั้นผิวแบบซ้อนทับ (Overlay welding)

ที่มา : WALDUN– Weld Overlay Company, 2015

4. การเชื่อมเพื่อเพิ่มขนาด/รูปทรง (Built up welding) เป็นขบวนการเชื่อมเพื่อเสริมสร้างขนาดหรือรูปทรงให้กับชิ้นงาน โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดหรือรูปร่างตามความต้องการที่จะใช้งานต่อไป ซึ่งเป็นการสร้างเนื้อโลหะขึ้นที่ไม่เน้นคุณสมบัติเฉพาะด้านมากนัก ดังนั้น การเชื่อมมักจะเป็นการเชื่อมที่โลหะลวดเชื่อมกับโลหะชิ้นงานเป็นวัสดุชนิดหรือเกรดเดียวกัน ขบวนการเชื่อมแบบ Built up จึงไม่ต้องยุ่งยากกับการเลือกลวดเชื่อมและไม่จำเป็นที่ต้องเน้นพฤติกรรมทางโลหะวิทยางานเชื่อมมากนัก หลักการกำหนดปัจจัยการเชื่อมจะเป็นการเชื่อมปกติแบบ Similar welding ส่วนใหญ่จะพบการเชื่อมเพื่อเพิ่มขนาด ของงานซ่อมบำรุงบนชิ้นส่วนงานที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เกิดการสึกหรอหรือสูญเสียเนื้อโลหะ หรือบางครั้งก็เป็นการประกอบชิ้นส่วนที่เกิดปัญหาจากความผิดพลาดในการออกแบบขนาดของชิ้นส่วนที่ไม่สามารถประกอบงานได้จึงต้องสร้างเพิ่มขึ้นจึงมักเรียกขบวนการแก้ปัญหางานเชื่อมในลักษณะนี้ว่า การ “Built up” เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเพื่อเพิ่มขนาด/รูปทรง ในรูปที่ 6.35 จากตัวอย่างชิ้นงานที่แสดงจะสังเกตได้ว่ามีลักษณะรูปแบบของวิธีการเชื่อมจะเหมือนกันหรือคล้ายกับการเชื่อมพอกผิวและการเชื่อมซ้อนทับ แต่จะต่างกันที่จุดประสงค์ของการนำผิวพอกไปใช้งาน

ลักษณะของงานที่ใช้วิธีการเชื่อมเพื่อเพิ่มขนาด/รูปทรงยังสามารถพบเห็นในรูปแบบของการเสริมผิวหน้าของร่องบากหน้ารอยต่อ ในกรณีที่รอยต่อมีช่องว่างมากเกินไป หรือบางครั้งเป็นการเชื่อมที่คล้ายกับการทำ Buttering เพื่อฝากวัสดุทับหน้าไว้บริเวณรอยต่อแต่มีจุดประสงค์หลักเพื่อเสริมขนาดของผิวให้หนาขึ้น โดยส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมวัสดุโลหะที่เป็นชนิดเดียวกันทั้งโลหะลวดเชื่อมและโลหะหลัก (Similar welding)



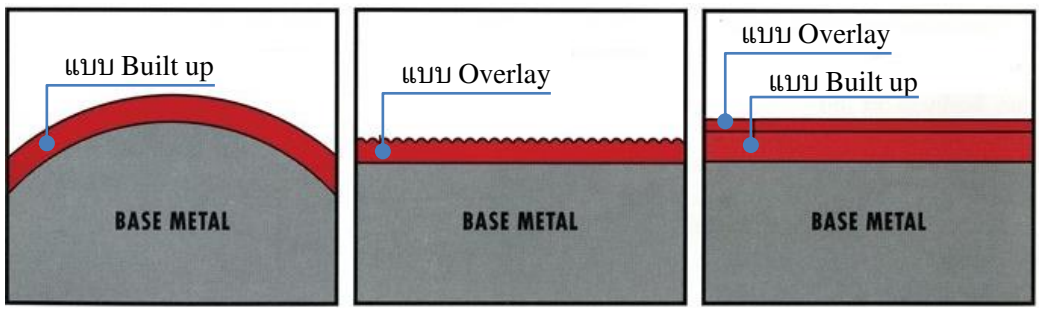
(ก) การเชื่อมเพิ่มขนาดของฟันเฟือง (ข) การเชื่อมเพิ่มขนาดรูปร่างของเพลา

รูปที่ 6.35 การเชื่อมเพื่อเพิ่มขนาดหรือรูปทรง (Built up welding)

ที่มา : Unithai – Beam build, 2016

5. การเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hard–facing welding) เป็นขบวนการเชื่อมเสริมเนื้อโลหะที่ผิวหน้าชิ้นงาน เพื่อต้องการให้ผิวมีความแข็งเป็นพิเศษ ซึ่งบางครั้งเรียกว่าการเชื่อมเคลือบผิวแข็ง/การฝากวัสดุที่แข็งบนพื้นผิว เป้าหมายก็เพื่อต้องการให้ชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบทนทานต่อการสึกหรอจากการเสียดสี วัสดุลวดโลหะที่นำมาเชื่อมพอกผิวแข็งสามารถเลือกได้ทั้งที่เป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันกับโลหะหลัก (Base metal) ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญที่ต้องพิจารณา คือ เนื้อเชื่อมต้องทนต่อการสึกหรอ เพราะการเชื่อมพอกผิวแข็งจะนิยมนำไปใช้กับงานซ่อมบำรุงที่จะช่วยยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วนหรือปรับปรุงชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่เสื่อมสภาพให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ช่วยลดค่าใช่จ่ายได้ในการที่จะต้องเปลี่ยนชิ้นส่วน เป็นต้น อ้างอิงจาก C. Okechukwu et al. (2017)

กรรมวิธีการพอกผิวแข็งด้วยการเชื่อมจะสามารถพอกผิวได้หลายแบบหรือหลายเทคนิควิธี ดังแสดงในรูปที่ 6.36 ที่สามารถทำการพอกด้วยวิธีแบบ Built up แบบ Overlay และแบบผสมของทั้งแบบ Built up แบบ Overlay โดยทุกวิธีจะมุ่งเน้นทำให้ผิวชิ้นงานมีความแข็งสูงขึ้น

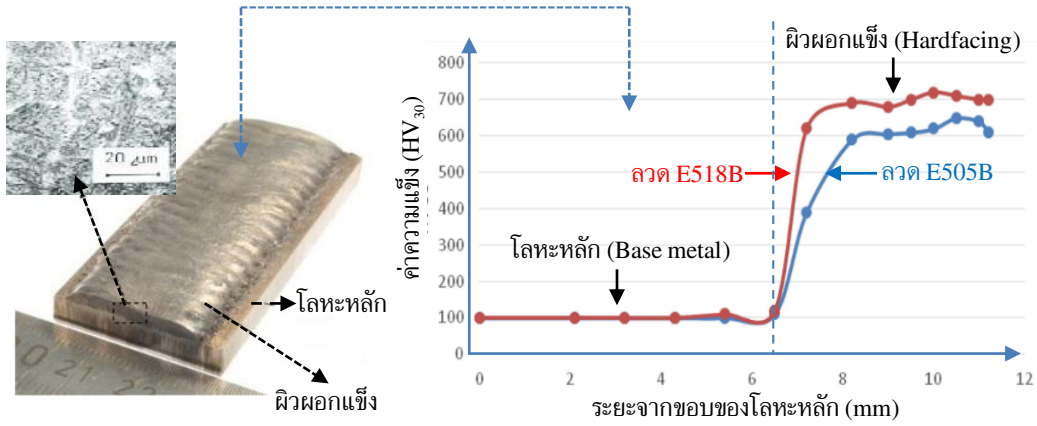


พอกผิวแข็งแบบ Built up พอกผิวแข็งแบบ Overlay พอกผิวแข็งแบบ Built up กับแบบ Overlay

รูปที่ 6.36 เทคนิควิธีการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing technic)

ที่มา : Hardfacing and compact machinery, 2013

ด้วยจุดประสงค์หลักของการเชื่อมพอกผิวแข็งที่ต้องการเสริมหรือเพิ่มความแข็งให้กับผิวของชิ้นงาน และต้องทนต่อสภาพการใช้งานที่ลดการสูญเสียเนื้อโลหะเป็นสำคัญ ดังนั้น คุณสมบัติของแนวเชื่อมต้องคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลทางด้านโลหะวิทยาของรอยเชื่อม ดังตัวอย่างการวิจัยการเชื่อมพอกผิวแข็งโลหะหลักเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S235JRH ด้วยลวด E505B กับ ลวด E518B ผลการวิจัยมีความเด่นชัดมาก ถึงค่าความแข็งที่บริเวณพอกผิวแข็งมีความแข็งสูงกว่าบริเวณโลหะหลัก ด้วยเหตุเพราะแนวเชื่อมพอกเกิดโครงสร้างที่เป็นคาร์ไบด์ที่ผสมกับโครงสร้างเบนไนท์ที่มีความแข็งสูง ดังแสดงผลของค่าความแข็งในรูปที่ 6.37 ดังนั้น การเลือกลวดเชื่อมที่จะนำมาเชื่อมเพื่อการเพิ่มความแข็งผิวงาน ช่างเชื่อมต้องมีความเข้าใจถึงบริบทของโลหะวิทยางานเชื่อมของโลหะลวดที่เชื่อมและโลหะหลัก ซึ่งโดยเฉพาะส่วนผสมทางเคมี เป็นสำคัญ



รูปที่ 6.37 ตัวอย่างการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing welding)

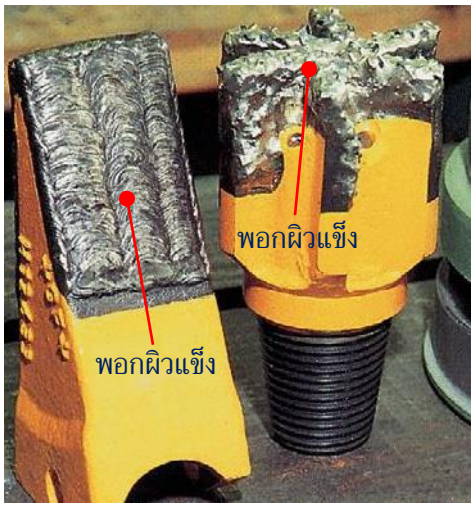
ที่มา : Journal of MDPI–Metal, (6) 36, 2016

ลักษณะชิ้นงานของการเชื่อมพอกผิวแข็งในอดีตมักจะพบในการเชื่อมงานประเภทซ่อมบำรุงเพื่อปรับปรุงแก้ไขให้ผิวของชิ้นงานสามารถนำไปใช้งานได้อีกครั้ง เช่น ชิ้นส่วนงานที่มีราคาแพงที่ผิวเกิดการสึกหรอก็จะทำการเชื่อมพอกผิวให้มีขนาดเหมือนเดิม ต่อมาก็พยายามเลือกลวดเชื่อมที่ทนทานต่อการสึกหรอมาใช้มากขึ้น จนเกิดเป็นเทคนิควิธีการเชื่อมพอกผิวแข็งขึ้นดังแสดงตัวอย่างชิ้นส่วนที่นำมาเชื่อมพอกผิวแข็งในรูปที่ 6.38 (ก) และในปัจจุบันผู้ผลิตชิ้นส่วนงานที่ต้องนำไปใช้กับงานที่มีการสึกหรอมาก ๆ หรืองานที่ต้องการความแข็งที่ผิวชิ้นงานมาก ๆ ได้ผลิตชิ้นส่วนที่มีการเชื่อมพอกผิวแข็งติดมาเรียบร้อยแล้ว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานและยืดอายุการใช้งาน รวมถึงการลดต้นทุนการผลิตลง ดังแสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีการเชื่อมพอกผิวสำเร็จมาแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 6.38 (ข) จากการศึกษาข้อมูลการผลิตชิ้นส่วนที่มีการเชื่อมเสริมผิวแข็ง และงานวิจัยในการเสริมผิวแข็งพบว่าส่วนใหญ่จะเป็นเทคนิคการเชื่อมของโลหะต่างชนิดกัน (Dissimilar welding) ระหว่างโลหะโครงสร้างหลักกับโลหะลวดเชื่อม ด้วยเหตุผลที่ต้องการให้ผิวของแนวเชื่อมมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากผิวของโลหะชิ้นงานเดิม เช่น

การใช้ลวดเชื่อมเหล็กกล้าผสมแมงกานีส (High manganese alloy steel) เชื่อมพอกบนชิ้นส่วนของเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) เพื่อต้องการให้ผิวของชิ้นงานที่อ่อนมีความแข็งที่เกิดจากโครงสร้างของแมงกานีสคาร์ไบด์ในแนวเชื่อม เป็นต้น



(ก) ชิ้นส่วนซ่อมเสริมเชื่อมพอกผิวแข็ง
ที่มา : Brazinternational–Hardfacing, 2012



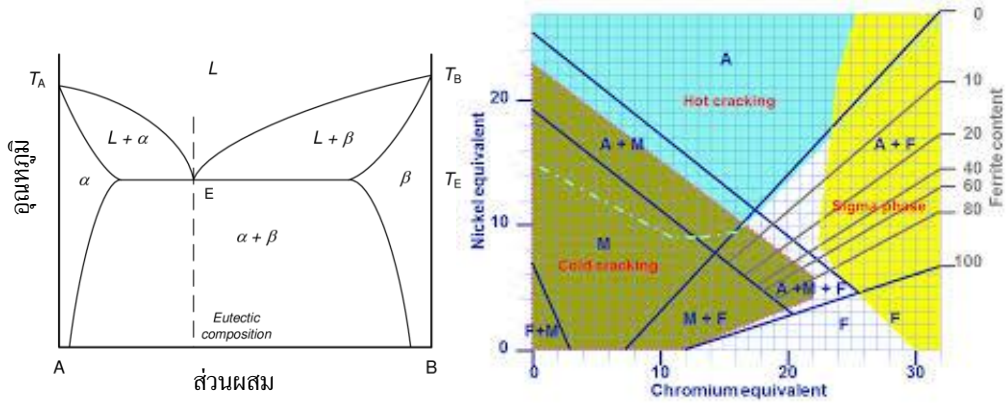
(ข) ชิ้นส่วนสำเร็จที่มีการพอกผิวแข็ง
ที่มา : FSH Welding CANADA, 2013

รูปที่ 6.38 ตัวอย่างชิ้นส่วนงานที่มีการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing welding)
ที่มา : Journal of MDPI–Metal, (6) 36, 2016

แนวเชื่อมแบบเชื่อมเสริมเนื้อโลหะ (Adding up weldments) ปัจจัยขององค์ประกอบทางด้านโลหะวิทยางานเชื่อม จะมีอิทธิพลโดยตรงต่อสมบัติของแนวเชื่อมที่มีการเชื่อมเสริมพื้นผิวทุกวิธี ไม่ว่าจะเป็นการเชื่อมแบบ Buttering/Cladding/Overlay/Built up และHardfacing ล้วนต้องคำนึงถึงทั้งในสมบัติทางด้านกายภาพ ทางด้านเคมี และทางด้านเชิงกล โดยมีรายละเอียดของสมบัติด้านต่าง ๆ ดังนี้

1. สมบัติทางด้านกายภาพ (Physical properties) สมบัติที่สำคัญด้านนี้ก็เป็นเรื่องของจุดหลอมเหลวของบ่อหลอมละลาย (Melting point) อัตราเร็วในการเย็นตัวของบ่อหลอมละลาย (Cooling rate) การเกิดระยะความกว้างของ HAZ การหดและการขยายตัวของชิ้นงาน รวมไปถึงบิดงอหรือเสียรูปทรงของชิ้นงานหลังเชื่อม เป็นต้น การสร้างเสริมเนื้อโลหะพอกผิวจะสามารถควบคุมผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับแนวเชื่อมในเรื่องต่าง ๆ ข้างต้นได้เป็นอย่างดี ก็ด้วยเพราะการสร้างชั้นผิวใหม่สามารถเลือกและกำหนดวัสดุที่จะนำมาพอกผิวได้ตามต้องการ ซึ่งช่วยแก้ปัญหาของการเชื่อมเสริมเนื้อโลหะได้ เช่น ปัญหาจากการเชื่อมโลหะต่างชนิดที่มีจุดหลอมเหลวต่างกัน การออกแบบรอยต่อสามารถเลือกวัสดุโลหะมาทำการสร้างเป็นชั้นพอกผิวที่เป็นตัวกลางช่วยเฉลี่ยอุณภูมิจุดหลอมเหลวให้ใกล้เคียงกันหรืออาจเท่ากันได้ โดยอาศัยหลักการพิจารณาจากส่วนผสมทางเคมีที่มีธาตุบางคู่ผสมกันซึ่งจะทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะผสมนั้นลดต่ำลง ซึ่งเรียกจุดที่มีจุดหลอมเหลวต่ำนี้ว่า Eutectic point โดยอ้างอิง

จากแผนภาพสมดุลของธาตุผสม (Binary alloy phase diagram) ดังแสดงในรูปที่ 6.39 (ก) นอกจากนี้ ผิวพอกที่เสริมสร้างขึ้นยังสามารถควบคุมชนิดของโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมได้จากการผสมกันของธาตุผสมในแนวเชื่อม เช่น การกำหนดปริมาณของเฟสโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite structure) โครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite structure) และโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite structure) ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ด้วยการทำนายจากมาตรฐานของแผนภาพ Schaeffler diagram ที่ใช้สัดส่วนปริมาณส่วนผสมทางเคมีของธาตุโครเมียม (Cr) กับธาตุนิกเกิล (Ni) ดังแสดง Schaeffler diagram ในรูปที่ 6.39 (ข)



(ก) แผนภาพสมดุลโลหะ 2 ธาตุ
ที่มา : Desk Handbook : Phase Diagram for Binary Alloys, 2nd ed., 2010

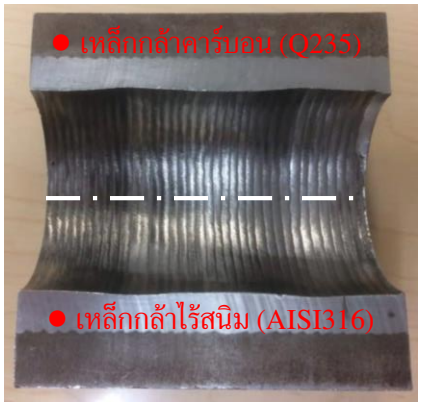
(ข) แผนภาพ Schaeffler
ที่มา : Welding Handbook : Welding Science and Technology 9th ed., 2001

รูปที่ 6.39 ปัจจัยเครื่องมือที่ใช้พิจารณาเลือกวัสดุที่จะนำมาเชื่อมเสริมเนื้อโลหะที่ผิว

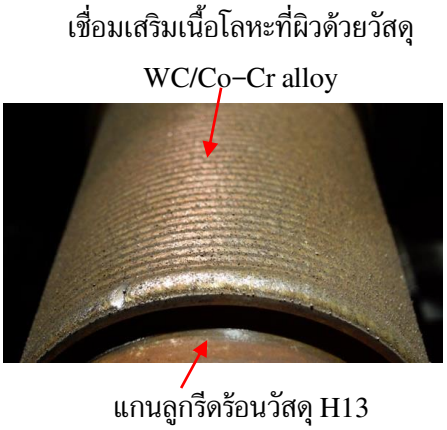
2. สมบัติทางด้านเคมี (Chemical properties) สำหรับการเชื่อมเพื่อเสริมเนื้อโลหะที่ผิวหรือที่เรียกรวม ๆ ว่าการพอกผิวนั้น สมบัติทางด้านเคมีส่วนใหญ่จะให้ความสำคัญกับการป้องกันการกัดกร่อนที่ผิวชิ้นงาน โดยการเลือกวัสดุโลหะที่มีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนมาใช้เป็นลวดเชื่อม ซึ่งมักจะเกี่ยวข้องกับส่วนผสมทางเคมีของโลหะ (Chemical composition) ทั้งชนิดและปริมาณของธาตุที่ผสมอยู่ภายใน ตัวอย่างชิ้นงานที่พบเห็นกันบ่อย ๆ ได้แก่ การเชื่อมพอกผิวเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ดังแสดงในรูปที่ 6.40 (ก) เป็นการเลือกใช้สมบัติทางเคมีที่ทนต่อการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 316 SS) มาเชื่อมพอกสร้างชั้นผิวบนเหล็กกล้าคาร์บอน (Q235) ที่มีส่วนผสมทางเคมีในการต้านทานการกัดกร่อนที่ต่ำ เมื่อนำไปใช้งานผิวภายในของท่อก็จะทนต่อการกัดกร่อนได้ดี

นอกจากนี้ยังมีลักษณะของชิ้นงานที่ต้องใช้กับสภาพแวดล้อมที่ต้องทนต่อความร้อน (High temperature) มักนิยมทำการเสริมผิวชิ้นงานด้วยการเชื่อม เพื่อนำเอาสมบัติทางเคมีของวัสดุด้านทนต่อความร้อนสูงไปปกป้องผิวหรือยืดอายุการใช้งาน ดังแสดงตัวอย่างการเชื่อมสร้างชั้นผิวหุ้มด้วยขบวนการเชื่อมเลเซอร์ (Laser cladding) ในรูปที่ 6.40 (ข) เป็นการเชื่อมเสริมเนื้อโลหะที่ผิววัสดุ เกรด H 13 ที่

เป็นชิ้นส่วนแกนลูกรีดงานร้อน ด้วยลวดเชื่อม WC/Co–Cr alloy โดยจุดประสงค์ต้องการใช้คุณสมบัติโครงสร้างคาร์ไบด์ของทังสเตน โคบอลต์ และโครเมียม ในการเสริมสร้างความต้านทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูงของลูกรีดขึ้นรูปร้อน



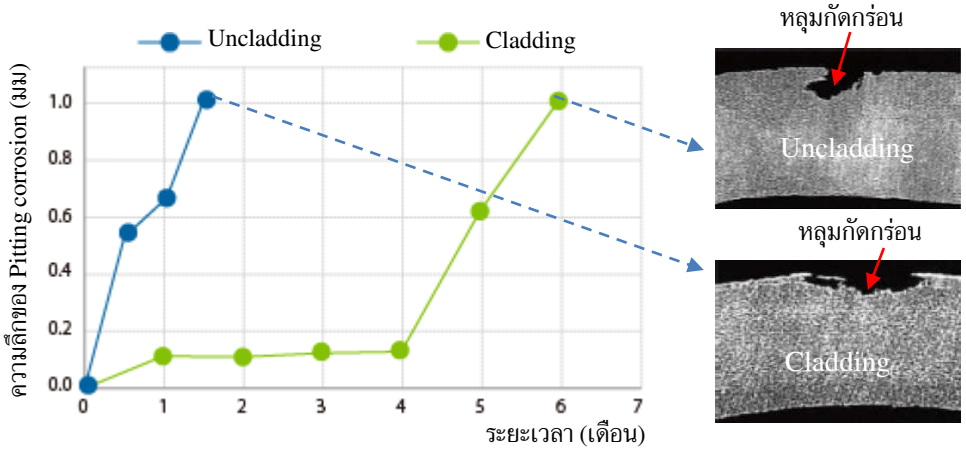
(ก) การสร้างชั้นผิวพอทนการกัดกร่อนภายในท่อ
ที่มา : AMI – AN ESAB BRAND, 2020



(ข) การสร้างชั้นผิวพอกเพื่อทนความร้อน
ที่มา : Cladding Technology–Repair, 2020

รูปที่ 6.40 ลักษณะงานสร้างชั้นผิวพอกที่มุ่งเน้นสมบัติทางเคมีของแนวเชื่อม

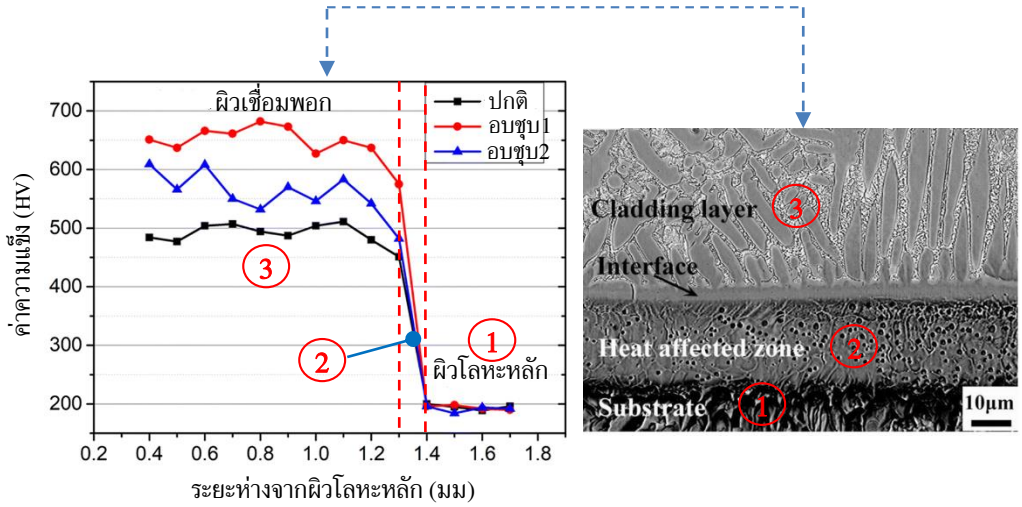
เทคนิคการเชื่อมเสริมเนื้อโลหะที่บริเวณผิวของชิ้นส่วนงานต่าง ๆ ทุกวิธีการล้วนแต่เป็นการปกป้องพื้นผิวของชิ้นงานทั้งสิ้น ส่วนจะมุ่งเน้นให้เกิดความโดดเด่นในคุณสมบัติด้านใดนั้นก็ต้องพิจารณาถึงวัสดุที่นำมาพอกหรือเสริมเนื้อนั้น ซึ่งมีหลายลักษณะงานในอดีตที่ประสบความสำเร็จและยังคงนิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน และยังมีงานวิจัยอีกจำนวนมากที่ได้ทำการทดลองหาวัสดุและวิธีการเชื่อมที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเชื่อมเสริมเนื้อโลหะที่บริเวณผิว ดังแสดงตัวอย่างผลการวิจัยในรูปที่ 6.41 เป็นการวิจัยเชิงทดลองของการเชื่อมเสริมเนื้อโลหะด้วยวิธีการสร้างชั้นผิวแบบหุ้ม (Cladding welding) บนชิ้นส่วนโลหะอลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อขึ้นรูปเกรด H2010 แล้วทำการเชื่อมพอกผิว (Cladding process) ด้วยโลหะอลูมิเนียมเกรด H2615 ที่มีส่วนผสมของเซอร์โคเนียม (Zr) สูง งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่ต้องการป้องกันการกัดกร่อน โดยใช้วิธีการให้โลหะที่ผิวพอกทำหน้าที่ป้องกันการกัดกร่อนและจะยังทำหน้าที่ผุกร่อนแทนเนื้อโลหะหลัก (Sacrificial layer) เมื่อนำไปใช้งานในสภาวะที่เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรง จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าผิวของชิ้นงานที่ผ่านการสร้างชั้นผิวพอกจะสามารถทนต่อการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting corrosion) ได้ดีและยาวนานกว่าผิวงานโลหะอลูมิเนียมผิวปกติ ด้วยเหตุผลเพราะธาตุผสมที่อยู่ในโลหะที่นำมาเชื่อมสร้างชั้นผิวพอกมีคุณสมบัติทางด้านเคมีในการสร้างฟิล์มปกป้องพื้นผิว (Passive film) ที่ต้านการกัดกร่อนได้ดีกว่า และยังมีแนวโน้มที่จะเกิดรูปแบบของการกัดก่อนที่เป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniformly corrosion) มากกว่ารูปแบบของการกัดกร่อนแบบหลุมหรือรูเข็ม (Pitting corrosion) ดังแสดงรูปแบบการกัดกร่อนในรูปที่ 6.41



รูปที่ 6.41 เปรียบเทียบการกัดกร่อนแบบรูเข็มของผิวงานปกติกับที่ผ่านการเชื่อมพอกผิว

ที่มา : UACJ – Aluminum lightens the world, 2014

3. สมบัติด้านทางกล (Mechanical properties) คุณสมบัติด้านนี้จะมีบทบาทและอิทธิพลอย่างมากต่อขบวนการสร้างชั้นผิวพอก เพราะลักษณะของงานเชื่อมส่วนใหญ่จะนำไปใช้กับการรับแรงทางกลเป็นสำคัญ แต่ที่มุ่งเน้นและมีความสำคัญเป็นพิเศษก็จะเป็นสมบัติทางด้านความแข็ง (Hardness properties) ปกติการสร้างผิวพอกเพื่อเพิ่มความแข็งอาจเกิดในขั้นตอนการเชื่อมพอกจากโรงงานผู้ผลิตชิ้นส่วนโดยตรง กับเกิดจากการซ่อมบำรุงพื้นผิวของชิ้นงานหลังใช้งานแล้วได้รับความเสียหาย แต่จะเกิดในลักษณะใดก็ตามสาเหตุหลักส่วนใหญ่มาจากการที่โลหะที่เป็นโครงสร้างหลักมีค่าสมบัติความแข็งที่ไม่มากเพียงพออาจเกิดจากขีดจำกัดในการออกแบบ การเลือกวัสดุ ขบวนการผลิต รวมถึงต้นทุนของการผลิต เมื่อนำไปใช้งานเกิดการสึกหรอสูง หรือผิวชิ้นงานเสียรูปทรง จึงจำเป็นจะต้องสร้างชั้นผิวพอกที่มีระดับของค่าความแข็งให้สูงขึ้น ดังตัวอย่างงานวิจัยในรูปที่ 6.42 เป็นผลการวิจัยของ Junbo Lin et al. (2018) ที่ทำการทดสอบหาค่าความแข็งของผิวพอกวัสดุโลหะ Tribaloy 400 บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเลเซอร์ จากรูปกราฟผลการทดสอบวัดค่าความแข็งจะเป็นได้อย่างชัดเจนว่าค่าความแข็งของแนวเชื่อมพอกผิว (Cladding process) จะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าผิวโลหะหลัก (●ปกติ) ซึ่งสามารถนำไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ของการเพิ่มความแข็งที่ผิว งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาหาวิธีการเพิ่มค่าความแข็งให้กับแนวเชื่อมพอกด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment) โดยทดลองเปรียบเทียบการชุบแข็งที่ปัจจัยแตกต่างกัน (ระหว่าง ●อบชุบ 1 กับ ●อบชุบ 2) พบว่าค่าความแข็งที่ได้สูงกว่าแบบปกติ และทั้งคู่ก็ยังมีค่าความแข็งที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าการเพิ่มค่าความแข็งของผิวพอกสามารถนำขบวนการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยกรรมวิธีทางความร้อนมาใช้ได้ ซึ่งสมบัติเชิงกลด้านความแข็งที่สูงจะช่วยให้ผิวพอกมีความสามารถต้านทานการเสียดสีได้มากขึ้น มีอัตราการสึกหรอต่ำลง เราจะมักได้พบเห็นลักษณะการเชื่อมพอกงานเหล่านี้กับชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลหนักในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ หรืองานขุดเจาะ บดย่อยต่าง ๆ เป็นต้น

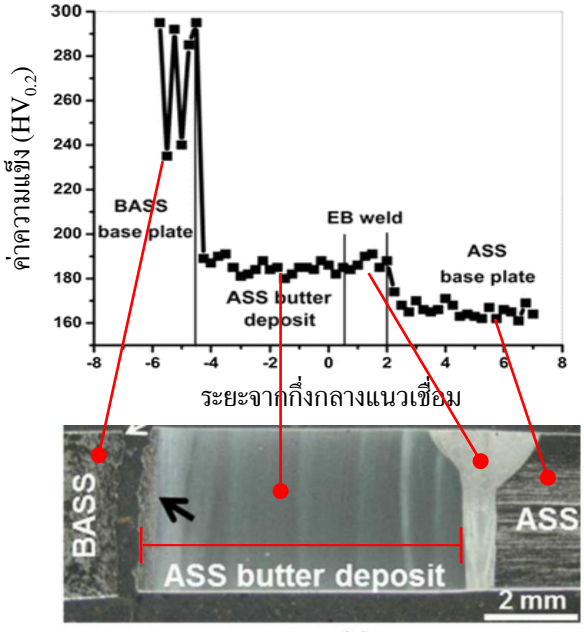


รูปที่ 6.42 เปรียบค่าความแข็งของแนวเชื่อมพอกผิวกับโลหะหลัก

ที่มา : Junbo Lin et al., ASM International, JMEPEG. (27) : 6339, 6339–6348, 2018

การสร้างชั้นพอกผิวที่เรียกกันว่า Buttering เป็นขบวนการเสริมสร้างเนื้อโลหะบนพื้นผิวเช่นเดียวกัน แต่จุดประสงค์ไม่ได้เน้นความต้องการด้านสมบัติทางกล แต่เป็นการเน้นเสริมสร้างขีดความสามารถในการเชื่อม (Welding ability) เพื่อที่จะช่วยให้วัสดุที่มีความสามารถในการเชื่อมต่ำหรือเชื่อมยาก มีความสามารถในการเชื่อมที่สูงขึ้น (ส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมโลหะต่างชนิด) ซึ่งสาระสำคัญที่ต้องพิจารณาจะเป็นปัจจัยทางด้านโลหะวิทยางานเชื่อม ดังตัวอย่างในรูปที่ 6.43 เป็นผลการวิจัยของ G.M. Karthik et al. (2017) ที่ทำการButtering บนเหล็กกล้าคาร์บอน (BASS–base metal) ด้วยโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม (ASS– butter deposit) เพื่อการเตรียมผิวหน้าที่จะนำไปเชื่อมต่อกับเหล็กกล้าไร้สนิมที่เป็นโลหะหลัก (ASS–base metal) ด้วยขบวนการเชื่อมด้วยลำแสงอิเลคตรอน จะพบว่าค่าความแข็งของบริเวณการสร้างชั้นผิวพอกจะไม่ได้มีความแข็งที่สูงขึ้นอย่างแตกต่างกันกับแนวเชื่อม นั้นเป็นเพราะจุดประสงค์ของการทำที่ไม่ได้ต้องการปรับปรุงสมบัติทางกลของผิวชิ้นงาน แต่ต้องการที่จะใช้เป็นตัวประสานเพิ่มประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อ และผลกระทบทางโลหะวิทยาต่อชิ้นงานเชื่อม เช่น ลดการเกิดการแตกร้าวขณะร้อน (Hot cracking) ที่เกิดจากโลหะต่างชนิดมีอัตราการเย็นตัวต่างกัน อัตราการขยายตัวตัวไม่เท่ากัน ซึ่งเนื้อเชื่อมบริเวณ Buttering จะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ดี หรือปัญหาของการที่โลหะที่นำมาเชื่อมต่อกันมีจุดหลอมเหลวแตกต่างกัน มีความสามารถในการนำความร้อนได้ไม่เท่ากัน รวมถึงช่วยลดปัญหาของธาตุที่ผสมมีประสิทธิภาพในการเจือจาง (Dilution) ในแนวเชื่อมต่ำ ปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการสร้างชั้นพอกผิวที่เรียกกันว่า Butter ซึ่งปัจจุบันขบวนการของการเชื่อมเพื่อสร้างชั้นพอกผิวแบบนี้สามารถเลือกวิธีการเชื่อมได้หลากหลาย และเกือบทุกขบวนการสามารถนำมาใช้เชื่อมได้ แต่ส่วนใหญ่มักเลือกขบวนการเชื่อมที่มีโอกาสเกิดข้อพกพร่องของแนวเชื่อมน้อยที่สุด กล่าวคือ ต้องเป็นแนวเชื่อมที่ไม่เกิดรูพรุน ไม่เกิดสแลกฝังใน หรือมีความเค้นตกค้างมาก และที่สำคัญ

รอยเชื่อมควรจะต้องมีรูปทรงที่สมบูรณ์ไม่เกิดการบิดงอหรือบิดเบี้ยวไม่คงรูป โดยที่แนวเชื่อมไม่จำเป็นต้องตกแต่งหรือปรับสภาพของผิวพอก

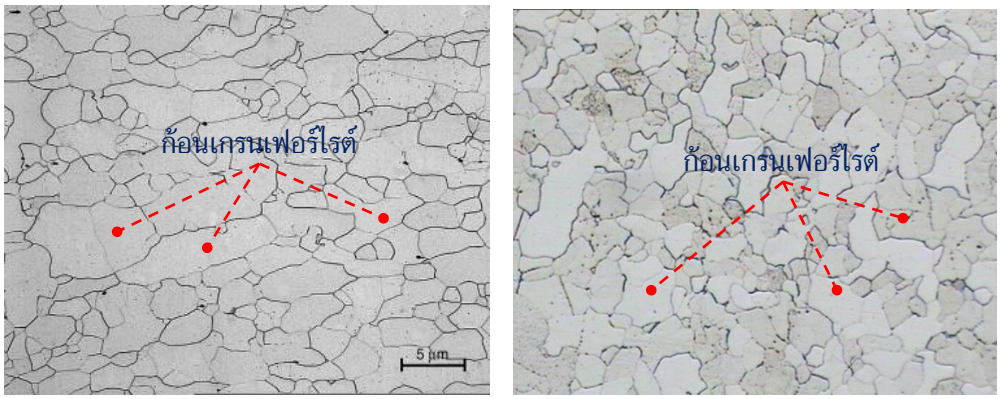


รูปที่ 6.43 ตัวอย่างงานเชื่อม Buttering ที่ไม่เน้นสมบัติทางกลแต่เน้นผลทางด้านโลหะวิทยางานเชื่อม *ที่มา : G.M. Karthik et al., Friction buttering : A New Technique for Dissimilar Welding, 2017*

6.4 โครงสร้างทางโลหะวิทยาของแนวเชื่อม (Metallurgical structure of weld metal)

เทคโนโลยีการเชื่อมได้มีการพัฒนาค้นคว้าเพื่อหาเทคนิคและวิธีการใหม่ ๆ อยู่เสมอ จนปัจจุบันมีกรรมวิธีการเชื่อมที่หลากหลายให้สามารถเลือกใช้ อย่างไรก็ตามการเชื่อมส่วนใหญ่ที่นิยมใช้งานกันจะเป็นกลุ่มของกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) ซึ่งมีหลักการที่เหมือนกันคือ ป้อนความร้อนเข้าไปเพื่อให้โลหะที่จะต่อกันหลอมละลายทั้งคู่ จากนั้นก็ปล่อยให้เย็นตัวก็จะได้ส่วนของเนื้อโลหะที่หลอมติดกันที่เรียกว่า “แนวเชื่อม” เมื่อสังเกตพบว่ากลไกของการเย็นตัวในบ่อหลอมละลายเชื่อม (Welding) จะเหมือนกับกลไกการเย็นตัวของขบวนการหล่อโลหะ (Casting) นั่นคือ ขบวนการเปลี่ยนสถานะจาก ของแข็ง ⟶ ของเหลว ⟶ ของแข็ง โดยที่ภายในของแนวเชื่อมเกิดเป็นโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างไปจากโครงสร้างจุลภาคเดิม (Base metals) จะแตกต่างกันทั้งด้านส่วนผสมทางเคมี รูปแบบการรวมตัวของธาตุผสมต่าง ๆ และลักษณะรูปร่างของเกรน ซึ่งกลไกของการเกิดได้มาจากปัจจัยสำคัญ ๆ ในด้านของวัสดุโลหะที่นำมาเชื่อม (Welding materials) ปัจจัยของขบวนการเชื่อม (Welding processes) และองค์ประกอบอื่น ๆ ของสภาพแวดล้อมที่ทำการเชื่อม (Environment welding) เป็นต้น โดยโครงสร้างทางโลหะวิทยาหรือโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมนี้มีโอกาสเป็นได้ทั้งโครงสร้าง ชนิดสารละลายของแข็ง (Solid solution) ชนิดสารประกอบ (Compound) และชนิดอื่น ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ของขบวนการเชื่อม ดังรายละเอียดของแต่ละชนิดของโครงสร้างจุลภาคดังต่อไปนี้อ้างอิงข้อมูลจาก AWS Welding Metallurgy (1956)

1. โครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite structure) เป็นโครงสร้างประเภทสารละลายของแข็ง (Solid solution structure) ที่มีส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะเชื่อม ที่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้อย่างสมบูรณ์ในสภาพของแข็ง ซึ่งโครงสร้างจุลภาคนี้จะพบเป็นโครงสร้างหลักในเนื้อเชื่อมของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) เพราะลักษณะของโครงสร้างเป็นชนิดสารละลายของแข็งที่ธาตุคาร์บอน (C) ละลายในธาตุเหล็ก (Fe) ที่ความเข้มข้นสูงสุดไม่เกิน 0.0218 % ลักษณะของก้อนเกรนและโครงสร้างจะคล้ายกับโครงสร้างของเหล็กบริสุทธิ์ (Pure ferrous) ดังแสดงเปรียบเทียบกับโครงสร้างจุลภาคของเหล็กบริสุทธิ์ในรูปที่ 6.44 (ก) และ โครงสร้างเฟอร์ไรต์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ในรูปที่ 6.44 (ข) Wichan Chuaiphan thesis Ph.D. (2011)



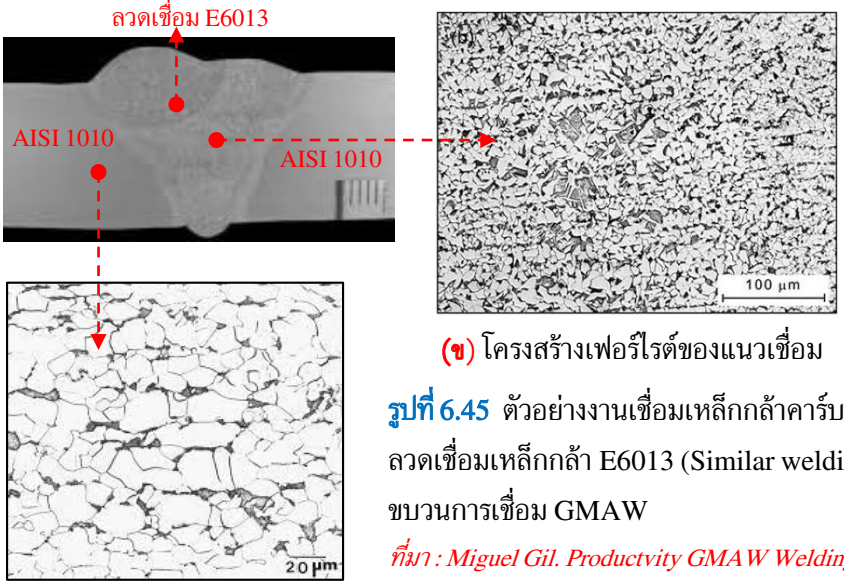
(ก) โครงสร้างเฟอร์ไรต์เหล็กบริสุทธิ์ *ที่มา : Jmr&t. 3(4), 349–353, 2014*

(ข) โครงสร้างเฟอร์ไรต์เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ *ที่มา : Wichan.C. Thesis in Doctoral, 2011*

รูปที่ 6.44 ลักษณะของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ในโลหะเหล็ก

โครงสร้างเฟอร์ไรต์ในแนวเชื่อมจะมีความแตกต่างไปจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ในโลหะหลักก่อนเชื่อม กล่าวคือ สำหรับกรณีที่โลหะเชื่อมกับลวดเชื่อมเป็นวัสดุชนิดและเกรดเดียวกัน (Similar welding) โครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่หลอมละลายในบ่อเชื่อมเล็ก ๆ เมื่อเย็นตัวจะมีอัตราการเย็นตัวที่เร็วมาก ซึ่งมีผลกระทบต่อการเกิดเกรนใหม่ในแนวเชื่อม ที่มีรูปร่างของก้อนเกรนที่ต่างไปจากเดิม (ก่อนเชื่อม) โดยการเติบโตของเกรน (Grain growth) ซึ่งถูกกำหนดโดยกลไกการระบายความร้อนของบ่อหลอมละลาย รูปร่างของเกรนจะมีขนาดเล็กมากขึ้น และเรียวแหลมพุ่งเข้าหาจุดกึ่งกลางของบ่อหลอมละลาย โดยที่ส่วนผสมทางเคมีไม่มีการเปลี่ยนแปลง (อาจสูญเสียไปบางส่วนเพียงเล็กน้อยจากความร้อนเชื่อม) และถ้าทำการเชื่อมด้วยขบวนการที่ใช้พลังงานความร้อน (Heat input) ไม่เท่ากัน โครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่ได้ก็จะแตกต่างกัน โดยบ่อหลอมละลายที่ป้อนพลังงานความร้อนสูง (High heat input) พบว่าบ่อหลอมละลายที่ได้จะกว้างและมีอัตราการยืนตัวที่ช้า (Slow colling rate) ดังนั้น โอกาสที่จะเกิดเป็นก้อนเกรนเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดใหญ่ในแนวเชื่อมก็มีมากขึ้น ด้วยเหตุผลเพราะนิวเคลียสของเกรนมีเวลาในการเติบโตรุกคืบเข้าไปในส่วนของเหลวก่อนจะกลายเป็นของแข็ง ส่วนถ้าบ่อหลอมละลายที่มีขนาดเล็ก ๆ ที่

เกิดจากขบวนการเชื่อมที่ป้อนพลังงานความร้อนไม่สูง (Low heat input) อัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะก็จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วก้อนเกรนมีเวลาน้อยในการเติบโต เกรนที่ได้จึงมีขนาดเล็ก ดังตัวอย่างงานวิจัยที่แสดงในรูปที่ 6.45 เป็นการแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมเมื่อได้รับอิทธิพลจากความร้อนของขบวนการเชื่อม ที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางส่วนผสมทางเคมี (อาจมีบ้างเล็กน้อย) แต่ที่เด่นชัดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาที่อธิบายถึงกลไกการแข็งตัวของน้ำโลหะของแนวเชื่อม (Solidification of weld metal) ว่าอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วเป็นปัจจัยที่ทำให้แนวเชื่อมได้โครงสร้างเกรนที่ละเอียด (Fine grain structures)



(ข) โครงสร้างเฟอร์ไรต์ของแนวเชื่อม

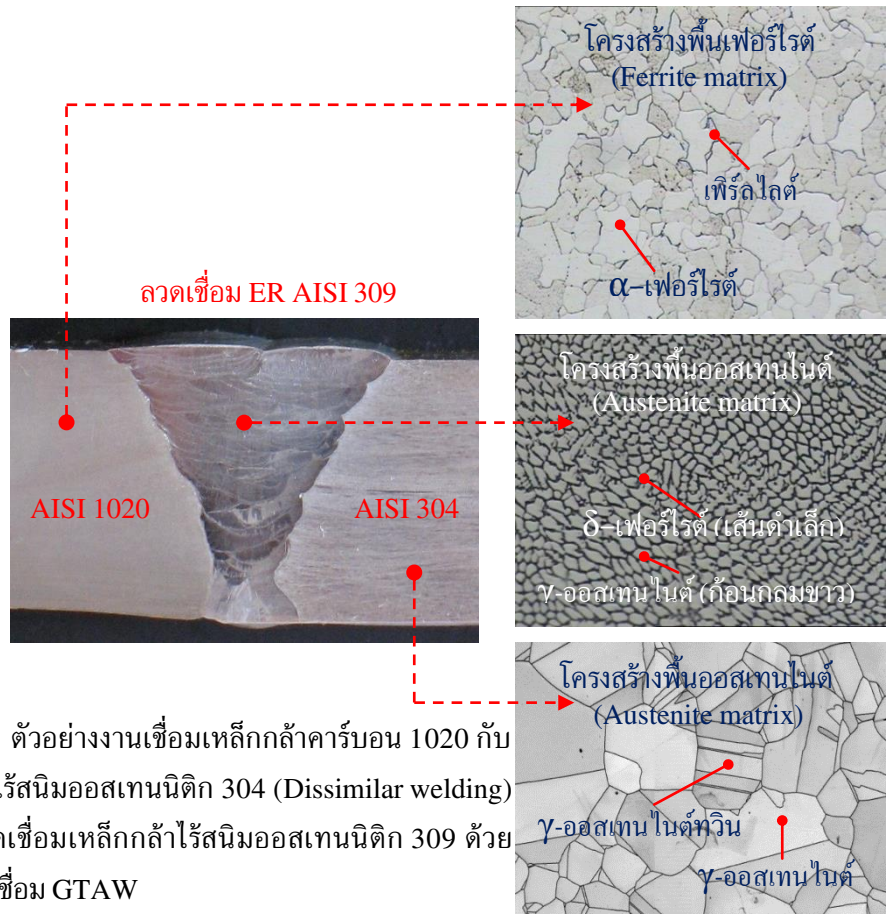
(ก) โครงสร้างเฟอร์ไรต์ก่อนเชื่อม

รูปที่ 6.45 ตัวอย่างงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ใช้ลวดเชื่อมเหล็กกล้า E6013 (Similar welding) ด้วยขบวนการเชื่อม GMAW

ที่มา : Miguel Gil. Productvity GMAW Welding – Carbon Steel, 2015

สำหรับในกรณีที่ทำการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนกับโลหะเหล็กกล้าต่างชนิด/ต่างเกรดและต่างชนิดลวดเติม (Dissimilar welding) โครงสร้างเฟอร์ไรต์ในแนวเชื่อมที่ได้จะแตกต่างกันไปตามปัจจัยของส่วนผสมทางเคมี และสมบัติการระบายความร้อนของโลหะที่นำมาเชื่อม (อัตราการเย็นตัว) โดยอาจมีโครงสร้างอื่นเกิดร่วมด้วยกับเฟอร์ไรต์ หรืออาจมีรูปแบบการฟอร์มของก้อนเกรนที่มีแตกต่างกันไป ดังตัวอย่างการวิจัยเชิงทดลองของ Wichan Chuaiphan thesis Ph.D (2011) ทำการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1020 กับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 309 โดยทำการเชื่อมด้วยขบวนการเชื่อม GTAW ที่แสดงในรูปที่ 6.46 จากผลการทดลองพบว่าแนวเชื่อมที่ได้มีสมบัติเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิติก (Austenitic stainless steel) ที่มีโครงสร้างพื้นเป็นเฟสออสเทนไนต์ (Austenite matrix) มีขนาดของก้อนเกรนเล็กและละเอียด พร้อมกับมีเฟสของโครงสร้างเฟอร์ไรต์เกิดขึ้นระหว่างเกรน เป็นที่น่าสนใจว่าจากเดิมโครงสร้างเฟอร์ไรต์ในเหล็กกล้าคาร์บอนมีขนาดที่ใหญ่และลักษณะของเกรนจะเป็นก้อน ๆ แต่เมื่อนำมาเชื่อมกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิติก รูปแบบการฟอร์มตัวของเกรนเฟอร์ไรต์เปลี่ยนไปเป็นเส้นเล็ก ๆ เกิดอยู่ระหว่างเกรนของ

ออสเทนไนต์ ด้วยลักษณะรูปร่างที่แตกต่างไปจากเดิมมากจึงได้เรียกโครงสร้างเฟสเฟอร์ไรต์นี้ว่า เดลต้าเฟอร์ไรต์ (δ–Ferrite) เจตนาบ่งชี้ว่าเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่เกิดในแนวเชื่อม และจากการพิสูจน์พบว่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากอิทธิพลของธาตุผสมนิกเกิล (Ni) ที่อยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และในลวดเชื่อม AISI 309 ที่เป็นตัวฟอร์มเฟสออสเทนไนต์ก่อนจากนั้นเกรนก็เติบโตพลักดันให้เฟสเฟอร์ไรต์ไปอยู่ตามขอบเกรน และนอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของก้อนเกรนของออสเทนไนต์ในแนวเชื่อม มีขนาดที่เล็กกว่าออสเทนไนต์ในโลหะหลักก่อนเชื่อม ซึ่งสรุปได้อีกว่าอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วของน้ำโลหะเหลวในแนวเชื่อมจะทำให้ขนาดของก้อนเกรนมีขนาดที่เล็กลง



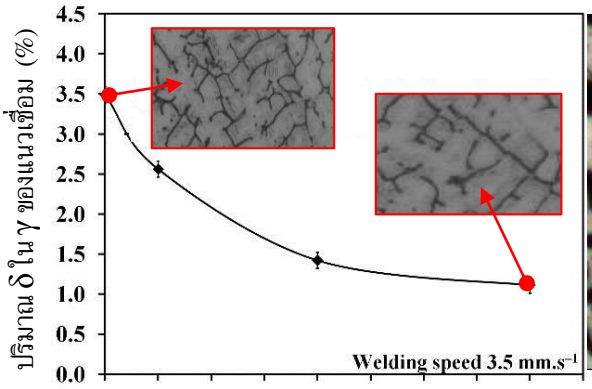
รูปที่ 6.46 ตัวอย่างงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน 1020 กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 304 (Dissimilar welding) โดยใช้ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 309 ด้วยขบวนการเชื่อม GTAW

ที่มา : Wichan Chuaiphan. Thesis Doctoral, 2011

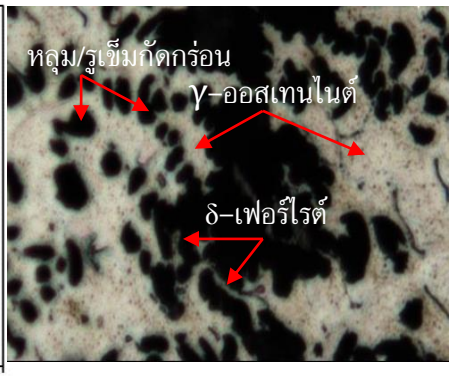
โครงสร้างเฟสเดลต้าเฟอร์ไรต์ (δ–ferrite) ที่เกิดขึ้นท่ามกลางโครงสร้างพื้นออสเทนไนต์ในแนวเชื่อมของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกทุกเกรด เป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนาของช่างเชื่อม ด้วยเหตุผลเพราะเฟสเฟอร์ไรต์ในลักษณะนี้จะเป็นตัวลดความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนแบบหลุม/รูเข็ม (Pitting corrosion) ของเหล็กกล้าไร้สนิมลง กล่าวคือ ที่บริเวณรอยต่อของขอบเกรนระหว่างเฟสออสเทนไนต์ (γ) กับเฟสเฟอร์ไรต์ (δ) เป็นบริเวณที่มีธาตุโครเมียมต่ำกว่าบริเวณอื่น ทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดความอ่อนแอของประสิทธิภาพของฟิล์มปกป้อง (Passive film) จึงเป็นจุดเริ่มต้น

ของการกัดกร่อนแบบหลุม/รูเข็ม ดังนั้น ถ้าในแนวเชื่อมมีปริมาณของเฟสเดลต้าเฟอร์ไรต์มากก็มีโอกาสในการเกิดจุดกัดกร่อนมากขึ้นด้วย แต่ด้วยกลไกการเย็นตัวของการเชื่อมแบบหลอมละลายหลีกเลี่ยงที่จะไม่ให้เกิดเฟสโครงสร้างเดลต้าเฟอร์ไรต์นั้นเป็นเรื่องที่ยากมาก แต่ก็ได้มีการทดลองปรับปรุงปัจจัยการเชื่อม เช่น ใช้แก๊สไนโตรเจน (N_2) ผสมกับแก๊สเฉื่อยปกคลุม (Ar) เพื่อควบคุมปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรต์โดยตามมาตรฐานเกณฑ์การยอมรับปริมาณเฟสเดลต้าเฟอร์ไรต์ในเฟสออสเทนไนต์ของแนวเชื่อม กับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก (Delta–fereite fraction : %) อยู่ระหว่าง 3–10% โดยมีการวิจัยทดลองผสมแก๊สไนโตรเจนลงไปในแก๊สอาร์กอนปกคลุม (Shielding gases) ที่ปริมาณต่าง ๆ กัน ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 6.47 (ก) เป็นการทดลองเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 201 กับเกรด AISI 304 ด้วยวิธีการเชื่อมทิก (TIG) แบบไม่เติมลวด พบว่าเมื่อปริมาณไนโตรเจนผสมลงไปในแก๊สปกคลุมอาร์กอนที่ปริมาณมากขึ้น จาก 0–8% สามารถลดปริมาณเฟสเดลต้าเฟอร์ไรต์ในแนวเชื่อมลงได้จาก 3.5% ลดลงถึง 1.14% ดังแสดงในเส้นกราฟของรูป

การมีปริมาณเฟสโครงสร้างเดลต้าเฟอร์ไรต์ที่มากในแนวเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกนอกจากจะเป็นจุดอ่อนของการที่ฟิล์มปกป้องแตกได้ง่ายแล้ว ยังเป็นเนื้อพื้นที่ส่วนที่ง่ายต่อการถูกรุกคืบของการกัดกร่อนอีกด้วย กล่าวคือ เนื้อของเฟสเดลต้าเฟอร์ไรต์มีปริมาณโครเมียมละลายอยู่น้อย เพราะโครเมียมจะถูกดึงไปรวมตัวกันกับธาตุเหล็ก (Fe) ในเฟสของออสเทนไนต์ ทำให้ขอบเกรนรอบด้านของออสเทนไนต์มีโครเมียมต่ำ ซึ่งก็คือเฟสเดลต้าเฟอร์ไรต์ที่ไม่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ ทิศทางการรุกคืบของการกัดกร่อนจึงลุกลามไปตามเนื้อเฟสเดลต้าเฟอร์ไรต์ที่อ้อมล้อมเฟสโครงสร้างออสเทนไนต์ที่ทนการกัดกร่อนได้ดีเพราะมีโครเมียมละลายอยู่สูงเป็นพฤติกรรมที่เรียกกันว่า เลือกกัดกร่อน ดังแสดงตัวอย่างการรุกคืบของการกัดกร่อนตามเฟสเดลต้าเฟอร์ไรต์ในรูปที่ 6.47 (ข)



(ก) วิธีการลดปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรต์แนวเชื่อม



(ข) การกัดกร่อนของเฟสเฟอร์ไรต์

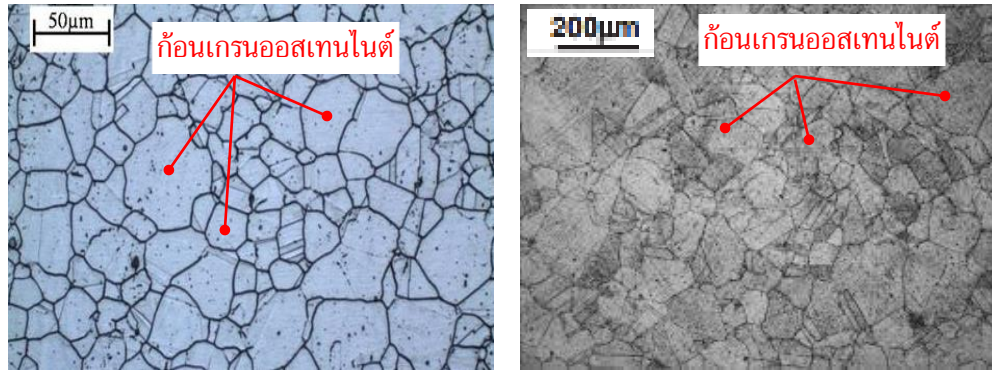
รูปที่ 6.47 ตัวอย่างวิธีการควบคุมปริมาณและกลไกการกัดกร่อนของเดลต้าเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อม

ที่มา : Wichan Chuaiphan. Defence Technology, Vol. 15(2), 170–178, 2019

2. โครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite structure) เป็นโครงสร้างประเภทสารละลายของแข็ง (Solid solution) ที่เกิดอยู่ในโลหะตระกูลเหล็กซึ่งบางครั้งเรียกว่า เหล็กแกมมา (Gamma iron : γ) มีระบบผลึกของโครงสร้างเป็นแบบ FCC ที่มีคุณลักษณะไม่ดูดติดกับแม่เหล็ก (Non–magnetic) มีความอ่อนเหนียว จากแผนภาพสมดุลของเหล็ก–คาร์บอนโครงสร้างนี้จะเกิดที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 723 –1,495°C ถ้าอุณภูมิสูงกว่านี้โครงสร้างจะเปลี่ยนสภาพไปเป็นโครงสร้างเดลต้าเฟอร์ไรต์ที่มีระบบผลึกเป็นแบบ BCC และถ้าอุณภูมิต่ำกว่านี้โครงสร้างจะเปลี่ยนสภาพไปเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่มีระบบผลึกเป็นแบบ BCC และโครงสร้างซีเมนไทต์ที่เป็นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound : Fe_3C) โดยปกติในเหล็กกล้าคาร์บอนโครงสร้างนี้สามารถละลายคาร์บอนได้สูงสุด 2.11% ที่ อุณหภูมิ1,146°C และไม่สามารถเกิดได้ที่ระดับอุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิปกติ (Room temperature) ด้วยเหตุที่สมบัติของโครงสร้างออสเทนไนต์มีคุณลักษณะไม่ดูดติดกับแม่เหล็ก ซึ่งเป็นสมบัติที่พิเศษของวัสดุโลหะกลุ่มเหล็กจึงได้มีความพยายามที่จะสร้างเฟสโครงสร้างออสเทนไนต์ให้สามารถคงอยู่ได้ที่ระดับอุณหภูมิห้อง เพื่อประโยชน์ในการใช้งานที่หลากหลาย ซึ่งที่จำเป็นที่จะต้องใช้โลหะเหล็กที่มีสมบัติ Non–magnetic เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ นักโลหะวิทยาจึงได้ค้นพบว่าธาตุโลหะนิกเกิล (Ni) และแมงกานีส (Mn) เป็นธาตุที่ผสมเข้าไปในโลหะเหล็กแล้วสามารถควบคุมขบวนการฟอร์มตัวของสารละลายของแข็งที่มีระบบผลึกแบบ FCC และไม่ดูดติดแม่เหล็ก ให้สามารถคงสถานะอยู่ได้เมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วก็ตาม กล่าวคือ โครงสร้างออสเทนไนต์ในโลหะเหล็กสามารถมีได้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งผู้ผลิตโลหะได้ผลิตออกมาในปัจุบันก็คือวัสดุโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกทั้งเกรด Series 300 และเกรด Series 200 และรวมไปถึงเหล็กกล้าผสมเกรดอื่น ๆ ที่ผสมธาตุโลหะนิกเกิลหรือผสมธาตุโลหะแมงกานีสในปริมาณที่สูง เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างโครงสร้างออสเทนไนต์ของเหล็กกล้าผสมนิกเกิล (Austenitic stainless steel) และเหล็กกล้าผสมแมงกานีสสูง (Hadfil–High manganess alloy steel) ในรูปที่ 6.48 (ก) และ (ข) ตามลำดับ อ้างอิงจาก Wichan Chuaiphan (2020) ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของสารละลายของแข็งที่ฟอร์มตัวเป็นออสเทนไนต์มีลักษณะก้อนเกรนที่เหมือนกัน จะต่างกันที่ขนาดก้อนเกรนที่อาจหยาบหรือละเอียดกว่ากัน ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยทางโลหะวิทยาอื่น ๆ เช่น ปัจจัยของการเย็นตัวหรืออิทธิพลของส่วนผสมทางเคมีอื่น ๆ ที่อยู่ ด้วยกัน เป็นต้น

โครงสร้างออสเทนไนต์ในเนื้อเชื่อมจะเกิดขึ้นกับการเชื่อมโลหะที่มีโครงสร้างพื้น (Matrix) ของโลหะหลักก่อนเชื่อมเป็นออสเทนไนต์ซึ่งเป็นปกติ แต่บางครั้งถ้าขบวนการเชื่อมใช้พลังงานความร้อนที่สูงมาก เป็นเหตุให้เกิดการสูญเสียธาตุที่มีเสถียรภาพออสเทนไนต์ (Austenite stabilizer) ออกไปมากยังคงเหลืออยู่ในปริมาณที่ไม่เพียงพอที่จะสร้างเสถียรภาพเฟสโครงสร้างออสเทนไนต์ไว้ได้ เนื้อเชื่อมอาจกลายเป็นโครงสร้างอื่นได้ เช่น โครงสร้างเดลต้าเฟอร์ไรต์ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เป็นต้น ดังนั้นการควบคุมปริมาณของส่วนผสมทางเคมีให้คงเหลือเพียงพอในแนวเชื่อมจึงเป็นปัจจัยสำคัญยิ่ง ไม่ว่าจะเป็นการเชื่อมโลหะชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน รวมไปถึงลวดเชื่อมชนิดเดียวกันและต่างชนิดกัน ซึ่งผู้ออกแบบงานเชื่อมหรือวิศวกรงานเชื่อมต้องทำนายหรือพยากรณ์ได้ว่าแนวเชื่อมที่ได้

ควรจะมีปริมาณส่วนผสมทางเคมีอยู่ปริมาณเท่าไหร่ ที่จะเป็นดรรชนีบ่งชี้ได้ว่าโครงสร้างของแนวเชื่อมมีโอกาสเป็นโครงชนิดใดได้บ้างและมีสัดส่วนปริมาณมากน้อยอย่างไร



(ก) ออสเทนไนต์เหล็กกล้าผสมนิกเกิล *ที่มา : JMR&T. Vol.9(3),5174–5183, 2020*

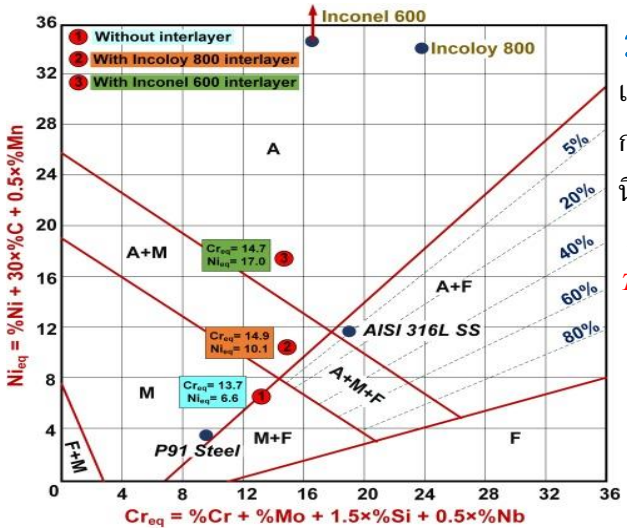
(ข) ออสเทนไนต์เหล็กกล้าผสมแมงกานีสสูง *ที่มา : MaterilasTransac. Vol.52(8),349–353, 2011*

รูปที่ 6.48 โครงสร้างออสเทนไนต์ในเหล็กกล้าผสมนิกเกิลและเหล็กกล้าผสมแมงกานีส

การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกทั้งที่เป็นแบบวัสดุโลหะชนิดเดียวกันและต่างชนิดกัน ของทั้งโลหะเชื่อมและลวดเชื่อม โครงสร้างพื้นฐาน (Matrix) ของแนวเชื่อมที่ได้ก็จะมีโอกาสเกิดเป็นเฟสออสเทนไนต์อย่างแน่นอนแต่จะมีเฟสโครงสร้างอื่น ๆ ปะปนร่วมอยู่ด้วยมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนของธาตุผสมทางเคมีเทียบเท่าเป็นสำคัญ กล่าวคือ ขึ้นอยู่กับปริมาณของโครเมียมเทียบเท่า (Chromium equivalent (Cr_{eq}) กับนิกเกิลเทียบเท่า (Nickel equivalent (Ni_{eq}) ที่ผสมอยู่ในเนื้อโลหะเชื่อม ดังนั้น ถ้าก่อนที่จะทำการเชื่อมช่างเชื่อมทราบค่าของ Cr_{eq}/ Ni_{eq} ของทั้งโลหะเชื่อมและลวดเชื่อมก็สามารถทำนาย/พยากรณ์ได้ว่าเมื่อน้ำโลหะเย็นตัวลงเนื้อของโลหะเชื่อมจะได้โครงสร้างชนิดใดบ้างและมีสัดส่วนปริมาณมากน้อยเพียงใด ปัจจุบันได้มีวิศวกรด้านวิศวกรรมโลหการคิดสูตรสำเร็จเป็นตารางความสัมพันธ์ออกมา ที่เรียกว่า “Schaeffler diagram” ใช้ในประมาณการปริมาณของโครงสร้าง (%) ในเนื้อเชื่อมที่อาศัยค่าความสัมพันธ์ของ Cr_{eq} กับ Ni_{eq} ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.49 เป็นการวิจัยทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L กับเหล็กกล้าผสมเกรด P 91 (9Cr–Mo) ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบ A–TIG โดยการทำนายโครงสร้างที่จะได้จากการเลือกใช้ลวดเชื่อม Incoloy 800 กับ Inconel 600 ที่อาศัยค่า Cr_{eq} กับ Ni_{eq} ด้วยการคำนวณจากส่วนผสมทางเคมี จะเห็นได้จากแผนภาพ Schaeffler ว่าค่าสัดส่วนปริมาณของ Cr_{eq}กับ Ni_{eq} สามารถพยากรณ์บอกชนิดและปริมาณของโครงสร้างที่ควรจะได้หลังการเชื่อม เช่น ออสเทนไนต์ (A) มาร์เทนไซต์ (M) และเฟอร์ไรต์ (F) ***ดูรายละเอียดเพิ่มเติมในบทต่อไป*

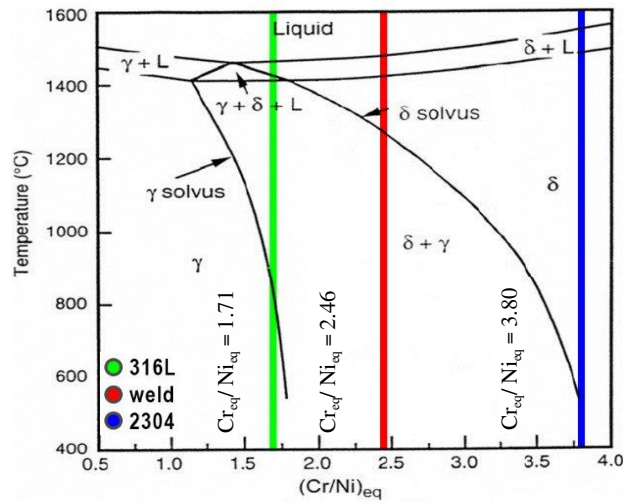
นอกจากนี้ยังมีวิธีการทำนายโครงสร้างที่ควรจะได้ด้วยการใช้ค่าสัดส่วนของ Cr_{eq}/ Ni_{eq} ที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ ขณะเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้องโดยใช้แผนภาพ Psuedo–binary ดังแสดงตัวอย่างในการวิจัยเชิงทดลองของการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่าง เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L กับเกรดดูเพล็กซ์ AISI 2304 ด้วยขบวนการเชื่อมเลเซอร์แบบไม่เติมลวด (Autogenous welding) ที่นำค่าสัดส่วนของ

Cr_{eq}/ Ni_{eq} มาทำนายโครงสร้างภายในเนื้อเชื่อม ในรูปที่ 4.50 จากรูปเห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่าสัดส่วนของ Cr_{eq}/ Ni_{eq} มีบทบาทในการกำหนดปริมาณการเกิดเฟสออสเทนไนต์ในแนวเชื่อม โดยกรณีที่สัดส่วนของ Cr_{eq}/ Ni_{eq} มีค่าต่ำโอกาสเกิดเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์สูง และเมื่อสัดส่วนของ Cr_{eq}/ Ni_{eq} มีค่าที่เพิ่มมากขึ้นโอกาสได้โครงสร้างออสเทนไนต์ก็จะค่อย ๆ ลดลง โดยจะได้เป็นเฟสโครงสร้างเฟอร์ไรต์มากขึ้นแทน ดังนั้นถ้าช่างเชื่อมทราบถึงปริมาณของ Cr_{eq} และ Ni_{eq} ของโลหะที่นำมาเชื่อมก็สามารถพยากรณ์ได้ว่าเมื่อน้ำโลหะในบ่อหลอมละลายเย็นตัวลง เนื้อโลหะของแนวเชื่อมจะเป็นโครงสร้างชนิดใด



รูปที่ 6.49 ตัวอย่างการทำนายโอกาสเกิดโครงสร้างภายในเนื้อเชื่อมของการเชื่อมเหล็กกล้าผสมโครเมียม – นิกเกิลด้วย Schaeffler diagram

ที่มา : Journal of Materials Processing Technology. Vol.274, 116280, 2019

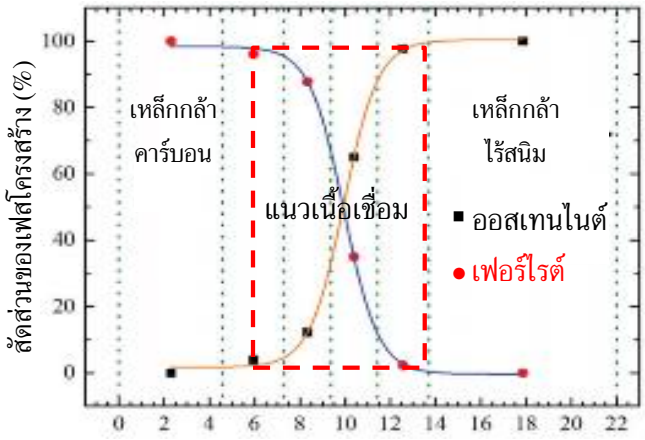


รูปที่ 6.50 ตัวอย่างการใช้สัดส่วนค่าของCr_{eq}/ Ni_{eq} เพื่อการทำนายเฟสโครงสร้างที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ ของการเชื่อมเหล็กกล้าที่ผสมโครเมียม–นิกเกิลโดยใช้ Psuedo–binary diagram

ที่มา : MDPI – Materials. Volume 13 (2930), 2020

ความสัมพันธ์ของการเกิดโครงสร้างออสเทนไนต์ (FCC) กับเฟอร์ไรต์ (BCC) ในเนื้อโลหะแนวเชื่อม เมื่อทำการเชื่อมเหล็กกล้าผสมที่มีโครงสร้างพื้นเป็นเฟสออสเทนไนต์ (Austenite matrix) กับเหล็กกล้าคาร์บอนมีโครงสร้างพื้นเป็นเฟสเฟอร์ไรต์ (Ferrite matrix) ดังแสดงในรูปที่ 6.51 (ก) จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนโครงสร้างได้อย่างชัดเจนมากว่า ถ้าเมื่อใดก็ตามภายในเนื้อโลหะเชื่อมเกิดเฟสออสเทนไนต์ปริมาณน้อย เฟสเฟอร์ไรต์จะกลับมีปริมาณที่มาก และในทางตรงกันข้ามถ้าเมื่อเกิด

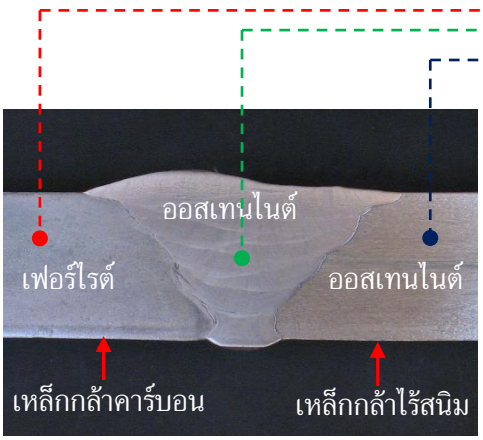
เฟสของออสเทนไนต์ปริมาณมาก เฟสเฟอร์ไรต์ก็จะน้อย ซึ่งเมื่อนำหลักการเกิดสัดส่วนโครงสร้างนี้ไปพิจารณาร่วมกับการทำนายโครงสร้างด้วยปริมาณสัดส่วน Cr_{eq}/ Ni_{eq} ที่แสดงในรูปที่ 6.50 นั้น สามารถอธิบายได้ว่าโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนซึ่งไม่มีธาตุนิกเกิลผสมจึงไม่สามารถเกิดเฟสออสเทนไนต์ได้ แต่ถ้าทำการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของนิกเกิลสูงก็จะสามารถสร้างเฟสออสเทนไนต์ขึ้นได้ โดยยิ่งนิกเกิลละลายเข้ามามากก็จะยิ่งทำให้โอกาสในการเกิดเฟสที่แม่เหล็กไม่ดูดนี้เพิ่มมากยิ่งขึ้นด้วย ดังตัวอย่างงานวิจัยเชิงทดลองในรูปที่ 6.51 (ข) เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1020 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 เชื่อมด้วยลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 309L (Cr และ Ni สูง) พบว่าเนื้อโลหะเชื่อมมีสมบัติเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเพราะมีเฟสโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ และเมื่อทดลองแช่ในสารละลายน้ำเกลือ 3.5% (น้ำทะเล) เป็นเวลา 7 วัน จะเห็นได้ชัดเจนว่าบริเวณแนวเชื่อมจะไม่เกิดออกไซด์ ซึ่งลักษณะเหมือนกับเนื้อโลหะบริเวณฝั่งโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม แต่ที่บริเวณฝั่งของโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนเกิดออกไซด์ ซึ่งเป็นปกติของเหล็กกล้าคาร์บอนในน้ำทะล ดังแสดงในรูปที่ 6.51 (ค)



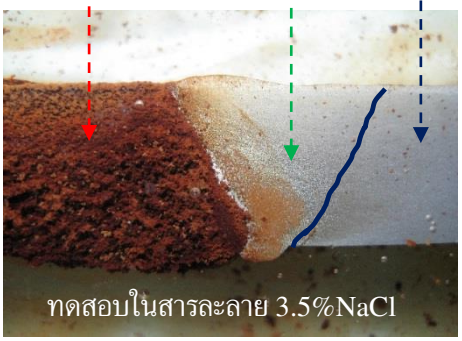
รูปที่ 6.51 ความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดเฟสเฟอร์ไรต์กับเฟสออสเทนไนต์ในการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิม

ที่มา : Wichan Chuaiphan. Thesis Doctoral, 2011

(ก) สัดส่วนการเกิดเฟสออสเทนไนต์/เฟอร์ไรต์



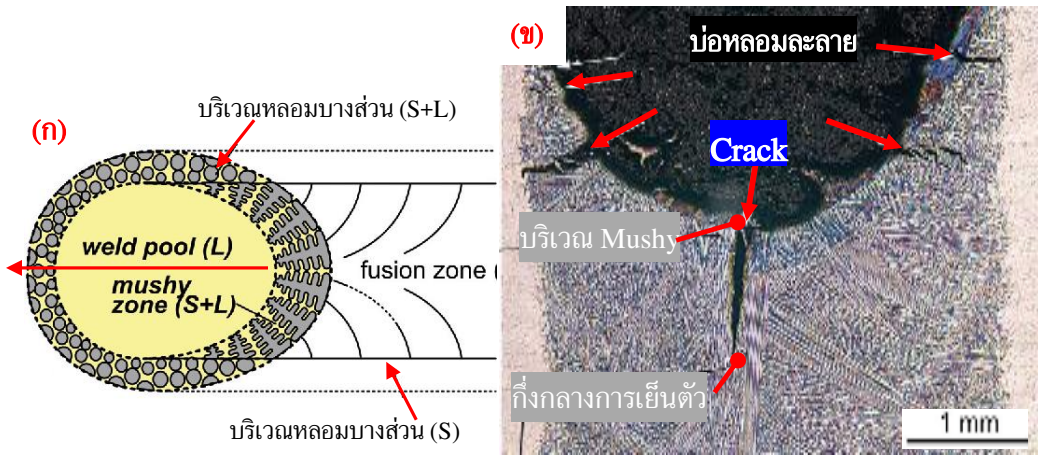
(ข) ลักษณะของแนวเชื่อมในการเชื่อมต่อ



(ค) การทดสอบประเมินการเกิดออกไซด์

นอกจากที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว การเกิดโครงสร้างออสเทนไนต์ในแนวเชื่อมยังต้องระวังการเกิดการแตกร้าวขณะแข็งตัว (Solidification cracking) ตามกลไกการแข็งตัวของบ่อหลอมละลายในการเชื่อม โดยปกติที่บริเวณกึ่งกลางของแนวเชื่อมจะเย็นตัวช้าที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 6.52 (ก) อ้างอิงจากงานวิจัยของ P. YU et al. (2018) กล่าวคือ เมื่อเริ่มเย็นตัวนิวเคลียสของแข็งจะเกิดที่ขอบของบ่อหลอมละลายที่บริเวณหลอมบางส่วน (Partially melted) เพราะความร้อนระบายออกไปได้ก่อน จากนั้นความร้อนจากส่วนกลางก็ตามมาของแข็งก็จะรุกคืบสวนทางกับทิศทางการระบายของความร้อน จึงเป็นเหตุให้กึ่งกลางของแนวเชื่อมเย็นตัวหลังสุด ซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจนที่บริเวณกึ่งกลางแนวแข็งตัวเมื่อแนวเชื่อมเย็นตัวเสร็จสิ้น

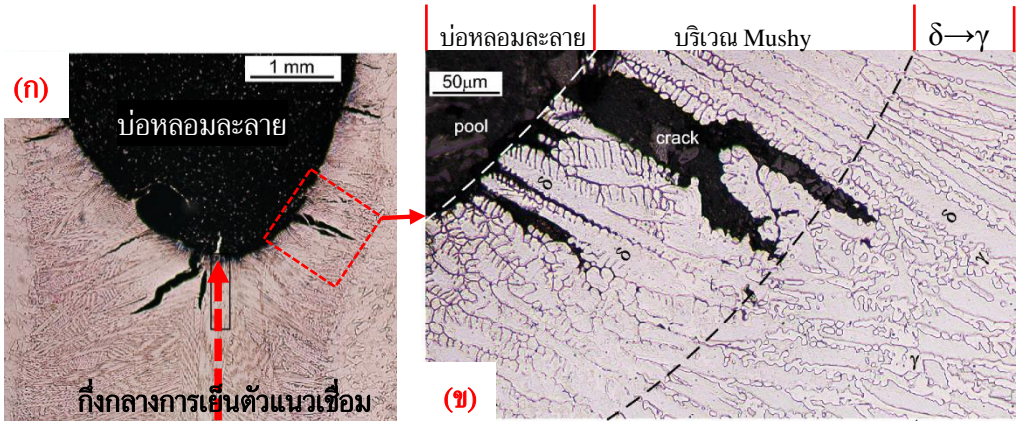
ขณะแข็งตัวของน้ำโลหะเหลวในการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก มักเกิดการแตกร้าวที่บริเวณของแข็งผสมของเหลว (S+L) ที่เรียกกันว่า “Mushy State” โดยมีโอกาสเกิดขึ้นได้รอบขอบของบ่อหลอมละลาย แต่ตำแหน่งที่รุนแรงและมีโอกาสเกิดมากที่สุดจะเป็นบริเวณจุดกึ่งกลางของแนวเย็นตัว ดังแสดงในรูปที่ 6.52 (ข) โดยการแตกร้าวจะเกิดที่ขอบของบ่อหลอม (Fusion line) แล้วแตกไปตามร่องของเกรนเดนไดร์ Primary arm ของแต่ละแท่ง โดยแต่ละแท่งจะจรดกันที่จุดปลายของ Secondary arm ซึ่งแนวที่แตกก็เปรียบเสมือนเป็นขอบเกรนของแท่งเดนไดร์ ที่มีสมบัติที่เกิดการแตกร้าวได้ง่าย ดังแสดงตัวอย่างผลของการวิจัยทดลองในรูปที่ 6.53 (ก)–(ค) ของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 แบบไม่เติมลวดเชื่อมด้วยขบวนการเชื่อมทิก ในรูป (ก) แสดงตำแหน่งของการแตกขณะเย็นตัวว่าจะเกิดที่บริเวณของแข็งผสมกับของเหลว (S+L) ส่วนในรูป (ข) ขยายถึงรูปแบบของการแตกจากขอบของบ่อหลอมละลาย (Mushy region) ลึกเข้าไปเนื้อของแข็ง ซึ่งสังเกตพบว่าแนวของรอยแตกจะเกิดในตำหน่งที่เป็นรอยต่อของระหว่างเกรนเดนไดร์ จึงได้ขยายตำแหน่งของรอยต่อระหว่างของโครงสร้างเดนไดร์ในรูป (ค) เพื่อให้เห็นถึงตำแหน่งของการแตกอย่างชัดเจน



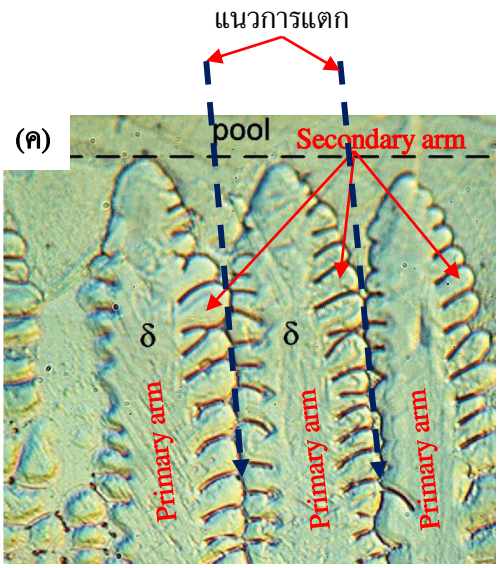
(ก) กลไกการแข็งตัวของบ่อหลอมละลาย **(ข)** ตำแหน่งที่จะเกิดการแตกขณะแข็งตัว

รูปที่ 6.52 กลไกการแข็งตัวของบ่อหลอมละลายในการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

ที่มา : AWS – Welding Journal, Welding research. Doi.org/10.29391/2018.97.026, 2018



(ก) กลไกการเย็นตัวของบ่อหลอมละลาย (ข) กลไกการแตกของขอบบ่อหลอมละลาย



(ค) แนวของการแตกร้าวขณะแนวเชื่อมแข็งตัว

รูปที่ 6.53 ตำแหน่งและทิศทางของการแตกขณะแข็งตัวของบ่อหลอมละลายในการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มของออสเทนนิติก

ที่มา : AWS – Welding Journal, Welding research. Doi.org/10.29391/2018.97.026, 2018

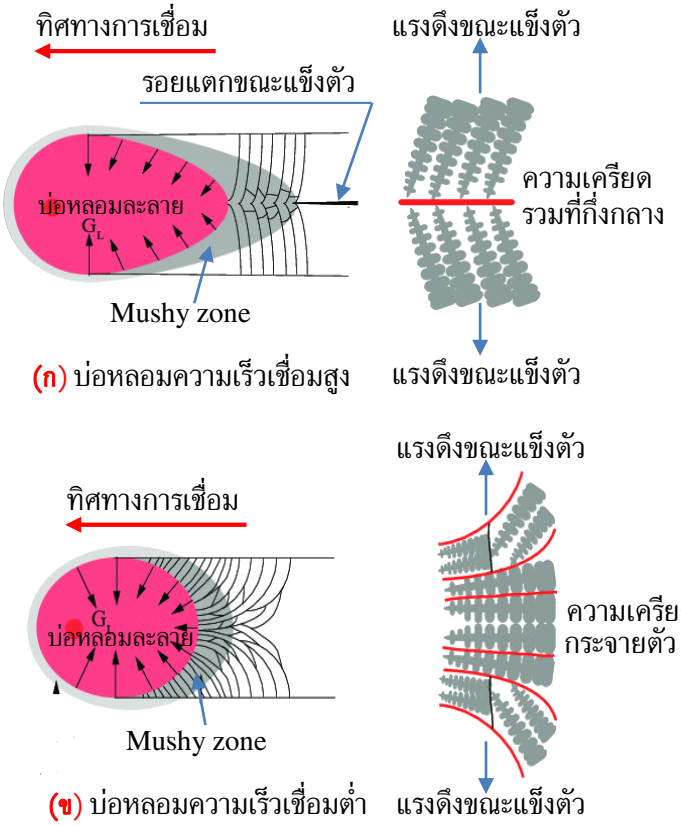
ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการแตกร้าวขณะแข็งตัว (Factor of Solidification cracking) จะเกิดจากส่วนผสมทางเคมีเป็นสำคัญ กล่าวคือ ส่วนผสมทางเคมีของทั้งโลหะหลักที่ติดมาจากขบวนการผลิตและส่วนผสมทางเคมีโลหะลวดเชื่อมที่นำมาเติม โดยที่มีการหลอมละลายรวมเข้าด้วยกัน ซึ่งทั้งชนิดและปริมาณของธาตุที่ผสมจะมีพฤติกรรมในการเปลี่ยนเฟสสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง (Solidification) ที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่มักมีธาตุซัลเฟอร์ (S) และฟอสฟอรัส (P) ที่หลงเหลือติดมามาจากขบวนการผลิต (หรืออาจมาจากที่ผสมในลวดเชื่อมเพื่อเพิ่มความสามารถในการตบแต่ง เช่น AISI 303S) เมื่อบ่อหลอมละลายแข็งตัวจะเริ่มแข็งที่ขอบแล้วรุกคืบเข้าหากึ่งกลางแนวเชื่อม ธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำอย่างซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสจะเย็นตัวช้า จึงถูกขับ

ออกไปยังกึ่งกลางของแนวเชื่อมทำให้บริเวณกึ่งกลางของแนวเชื่อมแข็งตัวหลังสุด และด้วยการที่มีปริมาณสะสมของซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสตามขอบเกรนเดนไดร์ที่สูง เมื่อแนวเชื่อมหด ตัวบริเวณขอบเกรนจะไม่สามารถรับความเค้นที่เกิดขึ้นจากการหดตัวได้ จึงเป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดการแตกร้าวขณะร้อนได้ (Hot cracking)

ในทางโลหะวิทยาเป็นที่ทราบกันดีว่าเฟสเฟอร์ไรต์ยินยอมให้ธาตุซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสสามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี ด้วยเหตุผลทางโลหะวิทยาข้อนี้ทำให้ในการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์เป็นโครงสร้างพื้นจึงมักไม่เกิดการแตกขณะเย็นตัว แต่ปัญหาดังกล่าวมักเกิดกับการเชื่อมเหล็กกล้าที่มีโครงสร้างพื้นเป็นเฟสออสเทนไนต์ นั่นก็คือการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มประเภทออสเทนไนต์ (Series 300 และ 200) ดังนั้นวิธีการป้องกันหรือลดการแตกขณะแข็งตัวของเหล็กกล้าประเภทนี้สามารถทำได้โดยการยินยอมให้เกิดเฟสเฟอร์ไรต์ขึ้นท่ามกลางเฟสออสเทนไนต์ เพื่อเอาไว้ทำหน้าที่กำจัดซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสในแนวเชื่อมไม่ให้ไปสะสมอยู่ตามขอบเกรน แต่อย่างไรก็ตามต้องไม่ลืมว่า เฟสโครงสร้างเฟอร์ไรต์ในแนวเชื่อมจะเป็นตัวการที่ลดความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนลง ซึ่งจากงานวิจัยได้มีการสรุปไว้ว่าการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกทั้งที่เชื่อมกับชนิดเดียวกัน หรือต่างชนิด/ต่างเกรดกัน ต้องควบคุมปริมาณของเฟสเฟอร์ไรต์ในแนวเชื่อมให้มีปริมาณที่ยอมรับได้อยู่ที่ 3 −10 % โดยสามารถทำนายปริมาณเฟสเฟอร์ไรต์ได้จากเครื่องมือที่เรียกว่า Schaeffler diagram ที่อาศัยการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโครเมียมเทียบเท่า (Cr_{eq}) กับปริมาณนิกเกิลเทียบเท่า (Ni_{eq}) ลงบนแผนภาพ Schaeffler ดังแสดงในรูปที่ 6.39 (ข) ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า ช่างเชื่อมสามารถควบคุมปริมาณของเฟสเฟอร์ไรต์ในแนวเชื่อมได้ด้วยการเลือกโลหะที่เชื่อมกับโลหะลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมทางเคมีที่ถูกต้องเหมาะสมและมีความสัมพันธ์กัน

นอกจากนี้วิธีการป้องกันการแตกร้าวขณะแข็งตัวยังสามารถทำได้ด้วยวิธีการควบคุมรูปร่างของบ่อหลอมละลายขณะแข็งตัว (Weld pool) ดังแสดงในรูปที่ 6.54 ซึ่งเป็นผลการวิจัยเชิงทดลองของ G. Agarwal et al. (2019) ที่ทดลองเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงในงานอุตสาหกรรมยานยนต์ เกรด TRIP ด้วยขบวนการเชื่อมเลเซอร์ที่ความเร็วเชื่อมสูง (High welding speed) กับความเร็วเชื่อมต่ำ (Low welding speed) ดังในรูป (ก) และ รูป (ข) ตามลำดับ เพื่อพิสูจน์ให้เห็นว่าเมื่อเชื่อมโลหะด้วยความเร็วเชื่อมที่สูง รูปร่างของบ่อหลอมละลายที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูปวงรียาวคล้ายหยดน้ำ (Teardrop) การเย็นตัวของบ่อหลอมละลายจะค่อนข้างเร็วทำให้เกิดรูปแบบการแข็งตัวเป็นเดนไดร์ที่พุ่งเข้าหาจุดกึ่งกลางของแนวเชื่อม (เกือบตั้งฉาก) ขณะที่ของแข็งเดนไดร์กำลังเติบโตก็จะปรากฏแรงดึงจากการหดตัว (Tensile strain) ขึ้นที่ทั้งสองข้างของขอบบ่อหลอมละลาย ส่งผลทำให้บริเวณกึ่งกลางของแนวเชื่อมที่เย็นตัวหลังสุดมีความเครียดดึงสูงมาก (Strain concentration) จึงเป็นต้นเหตุของการเกิดการแตกขณะร้อนขึ้น แต่พบว่าในขบวนการเชื่อมที่ใช้ความเร็วต่ำบ่อหลอมละลายจะมีลักษณะเป็นรูปทรงไข่ (Eilliptical) และมีอัตราการเย็นตัวที่ช้า รูปแบบการเติบโตของเดนไดร์ขณะแข็งตัวจะไม่พุ่งเข้าหาจุดกึ่งกลางแนวเชื่อมทิศทางเดียวแต่จะกระจายออกไป ด้วยเพราะมีเวลามากเพียงพอในการจัดเรีย ง

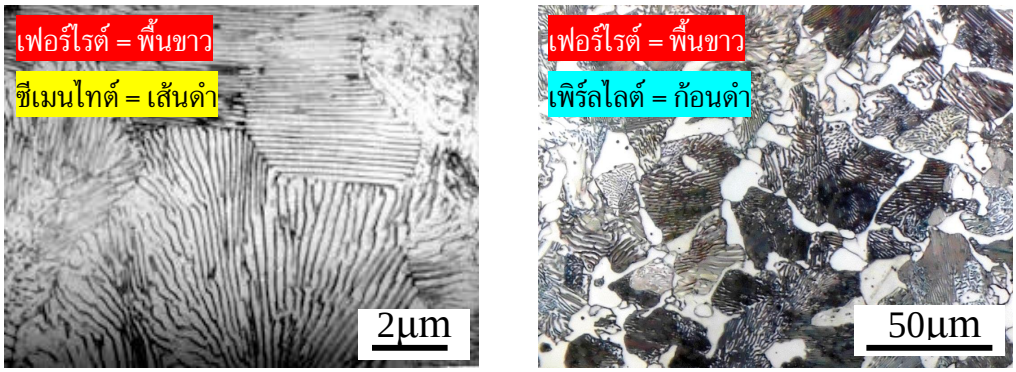
ตัวอย่างเป็นระบียบ จากพฤติกรรมการเติบโตของเดนไดร์ดังกล่าวส่งผลให้แรงเครียดดึงจากการหดตัวกระจายไปตามทิศทางของเดนไดร์ ขจัดการรวมแรงเครียดดึงที่จุดกึ่งของแนวเชื่อม ซึ่งเป็นการขจัดปัญหาการแตกร้าวขณะแข็งตัวของการเชื่อมได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 6.54 การป้องกันการแตกร้าวขณะแข็งตัวด้วยวิธีการควบคุมความเร็วของขบวนการเชื่อม *ที่มา : Journal of Materials & Design, Vol. 183 (5), 108104, 2019*

3. โครงสร้างซีเมนไทต์ (Cementite structure) หรือ โครงสร้างเหล็กคาร์ไบด์ (Iron carbide) เป็นโครงสร้างโลหะที่อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound) ที่ประกอบกันแบบแทรกช่องว่างระหว่างอะตอมของเหล็ก (Fe) กับคาร์บอน (C) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสูตรทางเคมีได้ว่า Fe_3C เป็นโครงสร้างของโลหะเหล็กที่มีสมบัติที่แข็งและเปราะ มีส่วนประกอบของคาร์บอนสูงสุด 6.67% ระบบผลึกเป็นแบบออโธรอมบิก (Orthorhombic) เป็นโครงสร้างที่มีจุดหลอมละลายสูงถึง 1,550 ^{o}C ในทางโลหะวิทยาจะไม่สามารถพบเหล็กที่มีโครงสร้างซีเมนไทต์อย่างเดียว แต่จะอยู่รวมกับโครงสร้างอื่น โดยเฉพาะในเหล็กกล้าคาร์บอนจะพบโครงสร้างซีเมนไทต์เกิดร่วมอยู่กับโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์ ซึ่งปะปนกันอยู่แบบเป็นแถบสลับกัน จะเรียกชื่อโครงสร้างที่อยู่กันในลักษณะนี้ว่า โครงสร้างเพิร์ลไลท์ (Pearlite structure : α+ Fe_3C) โดยที่สัดส่วนของเฟสซีเมนไทต์จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็ก กล่าวคือ ถ้าคาร์บอน (C) มากสามารถรวมตัวกับเหล็ก (Fe) ได้มากเกิดเป็นเหล็กคาร์ไบด์ได้มาก (Fe_3C) เฟสซีเมนไทต์ก็จะมากเฟสเฟอร์ไรต์ก็จะน้อย ในทางกลับกันถ้าคาร์บอน

น้อยเฟสซีเมนไทต์ก็จะน้อยเฟสเฟอร์ไรต์ก็จะมาก ดังแสดงในรูปที่ 6.55 (ก) แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างเฟสซีเมนไทต์มากกว่าเฟสเฟอร์ไรต์ และในรูป (ข) แสดงให้เห็นถึงเฟสซีเมนไทต์กับเฟสเฟอร์ไรต์ที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกันที่เรียกกันว่า เพิร์ลไลต์สมบูรณ์ (Balance pearlite)



(ก) โครงสร้างซีเมนไตท์ (Fe_3C) **(ข)** โครงสร้างเพิร์ลไลต์ ($\alpha+Fe_3C$)

รูปที่ 6.55 โครงสร้างซีเมนไทต์ที่เกิดร่วมกับเฟอร์ไรต์ในโครงสร้างเพิร์ลไลต์

ที่มา University of Tennessee, Materials Science and Engineering, 2013

โครงสร้างซีเทนไทต์ในทางโลหะวิทยางานเชื่อมมีอิทธิพลน้อยมาก เนื่องจากเป็นโครงสร้างสารประกอบของเหล็กที่สามารถเกิดขึ้นได้เองอย่างอัตโนมัติ เมื่อมีความเข้มข้นของคาร์บอนมากเพียงพอ (6.67%) ดังนั้น อัตราการเย็นตัวของการเชื่อมจึงไม่มีผลต่อกลไกการเกิดโครงสร้างซีเมนต์ไทต์ หรืออาจจะมีเพียงแค่ได้เฟสซีเมนไทต์สั้น–ยาว ที่อยู่ระหว่างเฟสเฟอร์ไรต์ โดยถ้าเย็นตัวเร็วจะได้เฟสของซีเมนไทต์ที่สั้นทำให้ได้โครงสร้างเพิร์ลไลต์ที่เป็นก้อนเล็ก และถ้าเย็นตัวช้าเฟสซีเมนไทต์ก็จะยาวทำให้ได้โครงสร้างเพิร์ลไลต์ที่เป็นก้อนใหญ่ จึงเป็นโครงสร้างที่ไม่ค่อยมีอิทธิพลต่อสมบัติของแนวเชื่อม

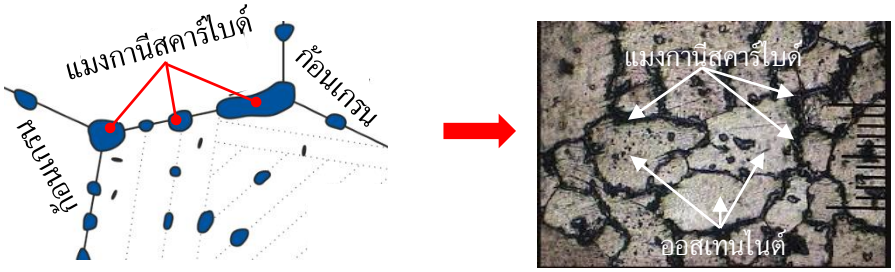
นอกจากโครงสร้างคาร์ไบด์ซีเมนไทต์แล้วยังมีโครงสร้างคาร์ไบด์ที่เกิดจากคาร์บอนไปรวมตัวกับธาตุโลหะอื่น ๆ ในรูปของการประกอบที่เกิดได้ในแนวเชื่อม เช่น โคเมียมคาร์ไบด์ ($Cr_{23}C_6$) แมงกานีสคาร์ไบด์ (Mn_3C) นิกเกิลคาร์ไบด์ (Ni_3C) โมลิบดินัมคาร์ไบด์ (Mo_3C) ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) และธาตุอื่น ๆ ที่อยู่ในบ่อหลอมละลายที่รวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ เป็นต้น โดยกลไกของการเกิดเฟสคาร์ไบด์ทั้งหมดจะเกิดขึ้นได้จากปริมาณที่ผสมอยู่ ไม่ได้เกิดจากปัจจัยของการเย็นตัวจึงไม่มีผลกระทบใด ๆ ต่อขบวนการเชื่อม แต่เป็นที่ทราบกันดีว่าเฟสคาร์ไบด์ส่วนใหญ่มีผลต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม ดังนั้นการเลือกวัสดุโลหะเชื่อมและลวดเชื่อมที่เหมาะสมก็สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลของแนวเชื่อมได้ ด้วยการควบคุมปริมาณเฟสคาร์ไบด์ที่กระจายอยู่ในแนวเชื่อม พบว่าส่วนใหญ่เฟสคาร์ไบด์มักถูกพลักออกมาให้อยู่ตามบริเวณขอบเกรน ด้วยเพราะไม่ละลายหรือรวมกับเฟสอื่น ๆ ได้อีก โดยจะส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีสมบัติด้านความเหนียวลดลง ซึ่งข้อด้อยของแนวเชื่อมเหล่านี้สามารถปรับปรุงแก้ไขได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment of metal) ด้วยการเอาพลังงานความร้อน

ไปช่วยในการปรับแต่งตำแหน่งของเฟสต่าง ๆ ให้อยู่ในสภาวะและตำแหน่งที่ไม่สมดุลในแนวเชื่อม ดังตัวอย่างการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์และแมงกานีสคาร์ไบด์ตามขอบเกรนในรูปที่ 6.56



(ก) การเกิดเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรน

ที่มา : T.Sourmail and H.K.D.H. Bhadeshia. Stainless steel, 2015



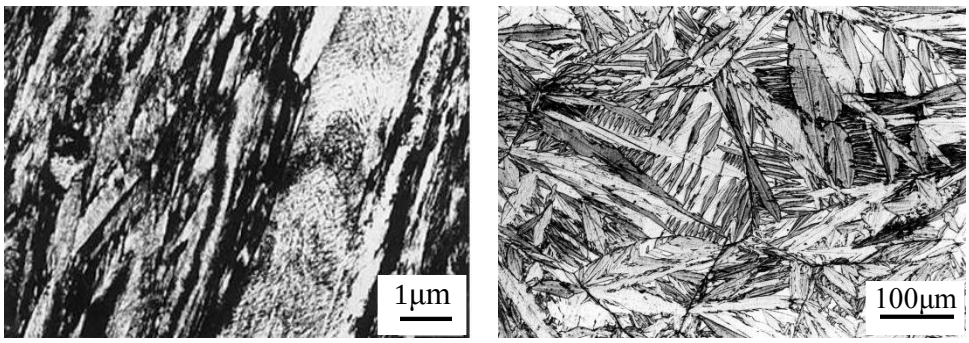
(ข) การเกิดเฟสแมงกานีสคาร์ไบด์ตามขอบเกรน

ที่มา : Knowledge E, ICTSD 2018 – Vol. 2019

รูปที่ 6.56 การเกิดคาร์ไบด์ตามบริเวณขอบเกรนหลังการแข็งตัว

4. โครงสร้างมาร์เทนไซต์ และเบนไนต์ (Martensite and Bainite structures) โครงสร้างจำพวกนี้เป็นโครงสร้างที่มีสภาพไม่เสถียร (Unstable) หรือไม่สมดุลซึ่งไม่ปรากฏให้เห็นบนแผนภาพสมดุลเฟส (Equilibrium phase diagram) แต่จะเกิดจากการเปลี่ยนของโครงสร้างในสภาวะวิกฤติ (Critical state) ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างฉับพลันของโลหะในการอบชุบด้วยความร้อน หรือเกิดจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการที่โลหะเหล็กกล้าผสมแมงกานีสสูง ได้รับแรงกระทำจากภายนอกอย่างแรง (แรงกระแทกของเหล็กฮาร์ดฟิลด์) และที่สำคัญคือเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของบ่อหลอมละลายในการเชื่อม ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ทั้งในเนื้อของแนวเชื่อม และบริเวณผลกระทบร้อน (HAZ) ของโลหะเชื่อม เป็นต้น สำหรับในแนวเชื่อมมักจะพบเฟสมาร์เทนไซต์กับการเชื่อมโลหะที่มีคาร์บอนผสมสูง โดยเกิดการแพร่ของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมของเหล็กจากเฟสออสเทนไนต์ขณะเย็นตัว เพื่อมาจับตัวกันเพื่อเป็นเฟสเฟอร์ไรต์ ด้วยเหตุคาร์บอนที่ผสมอยู่สูงจึงมารวมกันในปริมาณที่มากเกิน และเนื่องด้วยเพราะเวลาเย็นตัวที่เร็ว จึงเกิดเป็นสารละลายของแข็งเกินจุดอิ่มตัวยิ่งยวด (Supper saturated solid solution) ซึ่งผลึกของเฟสเฟอร์ไรต์แบบที่เกิดขึ้นใหม่นี้ เรียกว่า BTC (Body Centered Tetragonal)

นั่นก็คือ เฟสโครงสร้างมาร์เทนไซต์ โดยสามารถพบได้ทั้งมาร์เทนไซต์แบบบาง (Lath martensite) ซึ่งเกิดในกรณีที่ปริมาณคาร์บอนละลายมากเกิน (ที่ระดับต่ำ) และมาร์เทนไซต์แบบปลายแหลมคล้ายเข็ม (Needle–like martensite) ซึ่งเกิดในกรณีที่ปริมาณคาร์บอนละลายมากเกิน (ที่ระดับสูง) ดังแสดงในรูปที่ 6.57 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

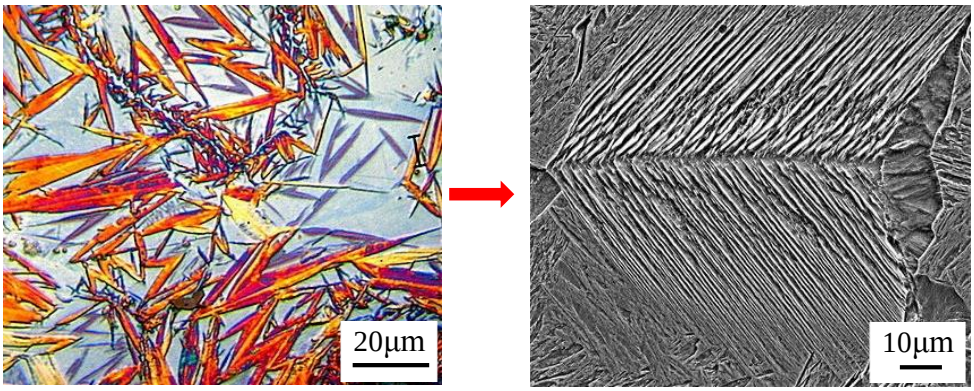


(ก) โครงสร้างมาร์เทนไซต์แบบแผ่นบาง **(ข)** โครงสร้างมาร์เทนไซต์แบบคล้ายเข็ม

รูปที่ 6.57 ลักษณะของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่แบบมีรูปแตกต่างกัน

ที่มา : Journal of Materials Research, Vol. 18(3), Org/10.1590, 2015

สำหรับโครงสร้างเฟสเบนไนต์ เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการที่เฟสออสเทนไนต์เย็นตัวเพื่อมาเป็นเฟสเพิร์ลไลต์แต่ด้วยอัตราเร็วของการเย็นตัวที่สูงของวิธีการอบชุบหรือวิธีการเชื่อม เป็นเหตุให้คาร์บอนที่ละลายออกมาจากการเปลี่ยนระบบผลึก FCC ไปเป็น BCC นั้นละลายออกมาได้ง่ายและมาก แล้วก็ไปรวมกับเฟสเฟอร์ไรต์และซีเมนไทต์ในปริมาณที่มากเกินจนเกิดเป็นสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดขึ้นที่เกิดสลับกันระหว่างเฟสเฟอร์ไรต์กับเฟสซีเมนไทต์ (เหมือนกับโครงสร้างเพิร์ลไลต์) แต่ด้วยเพราะเฟอร์ไรต์นี้แตกต่างจากเฟอร์ไรต์ที่เกิดแบบปกติ คือมีสถานะเป็นสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดจึงเรียกโครงสร้างที่เกิดสลับกันนี้ว่า “โครงสร้างเบนไนต์” ดังแสดงลักษณะของโครงสร้างในรูปที่ 6.58 (ก) และเพิ่มกำลังขยายด้วย SEM ในรูป (ข) ในงานเชื่อมมักจะพบว่าเกิดร่วมกันกับโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ด้วยเพราะอัตราการระบายความร้อนของการเย็นตัวในแนวเชื่อมมีความแตกต่างกันในแต่บริเวณ โดยบริเวณใดที่มีอัตราการเย็นตัวที่สูงโอกาสที่จะเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์มากกว่าเบนไนต์ และในทางตรงกันข้ามถ้าบริเวณใดมีอัตราการเย็นตัวที่ต่ำโอกาสที่จะเป็นโครงสร้างเบนไนต์มากกว่ามาร์เทนไซต์ และนอกจากอัตราการเย็นตัวแล้วยังมีปัจจัยของปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ในโลหะที่นำมาเชื่อม กล่าวคือ โอกาสที่จะเกิดปริมาณของโครงสร้างทั้งสองมากขึ้นในกรณีที่มีคาร์บอนผสมอยู่สูงอยู่ในโลหะเชื่อม (Base metal) แต่สำหรับการเชื่อมโลหะที่มีโครงสร้างพื้นเป็นมาร์เทนซิติก เช่นเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic stainless steels) หรือ ซีรีย์ 400 เมื่อผ่านการเชื่อมแล้วเย็นตัวก็จะได้โครงสร้างเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ (Martensitic matrix) ซึ่งเกิดขึ้นอย่างสมดุลของเหล็กกล้าผสมของเหล็กกลุ่มนี้ไม่ได้เกิดจากอิทธิพลของอัตราเร็วของการเย็นตัว



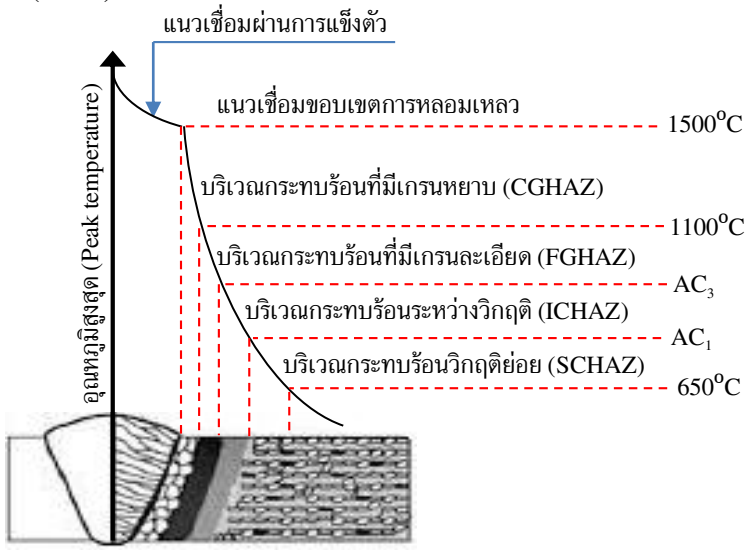
(ก) โครงสร้างเบนไนต์ (ข) โครงสร้างเบนไนต์ขยายด้วย SEM

รูปที่ 6.58 ลักษณะของโครงสร้างเบนไนต์ปกติและเพิ่มกำลังขยายด้วย SEM

ที่มา : Leometwu,. CS WU Taichung Taiwan, Color metallography, 2009

โครงสร้างมาร์เทนไซต์และเบนไนต์นอกจากจะเกิดอยู่ในส่วนของแข็งตัวจากบ่อหลอมละลายแล้ว บริเวณกระทบร้อน (HAZ) จากบ่อหลอมละลายก็จะมีโอกาสเกิดมากเช่นกัน เนื่องจากบริเวณของ HAZ มีอุณหภูมิจากการเชื่อมสูงมากที่จะทำให้เกิดเฟสออสเทนไนต์ แล้วเมื่อมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของการระบายความร้อนก็จะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจาก FCC เป็นเป็น BCC ได้ไม่ทัน เป็นเหตุให้เกิดเป็นโครงสร้าง BTC แทน ซึ่งก็คือโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (เย็นตัวเร็วมาก) และโครงสร้างเบนไนต์ (เย็นตัวช้ากว่าตามลำดับ) โดยโครงสร้างทั้งสองสามารถเกิดขึ้นได้ที่ HAZ ของทั้งบริเวณกระทบร้อนที่มีเกรนหยาบ (Coarse Grain Heat Affected Zone : CGHAZ) และบริเวณกระทบร้อนที่มีเกรนละเอียด (Fine Grain Heat Affected Zone : FGHAZ) ด้วยเพราะว่าระดับอุณหภูมิของทั้งสองบริเวณอยู่เหนือเส้น A_3 ดังแสดงในรูปที่ 6.59 ซึ่งที่ระดับของอุณหภูมินี้สูงมากพอที่จะทำให้โครงสร้างอยู่ในสภาวะสารละลายของแข็งเฟสออเทนไนต์ (FCC) และเมื่อบ่อหลอมละลายแนวเชื่อมเริ่มเย็นตัวที่มีอัตราการเย็นตัวที่เร็วมาก การเปลี่ยนเฟสจะเกิดขึ้นแบบฉับพลันซึ่งมีเวลาไม่มากพอที่จะเกิดเป็นโครงสร้างเฟสสมดุลได้ทัน ซึ่งก็คือเฟสเฟอร์ไรต์และซีเมนไทต์ แต่จะเกิดเป็นโครงสร้างเฟสที่ไม่สมดุลขึ้นแทน นั่นก็คือเฟสของโครงสร้างมาร์เทนไซต์และเบนไนต์ โดยปกติสมบัติทางกลของโครงสร้างมาร์เทนไซต์และเบนไนต์จะมีความแข็งสูง ดังนั้น บริเวณแนวเชื่อมและบริเวณกระทบร้อนที่เกิดโครงสร้างทั้งสองนี้จะมีความแข็งที่สูงจนอาจเป็นข้อด้อยที่ไม่พึงประสงค์ของแนวเชื่อมที่แข็งมากเกินไป เกิดการแตกร้าวได้ง่าย จึงต้องมีขบวนการนำแนวเชื่อมไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อลดความแข็ง และความเค้นตกค้าง (Residual stress) ที่สะสมอยู่ในแนวเชื่อม ซึ่งที่รู้จักกันดีในขบวนการของการให้ความร้อนกับชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม (Post Weld Heat Treatment : PWHT) โดยจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

ข้อมูลในรูปได้จากผลการวิจัยทดลองเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงส่วนผสมต่ำ (HSLA : APIX80) ด้วยขบวนการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (SAW)

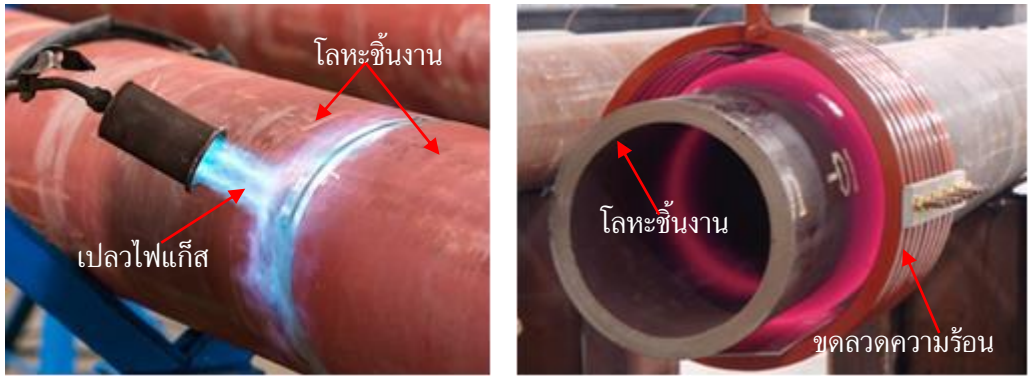


รูปที่ 6.59 การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างอันเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิกระทบร้อน (HAZ) ในแนวเชื่อม *ที่มา : ASME : Pressure Vessels and Piping Conference, Paper No. PVP 2020–21833, 2020*

6.5 กรรมวิธีทางความร้อนกับงานเชื่อม (Heat treatments associated with welding)

การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กันกับความร้อนเสมอ ทั้งที่เป็นความร้อนที่ป้อนเข้าไปเพื่อต้องการให้โลหะเกิดการหลอมละลาย (Heating) และความร้อนที่ระบายออกเพื่อต้องการให้บ่อหลอมละลายแข็งตัว (Cooling) ซึ่งทั้งคู่จะมีผลที่สัมพันธ์ต่อกัน ต่างก็ต้องควบคุมให้เกิดขึ้นอย่างมีระบบ เพราะบทบาทของความร้อนนี้มีอิทธิพลต่อการกำหนดคุณภาพและคุณสมบัติของแนวเชื่อมตามที่ต้องการ โดยจะกล่าวถึง กรรมวิธีทางความร้อนที่สำคัญและจำเป็นในขบวนการเชื่อมที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน ดังนี้

1. การอุ่นโลหะงานก่อนเชื่อม (Preheating in welding) เป็นวิธีการให้ความร้อนแก่โลหะชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม (Base metal) ให้มีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากอุณหภูมิปกติ เพื่อวัตถุประสงค์ในการเพิ่มความสามารถในการเชื่อมที่สูงขึ้น เช่นในกรณีการเชื่อมโลหะต่างชนิด การเชื่อมโลหะความหนาต่างกัน การเชื่อมโลหะที่จุดหลอมเลวต่างกัน เป็นต้น และยังช่วยลดอัตราการบิดตัว การแตกร้าว ที่เกิดจากความเค้น พร้อมกันนี้ยังช่วยขจัดแก๊สและความชื้นที่ชิ้นงานได้อีกด้วย กรรมวิธีการอุ่นโลหะงานสามารถทำได้ทั้งวิธีการเผาด้วยเปลวไฟแก๊ส (Flame heating) ดังแสดงในรูปที่ 6.60 (ก) ที่ทำได้ง่ายและสะดวก แต่ขาดความเที่ยงตรงของอุณหภูมิจากเปลวไฟอาจจะเหมาะกับงานที่ไม่ต้องการคุณภาพแนวเชื่อมมากนัก สำหรับงานเชื่อมที่ต้องการความเที่ยงตรงหรือคุณภาพของแนวเชื่อมที่สูง นิยมวิธีการใช้ขดลวดความร้อน (Induction heating) ดังแสดงในรูปที่ 6.60 (ข) ด้วยเพราะวิธีนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำซึ่งอาศัยระบบของไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



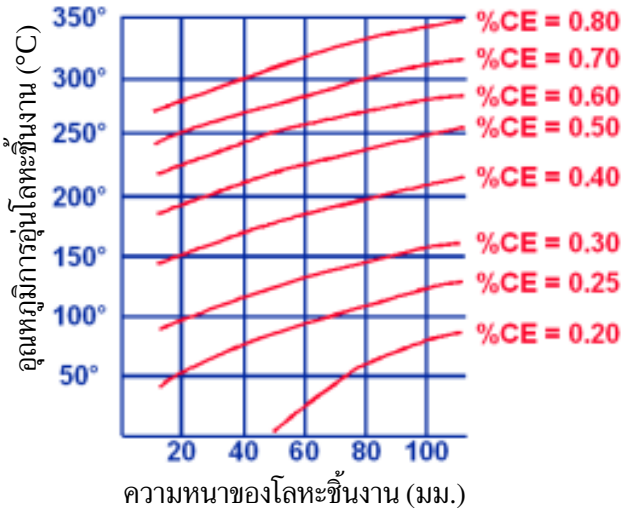
(ก) วิธีการให้ความร้อนด้วยเปลวไฟแก๊ส (ข) วิธีการให้ความร้อนด้วยขดลวดความร้อน

รูปที่ 6.60 กรรมวิธีการอุ่นโลหะชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม (Preheating in welding)

ที่มา : Pipe –Tube heating system, 2013

การเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาของการให้ความร้อนเพื่ออุ่นโลหะชิ้นงานก่อนเชื่อม เป็นการทำให้โลหะเชื่อมหลอมละลายได้เร็วขึ้นหรือง่ายขึ้น เหมาะกับการเชื่อมโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่างกัน เพราะความร้อนที่อุ่นให้จะเป็นฐานของอุณหภูมิสำหรับช่วยในการหลอมละลาย และความร้อนนี้ยังสร้างเป็นฐานของการระบายความร้อนให้เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เพื่อลดการขยายตัวแบบฉับพลันของโลหะชิ้นงานซึ่งสามารถช่วยลดการเกิดการบิดตัวของชิ้นงานได้ดี (Distortion) การให้ความร้อนก่อนเชื่อมนี้นอกจากจะกระทำบนบริเวณผิวของโลหะชิ้นงานที่ต้องการจะเชื่อมแล้วนั้น ยังมีขบบวนการอุ่นหรือให้ความร้อนงานระหว่างการเชื่อมของการเชื่อมหลายแนว (Interpass temperature) เพื่อต้องการเพิ่มอุณหภูมิในการเชื่อมของแนวเชื่อมถัดไป ซึ่งเป็นการเพิ่มขีดความสามารถของการเชื่อมเพิ่มขึ้น ในปัจจุบันได้มีการนำข้อดีของการอุ่นโลหะชิ้นงานก่อนเชื่อมมาพัฒนาเป็นเทคนิคการเชื่อม เช่น การออกแยกหัวเชื่อมมิก/แมกที่มีหัวเชื่อมแก๊สนำ เพื่อใช้เปลวไฟจากหัวเชื่อมแก๊สอุ่นงานก่อนเชื่อม ซึ่งเป็นลักษณะการเชื่อมแบบไฮบริด (Hybrid welding) เป็นต้น

อุณหภูมิสำหรับการอุ่นโลหะชิ้นงานก่อนทำการเชื่อมจะพิจารณาจากความสัมพันธ์ของปริมาณคาร์บอนที่ผสม (Carbon equivalent) กับความหนาของโลหะชิ้นงานเป็นสำคัญ ดังแสดงความสัมพันธ์ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงในรูปที่ 6.61 กล่าวคือ โลหะที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ในปริมาณมากขึ้น อุณหภูมิสำหรับการอุ่นโลหะชิ้นงานก็จะสูงขึ้น และในทำนองเดียวกันโลหะชิ้นงานยิ่งมีความหนามากขึ้น อุณหภูมิสำหรับการอุ่นก็จะยิ่งเพิ่มสูงมากขึ้น ซึ่งเป็นเหตุผลในทางโลหะวิทยาที่โลหะที่มีคาร์บอนผสมสูงอัตราการขยายตัวจะต่ำ มีคาร์ไบด์สูง ความแข็งสูงเมื่อบิดงอแล้วจะแตกได้ง่าย จึงต้องอุ่นงานด้วยความร้อนที่สูง สำหรับความหนาก็เป็นเรื่องปกติวิสัยที่เนื้องานที่หนามาก ต้องการความร้อนเพื่อการอุ่นให้เข้าถึงทุกบริเวณก็ต้องสูงตาม อย่างไรก็ตามการพิจารณาถึงอุณหภูมิของการอุ่นโลหะชิ้นงานก็จะต้องควบคู่กับกรรมวิธีของการเชื่อม เพราะแต่ละวิธีจะสร้างความร้อนได้ไม่เท่ากัน ซึ่งช่างเชื่อมต้องพิจารณาเลือกให้เหมาะสมและสัมพันธ์กัน ซึ่งอาจรวมถึงปัจจัยการเชื่อมด้านอื่น ๆ ด้วย เช่น ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้า (Heat input) และขนาดของลวดเชื่อม เป็นต้น

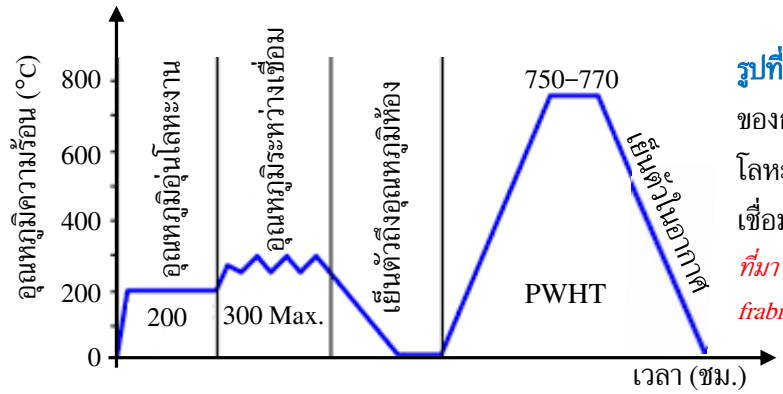


รูปที่ 6.61 อุณหภูมิของการอุ่นโลหะชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม (Preheating temperature) *ที่มา : Wear Management–Welding, 2015*

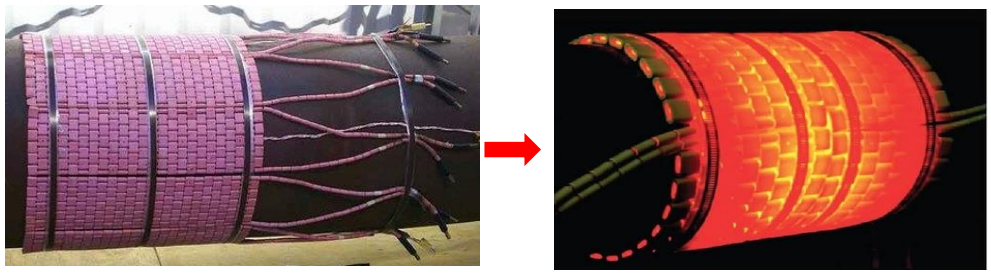
2. การให้ความร้อนโลหะชิ้นงานหลังการเชื่อม (Post–Weld Heat Treatment : PWHT) เป็นขบวนการที่จะเกิดขึ้นหลังการเชื่อมเสร็จสิ้นทันที หรือภายในเวลาที่กำหนดไว้ โดยการให้ความร้อนต่อชิ้นงานเชื่อมทั้งที่เป็นแนวเชื่อมและบริเวณกระทบร้อน เพื่อต้องการให้ความร้อนไปทำหน้าที่ปรับปรุงสมบัติของแนวเชื่อมให้ดีขึ้น โดยช่วยคลายหรือลดความเค้นที่ตกค้างภายในโครงสร้างโลหะที่เกิดจากการหดตัวขณะเย็นตัวของแนวเชื่อม ด้วยเหตุเพราะบ่อหลอมละลายของการเชื่อมมีอัตราการเย็นตัวที่เร็ว โครงสร้างที่ได้จะจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (Disorder structure) จึงเกิดความเค้นขึ้น ดังนั้น เมื่อป้อนพลังงานความร้อนเข้าไปก็จะช่วยทำให้โครงสร้างปรับตำแหน่งจนเป็นระเบียบ (Order structure) มากขึ้นเป็นผลทำให้ความเค้นลดลง นอกจากนี้ยังจะส่งผลไปทำให้ความแข็งของบริเวณกระทบร้อนลดลง ช่วยเพิ่มความเหนียวและความแกร่ง และยังช่วยกำจัดแก๊สไฮโดรเจนที่ละลายอยู่ในเนื้อเชื่อมได้เป็นอย่างดี สำหรับกรณีที่เชื่อมงานโลหะเหล็กไร้สนิมออสเทนเนติกที่ต้องการนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีความกัดกร่อนที่รุนแรง จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำ PWHT เพื่อให้ความร้อนไปละลายอนุภาคของเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr_3C_2 หรือ Cr_7C_3 หรือ $Cr_{23}C_6$) เพื่อให้โครเมียมที่ละลายออกมาช่วยสร้างออกไซด์ฟิล์ม (Passive film) ให้แข็งแกร่งและต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบหลุมหรือรูเข็ม (Pitting corrosion) ได้มากขึ้น ซึ่งเรียกกรรมวิธีนี้ว่า “การทำละลายของแข็ง (Solid solution heat treatment)”

สำหรับบริเวณกระทบร้อน (HAZ) หลังการให้ความร้อนจะส่งผลทำให้โครงสร้างที่ไม่สมดุล ได้แก่ โครงสร้างมาร์เทนไซต์หรือเบนไนต์ โครงสร้างเหล่านี้จะปรับตัวไปสู่สภาวะสมดุลในบางส่วน (กรณีให้ความร้อนสูงหรือใช้เวลานานอาจปรับตัวทั้งหมด) ส่งผลทำให้สมบัติของโครงสร้างบริเวณกระทบร้อนนี้มีสมบัติที่ใกล้เคียงหรือเหมือนกันกับแนวเชื่อมและโลหะหลัก โดยเฉพาะสมบัติทางกลด้านความแข็ง (Hardness) ทั้งนี้ก็ต้องขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของขบวนการให้ความร้อน กล่าวคือ ระดับของอุณหภูมิความร้อนที่ป้อนเข้าไป (Heating temperature) เวลาที่ใช้ป้อนความร้อน (Holding time) และอัตรา

ความเร็วของการให้และลดลงของอุณหภูมิ (Heating and Cooling rate) ซึ่งในทางปฏิบัติวิศวกรงานเชื่อมหรือช่างเชื่อมสามารถกำหนดรายละเอียดข้อปฏิบัติต่าง ๆ เหล่านี้ได้จากมาตรฐานข้อกำหนด ได้แก่ มาตรฐาน ISO/TR 14745:2015 หรือมาตรฐาน ASME Section VIII Divition 1 เป็นต้น ขบวนการให้ความร้อนโลหะชิ้นงานหลังการเชื่อม (PWHT) สำหรับโลหะเชื่อมแต่ละชนิดแต่ละเกรดจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนกับเวลาที่แตกต่างกัน แต่จะมีลำดับขั้นตอน (Step) ที่เกิดขึ้นเหมือนกันหรือคล้ายกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.62 และแสดงตัวอย่างของการเตรียมให้ความร้อนด้วยขดลวดความร้อนและชิ้นงานขณะร้อนบนแนวเชื่อมโลหะท่อ ในรูปที่ 6.63 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 6.62 ลำดับขั้นตอนของการให้ความร้อนแก่โลหะชิ้นงานหลังจากการเชื่อม (PWHT)
ที่มา : Welding frabrication world, 2014

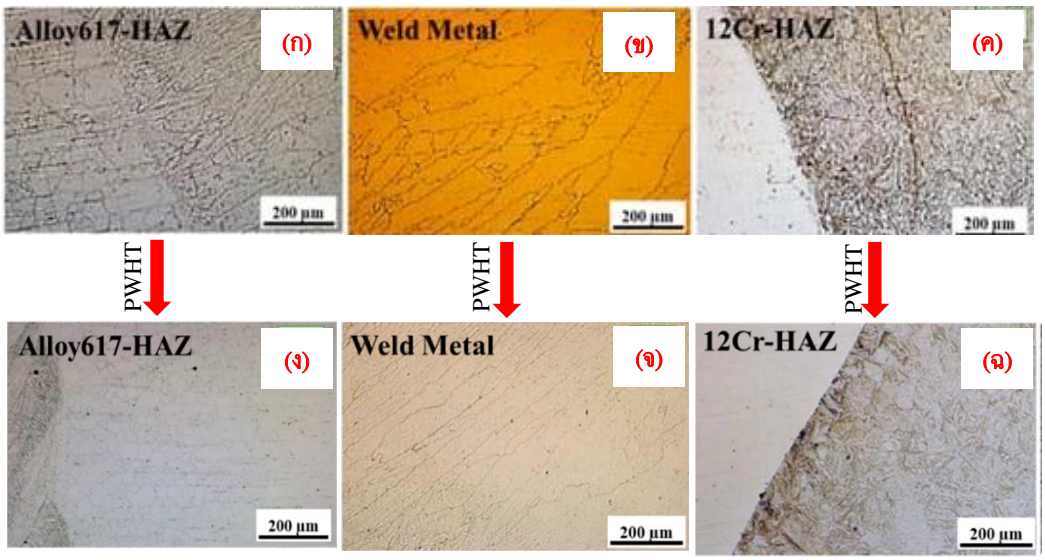


(ก) วิธีการประกอบเตรียมขดลวดความร้อน **(ข)** ความร้อนที่เกิดจากขดลวดความร้อน

รูปที่ 6.63 การเตรียมและการให้ความร้อนแก่โลหะชิ้นงานหลังจากการเชื่อม (PWHT)
ที่มา : Steel Heat Treatment Services : Post Weld Heat Treatment. 2017

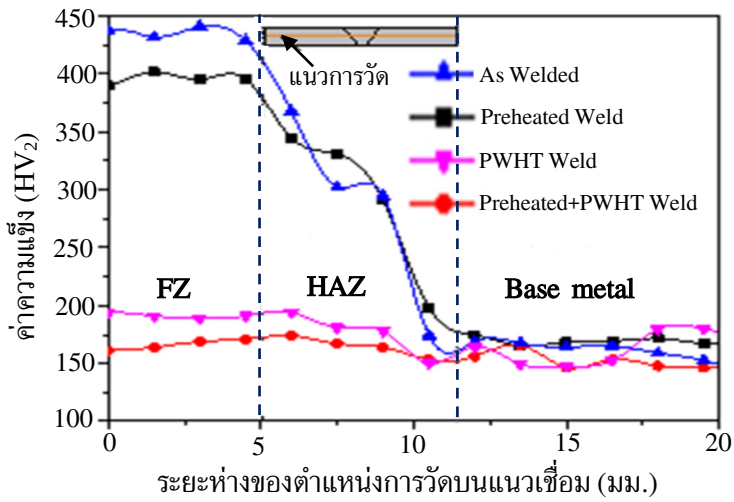
การเปลี่ยนแปลงในทางโลหะวิทยางานเชื่อมของการทำ PWHT เป็นการนำพลังงานความร้อนไปใช้เพื่อปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคในโลหะที่เชื่อม ดังแสดงตัวอย่างงานผลวิจัยเชิงทดลองของการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่าง Alloy 617 กับ Alloy 12 Cr ของ Umer Masood Chaudry et al. (2020) โดยเปรียบเทียบโครงสร้างก่อนและหลังการทำ PWHT ดังแสดงในรูปที่ 6.64 พบว่าผลของการให้ความร้อนแก่โลหะชิ้นงานหลังการเชื่อมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเนื้อเกรนภายในชัดเจนมาก ทั้งที่บริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) และที่บริเวณกระทบร้อน (HAZ) ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงมีอิทธิพลต่อสมบัติของชิ้นงานเชื่อม โดยเฉพาะสมบัติทางกลด้านความแข็ง ดังรายงานผลการวิจัยเชิงเปรียบเทียบระดับค่าความแข็งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงหลังจากที่ผ่านขบวนการให้ความร้อนที่แตกต่างกันระหว่าง

แนวเชื่อมปกติ (As welded) ผ่านการอุ่นชิ้นงาน (Preheated weld) ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม (PWHT weld) และผ่านการให้ความร้อนก่อนและหลังการเชื่อม (Preheated + PWHT weld) ดังแสดงผลในกราฟรูปที่ 6.65 ซึ่งพิสูจน์ให้เห็นว่าการใช้ความร้อนจากแหล่งภายนอกการเชื่อม เข้าไปเพื่อเป็นฐานของอุณหภูมิความร้อนใช้งาน ไม่ว่าจะให้ก่อนหรือหลังการเชื่อมก็จะเกิดผลดีกับแนวเชื่อม ซึ่งเห็นได้ชัดว่าช่วยลดความแข็งลงให้เท่ากันหรือใกล้เคียงกับโลหะหลัก และจะดีมากยิ่งขึ้นถ้าขบวนการเชื่อมนั้นสามารถทำการให้ความร้อนได้ทั้งก่อนและหลังการเชื่อม อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนชิ้นงานหลังการเชื่อมก็ต้องระมัดระวังเรื่องระดับความร้อนที่ใช้ และระยะเวลาของการให้ความร้อน เพราะทั้งคู่จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน เช่น ถ้าใช้ความร้อนสูงเกินไปหรือไม่สูงมากแต่นานเกินไป ก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างมากจนเกินไป จะทำให้เกิดเป็นข้อด้อยอื่น ๆ ตามมา ได้แก่ จะเกิด



รูปที่ 6.64 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะชิ้นงานเชื่อมหลังจากการทำ PWHT

ที่มา : MDPI– Materials Vol.13(20), 4512, 2020



รูปที่ 6.65 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแนวของเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่างกัน

ที่มา : ASM International –JMEPEG , 29:8271–8285, 2020

การผสมก้อนเกรนเข้าด้วยกันทำให้เกิดเป็นเกรนที่โตส่งผลต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม หรือเกิดการแพร่ของธาตุผสม (Diffusion) ที่มีประโยชน์เคลื่อนที่ไปอยู่ในตำแหน่งที่ไม่พึงประสงค์ เป็นต้น

6.6 โลหะวิทยางานเชื่อมของแก๊สปกคลุม (Welding metallurgy of shielding gases)

เทคโนโลยีการเชื่อมแบบหลอมละลายกับแก๊สปกคลุม (Shielding gas) เป็นสิ่งที่ต้องใช้ร่วมกัน เพราะความร้อนจากการเชื่อมทำให้เกิดการหลอมเหลวจากนั้นก็ปล่อยให้เกิดการเย็นตัว ในระหว่างการเปลี่ยนสถานะของโลหะเชื่อมจะได้ผลกระทบจากแก๊สต่าง ๆ ในบรรยากาศรอบ ๆ บ่อหลอมละลาย ซึ่งแก๊สภายนอกนี้จะเข้าไปรวมตัวกับน้ำโลหะในบ่อหลอมละลายได้ง่าย ส่งผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมในเชิงลบ จึงต้องใช้แก๊สมาปกคุลมป้องกันไว้ โดยแก๊สที่ใช้จะเป็นแก๊สที่มีน้ำหนักที่เรียกกันว่า แก๊สเฉื่อย (Inert gas) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาแก๊สปกคลุมที่ผสมแอคทีปแก๊ส (Active gas) และแก๊สที่ผสมเพื่อควบคุมปริมาณเฟสโครงสร้างในแนวเชื่อม ซึ่งแก๊สเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อแนวเชื่อมที่ได้หลังการเย็นตัว โดยจะได้กล่าวถึงแก๊สที่นิยมใช้งานกันในแต่ละกลุ่ม ที่มุ่งเน้นผลกระทบในทางโลหะวิทยาของงานเชื่อมเป็นสำคัญ ซึ่งอ้างอิงข้อมูลของ Robert W. Messler, Jr. (2004) ดังนี้

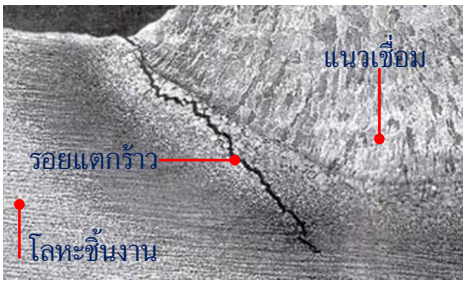
1. กลุ่มแก๊สเฉื่อยปกคลุม (Inert shielding gas) ที่นิยมใช้งานคือ แก๊สฮีเลียม (He) และแก๊สอาร์กอน (Ar) โดยฮีเลียมจะอาร์กได้ง่ายกว่าและมีเสถียรภาพมากกว่า หน้าที่หลักของแก๊สกลุ่มนี้จะปกป้องบ่อหลอมละลายไม่ให้แก๊สจากภายนอกเข้ารวมตัว เช่น ออกซิเจน (O_2) หรือไฮโดรเจน (H_2) ถ้าปริมาณแก๊สปกคลุมไม่มากเพียงพอแก๊สภายนอกสามารถทะลุผ่านเข้าไปได้จะทำให้เกิดรูพรุน (Porosity) ดังแสดงตัวอย่างรูพรุนที่เกิดจากการเชื่อมมิกในรูปที่ 6.66 (ก) ซึ่งเกิดจากแก๊สออกซิเจนไปรวมตัวกับโลหะเหล็กเกิดเป็นเหล็กออกไซด์หรือสนิม (Fe_2O_3 หรือ Fe_3O_4) ซึ่งมีสมบัติเป็นสารประกอบที่ไม่สามารถรวมตัวเป็นสารเนื้อเดียวได้ ประจวบกับความชื้นเมื่อได้รับความร้อนเกิดเป็นฟองอากาศขึ้น เมื่อเย็นตัวจะถูกพลักออกมาสู่ภายนอกจึงเกิดเป็นรูพรุนขึ้นบริเวณผิวแนวเชื่อม สำหรับความเสียหายของแนวเชื่อมเมื่อแก๊สไฮโดรเจนฝ่าด่านแก๊สปกคลุมเข้ามาได้ก็จะทำให้แนวเชื่อมเกิดการแตกร้าวได้ ดังตัวอย่างการแตกร้าวจากแก๊สไฮโดรเจนในรูปที่ 6.66 (ข) มักพบการแตกร้าวแบบนี้ที่บริเวณเกรนหยาบ (Coarse zone) เนื่องจากอะตอมของแก๊สไฮโดรเจนที่เข้าไปผสมอยู่จะแพร่ไปรวมตัวกันที่บริเวณขอบเกรน เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นก็จะรวมกันได้มากขึ้นและมากขึ้นเรื่อย จนเกิดเป็นแรงดันภายในที่เนื้อเชื่อมไม่สามารถทนได้ก็จะเกิดการแตกร้าวขึ้น ที่เรียกกันว่า Hydrogen cracking หรืออาจเรียกว่า Cold crack ซึ่งกลไกการแพร่ซึมของแก๊สไฮโดรเจนที่เรียกว่า Hydrogen embrittlement ดังแสดงในรูปที่ 6.66 (ค) อย่างไรก็ตามความอันตรายจากแก๊สไฮโดรเจนนี้สามารถแก้ไขได้ ด้วยวิธีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม (PWHT) ซึ่งความร้อนจะไปเพิ่มแรงดันให้กับแก๊สไฮโดรเจนและขณะเดียวกันก็ช่วยลดแรงยึดเหนี่ยวที่ขอบเกรน ทำให้แก๊สไฮโดรเจนภายในแพร่ซึมออกมาได้ง่ายและหมดไปหรืออาจหลงเหลืออยู่บ้างในปริมาณที่ไม่มากพอที่จะสร้างแรงดันให้เกิดการแตกร้าวได้ ขบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์จะมีโอกาสเกิดแก๊สไฮโดรเจนในแนวเชื่อมสูง เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนจะติดมากับ

ความชื้นของฟลักซ์ที่หุ้มลวด ดังนั้น จึงต้องมีการนำลวดเชื่อมไปอบไล่ความชื้นเพื่อขจัดแก๊สไฮโดรเจนให้หมดไป เป็นวิธีการลดหรือป้องกันแก๊สไฮโดรเจนเข้ามาสะสมอยู่ในเนื้อโลหะเชื่อม



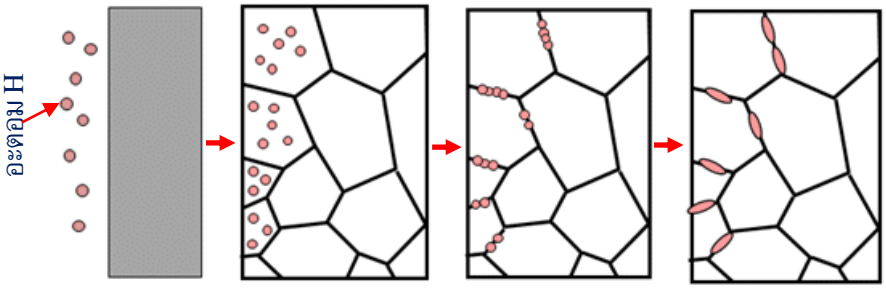
(ก) การเกิดรูพรุนจากแก๊สออกซิเจน

ที่มา : ARC HELMENTS, 2020



(ข) การแตกร้าวจากแก๊สไฮโดรเจน

ที่มา : Miller , Hydrogen in welding, 2013



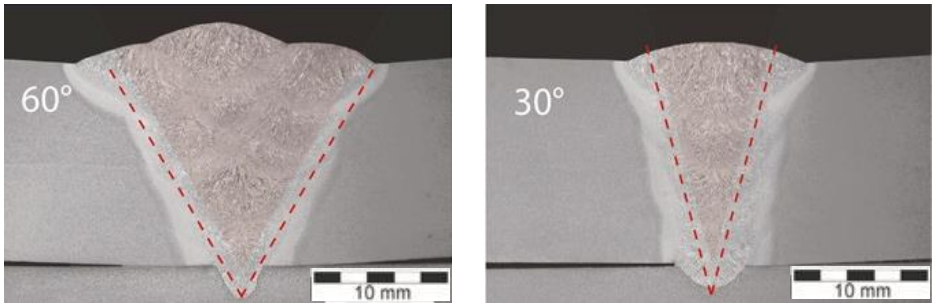
(ค) จำลองกลไกการแพร่ซึมของแก๊สไฮโดรเจนในแนวเชื่อม

ที่มา : Industrial Metallurgists. Hydrogen embrittlement of steel, 2020

รูปที่ 6.66 ผลกระทบของแก๊สออกซิเจนและแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในการเชื่อม

2. กลุ่มแก๊สแอคทีฟปกคลุม (Active shielding gas) ที่นิยมใช้กันคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) อย่างเดียวและผสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับแก๊สเฉื่อย โดยมีมาตรฐานของแก๊สปกคลุม EN–ISO 14175 การเลือกใช้แอคทีฟแก๊สในการเชื่อมก็เพราะต้องการปริมาณความร้อนจากแก๊สที่ทำปฏิกิริยากับความร้อนมาช่วยเสริมความร้อนจากการอาร์กให้เกิดการหลอมลายได้ง่ายขึ้น บ่อหลอมมีอุณหภูมิสูงขึ้น เชื่อมได้เร็วขึ้น และเชื่อมโลหะหนาได้มากขึ้น ด้วยเหตุผลเหล่านี้จึงเกิดการผสมแก๊สแอคทีฟหลายชนิดหลายสัดส่วนตามความเหมาะสมใช้งาน ในทางโลหะวิทยางานเชื่อมแก๊สแอคทีฟจะทำให้โลหะหลอมละลายเร็วขึ้น ซึ่งก็จะส่งผลทำให้บริเวณกระทบร้อน (HAZ) มีขนาดที่เล็กลง ซึ่งเป็นผลดีต่อชิ้นงานโลหะเชื่อม และเหมาะกับการเชื่อมโลหะที่มีจุดการหลอมเหลวที่สูง ๆ หรือการเชื่อมโลหะต่างชนิดที่จุดหลอมเหลวต่างกันมาก ๆ เป็นต้น นอกจากนี้การหลอมละลายที่เร็วของโลหะงานจะทำให้มีขนาดบ่อหลอมที่เล็กและแคบ ส่งผลให้เกิดอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วซึ่งจะได้แนวเชื่อมที่แคบแต่ลึก ดังแสดงเปรียบเทียบแนวเชื่อมจากการเชื่อมด้วยขบวนการ GMAW ที่ใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุม (Inert gas)

กับการใช้แอคทีฟแก๊สปกคลุม (Active gas) ในรูปที่ 6.67 (ก) และ (ข) ตามลำดับ และยังเป็นที่รับรู้กันเป็นอย่างดีว่าการใช้แก๊สแอคทีฟจะทำให้ได้ขนาดเกรนที่เล็ก (Fine grain) กว่าการใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุม



(ก) แนวเชื่อมใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุม (Ar) **(ข)** แนวเชื่อมใช้แก๊สแอคทีฟปกคลุม (CO_2)

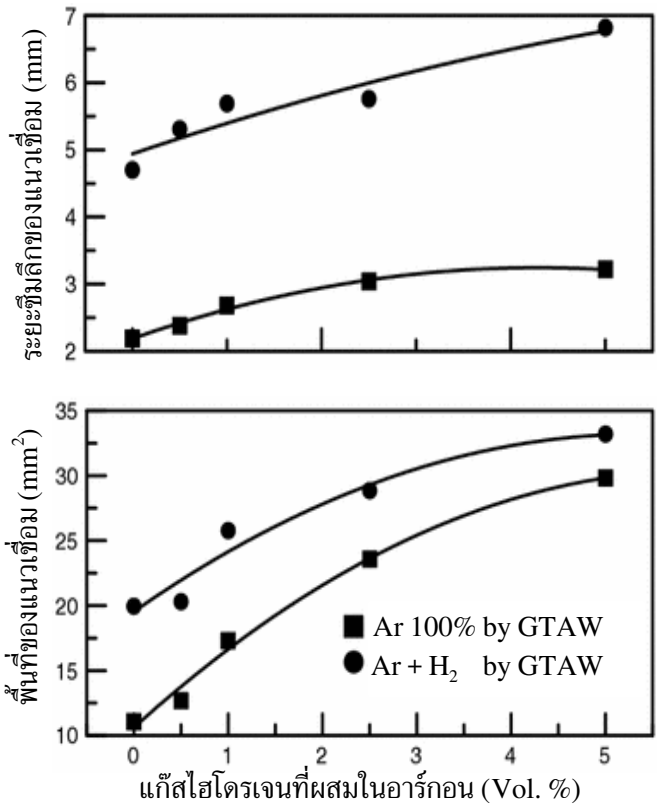
รูปที่ 6.67 เปรียบเทียบลักษณะของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยขบวนการเชื่อม MIG และ MAG

ที่มา : EWM– We are welding. MIG/MAG Welding processes, 2018

นอกจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่กล่าวมายังมีแก๊สแอคทีฟแบบผสม (Mixture gases) ที่ใช้แก๊สเฉื่อยเป็นตัวหลักแล้วผสมแก๊สแอคทีฟเข้าไปตามสัดส่วนที่เหมาะสมกับชนิดของโลหะที่เชื่อม แก๊สแอคทีฟที่นิยมนำมาใช้ผสมเพื่อการเชื่อม Metal Active Gases : MAGได้แก่ ออกซิเจน (O_2) ไฮโดรเจน (H_2) ไนโตรเจน (N_2) โดยจะผสมกันตามสัดส่วนที่เหมาะสม ซึ่งอาจผสมกันมากกว่าสองชนิดแก๊ส ดังตัวอย่างเช่น Ar + O_2 หรือ Ar + CO_2 หรือ Ar + CO_2 + O_2 หรือ Ar + H_2 หรือ Ar + He + CO_2 และอื่น ๆ อีกมากซึ่งสามารถที่จะระบุให้ผู้ผลิตแก๊สเชื่อมผสมปริมาณแก๊สที่เหมาะสมกับแต่ละชนิดของวัสดุโลหะที่ต้องการเชื่อมได้ โดยบทบาทของแก๊สที่นำมาผสมแต่ละตัวจะแตกต่างกัน ดังผลการวิจัยเชิงทดลองของ Her Yuen Huang (2009) ที่เปรียบเทียบการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติกเกรด AISI 304 ด้วยแก๊สปกคลุมระหว่าง Ar 100 % กับแก๊สผสม Ar + 0–5% H_2 ผลการทดลอง ในรูปที่ 6.68 จะเห็นได้ชัดเจนว่าการผสมแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สอาร์กอนปกคลุมจะส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีขนาดที่โตขึ้นและมีอัตราการซึมลึกที่สูงขึ้น โดยจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฮโดรเจนที่ผสม เพราะแก๊สไฮโดรเจนเมื่อได้รับความร้อนจะเป็นตัวช่วยเร่งเพิ่มปริมาณความร้อนให้กับการอาร์ก และยังช่วยเพิ่มความเร็วในการเชื่อมได้เป็นอย่างดี

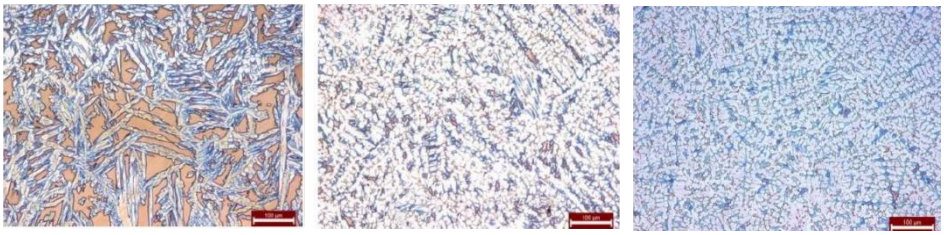
นอกจากนี้แก๊สแอคทีฟไนโตรเจน (N_2) เป็นแก๊สที่นิยมนำมาใช้ผสมกับแก๊สเฉื่อยอาร์กอนหรือฮีเลียมในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนเนติกและกลุ่มดูแพล็กซ์ โดยต้องการให้แก๊สไนโตรเจนเป็นตัวควบคุมปริมาณการเกิดเดลตาเฟอร์ไรต์ (δ–ferrite) และยังช่วยเพิ่มปริมาณความร้อนให้กับการเชื่อมได้ดี ดังแสดงผลการทดลองผสมแก๊สไนโตรเจนในอาร์กอนที่ปริมาณสัดส่วนต่าง ๆ ระหว่าง 1–9% โดยปริมาตร สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรด S32205 ผลการทดลองระบุชัดเจนว่าเมื่อใช้ปริมาณไนโตรเจนผสมที่สูงขึ้นจะช่วยลดปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ลงอย่างเห็นได้ชัดในรูปที่ 6.69 ด้วยเพราะไนโตรเจนมีสมบัติที่เสถียรภาพเฟสออสเทนไนต์สูง (Austenite stabilizer)

จึงทำหน้าที่ช่วยสร้างเฟสออสเทนไนต์ได้เร็วขึ้นและรั้งไม่ให้เกิดเฟสเฟอร์ไรต์ได้ง่าย นอกจากตัวอย่างของแก๊สผสมที่กล่าวมาแล้วนั้น ยังมีการผสมแก๊สที่ใช้งานเฉพาะทางอีกหลายชนิด โดยมีการกำหนดเป็นกลุ่มของแก๊สปกคลุมตามมาตราฐานสากล โดยมีทั้งมาตรฐานของอเมริกา และยุโรป เช่น มาตรฐานกลุ่มประเทศยุโรป EN–ISO 14175 เป็นต้น



รูปที่ 6.68 อิทธิพลของแก๊สไฮโดรเจนที่ผสมในแก๊สอาร์กอนใช้เป็นแก๊สปกคลุมมีผลต่อขนาดและการซึมลึกของแนวเชื่อม

ที่มา : Journal of Materials & Design. Vol. 30 (7), 2404–2409, 2009



3% N_2 (δ–ferrite 55.6%) 6%N_2 (δ–ferrite 36.5%) 9%N_2 (δ–ferrite 28.8%)

รูปที่ 6.69 เปรียบเทียบโครงสร้างแนวเชื่อมที่ N_2ผสมเพิ่มขึ้นและ δ–ferrite ลดลง

ที่มา : Journal of MDPI–Metals. Vol. 8 (226), doi:10.3390/met8040226, 2018

อย่างไรก็ตามในทางโลหะวิทยาจะพบว่าวัสดุโลหะแต่ละชนิดมีความสามารถหรือยินยอมให้แก๊สแอคทีฟที่ผสมอยู่ในแก๊สปกคลุมเข้าไปอยู่ในปริมาณจำกัด ถ้ามากเกินไปจะส่งผลกระทบในเชิงลบต่อแนวเชื่อม ดังนั้น จึงต้องเข้าใจถึงคุณลักษณะทางโลหะวิทยาของโลหะที่ต้องการเชื่อมกับชนิดและปริมาณแก๊สแอคทีฟที่เหมาะสม เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับการปรับปรุงคุณภาพของแนวเชื่อม

ดัชนีคำศัพท์บทที่ 6

Afm (Area filler metal) – บริเวณเนื้อโลหะของลวดเติมเชื่อม

After weld condition – สภาพโครงสร้างเนื้อโลหะหลังทำการเชื่อม

Arc energy – พลังงานของการอาร์กเชื่อม

As–received condition – สภาพโครงสร้างเนื้อโลหะก่อนทำการเชื่อม

As–weld condition – สภาพโครงสร้างเนื้อโลหะระหว่างทำการเชื่อม

Balance pearlite – เนื้อเชื่อมที่มีเฟส α กับเฟส Fe_3C เท่ากัน

Black & White Welding – การเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน (นิยมเรียกกันในแถบยุโรป)

Bond energy – พลังงานการเกาะยึดของผลึกโลหะ

Cladding weldment –โลหะเชื่อมแบบเสริมเนื้อโลหะ

Coarser structure weld – โครงสร้างเนื้อเชื่อมที่มีเกรนหยาบ

Columnar grains – รูปแบบเกรนที่เป็นแท่งยาว

Cooling rate – อัตราการเย็นตัวของบ่อหลอมละลาย

Crack propagation – การขยายตัวของรอยร้าว

Crystal structure – รูปแบบการเกาะยึดของผลึกโลหะ

Delta–ferrite fraction – โครงสร้างเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมออสเตนไนต์

Dilution (%) – ปริมาณสัดส่วนของการผสมกันของสารเคมี

Dilution in dissimilar – การละลายของสารเคมีในเนื้อเชื่อมโลหะต่างชนิด

Elliptical weld pool – บ่อหลอมละลายที่เป็นรูปวงรีที่เกิดจากความเร็วเชื่อมต่ำ

Finer structure weld – โครงสร้างเนื้อเชื่อมที่มีเกรนละเอียด

Grain boundary weld – ขอบเกรนของแนวเชื่อม

Grain growth weld – การเติบโตของเกรนขณะแข็งตัวของบ่อหลอมละลาย

Grain structure – โครงสร้างของเกรนในแนวเชื่อม

Heat input – พลังงานความร้อนที่ป้อนเข้าในการอาร์กเชื่อม

Heterogeneous welding – เรียกการเย็นตัวของการเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน

High dilution – การละลายของสารเคมีในเนื้อเชื่อมในปริมาณที่สูง

Hydrogen cracking– การแตกตร้าวจากอิทธิพลของไฮโดรเจน

Macrostructure weld – โครงสร้างเนื้อเชื่อมระดับมหาภาค

Mass of joint area – มวลของพื้นที่เนื้อโลหะเชื่อม

Melting point – จุดหลอมเหลวของโลหะที่ทำการเชื่อม

Microstructure weld – โครงสร้างเนื้อเชื่อมระดับจุลภาค

Mushy state– สภาพการแข็งตัวที่มีส่วนของเหลวกับของแข็งผสมกัน

New grain weld – การเกิดเกรนใหม่ในเนื้อเชื่อม

Overlay weldment – โลหะเชื่อมแบบพอกเนื้อเชื่อม

Parent zone – บริเวณของเนื้อโลหะหลักที่ไม่เกิดผลกระทบจากการเชื่อม

Partially melted – เนื้อเชื่อมที่มีการหลอมละลายบางส่วน

Polycrystalline – โครงผลึกที่เกาะยึดกันหลาย ๆ ผลึก

PWHT weld – การอุ่นชิ้นงานหลังจากการเชื่อม

Rapid cooling rate – อัตราการเย็นตัวของการเชื่อมที่รวดเร็ว

Schaeffler diagram – แผนภาพทำนายโครงสร้างงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม

Solidification cracking – การแตกร้าวขณะเย็นตัว

Solidification mechanism – กลไกการแข็งตัวของโลหะ

Stress Concentration weld – ความเค้นสะสมในเนื้อเชื่อม

Teardrop weld pool – บ่อหลอมละลายที่เป็นรูปหยดน้ำที่เกิดจากความเร็วเชื่อมสูง

Tempering weld – การอบคืนตัวของเนื้อเชื่อม

Thermal conductivity – การนำความร้อนของโลหะหลักที่เชื่อม

Thermal diffusivity– การกระจายความร้อนผ่านวัสดุโลหะเชื่อม

Thermal efficiency – ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของขบวนการเชื่อม

Weld tension – แรงดึงที่เกิดขึ้นในเนื้อเชื่อมอันเนื่องจากการบิดตัวของโลหะชิ้นงาน

Weld zone – บริเวณของแนวเชื่อมทั้งหมด

Welding metallurgy – การเปลี่ยนแปลงเนื้อของโลหะจากอิทธิพลของการเชื่อม

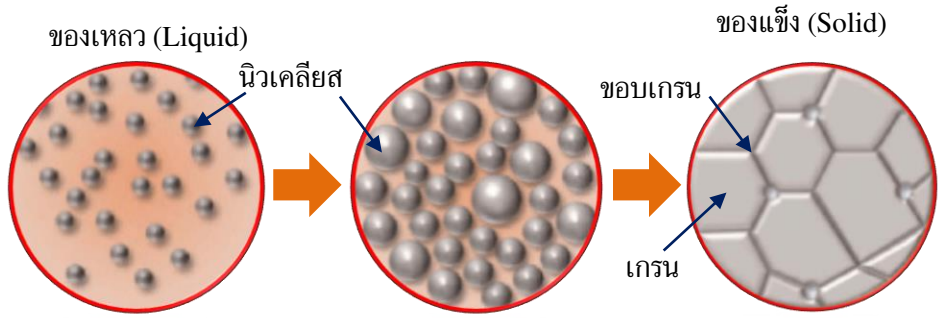
Welding parameter – ปัจจัยที่กำหนดขึ้นในขบวนการเชื่อม

Welding temperature – อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อม

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 6

ข้อที่ 1. จงบอกถึงความจำเป็นที่ช่างเชื่อมหรือวิศวกรงานเชื่อมต้องรู้และเข้าใจถึงบทบาทของโลหะวิทยาที่สัมพันธ์กันกับขบวนการเชื่อมโลหะ

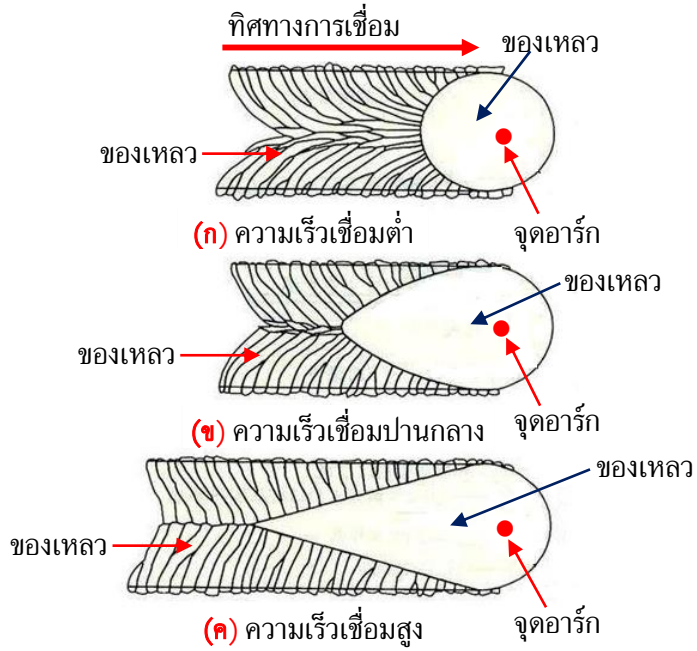
ข้อที่ 2. จากรูปข้างล่างนี้ จงอธิบายถึงกลไกการเกิดโครงสร้างของเกรนในเนื้อโลหะเชื่อมมาให้เข้าใจ



รูปกลไกของการเกิดโครงสร้างเกรนในเนื้อโลหะ

ที่มา : Solidification mechanisms 1, 2012

ข้อที่ 3. จากรูปจงอธิบายกลไกของการแข็งตัวของบ่อหลอมละลายที่เชื่อมด้วยอัตราความเร็วต่างกัน



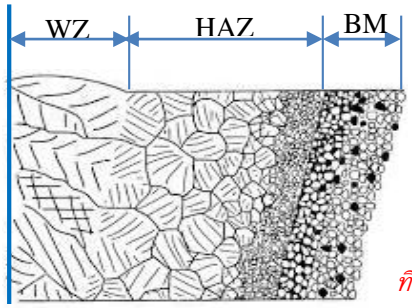
กลไกของการเกิดโครงสร้างเกรนในเนื้อโลหะที่ความเร็วเชื่อมต่างกัน

ที่มา : Solidification mechanisms 1, 2015

ข้อที่ 4. จงเขียนสูตรสมการหาพลังงานอาร์ก (Arc energy) พร้อมอธิบายถึงความหมายของตัวปัจจัยการเชื่อมที่นำมาทำการคำนวณ

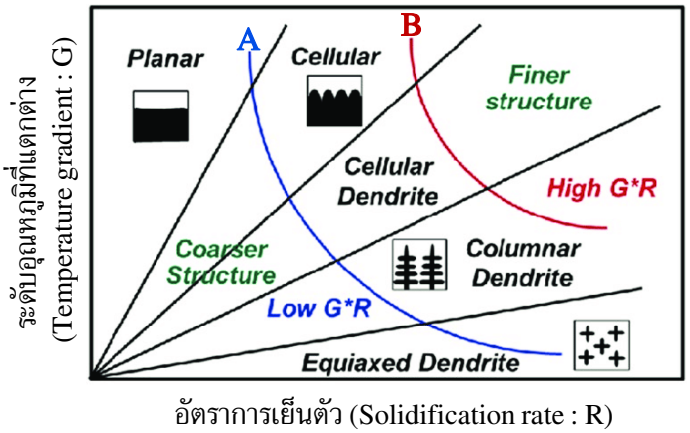
ข้อที่ 5. จงอธิบายความสัมพันธ์ของทิศทางการเกิดเกรน (Grain direction) กับทิศทางของการระบายความร้อน (Heat flow direction) ของบ่อหลอมละลายในการเชื่อม

ข้อที่ 6. จากรูปข้างล่างนี้ จงอธิบายความแตกต่างเนื้อเกรนบริเวณของ WZ บริเวณของ HAZ และบริเวณของ BM ที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อมมาโดยละเอียด



ที่มา : Review, MAPI : Metals, Metallurgy Journal, 2017

ข้อที่ 7. จากรูปข้างล่างนี้ จงอธิบายความสัมพันธ์ของอัตราการเย็นตัว (Solidification rate) กับรูปแบบและขนาดของเกรนที่ได้ในเนื้อเชื่อม

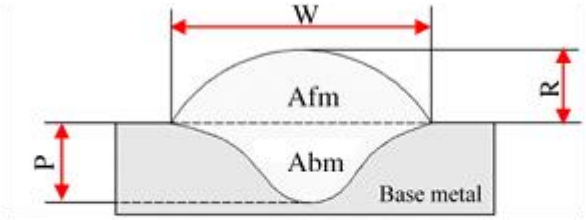


รูปความสัมพันธ์ของอัตราการเย็นตัวต่อกลไกการเกิดโครงสร้างของแนวเชื่อม

ที่มา : Chamara Kumara, Licentiate Thesis Production Technology, 2018

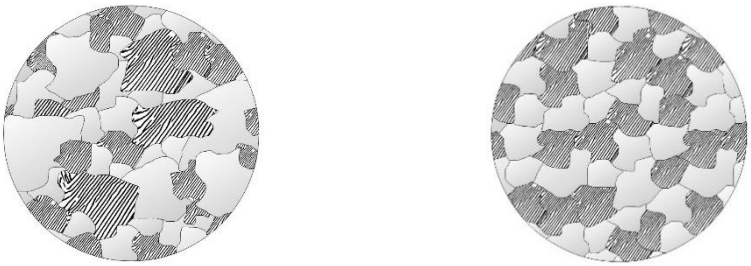
ข้อที่ 8. จงบอกประโยชน์ของแผนภาพ Schaeffler diagram สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) มาพอสังเขป

ข้อที่ 9 จากรูปและสัญลักษณ์ที่กำหนดให้ดังแสดงในรูปข้างล่างนี้ จงเขียนสูตรการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจาง (% Dilution) ของส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อม



W = ความกว้าง (Width)
R = ความสูง (Reinforcement)
P = แนวซึมลึก (Penetration)
Afm = บริเวณเนื้อโลหะลวดเติม (Filler metal area)
Abm = บริเวณเนื้อโลหะหลัก (Base metal area)

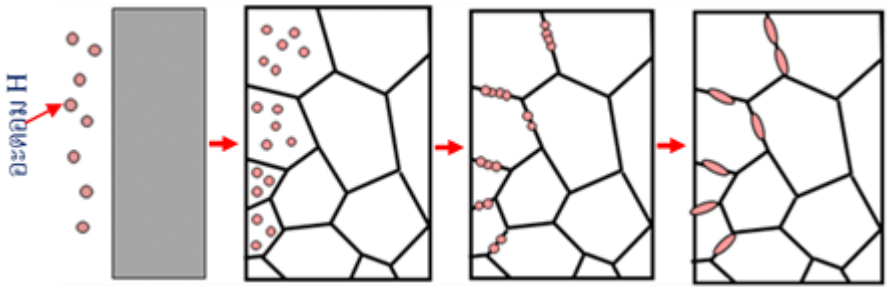
ข้อที่ 10. จงอธิบายความแตกต่างของ โครงสร้างจุลภาคแบบ Heterogeneous กับโครงสร้างจุลภาคแบบ Homogeneous โดยอ้างอิงตามรูปที่กำหนดให้ข้างล่างนี้



(ก) โครงสร้างจุลภาคแบบ Heterogeneous **(ข)** โครงสร้างจุลภาคแบบ Homogeneous

ที่มา : TECS – Uniform microstructure of weld metal, 2012

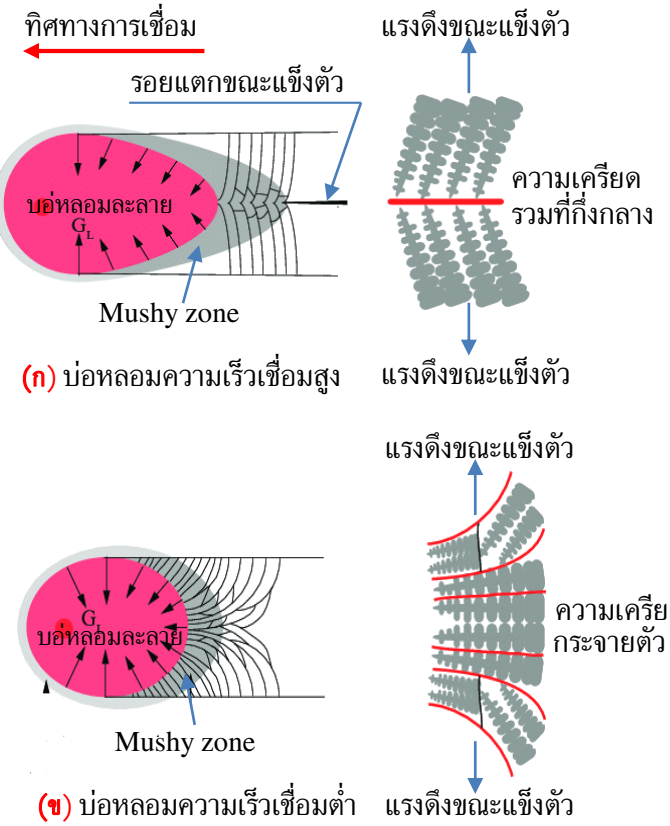
ข้อที่ 11. จากรูปที่กำหนดให้ข้างล่างนี้ จงอธิบายกลไกของการแพร่ซึมของแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในเนื้อเชื่อมมาพอเข้าใจ



ภาพจำลองกลไกการแพร่ซึมของแก๊สไฮโดรเจนในแนวเชื่อม

ที่มา : Industrial Metallurgists. Hydrogen embrittlement of steel, 2020

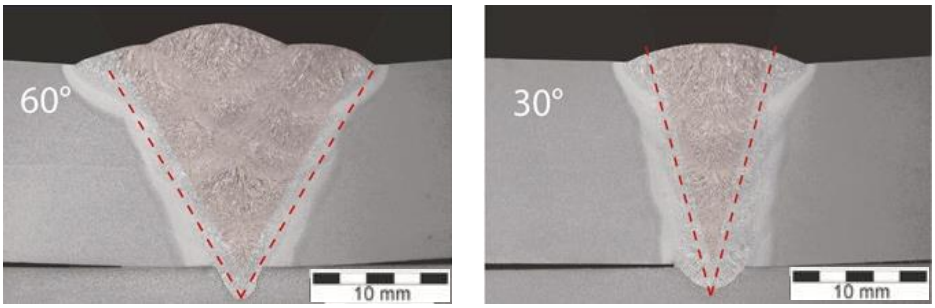
ข้อที่ 12. จงอธิบายวิธีการป้องกันการแตกร้าวขณะแข็งตัวของบ่อหลอมละลายด้วยวิธีการควบคุมความเร็วของการเชื่อม (Welding speed) โดยอ้างอิงจากรูปข้างล่างนี้



รูปการป้องกันการแตกร้าวขณะแข็งตัวด้วยวิธีการควบคุมความเร็วของขบวนการเชื่อม

ที่มา : Journal of Materials & Design, Vol. 183 (5), 108104, 2019

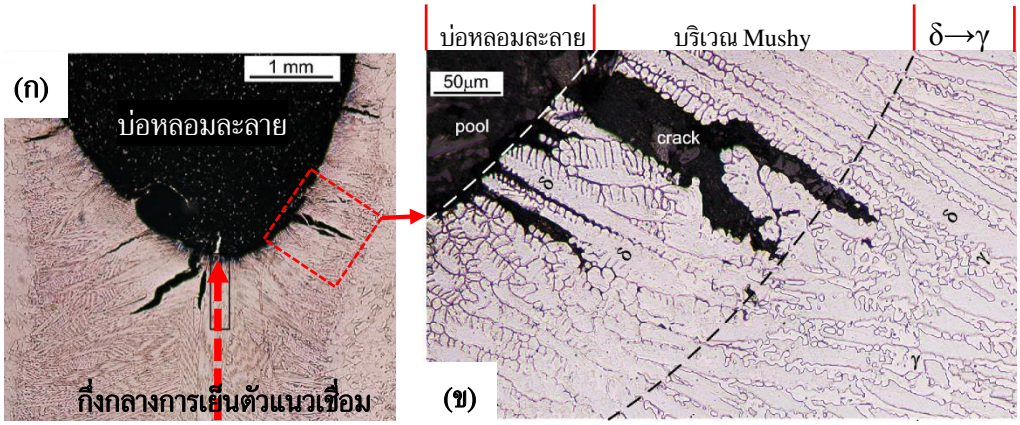
ข้อที่ 13. จงอธิบายความแตกต่างในสมบัติของแก๊สเฉื่อยกับแก๊สแอคทีฟที่มีต่อการเชื่อม โดยอ้างอิงจากรูปข้างล่างนี้ในการอธิบาย



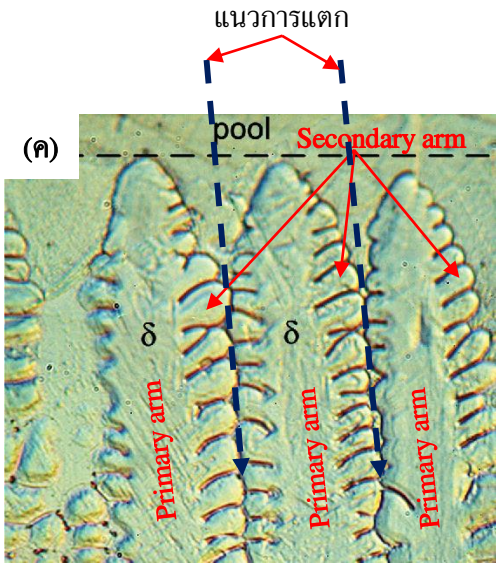
(ก) แนวเชื่อมใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุม (Ar) (ข) แนวเชื่อมใช้แก๊สแอคทีฟปกคลุม (CO_2)

ที่มา : EWM– We are welding. MIG/MAG Welding processes. 2018

ข้อที่ 14. จากรูปข้างล่างเป็นการแสดงถึงกลไกของการแตกร้าวในทางโลหะวิทยาที่เกิดขึ้นในการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเตนเนติก (Austenitic stainless steel) จงอธิบายกลไกการเกิดมาให้สมบูรณ์



(ก) กลไกการเย็นตัวของบ่อหลอมละลาย (ข) กลไกการแตกร้าวของบ่อหลอมละลาย



(ค) แนวของการแตกร้าวขณะแนวเชื่อมแข็งตัว

รูปตำแหน่งและทิศทางของการแตกขณะแข็งตัวของบ่อหลอมละลายในการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มของออสเทนนิติก

ที่มา : AWS – Welding Journal, Welding research. Doi.org/10.29391/2018.97.026, 2018

บรรณานุกรมบทที่ 6

Alber Sadek. *Dissimilar Materials Weldability Concepts*. EWI–Technology lead –Materials Engineering. 15 December 2015.

American Petroleum Institute. *Welding Inspection and Metallurgy*. 1st Edition, Copyright American Petroleum Institute. Washington, D.C. 2004.

American Welding Society (AWS). *AWS Resources for Engineering Welding Know – how for Engineering, Welding Metallurgy*, Published by AWS, 2008.

American Welding Society (AWS), *Fundamentals Welding Metallurgy Vol.1* (AWS WM1), Published by AWS, 1994.

American Welding Society (AWS). *Publications Catalog : Standards, reference books, online education, and more – AWS D1.1/D1 Structural Welding Code Steel*. An American National Standard, 2017.

American Welding Society (AWS). *Welding Journal*. Vol. 86 No. 2, Published by AWS. 2007.

American Welding Society (AWS). *Welding Metallurgy : Carbon and Alloy Steels* .Vol.1 and Vol.2, Published by AWS, 1965.

American Welding Society (AWS) D18.2. *Guide to Weld Discoloration Levels on Inside of Austenitic Stainless Steel Tube*. Published by AWS, 2009.

ASME. Secction IX– *Welding, Brazing, and Fusing Qualifications. An International Code*, Edition, July 1, 2019.

ASM International. *Handbook : Hardfacing, Weld Cladding and Dissimilar Metal Joining*. Vol. 6, 1993.

ASM International. *Handbook : Corrosion Materials.* Vol. 13B, Published by ASM, 2005.

B. J. Moniz and R. T. Miller. *Welding Skills*. 3rd Edition, American Technical Publishers, Inc. United States, 2004.

Baldev Raj, V. Shankar and A.K. Bhaduri. *Welding Technology for Engineers*. 2nd Edition, Published by N.K. Mehra for Narosa House Pvt. Ltd., Delhi, India, 2008.

BS EN 1011–1 (E). *Welding–Recommendations for Welding of Metallic Materials– Part 1 : Genernal Guidance for Arc Welding*. English Version, 2009.

Chamara Kumara. *Microstructure Modelling of Additive Manufacturing of Alloy 718*. Licentiate Thesis Production technology No. 3, 2018.

Chandan Pandey, Manas Mohan Mahaptra, Pradeep Kumar and Nitin Saini. *Some Studies on P91 Steel and their Weldments. Journal of Alloy and Compounds*. Vol. 743, pp. 332−364, 2018.

C. Okechukwu et al., *Review on Hardfacing as Method of Imroving the Service Life of Critical Component Subjected to Wear in Service*. Nigerian Journal of Technology, Vol. 36 No. 4. 1095−1103, 2017.

D.K. Bhattacharya. *Microstructure of Welding Joints. National Metallurgical Laboratory*, Jamshedpur. 2009.

Donald R. Askeland, Pradeep P. Fulay and Wendelin J. Wright. *The Science and Engineering of Materials*. 6th Edition, Cengage Learning Inc. Stamford USA, 2011.

Ghusoon Ridha Mohammed, Mahadzir Ishak, Syarifah N. Aqida and Hassan A. Abdulhadi. *Effects of Heat Input on Microstructure, Corrosion and Mechanical Characteristics of Welded Austenitic and Duplex stainless Steels A. Review*. Article in Metals –Metallurgy Journal. (7), 39, 2017.

G. Agarwal, A. Kumar, I.M. Richardson and M.J.M. Hermans. *Evaluation of Solidification Cracking Susceptibility during Laser Welding in Advanced High Strength Automative Steels*. Journal of Materials and Design. Vol.183, 108104, 2019.

G.M. Karthik, P. Mastanaiah, G.D. Janaki Ram and Ravi Sankar Kottada. *Friction Buttering : A New Technique for Dissimilar Welding*. Journal of Metallurgical and Trasactions B, Vol. 48B, 2017.

H. Granjon. *Fundamentals of Welding Metallurgy*. Woodhead Publishing, 1st Edition, 1991.

Her−Yuen Huang. *Effects of Shielding Gas Composition and Activating Flux on GTAW Weldments*. Journal of Materilas and Design, Vol. 30(7) pp. 2404−2409, 20096.

ISO/TR 18491. *Welding and Allied processes−Guidelines for Measurement of Welding Energies*. Published 05, 2015.

Jan Pawel Pilarczyk. *Welding Metallurgy*. Polish Welding Institute, Poland, 2004.

Janette Brezinova et al. *Influence of the Hardfacing Welds Structure on Their Wear Resistance*. Journal of MDPI− Metal, (6), 36, 2016.

Jinliang Zhang, Bo Song, Qingsong Wei, Dave Bourell and Yusheng Shi. *A Review of Selective Laser Melting of Aluminum Alloys : Processing, Microstructure, Property and Developing Trends*. Journal of Materials Science & Technology. Vol.35, Issue 2, pp. 270−284. 2019.

John C. Lippold and Damian J. Kotecki. *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*. Published by John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey United States, 2005.

John N. Dupont, John C. Lippold and Samuel D. Kiser. *Welding Metallurgy and Weldability of Nickel−Base Alloys*. Published by John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, United States, 2009.

John Norrish. *Advanced Welding Processes: Technologies and process control*. 2nd Edition, Woodhead publishing limlited, Cambridge, England, 2006.

Junbo Lin, Changlun Chen, Min Zhang and Shunquan Wang. *The Effects of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Tribaloy 400 Coatings Deposited by Laser Cladding*. ASM International, JMEPEG 27:6339−6348, 2018.

Kenneth Easterling. *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*. 2nd Edition, Elsevier Science, 2013.

KOBELCO. *Welding Handbook : Welding consumables and Processes*. Kobe Steel, Ltd. Welding Company. 2017.

Larry Jeffus and Lawrence Bower. *Welding : Skill, Processes and Practices for Entry−Level Welders*. 1st Edition. Delmar Cengage Learning. Cliftan Park, New York, UAS 2010.

Materials & Tests Unit. *Field Welding Procedures*. 4th Edition, NCDOT Steel section Publishing, 2011.

Moniz B.J. and Miller R.J. *Welding Skills*. 3rd Edition. American Technical Publisher, Inc., USA, 2004.

Olga Gil. *Welding Engineering*. Revised Edition, Published by Research Word, New York, United States, 2016.

P. YU, K.L. Thompson, J. McCarthy and S. Kou. *Microstructure Evolution and Solidification Cracking in Austenitic Stainless Steel Welds*. AWS Welding Research, November, 2018.

Regis Blondeau. *Metallurgy and Mechanics of Welding : Process and Industrial Applications*. Published by John Wiley & Sons. Inc., New Jersey, United States, 2008.

Robert W. Messler, Jr. *Principles of Welding : Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. Wiley−Vch Verlag GmbH&Co. KGaA, Troy, New York, United States, 2004.

Sindo Kou. *Welding Metallurgy*. 2nd Edition, Published by John Wiley & Sons. Inc., New Jersey, United States, 2003.

Sindo Kou. *Predicting Susceptibility to Solidification Cracking and Liquation Cracking By CALPHAD*. Journal of MDPI−Metals. 11 September, 2021.

Umer Masood Chaudry, Hafiz Waqar Ahmad, Muhammad Rehan Tariq, Ameeq Farooq, Muhammad Kashif Khan, Farooq Sher, Hassan Zeb and Kotiba Hamad. *Effect of Post Weld Treatment on the Microstructure and Electrochemical Characteristics of Dissimilar Materials Welded by Butter Method*. Journal of MDPI−Materials. Vol. 13, 5412, 2020.

Unitor. *Welding Handbook for Maritime Welders −Welding and related processes for repair and maintenance onboard*. 11th Edition, Wilhelmsen Ships Service. 2005.

V.M. Radhakrishnan. *Welding Technology & Design*. 2nd Edition, New Age International Publishers, Chennai, India, 2005.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Effect of Filler Alloy on Microstructure, Mechanical and Corrosion Behaviour of Dissimilar Welding between AISI 201 Stainless Steel and Low Carbon Steel Sheets Produced by a Gas Tungsten Arc Welding*. Journal of Advance Materials Research, Vol. 851(808−816), 2012.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Optimization of Gas Tungsten Arc Welding Parameters for the Dissimilar Welding between AISI 304 and AISI 201 Stainless steels*. Journal of Defence Techonlogy, 15, 170−175, 2019.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *The Behaviour of Nitrogen on the Welding Parameters of the Dissimilar Weld Joints between AISI 304 and AISI 316L Austenitic Stainless Steels Produced by Gas Tungsten Arc Welding*. Journal of Applied Mechanics and Materials, AMM. 248.365, 2012.

Wichan Chuaiphan. *Metallurgical Investigation of Dissimilar Welding between AISI 304 Stainless Steel and Some Other Steels*. Thesis Ph.D. 2011.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Microstructure, Mechnical Properties and Pitting Corrosion of TIG weld Joints Alternative Low−Cost Austenite Stainless Steel* Grade 216. Journal of Advanced Joining Processes. Vol. 2, 2020.

บทที่ 7

ลวดเชื่อมและมาตรฐานลวดเชื่อม

Welding Consumables & Standardisation



ที่มา :Carbone : Electrodes –Wire rolls–Filler Material, 2017

จุดประสงค์การเรียนรู้ บทที่ 7 ลวดเชื่อมและมาตรฐานลวดเชื่อม

- รู้และเข้าใจถึงความหมายและความสำคัญของลวดเชื่อมประเภทต่าง ๆ
- รู้จักมาตรฐานและรหัสต่าง ๆ ที่กำหนดขึ้นของแต่ละประเภทของลวดเชื่อม
- เข้าใจและสามารถอธิบายถึงหลักการแบ่งประเภทของลวดเชื่อมชนิดต่าง ๆ
- สามารถแปลความหมายของรหัสหรือโค๊ดที่ระบุบนลวดเชื่อมของมาตรฐานต่าง ๆ
- สามารถเลือกใช้ลวดเชื่อมตามคำแนะนำของผู้ผลิตได้ถูกต้อง หรือสามารถประยุกต์ใช้ตามความเหมาะสมในกรณีที่มีลวดเชื่อมให้เลือกจำกัด
- สามารถเทียบเคียงรหัสลวดเชื่อมที่เป็นชนิดเดียวกันที่แต่มาตรฐานต่างกัน
- ตระหนักและมีจิตใต้สำนึกในการให้ความสำคัญกับการเลือกใช้ลวดเชื่อมที่ถูกต้อง
- มีจรรยาบรรณในการพิจารณาและตัดสินใจกับปัญหาการเลือกใช้ลวดเชื่อมเมื่อต้องตัดสินใจร่วมกับผู้อื่นที่เกี่ยวข้อง และต้องยอมรับผลการตัดสินใจที่ปราศจากอคติ

"Welding Consumable" หมายถึง ลวดที่ใช้ในการเชื่อม หรือการประสานเนื้อของโลหะให้ติดกัน ด้วยวิธีการเติมเนื้อโลหะลงไปในรอยต่อของโลหะชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม โดยจัดว่าเป็นวัสดุสิ้นเปลือง (Consumable) ของบขวนการเชื่อมแบบหลอมละลายเติมเนื้อเชื่อม

สาระที่น่าสนใจและประเด็นที่ต้องรู้จริงของบทเรียนนี้ ผู้เขียนมีเจตนาที่จะรวบรวมองค์ความรู้และประสบการณ์ที่ผ่านมาในงานด้านวิศวกรรมการเชื่อม ที่จำเป็นต้องเกี่ยวข้องกับประเภท หรือชนิดของลวดเชื่อม และรวมถึงมาตรฐานของลวดเชื่อมตามสากลนิยมเพื่อการสื่อสารและการเข้าใจ ถึงบทบาทและความสำคัญของโลหะลวดเชื่อมที่นำมาใช้ในการหลอมละลายเพื่อเติมเต็มลงในรอยต่อที่ต้องการเชื่อมให้ติดกัน ที่มีคำเรียกโลหะลวดเชื่อมกันหลากหลาย เช่น บ้างก็เรียกลวด Consumable บ้างก็เรียกลวด Electrode บ้างก็เรียก Electrode cover flux บ้างก็เรียก Filler rod และ บ้างก็เรียก Filler wire ซึ่งไม่มีคำเรียกใดที่ผิดเพราะคำเรียกเหล่านี้ล้วนมีความหมายเดียวกัน

R. Scott Funderburk (1999) ได้กล่าวไว้ว่าลวดเชื่อมถือว่าเป็นตัวการสำคัญที่จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของรอยเชื่อมต่อและหลักการเลือกใช้ลวดเชื่อมที่ถูกต้อง ช่างเชื่อมจะต้องเลือกลวดเชื่อมที่เป็นชนิดเดียวกันกับโลหะที่ต้องการเชื่อมที่เราเรียกกันว่า "Similar welding" ซึ่งจะได้เนื้อเชื่อมที่เป็นโลหะชิ้นเดียวกันตลอดโครงสร้าง และปัญหาข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นก็จะน้อย แต่ในความเป็นจริงของงานวิศวกรรมการเชื่อมมีงานเชื่อมมากมายที่ไม่สามารถเลือกใช้ลวดเชื่อมที่เป็นชนิดเดียวกับโลหะชิ้นงานได้ ด้วยเหตุผลมากมาย เช่น ไม่มีผู้ผลิตลวดเชื่อมได้ตรงกับโลหะได้ทุกชนิด หรือ มีความจำเป็นในการออกแบบรอยต่อที่ต้องใช้วัสดุต่างชนิด ซึ่งรวมไปถึงความต้องการสมบัติที่พิเศษบางประการของเนื้อเชื่อม ได้แก่ สมบัติที่ทนการสึกหรอ มีความคงทนต่อแรงสั่นสะเทือน หรือ ทนต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น ในงานเชื่อมที่มีข้อกำหนดแบบนี้ต้องอาศัยความสามารถของช่างหรือวิศวกรงานเชื่อมที่จะต้องพิจารณาเลือกใช้ลวดเชื่อมที่เหมาะสม การที่ต้องเชื่อมโดยโลหะด้วยลวดเชื่อมกับโลหะชิ้นงานที่จะเชื่อมต่างชนิดกัน เราเรียกว่า "Disimilar welding" การเชื่อมงานในลักษณะนี้ต้องมีความเข้าใจถึงคุณลักษณะของลวดเชื่อมที่ต้องเลือกใช้เป็นอย่างดี บทเรียนนี้ได้นำเอาข้อมูลของลวดเชื่อมในทุก ๆ มิติที่จะเป็นความรู้ให้แก่ผู้อ่านได้นำไปใช้พิจารณาเลือกใช้ลวดเชื่อมที่เหมาะสมและถูกต้อง

แต่ด้วยปัจจุบันลวดเชื่อมได้มีการพัฒนาปรับปรุงและผลิตออกมาให้สามารถเลือกใช้งานกันมาก นอกจากจะมีความหลากหลายของชนิด ประเภท หรือเกรดของลวดเชื่อมแล้ว ยังมีมาตรฐานลวดเชื่อมของแต่ละประเทศที่ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดขึ้นเพื่อใช้ในการสื่อสารที่ตรงกัน ดังนั้นการที่รู้เพียงสมบัติของลวดเชื่อมคงไม่เพียงพอ จำเป็นต้องทราบและเข้าใจถึงข้อกำหนดของมาตรฐานลวดเชื่อมต่าง ๆ ที่นิยมใช้งานและยอมรับกัน ดังนั้นบทเรียนนี้จึงนำเรื่องของลวดเชื่อมและข้อกำหนดที่เป็นมาตรฐานสากลที่วิศวกรงานเชื่อม ช่างเชื่อม ผู้ออกแบบงานเชื่อม และ ผู้ทดสอบงานเชื่อม ต้องรู้และเข้าใจในมาตรฐานที่ตรงกัน ไม่เช่นนั้นจะเกิดความผิดผลาดและเกิดการโต้แย้งกัน โดยเฉพาะกรณีที่มีความจำเป็นที่อาจต้องใช้สัญลักษณ์งานเชื่อมของมาตรฐานที่มากกว่าหนึ่งมาตรฐานร่วมกัน ผู้ปฏิบัติงานร่วมกันต่างก็ต้องรู้และต้องแปลความหมายของสัญลักษณ์ต่าง ๆ อย่างถูกต้องและมีจรรยาบรรณในการพิจารณาตัดสินใจ

ลวดเชื่อม (Welding consumable) เป็นวัสดุสิ้นเปลืองที่นำมาใช้เป็นตัวประสานหรือเชื่อมชิ้นงานโลหะสองชิ้นให้ติดกัน โดยจะเกิดขึ้นกับการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) และจะต้องเป็นขบวนการเชื่อมแบบชนิดเติมเนื้อโลหะ (Filling weld) ซึ่งจะไม่ใช้กับการเชื่อมแบบหลอมละลายโลหะหลักติดกัน (Autogenous welding) ลวดเชื่อมแบบสิ้นเปลืองนี้บางครั้งก็จะเรียกกันว่า Consumable electrode จากการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวของกับลวดเชื่อมพบว่าด้วยความหลากหลายของการผลิตลวดเชื่อมออกมาเพื่อรองรับกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน จึงได้มีการแบ่งชนิดของกลุ่มลวดเชื่อมตามหลักเกณฑ์ที่ต่างกันได้หลายลักษณะ ซึ่งสามารถพบเห็นได้ในเอกสารเผยแพร่หรือประชาสัมพันธ์มากมาย โดยเฉพาะผู้ผลิตลวดเชื่อมเองที่มักจะจัดแบ่งกลุ่มตามผลิตภัณฑ์ของตนเอง ทำให้การสื่อสารมักเกิดความสับสนต่อการสร้างข้อกำหนดต่าง ๆ ของขบวนการเชื่อม จากการที่ผู้เขียนได้ศึกษาเรียนรู้ศาสตร์ทางด้านงานเชื่อมมาตลอด และได้สนใจทำงานวิจัยด้านวิศวกรรมงานเชื่อมอย่างต่อเนื่องบวกกับประสบการณ์ทำงานด้านงานเชื่อมในภาคอุตสาหกรรม พอที่จะจัดแบ่งประเภทของลวดเชื่อมตามลักษณะรูปแบบของการนำไปใช้งานโดยอิงควบคู่กับขบวนการเชื่อมอ้างอิง KOBELCO (2009) ดังนี้

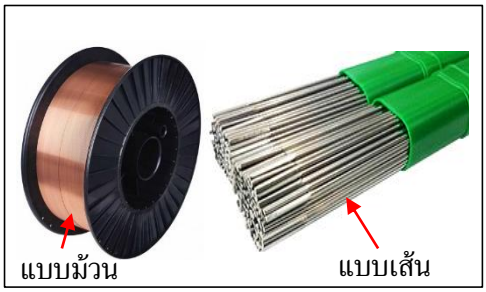
- ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Covered electrode) ลวดเชื่อมประเภทนี้จะหมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมที่ใช้ฟลักซ์ที่เป็นผงของแข็งพอกหุ้มแกนลวดโลหะไว้ เมื่อเกิดการอาร์กหลอมละลายจะกลายเป็นแก๊สใช้ทำหน้าที่ปกคลุมแนวเชื่อม (Shielding gas) โดยที่มีมากมายและหลากหลาย ตามชนิดของแกนกลางลวดโลหะที่ฟลักซ์หุ้ม และตามชนิดของสารฟลักซ์ที่พอกหุ้ม ดังแสดงตัวอย่างลวดเชื่อมในรูปที่ 7.1 (ก)
- ลวดเชื่อมเปลือย (Filler electrode) ลวดเชื่อมประเภทนี้จะหมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมที่ไม่มีสารพอกหุ้มใด ๆ จึงเรียกว่าลวดเปลือย โดยมีทั้งที่เป็นเส้นลวดยาวประมาณ 1000 มม. และที่เป็นลวดม้วนอยู่ในตลับ (Roll) ที่มีความยาวสามารถเชื่อมได้ต่อเนื่องมีหลายขนาดตามน้ำหนักของแต่ละม้วนดังแสดงตัวอย่างลวดเชื่อมในรูปที่ 7.1 (ข)
- ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux core electrode) ลวดเชื่อมประเภทนี้จะหมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมที่มีลักษณะของการใช้แผ่นโลหะม้วนให้เป็นท่อเล็กแกนกลวงซึ่งไว้บรรจุผงฟลักซ์ (Powder flux) ไว้แกนกลางภายใน เมื่อเกิดการอาร์กผงฟลักซ์ก็จะหลอมละลายกลายเป็นแก๊สปกคลุมแนวเชื่อม โดยจะมีทั้งลักษณะเป็นเส้นยาวอยู่ในม้วนตลับ สามารถป้อนเชื่อมได้ต่อเนื่อง และชนิดที่เป็นเส้นตรงยาวประมาณ 500 มม. ดังแสดงตัวอย่างลวดเชื่อมในรูปที่ 7.1 (ค)
- ลวดเชื่อมเซาะร่อง (Gouging electrode) หรือที่เรียกกันว่า ลวดเชื่อมเกาจ์ ลวดเชื่อมประเภทนี้เป็นแบบพิเศษที่ไม่ได้ใช้สำหรับการเติมเนื้อโลหะลงในรอยเชื่อม แต่จะเป็นลวดเชื่อมที่ใช้ในการกำจัดเนื้อโลหะที่ไม่ได้คุณภาพให้ออกไปจากชิ้นงาน เช่น การขจัดแนวเชื่อมที่มีข้อบกพร่องเพื่อทำการเชื่อมซ่อมแซมใหม่ และยังใช้ในการทำความสะอาดแนวเชื่อมเพื่อเตรียมชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม ซึ่งจะเหมาะสำหรับใช้ในการเซาะร่อง เจาะรู หรือใช้ในงานตัด โดยลักษณะจะเป็นแท่งยาวเหมือนลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ขนาดความยาวจะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เช่น ขนาด Ø 3.2 มม. จะยาว 350 มม. ขนาดโตขึ้นที่ขนาด Ø 4.0 มม. จะยาว 400 มม. เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างลวดเชื่อมในรูปที่ 7.1 (ง)

โดยประเภทที่จัดแบ่งไว้ข้างต้นนั้นถือว่าเป็นกลุ่มใหญ่ของประเภทลวดเชื่อม เพราะว่าในละประเภทยังสามารถแบ่งแยกออกเป็นชนิดย่อย ๆ อีกหลายชนิด เช่น แบ่งตามชนิดของวัสดุเส้นลวดเชื่อม (Type of metal materials) หรือ แบ่งตามชนิดของผงฟลักซ์ที่ใช้ผอกหุ้ม/บรรจุไว้ภายใน (Type of flux) หรือ แบ่งตามชนิดของขบวนการเชื่อม (Welding process) ซึ่งรายละเอียดปลีกย่อยของแต่ละประเภทของลวดเชื่อมดังจะได้กล่าวถึงเชิงบรรยายและภาพประกอบเพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจ โดยจะอ้างอิงตามมาตรฐานสากลนิยม (มีหลายมาตรฐาน) ร่วมกับข้อมูลจากผู้ผลิตลวดเชื่อมโดยตรง และจากองค์ความรู้จากงานวิจัยของผู้เขียนที่ได้เผยแพร่อยู่ในวารสารต่าง ๆ ทั้งในระดับชาติและนานาชาติ



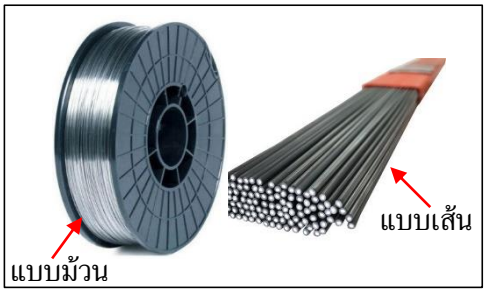
(ก) ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Covered electrode)

ที่มา : The Sun Thai Tool, 2018.



(ข) ลวดเชื่อมเปลือย (Filler electrode)

ที่มา : Siam Part Products, 2019.



(ค) ลวดเชื่อมใส้ฟลักซ์ (Flux core electrode)

ที่มา : The Sun Thai Tool, 2018.



(ง) ลวดเชื่อมเซาะร่อง (Gouging electrode)

ที่มา : Siam Part Products, 2019.

รูปที่ 7.1 การจัดแบ่งประเภทของลวดเชื่อมตามลักษณะรูปแบบของการนำไปใช้งาน

7.1 มาตรฐานลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Standard covered electrodes)

เป็นลวดเชื่อมพื้นฐานสำหรับเทคโนโลยีการเชื่อมก็ว่าได้ ด้วยเพราะเป็นลวดเชื่อมที่นิยมใช้งานกันจำนวนมาก สามารถพบเห็นการใช้งานกันทั่วไป ใช้ง่ายไม่ยุ่งยาก โดยสมาคมการเชื่อมแห่งอเมริกา (AWS) ได้ให้นิยามความหมายของลวดเชื่อมประเภทนี้ว่า “ ลวดเชื่อมที่ใช้สำหรับการเติมลงในแนวเชื่อมและเป็นตัวทำหน้าที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จากขั้วจ่ายไฟฟ้าผ่านตัวลวดเองไปยังการอาร์ก” โดยมีลักษณะเฉพาะของลวดคือ มีฟลักซ์แข็งที่พอกหุ้มแกนลวดโลหะ (Cover flux) ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์จะเป็นลวดเชื่อมที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้กับขบวนการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW/MMAW) หรือที่

รู้จักกันดีในชื่อของ ขบวนการเชื่อมไฟฟ้า หรือการเชื่อมธูป ดังแสดงลักษณะของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ใน รูปที่ 7.2 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์นี้สามารถเชื่อมได้กับชิ้นงานโลหะตระกูลเหล็ก (Ferrous) ได้ทุกชนิดและรวมถึงโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non–ferrous) บางชนิด โดยต้องทำการพิจารณาเลือกใช้ชนิดของลวดให้เหมาะสมตามข้อระบุคุณสมบัติของลวดเชื่อม ทั้งนี้ก็จะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่เป็นแกนลวดกับชนิดของฟลักซ์ที่นำมาพอกหุ้ม



รูปที่ 7.2 ส่วนประกอบของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์หรือลวดเชื่อมไฟฟ้า (Cover electrode)

ที่มา : ปราโมทย์ อุทัยวัฒน์, 2558

โดยพื้นฐานหรือมาตรฐานการผลิตลวดเชื่อม ชนิดของโลหะแกนลวดจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงชนิดของโลหะที่สามารถเชื่อมได้ ด้วยเพราะหลักพื้นฐานการเชื่อมโลหะที่เหมาะสม คือ โลหะชิ้นงานที่นำมาเชื่อมควรเป็นโลหะชนิดเดียวกันกับลวดเชื่อม (Similar welding) จนมีผู้ผลิตบางรายได้แบ่งประเภทของลวดเชื่อมตามชนิดของโลหะแกนลวด ดังตัวอย่างลวดเชื่อมที่นิยมใช้งานกันและจำหน่ายในท้องตลาด ดังนี้

– ลวดเชื่อมไฟฟ้าเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel electrodes)
– ลวดเชื่อมไฟฟ้าเหล็กกล้าผสมต่ำ (Low alloy steel electrodes)
– ลวดเชื่อมไฟฟ้าเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel electrode)
– ลวดเชื่อมไฟฟ้าเหล็กหล่อ (Cast iron electrode)
– ลวดเชื่อมไฟฟ้าทองแดงและผสม (Copper and copper alloy electrode)
– ลวดเชื่อมไฟฟ้าอลูมิเนียมและผสม (Aluminum and aluminum alloy electrode)
– ลวดเชื่อมไฟฟ้านิเกิลและผสม (Nickel and nickel alloy electrode)
– ลวดเชื่อมไฟฟ้าไทเทเนียมและผสม (Titanium and alloy electrode)
– ลวดเชื่อมไฟฟ้าเซอร์โคเนียมและผสม (Zirconium and alloy electrode)

แต่พบว่าชื่อเรียกเหล่านี้ไม่เป็นมาตรฐานสากลนิยมของวงการอุตสาหกรรมเชื่อม แต่อาจจะใช้สื่อสารกันในเฉพาะกลุ่มงานในบางประเภทหรือในบางมาตรฐาน เช่น กลุ่มงานประเภทของการเชื่อมโลหะท่อ (Pipe welding group) หรือเป็นข้อกำหนดในมาตรฐานเฉพาะใช้ในประเทศของตนเอง จากการศึกษารวบรวมข้อมูลการเลือกใช้ลวดเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์ เกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาตัดสินเลือกใช้ลวดเชื่อมที่เป็นมาตรฐานสากลนิยม จะใช้ชนิดของสารฟลักซ์พอกหุ้มเป็นตัวกำหนดที่สำคัญ ด้วยเพราะสารพอกหุ้มจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมเป็นสำคัญ โดยสารฟลักซ์ที่นำมาพอกหุ้มนั้นหลายคน

มักจะเข้าใจว่าจะทำหน้าที่หลัก คือ การปกป้องบ่อหลอมละลายของแนวเชื่อม (Shielding weld pool) ในระหว่างที่ทำการเชื่อมเพียงอย่างเดียว แต่แท้จริงแล้วฟลักซ์ที่พอกอยู่ที่ผิวของแกนลวดเชื่อมมีหน้าที่และประโยชน์มากกว่าที่เข้าใจ และชนิดของฟลักซ์ที่นำมาพอกก็จะมีบทบาทต่อการเชื่อมที่แตกต่างกัน ดังนั้น จึงมีการยอมรับกับการแบ่งชนิดหรือเกรดของลวดเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์ที่แบ่งด้วยเกณฑ์ของชนิดสารฟลักซ์พอกหุ้ม ซึ่งผู้เขียนจะขอกล่าวถึงสมบัติและหน้าที่ของสารฟลักซ์ที่นำมาใช้ประโยชน์ในแง่มุมต่าง ๆ ของขบวนการเชื่อมก่อน เพื่อที่จะเป็นพื้นฐานแนวทางความเข้าใจในเหตุผลของหลักการแบ่งชนิดลวดเชื่อมตามชนิดของสารพอกหุ้มในหัวข้อถัดไป ดังนี้

1. สมบัติและหน้าที่ของสารฟลักซ์พอกหุ้ม (Properties and functions of cover flux)

● สมบัติของสารฟลักซ์พอกหุ้ม (Properties of cover flux) สารพอกหุ้มหรือฟลักซ์จะมีสมบัติพื้นฐานที่พึงประสงค์ หรือเป็นสารพอกหุ้มที่ดีนั้นจะต้องมีลักษณะเฉพาะตัว ดังนี้ คือ

– ต้องมีความถ่วงจำเพาะที่ต่ำมากวัสดุโลหะ (Low specific gravity) หรือความหนาแน่นต่ำ (Low density) เพราะจะสามารถลอยตัวเหนือน้ำโลหะเหลวได้ดีในระหว่างการอาร์กหลอมละลาย

– ต้องมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำและสามารถหลอมละลายได้ง่าย ซึ่งต้องเกิดการหลอมละลายไปพร้อม ๆ กันกับลวดแกนกลางในขณะที่เกิดการอาร์กของเชื่อม

– ขณะอาร์กเป็นของเหลวจะต้องปล่อยแก๊สที่มีความหนาแน่นสูง (แก๊สเฉื่อย) หรือควันออกมาเพื่อทำหน้าที่ปกป้อง (Shielding) น้ำโลหะเหลวที่กำลังหลอมละลายในแนวเชื่อม ให้ปราศจากแก๊สหรืออากาศจากบริเวณโดยรอบเข้ามารวมตัวกับน้ำโลหะได้

– เมื่อน้ำโลหะในแนวเชื่อมเย็นตัวลง ฟลักซ์จะต้องลอยขึ้นและครอบคลุมอยู่ที่ผิวของแนวเชื่อมในสภาพของแข็ง และสามารถเคาะหรือกำจัดออกได้ง่าย

– ต้องไม่ดูดซับหรือสะสมความชื้นไว้ภายใน และถ้ามีความชื้นก็จะต้องกำจัดออกได้ง่าย

– ต้องยึดเกาะกับผิวของโลหะแกนลวดได้ดี ไม่หลุดหรือแตกออกได้ง่าย

– ต้องมีน้ำหนักที่เบา และพอกติดผิวแกนลวดได้ดี (ไม่หนาเกินไป)

– ต้องมีสภาพไม่เป็นควันพิษที่มีผลกระทบต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อม

จากสมบัติของฟลักซ์ที่ควรจะเป็นดังที่กล่าวมานั้น จะเห็นได้ว่าวัสดุที่จะนำมาใช้ผลิตเป็นฟลักซ์เพื่อพอกลวดเชื่อม หรือเป็นแก๊สปกคลุมแนวเชื่อมนั้นจะต้องผ่านการวิจัยและทดลองหาสมบัติดังกล่าวมาอย่างต่อเนื่อง เพื่อที่จะได้ฟลักซ์ตามสมบัติที่พึงประสงค์ โดยภายในองค์ประกอบของผงฟลักซ์ที่ต้องการจะต้องผสมด้วยสสารต่าง ๆ ที่มีหน้าที่ตามวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 7.1 โดยจะใช้โซเดียม (Na) และโปแตสเซียมซิลิเกต (K_2SiO_3) ทำเป็นกาวประสานผงฟลักซ์ และใช้สารจำพวกเฟอร์โรและผงโลหะบริสุทธิ์เพื่อทำหน้าที่ดึงแก๊สออกซิเจนออกจากแนวเชื่อม พร้อมกับทำหน้าที่เติมเป็นสารประกอบเชิงโลหะที่เป็นด่าง ซึ่งจะช่วยให้การอาร์กสม่ำเสมอ และใช้จำพวก ขี้เลื่อย เยื่อไม้ ฝ้าย เซลลูโลส ผสมเพื่อทำหน้าที่สร้างแก๊สปกคลุม ส่วนสารจำพวก ซิลิก้า อลูมิเนียม แร่เหล็ก หินแม่เหล็ก ดินเหนียว และสารประกอบ โปแตสเซียมไตตาเนต กับ ไทเทเนียมไดออกไซด์ จะทำหน้าที่

เป็นสแลกปกคุลมแนวเชื่อม ซึ่งเมื่อทำการผสมสสารที่เป็นองค์ประกอบร่วมทั้งหมดเข้าด้วยกัน เพื่อผลิตออกมาเป็นผงฟลักซ์ที่จะนำไปพอกหุ้มแกนลวดให้ได้ออกมาเป็นลวดเชื่อมไฟฟ้านั้น พบว่าชนิดของผงฟลักซ์หรือสารพอกหุ้มที่ผลิตออกมาใช้งานกันในปัจจุบันสามารถแบ่งได้ 4 ชนิด คือ

1. ฟลักซ์พอกหุ้มชนิดที่เป็นกรด (Acid type cover flux)
2. ฟลักซ์พอกหุ้มชนิดที่เป็นด่าง (Basic type cover flux)
3. ฟลักซ์พอกหุ้มชนิดที่เป็นรูไทล์ (Rutile type cover flux)
4. ฟลักซ์พอกหุ้มชนิดที่เป็นเซลลูโลส (Cellulose type cover flux)

ซึ่งแต่ละชนิดของฟลักซ์ที่พอกหุ้มนี้จะเหมาะกับการเชื่อมวัสดุโลหะแต่ละชนิดแต่ละเกรดแตกต่างกัน โดยจะสัมพันธ์กับสสารที่มีอยู่ในส่วนผสมของตัวผงฟลักซ์ ดังนั้นช่างเชื่อมก็ต้องเลือกใช้ชนิดของผงฟลักซ์บนลวดเชื่อมให้ถูกต้อง เพราะผงฟลักซ์ที่หุ้มอยู่บนลวดเชื่อมจะมีหน้าที่สำคัญ ๆ ของแต่ละตัวผสมที่เป็นองค์ประกอบอยู่ภายในซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 7.1 องค์ประกอบของสสารที่ผสมอยู่ในฟลักซ์ที่นำมาใช้พอกหุ้มลวดเชื่อม

ที่มา : ESAB–Welding Handbook. Consumable for Manual & Automatic welding, 2014

องค์ประกอบของสสารที่ผสมอยู่ในฟลักซ์พอกหุ้มลวดเชื่อม (Component of cover flux)	
– สารตั้งต้นที่เป็นผงฟลักซ์	– สารผสมเพิ่มความเสถียรในการอาร์ก
– สารลดออกซิเจน ไนโตรเจน และ ไฮโดรเจน	– สารเพิ่มปริมาณแก๊สเฉื่อยเพื่อปกคลุม
– สารผสมให้สแลกแข็งตัว	– สารตัวประสานการเกาะยึดของฟลักซ์
– ธาตุผสมที่เพิ่มในลวดเชื่อม	

● หน้าที่ของสารฟลักซ์พอกหุ้ม (Function of cover flux) สารพอกหุ้มหรือฟลักซ์หุ้มลวดเชื่อมจะมีบทบาทและหน้าที่ต่อเมื่อเกิดการอาร์กเชื่อมขึ้น โดยเมื่อได้ความร้อนจากการอาร์กก็จะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นของเหลว จากนั้นก็จะทำหน้าที่ต่อขบวนการเชื่อมอาร์กในแต่ละด้านดังต่อไปนี้ อ้างอิงข้อมูลจาก Avesta Welding (2004)

1. หน้าที่สร้างขบวนการอาร์ก (Stabilizes arc) โดยในส่วนประกอบของฟลักซ์หุ้ม สสารหลักในกลุ่มของคาร์บอเนตเมื่อได้รับความร้อนจะสลายตัวกลายเป็นแก๊สและจะถูกทำให้แตกตัว (Ionization) โดยตัวของอิเลคตรอนจากการไหลของกระแสไฟเชื่อมที่ข้ามผ่านการอาร์ก จะช่วยทำให้การอาร์กมีความเสถียรมากขึ้นและเริ่มต้นการอาร์กได้ง่ายขึ้น

2. หน้าที่เป็นแก๊สปกคลุม (Shielding gas) เป็นหน้าที่หลักที่สำคัญของสารพอกหุ้ม โดยสสารที่ผสมอยู่ในฟลักซ์จะหลอมละลายกลายเป็นแก๊สที่มีความหนาแน่นหรือมีน้ำหนักมากกว่าอากาศโดยรอบบ่อหลอมละลาย ซึ่งจะฟุ้งกระจายอยู่รอบ ๆ ติดกับแนวเชื่อม เช่น เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Co_2) โดยจะทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันไม่ให้บรรดาเหล่าแก๊สออกซิเจน (O_2) กับ แก๊สไนโตรเจน (N_2) ที่

เป็นส่วนประกอบหลักของบรรยากาศโดยรอบเข้ามารวมตัวกับแนวเชื่อมที่กำลังหลอมละลายจากการอาร์ก ซึ่งแก๊สปกป้องนี้จะเกิดจากสสารออร์แกนิค กับ สารกลุ่มคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ที่อยู่ในผงฟลักซ์

3. หน้าที่ลดออกซิเจน (Deoxidizer) ในขณะที่เกิดการอาร์กเนื้อโลหะก็จะหลอมละลายและก็จะเกิดการละลายของออกซิเจนออกมาด้วย ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อความเหนียวของแนวเชื่อมจึงจำเป็นที่จะต้องลดหรือกำจัดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น โดยการเติมธาตุในกลุ่มของเฟอร์โรซิลิกอน และเฟอร์โรแมงกานีสลงไปผสมในฟลักซ์เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวลดออกซิเจน ซึ่งก็จะช่วยเพิ่มสมบัติด้านความเหนียวและสมบัติทางกลด้านอื่น ๆ ของแนวเชื่อมดีขึ้น

4. หน้าที่กำจัดสารมลทินและสารปนเปื้อน (Impurity and contaminate) ข้อบกพร่องของงานเชื่อมจำนวนไม่น้อยที่เกิดจากสารมลทินและสารปนเปื้อนติดอยู่ในแนวเชื่อม ดังนั้นหน้าที่ในการทำความสะอาดของฟลักซ์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยการเติมธาตุผสมลงไปในผงฟลักซ์และเมื่อเกิดการหลอมละลายก็จะไปจับตัวกับสารมลทินและสารปนเปื้อนต่าง ๆ ที่ปะปนอยู่ในน้ำโลหะเหลวและด้วยสมบัติของธาตุผสมที่มีความถ่วงจำเพาะที่ต่ำก็จะนำสารมลทินและสารปนเปื้อนลอยสู่ผิวด้านบนของบ่อหลอมละลายเป็นลักษณะของสแลกเหลว

5. หน้าที่สร้างสแลกปกคลุมแนวเชื่อม (From slag after melting and covers weld) หลักการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เมื่อเกิดการอาร์กจะเกิดการหลอมละลายทั้งแกนลวดและฟลักซ์หุ้มลวดพร้อม ๆ กัน โดยแกนลวดจะทำหน้าที่เติมเนื้อโลหะในรอยต่อ ส่วนฟลักซ์ก็จะทำหน้าที่เป็นตัวปกป้อง แต่เมื่อน้ำโลหะเย็นตัว สารผสมในฟลักซ์จะทำหน้าที่ในการทำให้น้ำสแลกแข็งตัวก่อนน้ำโลหะเชื่อม เพื่อต้องการแยกออกจากน้ำโลหะที่แข็งตัวออกจากสแลก ไม่เช่นนั้น สแลกจะฝังตัวไปกับการแข็งตัวของแนวเชื่อม และสแลกต้องมีสมบัติที่สามารถเคาะออกได้ง่าย

6. หน้าที่เติมธาตุผสมในแนวเชื่อม (Increases alloy element) สมบัติเฉพาะบางอย่างที่ต้องการให้เกิดขึ้นในแนวเชื่อม นอกจากที่ได้มากับแกนลวดเชื่อมแล้วนั้นจะมาจากการเพิ่มเติมเข้าไปผสมไว้ในผงฟลักซ์หุ้มลวด เมื่อเกิดการอาร์กก็จะหลอมละลายเข้าไปรวมตัวกับเนื้อโลหะหลักในแนวเชื่อม ซึ่งจะส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีสมบัติเป็นไปตามที่ต้องการ เช่น มีสมบัติทางกลที่ดี มีความต้านทานการกัดกร่อนและสึกหรอ มีความต้านทานความร้อนสูง หรือความสามารถในการขึ้นรูปได้ดี เป็นต้น

7. หน้าที่ช่วยให้แนวเชื่อมซึมลึกดี (Increases penetration) การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์จะมีผลต่อแนวเชื่อมที่ซึมลึก (Root weld) และแนวเชื่อมด้านหน้า (Face weld) โดยถ้าขณะอาร์กแกนของลวดเชื่อมหลอมละลายเร็วกว่าฟลักซ์พอกหุ้ม พฤติกรรมการอาร์จะเป็นแบบ ที่พุ่งลงบ่อหลอมด้วยความเร็วสูง ที่เรียกว่า Jetting action จะช่วยให้เกิดการซึมลึกได้ดี ซึ่งมีชนิดของผงฟลักซ์ที่หลอมละลายยากกว่าแกนลวดโลหะ ในทางกลับกันก็มีผงฟลักซ์ชนิดที่หลอมละลายเร็วกว่าแกนลวด จะใช้กับการเชื่อมที่ไม่ต้องการแนวซึมลึกแต่ประสงค์เพื่อความสวยงามของผิวและรูปร่างของแนวเชื่อม

ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์จะประกอบด้วยสองส่วนหลัก ๆ ที่มีบทบาทสำคัญและมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกัน นั้นก็คือ ส่วนของแกนลวดโลหะ (Rod) กับ ส่วนของฟลักซ์ที่พอกหุ้ม (Cover flux) โดยที่

แกนลวดจะต้องเป็นวัสดุโลหะชนิดเดียวกันกับโลหะหลักที่จะทำการเชื่อมจึงไม่เป็นปัญหาในแง่ของการที่จะเลือกวัสดุมาผลิตลวดเชื่อมสำหรับในภาคส่วนของผู้ผลิต (Manufacturers) และในแง่ของการที่จะเลือกใช้งานลวดเชื่อมสำหรับในภาคส่วนของช่างเชื่อม (Welder) แต่ที่เป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพแนวของเชื่อมและข้อพกพร่องที่อาจเกิดขึ้นในแนวเชื่อม คือ ส่วนของฟลักซ์ที่หุ้มแกนลวดเชื่อม (Type of flux) ซึ่งชนิดของฟลักซ์จะมีอิทธิพลต่อการควบคุมคุณภาพของแนวเชื่อม ทั้งในแง่ของสมบัติที่พึงประสงค์และแง่มุมของการปกป้องข้อบกพร่องที่จะเกิดขึ้นในแนวเชื่อม ด้วยเหตุผลในส่วนนี้จึงนิยมที่จะแบ่งชนิดของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ตามชนิดของฟลักซ์ที่หุ้ม ดังรายละเอียดของแต่ละชนิดที่จะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2. การแบ่งลวดเชื่อมตามชนิดของสารฟลักซ์หุ้ม (Type of electrode flux)

ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ หรือที่รู้จักกันดีในนามของ “ลวดเชื่อมไฟฟ้า หรือลวดเชื่อมธูป” ผลิตออกมารองรับกับการเชื่อมวัสดุโลหะได้หลายชนิดหลายเกรด ทั้งเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steels) เหล็กกล้าผสม (Alloy steels) เหล็กหล่อ (Cast iron) และโลหะนอกกลุ่มเหล็กบางชนิด (Non–ferrous) โดยมีมาตรฐานที่รองรับก็หลากหลายเช่นกัน และลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่มีปริมาณการใช้มากที่สุดคือ ลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมกลุ่มของโลหะเหล็กกล้า ทั้งเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม โดยแบ่งตามชนิดของสารฟลักซ์หุ้ม อ้างอิงตาม ESAB Repair & Maintenance Welding Handbook (2012) ดังนี้

● ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดกรด (Acid welding electrode) ลวดเชื่อมชนิดนี้จะใช้ฟลักซ์พอกหุ้มที่มีส่วนผสมของสสารจำพวกเหล็กออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ และซิลิกา สแลกเมื่อแข็งตัวแล้วหลุดร่อนหรือเคาะออกได้ง่าย เกิดการหลอมละลายที่ลึกใช้ได้ทั้งเครื่องเชื่อมกระแสไฟตรง (DC) และกระแสไฟสลับ (AC) ลวดเชื่อมชนิดนี้มีแนวโน้มในการเกิดการแตกร้าวขณะร้อน (Hot crack) ได้ จึงเหมาะกับการเชื่อมโลหะที่มีความเหนียวสูง ดังแสดงลักษณะพฤติกรรมของการอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดนี้ในรูปที่ 7.3 (ก) โดยในทางการผู้ผลิตลวดเชื่อม ได้ผลิตลวดเชื่อมชนิดนี้ออกมาใช้งานมีอยู่ 2 ประเภท คือ

– ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กออกไซด์ผสมโซเดียม (EXX20) ลวดเชื่อมชนิดนี้สามารถเชื่อมด้วยความเร็วที่สูงได้ดี เพราะลวดเชื่อมมีอัตราการหลอมเหลวสูงซึ่งสังเกตได้ว่าปลายแกนลวดที่หลอมจะหดลึกเข้าไปข้างใน มีฟลักซ์ยื่นออกมาหุ้มอยู่ มีการหลอมลึกระดับปานกลาง เกิดสะเก็ดเชื่อมน้อย เหมาะกับการเชื่อมในท่าราบและการเชื่อมมุม (Fillet)

– ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กออกไซด์ผสมผงเหล็ก (EXX27) ลวดเชื่อมชนิดนี้มีอัตราการป้อนเติมเนื้อโลหะลงในรอยต่อได้ในอัตราที่สูงและรวดเร็ว มีอัตราการหลอมเลวสูง ด้วยเหตุเพราะมีปริมาณของโลหะผงเหล็ก (Power ferrous) ผสมอยู่มากสูงถึง 50% ของส่วนผสมฟลักซ์

● ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดด่าง (Basic welding electrode) หรือลวดเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำ (Low hydrogen) ฟลักซ์ที่นำมาใช้พอกหุ้มลวดเชื่อมชนิดนี้จะมีส่วนผสมของสารจำพวกแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) หรือคาร์บอเนตประเภทอื่น ๆ และฟลูออไรด์ (CaF2) หรือชื่อในทางการค้าว่าฟลูออร์สปาร์ส

(Fluorspar) โดยสารคาร์บอเนตที่เป็นตัวผสมหลักเมื่อได้รับความร้อนจากการอาร์ก จะทำให้เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีไฮโดรเจนต่ำปกคลุมบ่อหลอมละลาย ทำให้เนื้อเชื่อมมีปริมาณของแก๊สออกซิเจนจากภายนอกเข้าไปรวมตัวได้น้อยลง ฟลักซ์ชนิดนี้จะทำให้สแลกมีความหนา เป็นเงาและมีสีเข้ม เคาะหรือกำจัดออกได้ยาก ขณะเชื่อมเกิดควันมาก มีข้อแนะนำจากผู้ผลิตเสมอว่าก่อนนำไปเชื่อมต้องทำการอบไล่ความชื้นก่อนเสมอ เพื่อป้องกันการเกิดรูพรุนและการแตกร้าวของรอยเชื่อมได้เป็นอย่างดี โดยลวดเชื่อมสามารถที่จะใช้กับเครื่องเชื่อมทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ และเหมาะอย่างยิ่งกับการนำไปเชื่อมโลหะเหล็กกล้าความผสมแข็งแรงสูง (High strength alloy) เพราะขณะเชื่อมเกิดแก๊สไฮโดรเจนในปริมาณที่ต่ำ ดังแสดงลักษณะพฤติกรรมของการอาร์กของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดนี้ใน รูปที่ 7.3 (ข) ลวดเชื่อมชนิดนี้ผู้ผลิตได้ผลิตออกมา 3 ประเภท คือ

– ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ไฮโดรเจนต่ำผสมโซเดียม (EXXX5) ลวดเชื่อมประเภทนี้จะใช้แคลเซียมคาร์บอเนตหรือแคลเซียมฟลูออไรด์เป็นส่วนผสมหลัก ซึ่งเป็นสารที่สภาพเป็นด่าง จนนิยมเรียกกันว่าลวดเชื่อมประเภทด่าง สารพอกหุ้มประเภทนี้จะไม่ใช้ร่วมกับสารพอกหุ้มประเภทอื่นที่มีน้ำร่วมผสมอยู่ เพื่อสร้างจุดเด่นของลวดที่สามารถลดแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดจากการอาร์กของลวดเชื่อม โดยลวดเชื่อมประเภทนี้จะค่อนข้างให้สมบัติของแนวเชื่อมที่ดี มีความแข็งแรงสูง (ต้องเก็บไว้ในตู้อบเพื่อป้องปกจากความชื้น) ซึ่งมีความรุนแรงของการอาร์กอยู่ในระดับปานกลาง การหลอมลึกปานกลาง และอัตราการหลอมละลายเติมลวดก็อยู่ในระดับปานกลาง จะเหมาะสมกับการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมแบบกระแสตรงลวดเชื่อมเป็นขั้วบวก (DCEP)

– ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ไฮโดรเจนต่ำผสมโพแตสเซียม (EXXX6) ลวดเชื่อมประเภทนี้จะมีสมบัติและความสามารถใกล้เคียงกับ ประเภทผสมโซเดียมข้างต้น แต่จะมีความพิเศษกว่าที่สามารถใช้กับเครื่องเชื่อมได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับที่ลวดเชื่อมต่อขั้วบวกได้ จึงเป็นที่นิยมเลือกใช้งานกันมาก การอาร์กก็สม่ำเสมอ

– ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ไฮโดรเจนต่ำผสมโพแตสเซียม–ผงเหล็ก (EXXX8) ลวดเชื่อมประเภทนี้จะมีความสามารถโดยพื้นฐานเหมือนกับสองประเภทที่กล่าวมา เพียงแต่มีการเพิ่มปริมาณของผงเหล็กเข้าไปผสมในปริมาณที่มากสูงถึง 25–40% ทำให้ลวดเชื่อมประเภทนี้มีความสามารถในการป้อนเติมเนื้อเชื่อมได้สูง อัตราการหลอมเหลวสูง เหมาะกับการเชื่อมโลหะที่ต้องการปริมาณเนื้อโลหะเพื่อเติมเต็มลงในรอยต่อในปริมาณที่มาก

● ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดรูไทล์ (Rutile welding electrode) ลวดเชื่อมประเภทนี้ใช้สารพอกหุ้มจำพวกไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารผสมหลัก ที่มีความโดดเด่นในเรื่องของการช่วยทำให้สแลกหรือขี้ตะกรันไหลตัวได้ดี โดยที่การอาร์กไม่ต้องรุนแรง การหลอมลึกปานกลาง และผิวหน้าของแนวเชื่อมจะราบเรียบ ซึ่งมีข้อด้อยเรื่องของการป้องกันแก๊สไฮโดรเจนแทรกตัวเข้ามารวมตัวกับแนวเชื่อมจึงให้แนวเชื่อมมีความแข็งเพิ่มสูงขึ้น จึงไม่นิยมนำมาใช้เชื่อมเหล็กกล้า ดังแสดงลักษณะพฤติกรรมของการ

อาร์กของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดนี้ในรูปที่ 7.3 (ค) ลวดเชื่อมประเภทนี้เป็นที่นิยมกันมาก ผู้ผลิตได้จัดแบ่งออกเป็นประเภทย่อย ได้ 3 ประเภท คือ

– ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์รูไทล์ผสมโซเดียม (EXX12) ลวดเชื่อมประเภทนี้จะมีสมบัติที่เชื่อมที่อาร์กง่าย การไหลตัวของฟลักซ์ที่หลอมละลายไปรวมตัวกับสารมลทินการการไหลตัวที่ดีมาก ทำให้การควบคุมบ่อหลอมละลายก็เสถียร และเกิดสะเก็ดเชื่อมน้อยมาก ลวดเชื่อมประเภทนี้มักจะเพิ่มเติมส่วนผสมของผงเหล็กเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหลอมละลายให้สามารถป้อนเติมน้ำโลหะได้มากและรวดเร็วขึ้น แต่การหลอมลึกค่อนข้างน้อย สามารถใช้ได้กับเครื่องเชื่อมชนิดกระแสไฟตรงสลับและกระแสไฟตรงที่ลวดเชื่อมต่อเป็นขั้วลบ (DCEN)

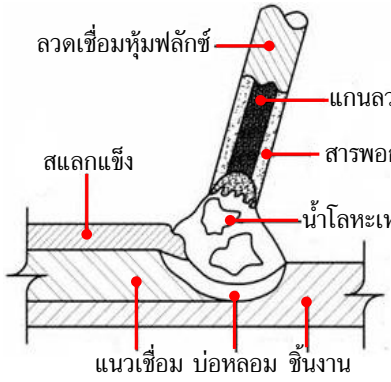
– ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์รูไทล์ผสมโพแตสเซียม (EXX13) ลวดเชื่อมประเภทนี้จะมีสมบัติที่ใกล้เคียงกับประเภทฟลักซ์รูไทล์ผสมโซเดียม จะต่างกันที่มีการอาร์กที่ราบเรียบและสม่ำเสมอมากกว่าและสามารถใช้ได้ดีกับทั้งการต่อขั้วแบบ DCEP และ แบบ DCEN

– ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์รูไทล์ผสมผงเหล็ก (EXXX4) ลวดเชื่อมประเภทนี้ปรับปรุงมาจากสองชนิดแรกโดยการผสมผงเหล็กมากขึ้นสูงถึง 25–40% ซึ่งเพิ่มความโดยเด่นในด้านการหลอมละลายและอัตราการป้อนเติมเนื้อเชื่อมที่สูง ขี้ตะกรันน้อยและขจัดออกได้ง่าย การหลอมลึกต่ำ ผิวหน้าแนวเชื่อมเป็นคลื่นเล็กน้อย ที่สำคัญสามารถใช้ได้กับเครื่องเชื่อมทุกชนิดของกระแสไฟเชื่อม

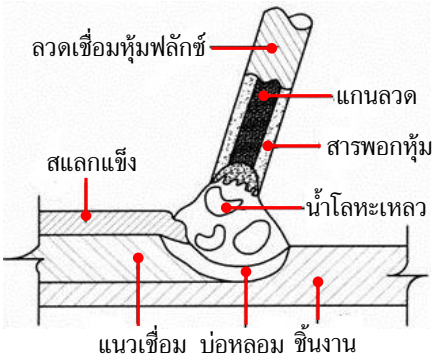
● ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดเซลลูโลส (Cellulose welding electrode) ลวดเชื่อมประเภทนี้จะใช้สารพอกหุ้มที่ได้จากสารอินทรีย์ที่เป็นเซลลูโลสจำพวกเยื่อไม้หรือส่วนที่เหลือจากการผลิตกระดาษ โดยเซลลูโลสเมื่อได้รับความร้อนจากการอาร์กจะทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนปกคลุมจำนวนมาก ปกป้องแก๊สจากภายนอกได้ดี ขณะเดียวกันการอาร์กก็ค่อนข้างรุนแรง ทำให้เกิดการหลอมลึกที่สูง ผิวแนวเชื่อมมีลักษณะเป็นคลื่นไม่ราบเรียบ เกิดสะเก็ดเชื่อมมาก ส่งผลให้เกิดสแลกน้อยและเคาะออกได้ง่าย มีความพิเศษที่สามารถใช้เชื่อมได้ทั้งแนวราก (Root) และ แนวทับหน้า (Face) ดังแสดงลักษณะพฤติกรรมของการอาร์กของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดนี้ในรูปที่ 7.3 (ง) ลวดเชื่อมชนิดนี้ผู้ผลิตได้แบ่งออกมาเป็น 2 ประเภทที่สำคัญ ๆ คือ

– ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เซลลูโลสผสมโซเดียม (EXX10) ลวดเชื่อมประเภทนี้จะมีสมบัติของสารพอกหุ้มที่ให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนช่วยในการปกคลุมแนวเชื่อมได้เป็นอย่างดี แนวเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรงสูงมาก และยังหลอมละลายได้ลึก จะสามารถใช้ได้กับการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมไฟกระแสตรง ลวดเชื่อมต่อขั้วบวก (DCEP) การอาร์กจึงค่อนข้างที่จะรุนแรง ส่งผลเสียทำให้แนวเชื่อมเกิดสะเก็ดโลหะ(Spatter) บริเวณแนวเชื่อมมาก

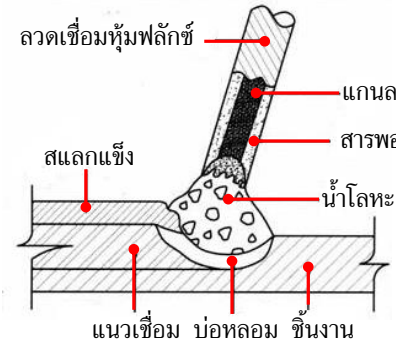
– ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เซลลูโลสผสมโพแตสเซียม (EXX11) ลวดเชื่อมประเภทนี้พัฒนาขึ้นมาจากประเภทแรกดังที่กล่าวมา ดังนั้น สมบัติและความสามารถเหมือนกันกับประเภทแรก แต่ที่แตกต่างกันคือเป็นลวดเชื่อมที่สามารถใช้กับเครื่องเชื่อมทั้งชนิดกระแสไฟสลับและกระแสไฟตรงลวดเชื่อมต่อขั้วบวก (DCEP)



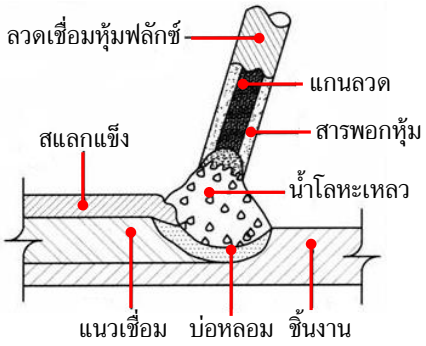
(ก) การอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดกรด



(ข) การอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดด่าง



(ค) การอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดรูไทล์



(ง) การอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดเซลลูโลส

รูปที่ 7.3 ลักษณะการอาร์กของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ใช้สารพอกหุ้มต่างชนิด

ที่มา : บทเรียนออนไลท์วิชาวัสดุประสานงานเชื่อม, 2011

3. การจัดเก็บและการอบลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Stored and Oven electrode)

ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ผลิตขึ้นมาจากการนำสารแร่ธาตุและสารประกอบออกไซด์ในประเภทต่าง ๆ นำมาผสมกันแล้วทำการบดให้เป็นรูปแบบผง (Powder) จากนั้นก็นำมาผสมกับน้ำแก้ว (Water glass) ทำเป็นฟลักซ์เพื่อใช้พอกหุ้มแกนลวดโลหะ จนได้เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ซึ่งด้วยเพราะองค์ประกอบของฟลักซ์และขบวนการพอกหุ้มที่มีไม่แข็งแรงมากนัก มีโอกาสที่ฟลักซ์พอกจะหลุดร่อนออกได้ง่าย และเมื่อสัมผัสกับน้ำหรือความชื้นต่าง ๆ จะมีสมบัติที่ดูดซับความชื้นได้มาก ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์สำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ดังนั้นวิธีการจัดเก็บที่จะให้คงสภาพใช้งานได้ดีและวิธีการอบไล่ความชื้นออกไปจากลวดเชื่อมจะต้องปฏิบัติให้ถูกวิธี

● วิธีการจัดเก็บลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ควรจัดเก็บให้อยู่ในกล่องบรรจุ (Packaging) จากผู้ผลิตในสภาพที่ดีมีการห่อหุ้มด้วยวัสดุป้องกันความชื้น สถานที่จัดเก็บควรมีระดับความชื้นที่ต่ำ มีระบบระบายอากาศที่ดี และมีชั้นวางเรียงไม่ซ้อนทับกัน กรณีที่เปิดกล่องลวดเชื่อมใช้แล้วส่วนที่เหลือใช้จะต้องจัดเก็บในห้องที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ที่ความแปรผันต้องไม่เกิน $\pm 5^{\circ}C$

ความชื้นสัมพัทธ์ต้องไม่เกิน 60% ที่ 15–25°C หรือที่ 50% ที่ 25–35°C และหากลวดเชื่อมเปียกน้ำ น้ำมัน หรือจาระบี จะต้องจัดแยกเก็บและนำไปทำความสะอาด (กรณีที่สามารถยังใช้งานได้) หรืออาจต้องทิ้งเพราะลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เมื่อสัมผัสกับสารปนเปื้อนจะทำให้คุณภาพลดลงซึ่งจะส่งผลทำให้แนวเชื่อมเกิดข้อพกพร่องได้ง่าย จึงเป็นข้อที่ต้องพิจารณาและไม่แนะนำเอาไปใช้กับงานเชื่อมที่ต้องการประสิทธิภาพของแนวเชื่อมสูง ดังแสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์กล่องบรรจุลวดเชื่อมซึ่งมีทั้งที่เป็นวัสดุพลาสติก และเป็นวัสดุกระดาษ ในรูปที่ 7.4 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

● วิธีการอบลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Electrode drying) ความชื้นของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์จะมีอิทธิพลต่อขบวนการเชื่อมอาร์กเป็นอย่างยิ่ง ไม่ว่าจะเป็นรูปแบบของความสม่ำเสมอของการอาร์ก คุณภาพของแนวเชื่อม การแตกร้าวของแนวเชื่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งโอกาสที่จะเกิดข้อบกพร่องในรูปแบบต่าง ๆ บนแนวเชื่อม ดังนั้นการขจัดความชื้นออกไปจากลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ก่อนที่จะไปใช้เชื่อมจึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งช่างเชื่อมหรือวิศวกรงานเชื่อมต้องรู้และเข้าใจถึงวิธีการปฏิบัติ เช่น อบอย่างไร อบด้วยเครื่องมือหรืออุปกรณ์ชนิดใด ลวดเชื่อมประเภทไหนที่ต้องอบบ้างและจะต้องอบที่ระดับอุณหภูมิเท่าไหร่ สิ่งเหล่านี้ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น การอบลวดเชื่อมครั้งต่อไปเมื่ออบแล้วใช้ไม่หมด จะแนะนำให้อบครั้งใหม่ที่ระดับอุณหภูมิ 140–200°C เป็นเวลา 2–12ชั่วโมง (จากประสบการณ์ที่นิยม คือ 6 ชั่วโมง ที่ 150°C และอบใหม่ได้ไม่ควรเกินจำนวน 6 รอบ) โดยปกติทั่วไปเป็นที่ทราบกันดีในกลุ่มงานวิชาชีพช่างเชื่อมว่าการอบลวดเชื่อมจะใช้เตาอบ (Electrode drying oven) ที่ได้ความร้อนจากขดลวดความต้านทานไฟฟ้า โดยจะมีทั้งที่เป็นเตาอบที่มีขนาดใหญ่ติดตั้งประจำตำแหน่ง (Stationary) อบได้ในปริมาณลวดเชื่อมที่มากตั้งแต่ปริมาณ 50 ถึง 200 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 260 ถึง 425 °C และ ดังแสดงในรูปที่ 7.5 (ก) และกระบอกอบลวดที่เป็นแบบเคลื่อนที่ (Portable electrode drying oven) ที่นิยมใช้เป็นตัวใส่ลวดเชื่อมที่เอาออกจากเตาอบหลักไปใช้หน้างานที่เชื่อม เพราะอบได้ที่อุณหภูมิ 30 ถึง 140 °C และในปริมาณที่ไม่มาก (ประมาณ 5 กิโลกรัม) จนในปัจจุบันมักเรียกกระบอกอบแบบนี้ว่า กระบอกอุ่นลวดเชื่อม โดยมีทั้งแบบวางตั้งตรง และแบบวางแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 7.5 (ค) และ (ง) ตามลำดับ

สำหรับประเภทของลวดเชื่อมที่ต้องผ่านการอบไล่ความชื้นก่อนนำไปใช้งานนั้น จะเป็นลวดเชื่อมประเภทไฮโดรเจนต่ำ (Low hydrogen electrodes) ซึ่งก็คือลวดเชื่อมชนิดด่าง (Basic electrode) ด้วยเพราะลวดเชื่อมประเภทนี้ออกแบบมาใช้งานที่ต้องการสมบัติของแนวเชื่อมที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น งานท่อส่งแก๊ส ท่อส่งน้ำมัน ถังภาชนะความดัน ซึ่งเนื้อเชื่อมของงานกลุ่มนี้มักเกิดการแตกร้าวจากแก๊สไดรเจน (H_2 Crack) จึงต้องเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีไฮโดรเจนต่ำมาใช้งาน นอกจากนี้ลวดเชื่อมประเภทนี้ยังโดดเด่นในด้านความเหนียวทนแรงกระแทก (Toughness) ที่ไม่ใช่ความเหนียวทนแรงดึง (Tensile strength) ได้ดีกว่าลวดเชื่อมชนิดอื่น ๆ ดังนั้นลวดเชื่อมที่ใช้เชื่อมต้องไม่มีความชื้นปะปนอยู่ในเนื้อฟลักซ์หุ้ม(ยอมให้มีได้แต่ต้องน้อยที่สุดเท่าที่สามารถกำจัดออกได้) เราจึงนิยมเรียกลวดเชื่อมชนิดนี้ว่า ลวดไฮโดรเจนต่ำ ส่วนลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ประเภทรูไทล์ ที่ออกแบบมาใช้โดยไม่ต้องอบไล่ความชื้นเนื่องจากฟลักซ์ดูดซับความชื้นได้ต่ำ และนิยมใช้กับงานที่เชื่อมโลหะบาง (Sheet metal) ซึ่งเนื้อ

เชื่อมไม่มากพอที่จะสะสมแก๊สไฮโดรเจนแล้วเกิดการแตกร้าว จึงไม่มีความจำเป็นต้องอบไล่ความชื้นก่อนนำไปใช้งาน (แต่ถ้าต้องการที่อบไล่ความชื้นก็สามารถทำได้) มีข้อแนะจากผู้ผลิตให้จัดวางกล่องลวดเชื่อมขณะปฏิบัติงานในแนวตั้งและเป็นช่องแคบ ๆ การดูดซับไฮโดรเจนจะต่ำลง แต่จะดีที่สุดถ้าจัดเก็บไว้ในกระบอกอุ่นลวด (ตามมาตรฐาน AWS D1.1 อุณหภูมิต้องไม่ต่ำกว่า 120°C)



(ก) บรรจุภัณฑ์ลวดเชื่อมกล่องพลาสติก

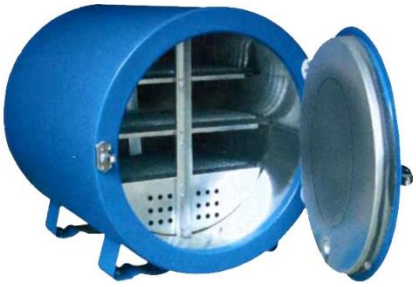
ที่มา : Castolin Eutectic, 2021



(ข) บรรจุภัณฑ์ลวดเชื่อมกล่องกระดาษ

ที่มา : KOBE Steel, 2020

รูปที่ 7.4 ตัวอย่างการจัดเก็บลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ในบรรจุภัณฑ์ของผู้ผลิต



(ก) เตาอบลวดเชื่อม



(ข) กระบอกอบลวดเชื่อมนอน



(ค) กระบอกอุ่นลวดเชื่อมตั้ง

รูปที่ 7.5 อุปกรณ์อบไล่ความชื้นและอุ่นในลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

ที่มา : Product of Speed arc, 2019

4. มาตรฐานต่าง ๆ ของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Classification standards code of covered electrode)

ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์หรือลวดเชื่อมไฟฟ้าที่ผลิตออกมาจำหน่ายและใช้งานกันมีหลายมาตรฐานที่รู้จักกันดี ได้แก่ มาตรฐาน AWS (มาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา) มาตรฐาน EN DIN ISO (มาตรฐานของประเทศในกลุ่มยุโรป) มาตรฐาน JIS (มาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น) และ มาตรฐาน มอก. (TIS) (มาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศไทย) และยังมีมาตรฐานอื่น ๆ อีกที่ไม่ได้กล่าวถึง เป็นต้น อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะมีหลายมาตรฐาน แต่สาระสำคัญที่ระบุถึงลวดเชื่อมจะไม่แตกต่างกันมาก ส่วน

ใหญ่จะต่างกันที่การระบุรหัส (Code) จากประสบการณ์ที่ผ่านมาของผู้เขียนพบว่า งานเชื่อมในประเทศไทยจะนิยมอ้างอิงตามมาตรฐาน AWS กับมาตรฐาน JIS และมาตรฐาน มอก. ซึ่งจะได้แสดงในรายละเอียดต่าง ๆ ของแต่ละมาตรฐานดังนี้

4.1 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มาตรฐาน AWS (American Welding Society)

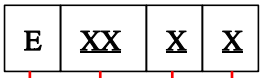
มาตรฐานที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้จัดกลุ่มแบ่งรหัสลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็ก ดังนี้

1) AWS A5.1/A5.1M:2012 ข้อกำหนดสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ของเหล็กกล้าคาร์บอน (Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding) ซึ่งได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดออกมาดังนี้

AWS A5.1/A5.1M:2012 **E XX X X** ตัวอักษรและตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

A5.1/A5.1M หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน

2012 หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน (2012)



- หมายถึง = ชนิดของฟลักซ์พอกหุ้ม และชนิดของกระแสไฟเชื่อม
- หมายถึง = ตำแหน่งท่าเชื่อม
- หมายถึง = ค่าความเค้นแรงดึงต่ำสุด กิโลปอนด์/ตารางนิ้ว ใช้หมายเลข 2–5
- หมายถึง = ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Electrode)

ตำแหน่งท่าเชื่อม

หมายเลข 0 หรือ 1 = เชื่อมได้ทุกตำแหน่งท่าเชื่อม

หมายเลข 2 = เชื่อมได้ในตำแหน่งท่าราบ และท่าแนวระดับ

หมายเลข 3 = เชื่อมได้ในตำแหน่งท่าราบ

หมายเลข 4 = เชื่อมได้ในตำแหน่งท่าราบ ท่าแนวระดับ และท่าเหนือศีรษะ

ชนิดของของฟลักซ์พอกหุ้มและชนิดกระแสไฟเชื่อม

หมายเลข 0 = ฟลักซ์เซลลูโลส–โซเดียม กระแสไฟเชื่อม DCEP

หมายเลข 1 = ฟลักซ์เซลลูโลส–โพแตสเซียม กระแสไฟเชื่อม AC/DCEP

หมายเลข 2 = ฟลักซ์รูไทล์–โซเดียม กระแสไฟเชื่อม AC/DCEN

หมายเลข 3 = ฟลักซ์รูไทล์–โพแตสเซียม กระแสไฟเชื่อม AC/DCEP/DCEN

หมายเลข 4 = ฟลักซ์รูไทล์–ผงเหล็ก กระแสไฟเชื่อม AC/DCEP/DCEN

หมายเลข 5 = ฟลักซ์ไฮโดรเจนต่ำ–โซเดียม กระแสไฟเชื่อม DCEP

หมายเลข 6 = ฟลักซ์ไฮโดรเจนต่ำ–โพแตสเซียม กระแสไฟเชื่อม AC/DCEP

หมายเลข 7 = ฟลักซ์เหล็กออกไซด์–ผงเหล็ก กระแสไฟเชื่อม AC/DCEP/DCEN

หมายเลข 8 = ฟลักซ์ไฮโดรเจนต่ำ–ผงเหล็ก กระแสไฟเชื่อม AC/DCEP

จากที่ได้บ่งชี้ถึงความหมายของรหัสหรือโค๊ด (Code) ที่ใช้จัดแบ่งประเภทของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ตามมาตรฐานของ AWS ในข้างต้นแล้วนั้น ผู้เขียนใคร่จะขอยกตัวอย่างชนิดลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์บางชนิดเพื่อเป็นตัวอย่างในการแปลความหมายของโค๊ดที่แสดงอยู่บนลวดเชื่อม และตัวอย่างการแสดงโค๊ดที่ผู้ผลิตระบุไว้บนลวดเชื่อมในรูปที่ 7.6 และลวดเชื่อมตัวอย่างที่จะแสดงความหมายมีดังนี้

ลวดเชื่อมชนิด E6010 หมายถึง ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดเซลลูโลส มีความเค้นแรงดึงสูงสุด 60,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว เชื่อมได้ทุกตำแหน่งท่าเชื่อม ใช้กระแสไฟเชื่อม DCEP การอาร์กรุนแรง หลอมลึกสูง (Deep)

ลวดเชื่อมชนิด E6013 หมายถึง ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดรูไทล์–โพแตสเซียม มีความเค้นแรงดึงสูงสุด 60,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว เชื่อมได้ทุกตำแหน่งท่าเชื่อม ใช้กระแสไฟเชื่อม AC/DCEP/DCEN การอาร์กนิ่มนวลไม่รุนแรง หลอมลึกต่ำ

ลวดเชื่อมชนิด E6016 หมายถึง ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิด มีความเค้นแรงดึงสูงสุด 60,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว เชื่อมได้ทุกตำแหน่งท่าเชื่อม ใช้กระแสไฟเชื่อม DCEP การอาร์กรุนแรง หลอมลึกสูง

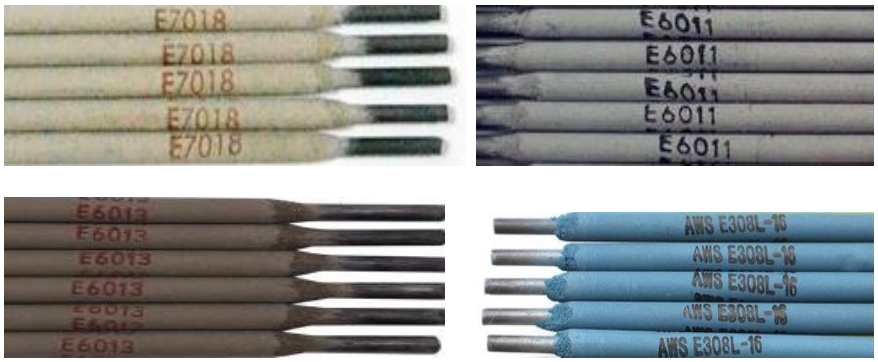
นอกจากนี้ยังมีรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์อื่น ๆ ของประเภท E 60 และ E 70 ที่แสดงถึงโค๊ด ชนิดของสารพอกหุ้ม ท่าเชื่อมและชนิดของกระแสไฟเชื่อม ดังแสดงในตารางที่ 7.2

ปัจจุบันผู้ผลิตลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ได้พัฒนาลวดเชื่อมชนิดแปลกใหม่ขึ้นมามาก เพื่อต้องการให้สามารถนำไปใช้งานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและตรงตามความต้องการของผู้ใช้มากขึ้น มาตรฐานก็มีการเพิ่มเติมรหัสโค๊ดบนลวดเชื่อมสำหรับลวดเชื่อมที่ใช้งานพิเศษเพาะทาง เช่น ลวดเชื่อมประเภท E 70 ยกตัวอย่าง E7018–1 H4 R รหัสพิเศษเพิ่มเติม คือ

1 หมายถึง เหมาะสำหรับงานเชื่อมที่รับแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature impact)

H4 หมายถึง ไฮโดรเจนผสมน้อยกว่า 4 มิลลิลิตร/100 กรัม (Hydrogen content)

R หมายถึง ผ่านการทดสอบการดูดซับความชื้น (Absorbed moisture test) ลวดเชื่อมบางชนิดกำหนดเป็นตัว M ซึ่งจะหมายถึงใช้ในงานด้านการทหาร (Military)



รูปที่ 7.6 ตัวอย่างการระบุรหัสหรือโค๊ดบนลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

ที่มา : KOBE Steel Welding Electrode, 2017

ตารางที่ 7.2 การแบ่งประเภทลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐาน AWS A5.1

ที่มา : ANSI/AWS A5.1/A5.1M, 2012

ลวดเชื่อมประเภท E60	สารพอกหุ้ม	ท่าเชื่อม	กระแสไฟเชื่อม
E6010	เซลลูโลส–โซเดียมสูง	F/V/OH/H	AC/DCEP
E6011	เซลลูโลส–โปแตสเซียมสูง	F/V/OH/H	AC/DCEP
E6012	ไทเทเนียม–โปแตสเซียมสูง	F/V/OH/H	AC/DCEN
E6013	ไทเทเนียม–โปแตสเซียมสูง	F/V/OH/H	AC/DCEP/DCEN
E6020	เหล็กออกไซด์สูง	H/FIL	AC/DCEP/DCEN
E6022	เหล็กออกไซด์สูง	F	AC/DCEN
E6027	ผงเหล็กออกไซด์สูง	H/FIL/F	AC/DCEN
E6028	ผงเหล็ก–เหล็กออกไซด์	H/FIL/F	AC/DCEN
ลวดเชื่อมประเภท E70	**สารพอกหุ้ม**	**ท่าเชื่อม**	**กระแสไฟเชื่อม**
E7014	ผงเหล็ก–ไทเทเนียม	F/V/OH/H	AC/DCEP/DCEN
E7015	ไฮโดรเจนต่ำ	F/V/OH/H	AC/DCEP
E7016	ไฮโดรเจนต่ำ–โปแตสเซียมสูง	F/V/OH/H	AC/DCEN
E7017	ผงเหล็ก–ไฮโดรเจนต่ำ	F/V/OH/H	AC/DCEP
E7018	ผงเหล็กไทเทเนียม	H/FIL/F	AC/DCEP/DCEN
E7024	เหล็กออกไซด์สูง–ผงเหล็ก	H/FIL/F	AC/DCEN
E7027	ผงเหล็ก–ไฮโดรเจนต่ำ	H/FIL/F	AC/DCEP
E7028	ไฮโดรเจนต่ำ	F/OH/H/FIL	AC/DCEP
E7028	ไฮโดรเจนต่ำ–โปแตสเซียม–ผงเหล็ก	F/OH/H V–Down	AC/DCEP

หมายเหตุ

- อักษรย่อแสดงท่าเชื่อม ดังนี้

  F = ท่าราบ H = ท่าขนานนอน FIL = เชื่อมมุมท่าระดับ V= ท่าตั้ง V–Down = ท่าตั้งเชื่อมลง

  OH = ท่าเหนือศีรษะ
- DCEP คือ กระแสไฟตรงลวดเชื่อมขั้วบวก และ DCEN คือ กระแสไฟตรงลวดเชื่อมขั้วลบ
- AC คือ กระแสไฟสลับ

มาตรฐานลวดเชื่อม AWS A5.1 นอกจากที่กล่าวมาข้างต้นในเรื่องของชนิดสารพอกหุ้ม ท่าเชื่อม และชนิดของกระแสไฟเชื่อมของแต่ละชนิดลวดเชื่อมให้สามารถเลือกใช้แล้วนั้น มาตรฐานยังบอกถึงสมบัติทางกลที่ได้จากการเลือกใช้ลวดเชื่อมของแต่ละชนิด ได้แก่ สมบัติความต้านทานแรงดึง ความเค้นจำนนที่จุด 0.2% Offset และ เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ดังแสดงเป็นตัวอย่างลวดบางชนิดในตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 สมบัติทางกลจากลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐาน AWS A5.1

ที่มา : ANSI/AWS A5.1/A5.1M , 2012

ประเภทลวดเชื่อม E60	ความต้านทานแรงดึง		ความเค้นจำนนที่ 0.2 Offset		การยืดตัว
	ksi	MPa	ksi	MPa	%
E6010	60	414	48	331	22
E6011	60	414	48	331	22
E6012	60	414	48	331	17
E6013	60	414	48	331	17
E6019	60	414	48	331	22
E6020	60	414	48	331	22
E6022[a]	60	414	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
E6027	60	414	48	331	22
ประเภทลวดเชื่อม E70					
E7014	70	482	58	399	17
E7015	70	482	58	399	22
E7016	70	482	58	399	22
E7018	70	482	58	399	22
E7024	70	482	58	399	17[b]
E7027	70	482	58	399	22
E7028	70	482	58	399	22
E7048	70	482	58	399	22
E7018M	70[d]	482	53–72[c]	365–496[c]	24

หมายเหตุ

- ชิ้นทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ใน AWS A5.1/A5.1M:2012
- สภาพของชิ้นงานทดสอบไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (As weld)
- ค่าทดสอบที่ระบุเป็นค่าต่ำสุด (Minimum)
- ข้อบ่งชี้ของตัวอักษร

a = การทดสอบแรงดึงและแรงดัดโค้ง อ้างอิงตามมาตรฐานที่กำหนดใน AWS 5.1/A5.1M:2012

b = กรณีเนื้อเชื่อมที่ได้จาก E7024–1 จะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำสุด 22%

c = กรณีขนาดลวดเชื่อม 2.4 มม. ค่าความเค้นจำนนสูงสุด 77 ksi (531 MPa)

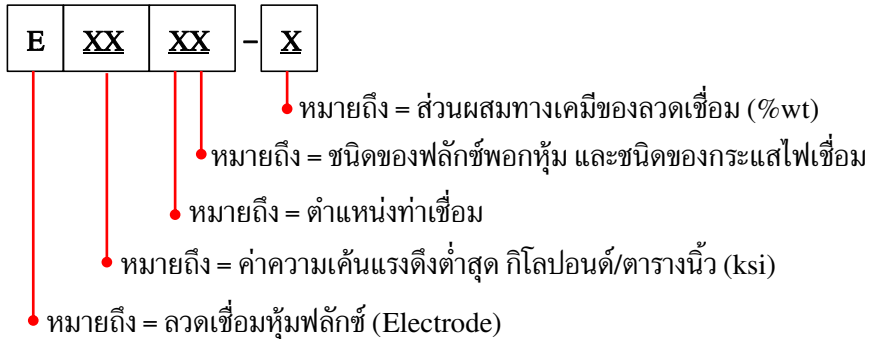
d = ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของเนื้อเชื่อมปกติ 70 ksi (MPa)

2) AWS A5.5/A5.5M:2014 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำ (Specification for Low Alloy Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding) ซึ่งได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดออกมาดังนี้

AWS A5.5/A5.5M:2014 **E XX XX–X** ตัวอักษร และตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

A5.5/A5.5M หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำ

2014 หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน (2014)



มาตรฐานข้อกำหนดลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ AWS ชุดนี้ใช้สำหรับการนำไปเลือกนำไปใช้กับการเชื่อมโลหะกลุ่มเหล็กกล้าผสมต่ำ (Low alloy steels) โดยในมาตรฐานจะมีการระบุถึงประเภทลวดเชื่อม ชนิดของฟลักซ์พอกหุ้ม ตำแหน่งท่าเชื่อม ชนิดของกระแสไฟเชื่อม ส่วนผสมทางเคมี และสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมที่ได้ ซึ่งรายละเอียดของข้อกำหนดหรือข้อบ่งชี้ของแต่ละด้านที่กล่าวถึงจะได้แสดงในรูปแบบตารางที่อ้างอิงมาจากคู่มือมาตรฐานของ AWS A5.5/A5.5M:2014 10th Edition ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 7.4 แสดงถึงข้อกำหนดที่ว่าด้วยประเภทของลวดเชื่อม ชนิดของฟลักซ์พอกหุ้ม ตำแหน่งท่าเชื่อม และชนิดของกระแสไฟเชื่อมกับขั้วเชื่อม ซึ่งช่างเชื่อมหรือวิศวกรงานเชื่อมสามารถใช้ตารางในการพิจารณาเลือกใช้ประเภทลวดเชื่อมและกำหนดปัจจัยการเชื่อมให้ถูกต้องและเหมาะสมกับโลหะชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม ลดปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับแนวเชื่อม ลดการแก้ไขซ่อมแซมแนวเชื่อมที่เกิดข้อบกพร่องจากการกำหนดหรือเลือกใช้ลวดเชื่อมที่ผิดพลาด

สำหรับข้อกำหนดมาตรฐานที่ระบุอยู่ในตารางที่ 7.5 เป็นการแสดงถึงส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมของลวดเชื่อมแต่ละประเภทที่ช่างเชื่อมสามารถที่จะเลือกลวดเชื่อมที่ต้องการส่วนผสมทางเคมีของเนื้อหลังการเชื่อมเสร็จ ที่มีสมบัติตามความต้องการ เช่น ต้องการแนวเชื่อมที่มีส่วนผสมทางเคมีที่ทนการกัดกร่อน ต้านทานการสึกหรอ มีโครงสร้างจุลภาคที่มีเกรนที่ละเอียด/เรียงตัวเป็นระเบียบ หรือความทนต่อการใช้งานอุณหภูมิที่สูง เป็นต้น

สว่นข้อกำหนดมาตรฐานสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมแต่ละประเภทดังแสดงในตารางที่ 7.6 เป็นค่าจากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ของเนื้อเชื่อม ที่ระบุถึงค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความเค้นจำนน ที่ 0.2% offset และค่าความสามารถในการยืดตัว พร้อมระบุสภาพการปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment)

ตารางที่ 7.4 การแบ่งประเภทลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M, 2014

ประเภทลวดเชื่อม[a]	ชนิดฟลักซ์พอกหุ้ม	ตำแหน่งท่าเชื่อม[b]	ชนิดกระแสไฟเชื่อม[c]
E7010–X	High–cellulose sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E7010–X	High–cellulose potassium	F/V/ OH/ H	AC / DCEP
E7015–X [d,e]	Low–hydrogen sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E7016–X [d,e]	Low–hydrogen potassium	F/V/ OH/ H	AC / DCEP
E718–X [d,e]	Low–hydrogen potassium, iron powder	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E7020–X	High–iron oxide	H–fillets F	AC / DCEP AC / DCEP / DCEN
E7027–X	High–iron oxide, iron powder	H–fillets F	AC / DCEP AC / DCEP / DCEN
E810–X	High–cellulose sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E8011–G	High–cellulose potassium	F, V, OH, H	AC / DCEP
E8013–G	High–titania potassium	F /V/ OH/ H	AC / DCEP / DCEN
E8015–X [d,e]	Low–hydrogen sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E8016–X [d,e]	Low–hydrogen potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E8018–X [d,e]	Low–hydrogen potassium, iron powder	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E9010–G	High–cellulose sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E9011–G	High–cellulose potassium	F/V/ OH/ H	AC / DCEP
E9013–G	High–titania potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP / DCEN
E9015–X [d,e]	Low–hydrogen sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E9016–X [d,e]	Low–hydrogen potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E9018–X [d,e]	Low–hydrogen potassium, iron powder	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E9018M [d,e]	Iron powder, low hydrogen	F/ V/ OH/ H	DCEP
E10010–G	High–cellulose sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E10011–G	High–cellulose potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E10013–G	High–titania potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP / DCEN
E10015–X [d,e]	Low–hydrogen sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E10016–X [d,e]	Low–hydrogen potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E10018–X [d,e]	Low–hydrogen potassium, iron powder	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E10018M [d,e]	Iron powder, low hydrogen	F/ V/ OH/ H	DCEP
E11010–G	High–cellulose sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP

ตารางที่ 7.4 (ต่อ) การแบ่งประเภทลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M, 2014

ประเภทลวดเชื่อม[a]	ชนิดฟลักซ์พอกหุ้ม	ตำแหน่งท่าเชื่อม[a]	ชนิดกระแสไฟเชื่อม[c]
E11011–G	High–cellulose potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E11013–G	High–titania potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP / DCEN
E11015–X [d,e]	Low–hydrogen sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E11016–X [d,e]	Low–hydrogen potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E11018–X [d,e]	Low–hydrogen potassium, iron powder	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E11018M [d,e]	Iron powder, low hydrogen	F/ V/ OH/ H	DCEP
E12010–G	High–cellulose sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E12011–G	High–cellulose potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E12013–G	High–titania potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP / DCEN
E12015–X [d,e]	Low–hydrogen sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E12016–X [d,e]	Low–hydrogen potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E12018–X [d,e]	Low–hydrogen potassium, iron powder	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E12018M [d,e]	Iron powder, low hydrogen	F/ V/ OH/ H	DCEP
E12018M1 [d,e]	Iron powder, low hydrogen	F/ V/ OH/ H	DCEP

หมายเหตุ ของตาราง 7.4

- a = อักษรที่ต่อท้าย “X” ใช้แทนอักษรได้แก่ A_1 B_1 B_3 เป็นต้น และธาตุผสมทางเคมีดูได้จากตารางที่ 7.5
- b = ตำแหน่งท่าเชื่อม F = ท่าราบ H = ท่าระดับ H–FIL = เชื่อมมุมท่าระดับ V= ท่าตั้ง OH = ท่าเหนือศีรษะ
- c = กระแสไฟเชื่อม DCEP หมายถึง กระแสตรงลวดเชื่อมขั้วบวก และ DCEN หมายถึง กระแสตรงลวดเชื่อมขั้วลบ
- d = ลวดเชื่อมที่กำหนดปริมาณของความชื้นที่อยู่ในฟลักซ์พอกหุ้ม
- e = ลวดเชื่อมที่กำหนดปริมาณของไฮโดรเจนที่แพร่ซึมอยู่ในเนื้อเชื่อม

การกำหนดมาตรฐานลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ รหัสหรือโค๊ดที่อยู่บนลวดเชื่อมนอกจากจะระบุให้ทราบถึงชนิดฟลักซ์หุ้ม ท่าเชื่อม และชนิดของกระแสไฟเชื่อมแล้วนั้น ยังจะบอกถึงส่วนผสมทางเคมีที่จะได้ในเนื้อเชื่อมด้วย โดยจะบอกถึงชนิดของธาตุ (Type of elements) ที่ผสมหลัก ๆ และธาตุอื่น ๆ ที่เสริมเพื่อต้องการสมบัติที่พิเศษบางอย่างของเนื้อเชื่อม ซึ่งจะระบุจำนวนปริมาณของธาตุที่ผสมเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%wt.) ดังแสดงส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5/A5.5:M2014 ในตารางที่ 7.5 อย่างไรก็ตามในการปฏิบัติงานจริง การเชื่อมอาร์กเป็นเชื่อมแบบหลอมละลายที่มีอุณหภูมิของบ่อหลอมละลายที่สูงมาก ซึ่งมีโอกาสสูงมากที่จะทำให้ธาตุผสมบางตัวที่จุดหลอมเหลวต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะหลักเกิดการสูญเสียไปในบรรยากาศ (Lose elements) เป็นต้นเหตุของการที่เนื้อเชื่อมมีส่วนผสมทางเคมีที่ไม่เป็นไปตามที่ต้องการ และจะส่งผลกระทบต่อสมบัติของเนื้อเชื่อมที่พึงประสงค์ ปัญหานี้แก้ไขด้วยการควบคุมแก๊สปกคลุมแนวเชื่อมด้วยการเชื่อมในสถานที่ป้องกันแก๊สปกคลุมแนวเชื่อมไม่ให้กระจายตัวออกเร็วเกินไป

ตารางที่ 7.5 ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M, 2014

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
Carbon–Molybdenum Steel Electrodes											
E7010–A1	W17010	0.12	0.60	0.40	0.03	0.03	--	--	0.40–0.65	--	--
E7011–A1	W17011	0.12	0.60	0.40	0.03	0.03	--	--	0.40–0.65	--	--
E7015–A1	W17015	0.12	0.90	0.60	0.03	0.03	--	--	0.40–0.65	--	--
E7016–A1	W17016	0.12	0.90	0.60	0.03	0.03	--	--	0.40–0.65	--	--
E7018–A1	W17018	0.12	0.90	0.80	0.03	0.03	--	--	0.40–0.65	--	--
E7020–A1	W17020	0.12	0.60	0.40	0.03	0.03	--	--	0.40–0.65	--	--
E7027–A1	W17027	0.12	1.00	0.40	0.03	0.03	--	--	0.40–0.65	--	--
Chromium–Molybdenum Steel Electrodes											
E8016–B1	W51016	0.05–0.12	0.90	0.60	0.03	0.03	--	0.4–0.65	0.40–0.65	--	--
E8018–B1	W51018	0.05–0.12	0.90	0.80	0.03	0.03	--	0.4–0.65	0.40–0.65	--	--
E8016–B2	W51016	0.05–0.12	0.90	0.60	0.03	0.03	--	1.0–1.50	0.40–0.65	--	--
E8018–B2	W51018	0.05–0.12	0.90	0.80	0.03	0.03	--	1.0–1.50	0.40–0.65	--	--
E7015–B2L	W52115	0.05	0.90	1.00	0.03	0.03	--	1.0–1.50	0.40–0.65	--	--
E7016–B2L	W52116	0.05	0.90	0.60	0.03	0.03	--	1.0–1.50	0.40–0.65	--	--
E7018–B2L	W52118	0.05	0.90	0.80	0.03	0.03	--	1.0–1.50	0.40–0.65	--	--
E9015–B3	W53015	0.05–0.12	0.90	1.00	0.03	0.03	--	2.0–2.50	0.90–1.20	--	--

ตารางที่ 7.5 (ต่อ) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M. 2014

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
Chromium–Molybdenum Steel Electrodes											
E9016–B3	W53016	0.05–0.12	0.90	0.60	0.03	0.03	––	2.0–2.50	0.90–1.20	––	––
E9018–B3	W53018	0.05–0.12	0.90	0.80	0.03	0.03	––	2.0–2.50	0.90–1.20	––	––
E8015–B3L	W53115	0.05	0.90	1.00	0.03	0.03	––	2.0–2.50	0.90–1.20	––	––
E8018–B3L	W53118	0.05	0.90	0.80	0.03	0.03	––	2.0–2.50	0.90–1.20	––	––
E8015–B4L	W53115	0.05	0.90	1.00	0.03	0.03	––	1.75 – 2.25	0.40–0.65	––	––
E8016–B5	W51316	0.07–0.15	0.4–0.7	0.3–0.6	0.03	0.03	––	0.4–0.6	1.00–1.25	V	0.05

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
E8015–B6[e]	W50215	0.05–0.10	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	4.0–6.0	0.45–0.65	––	––
E8016–B6[e]	W50216	0.05–0.10	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	4.0–6.0	0.45–0.65	––	––
E8018–B6[e]	W50218	0.05–0.10	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	4.0–6.0	0.45–0.65	––	––
E8015–B6L[e]	W50205	0.05	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	4.0–6.0	0.45–0.65	––	––
E8016–B6L[e]	W50206	0.05	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	4.0–6.0	0.45–0.65	––	––
E8018–B6L[e]	W50208	0.05	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	4.0–6.0	0.45–0.65	––	––
B8015–B7[e]	W50315	0.05–0.10	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	6.0–8.0	0.45–0.65	––	––

ตารางที่ 7.5 (ต่อ) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M, 2014

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
B8016–B7[e]	W50316	0.05–0.10	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	6.0–8.0	0.45–0.65	--	--
B8018–B7[e]	W50318	0.05–0.10	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	6.0–8.0	0.45–0.65	--	--
B8015–B7L[e]	W50305	0.05	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	6.0–8.0	0.45–0.65	--	--
B8016–B7L[e]	W50306	0.05	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	6.0–8.0	0.45–0.65	--	--
B8018–B7L[e]	W50308	0.05	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	6.0–8.0	0.45–0.65	--	--
B8015–B8[e]	W50415	0.05–0.10	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	8.0–10.5	0.85–1.20	--	--
B8016–B8[e]	W50416	0.05–0.10	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	8.0–10.5	0.85–1.20	--	--
B8018–B8[e]	W50418	0.05–0.10	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	8.0–10.5	0.85–1.20	--	--

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
B8015–B8L[e]	W50405	0.05	1.0	0.90	0.03	0.03	0.4	8.0–10.5	0.85–1.20	--	--
B8016–B8L[e]	W50406	0.05	1.0	0.90	0.03	0.03	0.4	8.0–10.5	0.85–1.20	--	--
B8018–B8L[e]	W50408	0.05	1.0	0.90	0.03	0.03	0.4	8.0–10.5	0.85–1.20	--	--
E9015–B9	W50425	0.08–0.13	1.25	0.30	0.01	0.01	1.0	8.0–10.5	0.85–1.20	V Cu Al Nb N	0.15–0.30 0.25 0.04 0.02–0.10 0.02–0.07

ตารางที่ 7.5 (ต่อ) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M, 2014

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
E9016-B9	W50426	0.08–0.13	1.25	0.30	0.01	0.01	1.0	8.0–10.5	0.85–1.20	V Cu Al Nb N	0.15–0.30 0.25 0.04 0.02–0.10 0.02–0.07
E9018-B9	W50428	0.08–0.13	1.25	0.30	0.01	0.01	1.0	8.0–10.5	0.85–1.20	V Cu Al Nb N	0.15–0.30 0.25 0.04 0.02–0.10 0.02–0.07

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
					Nickel Steel Electrodes						
E8016-C1	W22016	0.12	1.25	0.60	0.03	0.03	2.00–2.75	--	--	--	--
E8018-C1	W22018	0.12	1.25	0.80	0.03	0.03	2.00–2.75	--	--	--	--
E8015-C1L	W22115	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	2.00–2.75	--	--	--	--
E8016-C1L	W22116	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	2.00–2.75	--	--	--	--
E8018-C1L	W22118	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	2.00–2.75	--	--	--	--
E8016-C2	W23016	0.12	1.25	0.60	0.03	0.03	3.00–3.75	--	--	--	--
E8018-C2	W23018	0.12	1.25	0.80	0.03	0.03	3.00–3.75	--	--	--	--
E7015-C2L	W23115	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	3.00–3.75	--	--	--	--
E7016-C2L	W23116	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	3.00–3.75	--	--	--	--
E7018-C2L	W23118	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	3.00–3.75	--	--	--	--

ตารางที่ 7.5 (ต่อ) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M, 2014

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
Nickel Steel Electrodes											
E8016-C3	W21016	0.12	0.40 – 1.25	0.80	0.03	0.03	0.80–1.10	0.15	0.35	V	0.05
E8018-C3	W21018	0.12	0.40 – 1.25	0.80	0.03	0.03	0.80–1.10	0.15	0.35	V	0.05
E7018-C3L	W20918	0.08	0.40 –1.4	0.50	0.03	0.03	0.80–1.10	0.15	0.35	V	0.05
E816-C4	W21916	0.10	1.25	0.60	0.03	0.03	1.10–2.00	--	--	--	--
E818-C4	W21918	0.10	1.25	0.60	0.03	0.03	1.10–2.00	--	--	--	--
E9015-C5L	W25018	0.05	0.4–1.0	0.5	0.03	0.03	6.00–7.25	--	--	--	--

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
Nickel–Molybdenum Steel Electrodes											
E8018-NM1	W2118	0.10	0.80–1.25	0.60	0.02	0.02	0.80–1.10	0.10	0.40–0.65	V Cu Al	0.02 0.10 0.05

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
Manganese–Molybdenum Steel Electrodes											
E8018-D1	W18118	0.12	1.00–1.75	0.80	0.03	0.03	0.90	--	0.25–0.45	--	--
E8015-D1	W19015	0.12	1.00–1.75	0.60	0.03	0.03	0.90	--	0.25–0.45	--	--
E9018-D1	W19018	0.12	1.00–1.75	0.80	0.03	0.03	0.90	--	0.25–0.45	--	--

ตารางที่ 7.5 (ต่อ) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M. 2014

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
E10015–D2	W10015	0.15	1.65–2.00	0.60	0.03	0.03	0.90	--	0.25–0.45	--	--
E10016–D2	W10016	0.15	1.65–2.00	0.60	0.03	0.03	0.90	--	0.25–0.45	--	--
E10018–D2	W10018	0.15	1.65–2.00	0.80	0.03	0.03	0.90	--	0.25–0.45	--	--
E8016–D3	W18016	0.12	1.00–1.80	0.60	0.03	0.03	0.90	--	0.40–0.65	--	--
E8018–D3	W18018	0.12	1.00–1.80	0.80	0.03	0.03	0.90	--	0.40–0.65	--	--
E8018–D3	W19018	0.12	1.00–1.80	0.80	0.03	0.03	0.90	--	0.40–0.65	--	--

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
General Low –Alloy Steel Electrodes											
EXX10–G[8]	--	--	1.00[h] min	0.80[h] min	--	--	0.50[h] min	0.30[h] min	0.20[h] min	V Cu	0.10[h] min 0.20[h] min
EXX11–G[8]	--	--	1.00[h] min	0.80[h] min	--	--	0.50[h] min	0.30[h] min	0.20[h] min	V Cu	0.10[h] min 0.20[h] min
EXX13–G[8]	--	--	1.00[h] min	0.80[h] min	--	--	0.50[h] min	0.30[h] min	0.20[h] min	V Cu	0.10[h] min 0.20[h] min
EXX15–G[8]	--	--	1.00[h] min	0.80[h] min	--	--	0.50[h] min	0.30[h] min	0.20[h] min	V Cu	0.10[h] min 0.20[h] min
EXX16–G[8]	--	--	1.00[h] min	0.80[h] min	--	--	0.50[h] min	0.30[h] min	0.20[h] min	V Cu	0.10[h] min 0.20[h] min
EXX18–G[8]	--	--	1.00[h] min	0.80[h] min	--	--	0.50[h] min	0.30[h] min	0.20[h] min	V Cu	0.10[h] min 0.20[h] min
E7020–G	--	--	1.00[h] min	0.80[h] min	--	--	0.50[h] min	0.30[h] min	0.20[h] min	V Cu	0.10[h] min 0.20[h] min
E7027–G	--	--	1.00[h] min	0.80[h] min	--	--	0.50[h] min	0.30[h] min	0.20[h] min	V Cu	0.10[h] min 0.20[h] min

ตารางที่ 7.5 (ต่อ) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M, 2014

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
Military−Similar Electrodes											
E9018M[i]	W21218	0.10	0.60−1.25	0.80	0.03	0.03	1.40−1.80	0.15	0.35	V	0.05
E10018M[i]	W21318	0.10	0.75−1.70	0.60	0.03	0.03	1.40−2.10	0.35	0.25−0.50	V	0.05
E11018M[i]	W21418	0.10	1.30−1.80	0.60	0.03	0.03	1.25−2.50	0.40	0.25−0.50	V	0.05
E12018M[i]	W22218	0.10	1.30−2.25	0.60	0.03	0.03	1.75−2.50	0.30−1.50	0.30−1.50	V	0.05
E12018M[i]	W23218	0.10	0.80−1.60	0.65	0.01	0.01	3.00−3.80	0.65	0.20−0.30	V	0.05

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
Pipeline Electrodes											
E7010−P1	W17110	0.20	1.20	0.60	0.30	0.03	1.00	0.30	0.50	V	0.10
E8010−P1	W18110	0.20	1.20	0.60	0.30	0.03	1.00	0.30	0.50	V	0.10

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
Weathering Steel Electrodes											
E7018−WP	W20018	0.12	0.40−0.70	0.40−0.70	0.025	0.025	0.20−0.40	0.15−0.30	−−	V Cu	0.08 0.30−0.60
E8018−W2	W20118	0.12	0.50−1.30	0.35−0.80	0.03	0.03	0.40−0.80	0.45−0.70	−−	Cu	0.30−0.75

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.5

- a = ค่ากำหนดมาค่าเดียว เป็นค่าสูงสุด นอกจากกำหนดเป็นค่าอื่น
- b = การวิเคราะห์จะพิจารณาธาตุที่ระบุในตารางเท่านั้น
- c = รหัสต่อท้าย A_1 B_3 C_3 หมายถึงส่วนผสมของเนื้อเชื่อม
- d = Unified Numbering System for Metals and Alloys
- e = รหัสลวดเชื่อมออกใหม่แทนตัวเดิมใน AWS A5.4−81
- f = อักษร “XX” ของ EXX13−G หมายถึง ค่าความต้านแรงดึงต่ำสุดในเนื้อเชื่อม ได้แก่ 80 90 100 110 และ 120 ksi
- g = อักษร “XX” ของรหัสลวดเชื่อม ยกเว้น EXX13−G หมายถึง ค่าความต้านแรงดึงต่ำสุดในเนื้อเชื่อม ได้แก่ 70 80 90 100 110 และ 120 ksi
- h= เนื้อเชื่อมต้องมีธาตุตามตารางอย่างน้อย 1 ธาตุ
- i = ผลิตมาคล้ายกับ MIL−E22200/1 และ MIL−E22200/10
- j = E7018−W1 คือ E7018−W และ E7018−W2 คือ E7018−W

ตารางที่ 7.6 ค่าทดสอบแรงดึงลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M, 2014

ประเภทลวดเชื่อม	ความต้านแรงดึง		ความเค้นจำนน 0.2% Offset		การยืดตัว	สภาพการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน
AWS	ksi	MPa	ksi	MPa	%	
E7010–P1	70	480	60	415	22	AW
E7010–A1	70	480	57	390	22	PWHT
E7010–G	70	480	57	390	22	AW / PWHT
E7011–A1	70	480	57	390	22	PWHT
E7011–G	70	480	57	390	22	AW / PWHT
E7015–X	70	480	57	390	25	PWHT
E7015–B2L	75	520	57	390	19	PWHT
E7015–G	70	480	57	390	25	AW / PWHT
E7016–X	70	480	57	390	25	PWHT
E7016–B2L	75	520	57	390	19	PWHT
E7016–G	70	480	57	390	25	AW / PWHT
E7018–X	75	480	57	390	25	PWHT
E7018–B2L	70	520	57	390	19	PWHT
E7018–C3L	70	480	57	390	25	AW
E7018–W1	70	480	60	415	25	AW
E7018–G	70	480	57	390	25	AW / PWHT
E7020–A1	70	480	57	390	25	PWHT
E7020–G	70	480	57	390	25	AW / PWHT
E7027–A1	70	480	57	390	25	PWHT
E7027–G	70	480	57	390	25	AW / PWHT
E8010–P1	80	550	67	460	19	AW
E8010–G	80	550	67	460	19	AW / PWHT
E8011–G	80	550	67	460	19	AW / PWHT
E8013–G	80	550	67	460	16	AW / PWHT
E8015–X	80	550	67	460	19	PWHT
E8015–B3L	80	550	67	460	17	PWHT
E8015–G	80	550	67	460	19	AW / PWHT
E8016–X	80	550	67	460	19	PWHT
E8016–C3	80	550	68–80	470–550[c]	24	AW
E8016–C4	80	550	67	460	19	AW
E8016–G	80	550	67	460	19	AW / PWHT
E8018–X	80	550	67	460	19	PWHT

ตารางที่ 7.6 (ต่อ) ค่าทดสอบแรงดึงลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M, 2014

ประเภทลวดเชื่อม	ความต้านแรงดึง		ความเค้นจำนน 0.2% Offset		การยืดตัว	สภาพการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน
AWS	ksi	MPa	ksi	MPa	%	
E8018–B3L	80	550	67	460	17	PWHT
E8018–C3	80	550	68–80	470–550[c]	24	AW
E8018–C4	80	550	67	460	19	AW
E8018–NM1	80	550	67	460	19	AW
E8018–W2	80	550	67	460	19	AW
E8018–G	80	550	67	460	19	AW / PWHT
E9010–G	90	620	77	530	17	AW / PWHT
E9011–G	90	620	77	530	17	AW / PWHT
E9013–G	90	620	77	530	14	AW / PWHT
E9015–X	90	620	77	530	17	PWHT
E9015–G	90	620	77	530	17	AW / PWHT
E9016–X	90	620	77	530	17	PWHT
E9016–G	90	620	77	530	17	AW / PWHT
E9018M	90	620	78–90	540–620[c]	24	AW
E9018–X	90	620	77	530	17	PWHT
E9018–G	90	620	77	530	17	AW / PWHT
E10010–G	100	690	87	600	16	AW / PWHT
E10011–G	100	690	87	600	16	AW / PWHT
E10013–G	100	690	87	600	13	AW / PWHT
E10015–X	100	690	87	600	16	PWHT
E10015–G	100	690	87	600	16	AW / PWHT
E10016–X	100	690	87	600	16	PWHT
E10016–G	100	690	87	600	16	AW / PWHT
E10018M	100	690	88–100	610–690[c]	20	AW
E10018–X	100	690	87	600	16	PWHT
E10018–G	100	690	87	600	16	AW / PWHT
E11010–G	110	760	97	670	15	AW / PWHT
E11011–G	110	760	97	670	15	AW / PWHT
E11013–G	110	760	97	670	13	AW / PWHT
E11015–G	110	760	97	670	15	AW / PWHT
E11016–G	110	760	97	670	15	AW / PWHT

ตารางที่ 7.6 (ต่อ) ค่าทดสอบแรงดึงลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M, 2014

ประเภทลวดเชื่อม	ความต้านแรงดึง		ความเค้นจำนน 0.2% Offset		การยืดตัว	สภาพการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน
AWS	ksi	MPa	ksi	MPa	%	
E11018–G	110	760	97	670	15	AW / PWHT
E11018M	110	760	98–110	680–760[e]	20	AW
E12010–G	120	830	107	740	14	AW / PWHT
E12011–G	120	830	107	740	14	AW / PWHT
E12013–G	120	830	107	740	11	AW / PWHT
E12015–G	120	830	107	740	14	AW / PWHT
E12016–G	120	830	107	740	14	AW / PWHT
E12018–G	120	830	107	740	14	AW / PWHT
E12018M	120	830	108–120	745–830	18	AW
E12018M1	120	830	108–120	745–830	18	AW

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.6

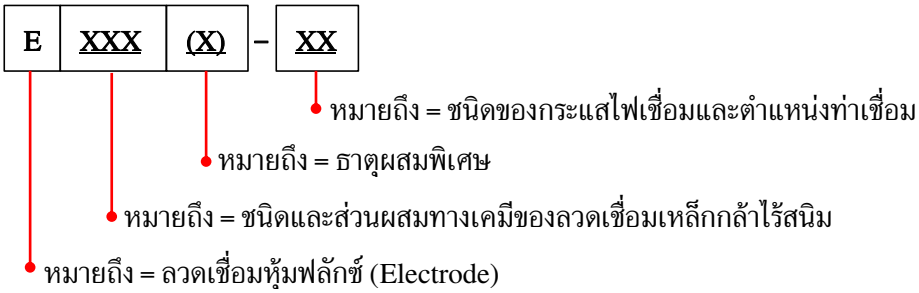
- ขนาดของลวดเชื่อมที่ทำการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด
- ค่าที่แสดงเป็นค่าผลการทดสอบค่าที่ต่ำสุด นอกจากจะกำหนดเป็นอย่างอื่น
- อักษร X ต่อท้าย แทน A_1 B_1 B_2 เป็นต้น ทดสอบในสภาพไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อน (As welded)
- AW = เนื้อเชื่อมสภาพเดิมไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อน
- PWHT = เนื้อเชื่อมผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อน
- "G" = AS หรือ PWHT เป็นตามข้อตกลงของผู้ผลิตกับลูกค้า
- "e" = สำหรับลวดเชื่อมขนาด 2.4 มม.(3/32 นิ้ว) ค่าความเค้นจำนนอาจสูงถึง 5 ksi (3.5 MPa) ซึ่งสูงกว่าที่กำหนดไว้

3) AWS A5.4/A5.4M:2012 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิม (Specification for Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding) ซึ่งได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดออกมาดังนี้

AWS A5.4/A5.4M:2012 **E XXX (X) –XX** ตัวอักษร และตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

A5.4/A5.4M หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม

2012 หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน (2012)



มาตรฐานลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีรหัสหรือโค๊ดเพิ่มเติมที่ต่างจากลวดเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมดังที่กล่าวมา คือ มีโค๊ดระบุธาตุผสมพิเศษ (X) ตามมาตรฐาน AWS A5.4/A5.4:2012 ได้จัดกลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ของเหล็กกล้าไร้สนิม ตามชนิดของกระแสไฟเชื่อมและตำแหน่งท่าเชื่อม ออกเป็น 5 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 7.7 และตัวอย่างลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมในรูปที่ 7.7

ตารางที่ 7.7 ประเภทลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน AWS A5.4

ที่มา : ANSI/AWS A5.4/A5.4M, 2012

ประเภทลวดเชื่อม AWS	กระแสไฟเชื่อม[a]	ตำแหน่งท่าเชื่อม[b]
EXXX(X)−15	DCEP	All[c]
EXXX(X)−25	DCEP	H/F
EXXX(X)−16	AC/DCEP	All[c]
EXXX(X)−17	AC/DCEP	All[c]
EXXX(X)−26	AC/DCEP	H/F

a หมายถึง DCEP = กระแสไฟตรงต่อขั้วบวก และ AC = กระแสไฟสลับ

b หมายถึง ตำแหน่งท่าเชื่อม F = ท่าราบ H = ท่าระดับ และ All = เชื่อมได้ทุกท่า

c หมายถึง ลวดเชื่อมขนาด 4.8 มม (3/16 นิ้ว) และใหญ่กว่าไม่แนะนำให้ใช้เชื่อมทุกท่าเชื่อม



รูปที่ 7.7 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel cover electrode)

ที่มา : Stainless steel/Alloys International, 2015

ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ ชนิดของฟลักซ์ที่ใช้พอกหุ้มจะเป็นตัวกำหนดสมบัติของลวดเชื่อมที่จะเลือกนำไปใช้ โดยในมาตรฐานได้กำหนดเป็นสัญลักษณ์หมายเลข 2 ตัวท้าย ของรหัสที่ระบุบนเส้นลวดเชื่อม ดังรายละเอียดที่จะได้กล่าวถึงของแต่ละประเภทของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์กลุ่มนี้ เพื่อความเข้าใจในการแปลความหมายของรหัสลวดเชื่อม ดังต่อไปนี้

● ลวดเชื่อมประเภท EXXX–15 ⟶ ตัวเลข –15 บนลวดเชื่อม มีความหมายว่า เป็นลวดเชื่อมชนิดที่ใช้ได้กับกระแสไฟตรงลวดเชื่อมต่อขั้วบวก (DCEP) เท่านั้น ไม่แนะนำให้ใช้กับไฟเชื่อมกระแสสลับกับงานที่ต้องการคุณภาพแนวเชื่อมที่สูง และลวดเชื่อมที่มีขนาดความโตไม่เกิน 4.0 มม. (5/32 นิ้ว) สามารถทำการเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม

● ลวดเชื่อมประเภท EXXX–16 ⟶ ตัวเลข –16 บนลวดเชื่อม มีความหมายว่า เป็นลวดเชื่อมที่มีธาตุที่ช่วยในการเกิดไอออนผสมอยู่ เช่น โปแตสเซียม เพื่อเป็นตัวช่วยให้การอาร์กสม่ำเสมอสำหรับการเชื่อมด้วยกระแสไฟสลับ (AC) ลวดเชื่อมที่มีขนาดความโตไม่เกิน 4.0 มม. (5/32 นิ้ว) สามารถทำการเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม

● ลวดเชื่อมประเภท EXXX–17 ⟶ ลวดเชื่อมประเภทนี้พัฒนาปรับปรุงมาจาก EXXX–16 โดยวิธีการเพิ่มเติมธาตุซิลิกา (Silica/SiO2) เข้าไปแทน ธาตุไทเทเนียม (Titanium) ซึ่งตัวเลข –17 บนลวดเชื่อม มีความหมายว่า เป็นลวดเชื่อมที่เหมาะสำหรับการเชื่อมต่อมุมในท่าระดับ (HF) ด้วยเพราะโดดเด่นในส่งถ่ายน้ำโลหะแบบสเปรย์ที่ทำให้ผิวหน้าแนวเชื่อมมีเกล็ดที่ละเอียด และมีรูปร่างของแนวเชื่อมมุมที่ได้จะเรียบแบนหรือเว้า สำหรับในกรณีที่เชื่อมต่อมุมท่าตั้ง (Vertical upwards fillet) จะต้องมีเทคนิคการส่ายลวดเชื่อมเข้ามาช่วยเสริม เพราะเนื่องจากลวดเชื่อมประเภทนี้สแลกจะเย็นตัวช้า ข้อดีของลวดเชื่อมประเภทนี้ที่สามารถเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม แต่ถ้าขนาดของลวดเชื่อมโตกว่า 4.8 มม. (3/16 นิ้ว) จะไม่แนะนำให้เชื่อมท่าตั้ง (V) และท่าเหนือศีรษะ (OH)

● ลวดเชื่อมประเภท EXXX–25 ⟶ ลวดเชื่อมประเภทนี้จะมีฟลักซ์พอกหุ้มคล้ายกับลวดเชื่อม EXXX–15 ทั้งส่วนผสมและสมบัติในการนำไปใช้งาน จะแตกต่างกันที่ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะลวดแกนกลาง เช่น แกนกลางเป็นโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน ตัวเลข –25 บนลวดเชื่อม มีความหมายว่าเป็นลวดเชื่อมที่ต้องกระแสไฟเชื่อมอาร์กที่สูง ธาตุที่ต้องการผสมลงไปในเนื้อเชื่อมจะเติมไว้ในฟลักซ์พอกหุ้ม ลวดเชื่อมประเภทนี้จะแนะนำให้ใช้ในการเชื่อมท่าราบ (F) และท่าระดับ (H) เท่านั้น (ลวดเชื่อม–25 จะมีขนาดที่โตกว่า ลวดเชื่อม –15)

● ลวดเชื่อมประเภท EXXX–26 ⟶ ลวดเชื่อมประเภทนี้พัฒนามาจาก EXXX–16 โดยมีชนิดของฟลักซ์พอกหุ้มที่เหมือนกันทั้งในส่วนของส่วนผสมทางเคมีและสมบัติความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน จะแตกต่างกันที่ลวดแกนกลางที่นำมาพอกหุ้มฟลักซ์ และขนาดของแกนลวดเชื่อมจะมีขนาดที่โตมากกว่า –16 จึงเหมาะและแนะนำให้ใช้ลวดเชื่อมประเภทนี้กับการเชื่อมในตำแหน่งท่าราบ (F) และท่าระดับ (H) เท่านั้น

จากการแปลความหมายของรหัสที่ระบุบนลวดเชื่อม ที่กล่าวมาข้างต้นนั้น จะเห็นได้ว่ารหัสของลวดเชื่อมกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีความแตกต่างกันในสภาพความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับสมบัติของเนื้อเชื่อมเป็นสำคัญ โดยสมบัติดังกล่าวจะมาจากอิทธิพลของชนิดและปริมาณของธาตุผสมทางเคมีที่มีอยู่ในเนื้อเชื่อม มาตรฐานลวดเชื่อมจึงมีระบุส่วนผสมทางเคมีที่จะได้ในเนื้อเชื่อมเป็นเกณฑ์มาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 7.8 และแสดงสมบัติทางกลด้านแรงดึงในตารางที่ 7.9

ตารางที่ 7.8 ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน AWS A5.4

ที่มา : ANSI/AWS A5.4/A5.4M. 2012

ประเภทลวดเชื่อม AWS[c]	SAE/ ASTM[d]	ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]										
		C	Cr	Ni	Mn	Cb(Nb) Plus Ta	Mn	Si	P	S	N	Cu
E209–XX[e]	W32210	0.06	20.5–24.0	9.5–12.0	1.5–3.0	––	4.0–7.0	0.90	0.04	0.03	0.10–0.30	0.75
E2199–XX	W32310	0.06	19.0–21.5	5.5–7.0	0.75	––	8.0–10.0	1.00	0.04	0.03	0.10–0.30	0.75
E240–XX	W32410	0.06	17.0–19.0	4.0–6.0	0.75	––	10.5–13.5	1.00	0.04	0.03	0.10–0.30	0.75
E307–XX	W30710	0.04–0.14	18.0–21.5	9.0–10.7	0.5–1.5	––	3.30–4.75	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E308–XX	W30810	0.08	18.0–21.0	9.0–11.0	0.75	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E308H–XX	W30810	0.04–0.08	18.0–21.0	9.0–11.0	0.75	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E308L–XX	W30813	0.04	18.0–21.0	9.0–11.0	0.75	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E308Mo–XX	W30820	0.08	18.0–21.0	9.0–12.0	2.0–3.0	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E308MoL–XX	W30823	0.04	18.0–21.0	9.0–12.0	2.0–3.0	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E309–XX	W30910	0.15	22.0–25.0	12.0–14.0	0.75	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E309L–XX	W30913	0.04	22.0–25.0	12.0–14.0	0.75	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E309Cb–XX	W30917	0.12	22.0–25.0	12.0–14.0	0.75	0.70–1.00	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E309Mo–XX	W30920	0.12	22.0–25.0	12.0–14.0	2.0–3.0	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E309MoL–XX	W30923	0.04	22.0–25.0	12.0–14.0	2.0–30	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E310–XX	W31010	0.08–0.20	25.0–28.0	20.0–22.5	0.75	––	1.0–2.5	0.75	0.03	0.03	––	0.75
E310H–XX	W31015	0.35–0.45	25.0–28.0	20.0–22.5	0.75	––	1.0–2.5	0.75	0.03	0.03	––	0.75
E310Cb–XX	W31017	0.12	25.0–28.0	20.0–22.0	0.75	0.70–1.00	1.0–2.5	0.75	0.03	0.03	––	0.75
E310Mo–XX	W31020	0.12	25.0–28.0	20.0–22	2.0–3.0	––	1.0–2.5	0.75	0.03	0.03	––	0.75
E312–XX	W31310	0.15	28.0–32.0	8.0–10.5	0.75	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E316–XX	W31610	0.08	17.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E316H–XX	W31610	0.04–0.08	17.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E316L–XX	W31613	0.04	17.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75

ตารางที่ 7.8 (ต่อ) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน AWS A5.4

ที่มา : ANSI/AWS A5.4/A5.4M, 2012

ประเภทลวดเชื่อม AWS[c]	SAE/ ASTM[d]	ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]										
		C	Cr	Ni	Mn	Cb(Nb) Plus Ta	Mn	Si	P	S	N	Cu
E317–XX	W31710	0.08	18.0–21.0	12.0–14.0	3.0–4.0	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E317L–XX	W31713	0.04	18.0–21.0	12.0–14.0	3.0–4.0	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E318–XX	W31910	0.08	17.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	6xC, min to 1.00 max	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E320–XX	W88021	0.07	19.0–21.0	32.0–36.0	2.0–3.0	8xC, min to 1.00 max	0.5–2.5	0.60	0.04	0.03	––	3.0–4.0
E20LR–XX	W388022	0.03	19.0–21.0	32.0–36.0	2.0–3.0	8xC,min to 0.40 max	1.50–2.5	0.30	0.02	0.015	––	3.0–4.0
E330–XX	W88331	0.18–0.25	14.0–17.0	33.0–37.0	0.75	––	1.0–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E330H–XX	W88335	0.35–0.45	14.0–17.0	33.0–37.0	0.75	––	1.0–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E347–XX	W34710	0.08	18.0–21.0	9.0–11.0	0.75	8xC, min to 1.00 max	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E349–XX[e,f,g]	W34910	0.13	18.0–21.0	8.0–10.0	0.35–0.65	0.75–1.20	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E383–XX	W88028	0.03	26.5–29.0	30.0–33.0	3.2–4.2	––	0.5–2.5	0.90	0.02	0.02	––	0.6–1.5
E385–XX	W88904	0.03	19.5–21.5	24.0–26.0	4.2–5.2	––	1.0–2.5	0.75	0.03	0.02	––	1.2–2.0
E410–XX	W41010	0.12	11.0–13.5	0.7	0.75	––	1.0	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E410Nimo–XX	W41016	0.06	11.0–12.5	4.0–5.0	0.40–0.70	––	1.0	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E430–XX	W43010	0.10	15.0–18.0	0.6	0.75	––	1.0	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E502–XX[h]	W50210	0.10	4.0–6.0	0.4	0.45–0.65	––	1.0	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E505–XX[h]	W50410	0.10	8.10–10.5	0.4	0.85–1.20	––	1.0	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E630–XX	W37410	0.05	16.00–16.75	4.5–5.0	0.75	0.15–0.30	0.25–0.75	0.75	0.04	0.03	––	3.25–4.0
E16–8–2–XX	W36810	0.10	14.5–16.5	7.5–9.5	1.0–2.0	––	0.5–2.5	0.60	0.03	0.03	––	0.75
E7Cr–XX[b]	W50310	0.10	6.0–8.0	0.4	0.45–0.65	––	1.0	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E2209–XX	W39209	0.04	21.5–23.5	8.5–10.5	2.5–3.5	––	0.5–2.0	0.90	0.04	0.03	0.08–0.20	0.75
E2553–XX	W39553	0.06	24.0–27.0	6.5–8.5	2.9–3.9	––	0.5–1.5	1.0	0.04	0.03	0.10–0.25	1.5–2.5

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.8

- a = ธาตุอื่น ๆ ที่ไม่ได้แสดงในคารางยกเว้นธาตุ Fe ต้องไม่เกิน 0.5%
- b = ค่าที่ให้มาค่าเดียวเป็นค่าที่สูงสุด
- c = รหัสต่อท้าย –XX หมายถึง –15 –16 –17 –25 หรือ –26
- d = SAE/ASTM Unified Numbering System for Metals and Alloys
- e = วาเนเดียมผสมอยู่ระหว่าง 0.1–0.3 %
- f = ไทเทเนียม ผสมสูงสุด 0.15%
- g = ทังสเตน ผสมอยู่ระหว่าง 1.25–1.75%
- h= เกรดนี้จะปรากฏอยู่ใน AWS A5.5

ตารางที่ 7.9 ค่าทดสอบแรงดึงลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน AWS A5.4

ที่มา : ANSI/AWS A5.4/A5.4M, 2012

ประเภทลวดเชื่อม	ความต้านแรงดึงต่ำสุด		% การยืดตัวต่ำสุด	การปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน
AWS	ksi	MPa		
E209–XX	100	690	15	None
E219–XX	90	620	15	None
E240–XX	100	690	15	None
E307–XX	85	590	30	None
E308–XX	80	550	35	None
E308H–XX	80	550	35	None
E308L–XX	75	520	35	None
E308Mo–XX	80	550	35	None
E308MoL–XX	75	520	35	None
E309–XX	80	550	30	None
E309L–XX	75	520	30	None
E309Cb–XX	80	550	30	None
E309Mo–XX	80	550	30	None
E309MoL–XX	75	520	30	None
E310–XX	80	550	30	None
E310H–XX	90	620	10	None
E310Cb–XX	80	550	25	None
E310Mo–XX	80	550	30	None
E312–XX	95	660	22	None
E316–XX	75	520	30	None
E316H–XX	75	520	30	None
E316L–XX	70	490	30	None
E317–XX	80	550	30	None
E317L–XX	75	520	30	None
E318–XX	80	550	25	None

ตารางที่ 7.9 (ต่อ) ค่าทดสอบแรงดึงลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน AWS A5.4

ที่มา : ANSI/AWS A5.4/A5.4M, 2012

ประเภทลวดเชื่อม AWS	ความต้านแรงดึงต่ำสุด ksi	ความต้านแรงดึงต่ำสุด MPa	% การยืดตัวต่ำสุด	การปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน
E320–XX	80	550	30	None
E320LR––XX	75	520	30	None
E330–XX	75	520	25	None
E330H–XX	90	620	10	None
E347–XX	75	520	30	None
E349–XX	100	690	25	None
E383–XX	75	520	30	None
E385–XX	75	520	30	None
E410–XX	75	450	20	a
E410NiMo–XX	110	760	15	c
E430–XX	65	450	20	d
E502–XX	60	420	20	b
E505–XX	60	420	20	b
E630–XX	135	930	7	e
E16–8–2–XX	80	550	35	None
E7Cr–XX	60	20	420	b
E2209–XX	100	690	20	None
E2553–XX	110	760	15	None

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.9

- a = ให้ความร้อน 730–760 °C เป็นเวลา 1 ชม. แล้วเย็นตัวในเตาด้วยอัตรา 55°C/ชม. จนถึง 315°C ออกจากเตาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง
- b = ให้ความร้อน 840–870 °C เป็นเวลา 2 ชม. แล้วเย็นตัวในเตาด้วยอัตรา 55°C/ชม. จนถึง 595°C ออกจากเตาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง
- c = ให้ความร้อน 595–620 °C เป็นเวลา 1 ชม. แล้วเย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง
- d = ให้ความร้อน 760–790 °C เป็นเวลา 2 ชม. แล้วเย็นตัวในเตาด้วยอัตรา 55°C/ชม. จนถึง 595°C ออกจากเตาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง
- e = ให้ความร้อน 1,025–1,050 °C เป็นเวลา 1 ชม. แล้วเย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง ต่อจากนั้นให้ตกผลึกแข็งที่อุณหภูมิ 610–630°C แช่ไว้เป็นเวลา 4 ชม. เอาออกจากเตาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง

ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับงานเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมมีการใช้งานกันไม่มากเมื่อเทียบกับลวดเชื่อมสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนหรือเหล็กกล้าผสมต่ำ เนื่องการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมมีปัญหาเรื่องการควบคุมคุณภาพเนื้อเชื่อมที่นอกจากความแข็งแรง ความต้านทานการกัดกร่อนแล้ว งานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมยังต้องการความสะอาดและความสวยงามของแนวเชื่อมที่ปรากฏบนโครงสร้างของ

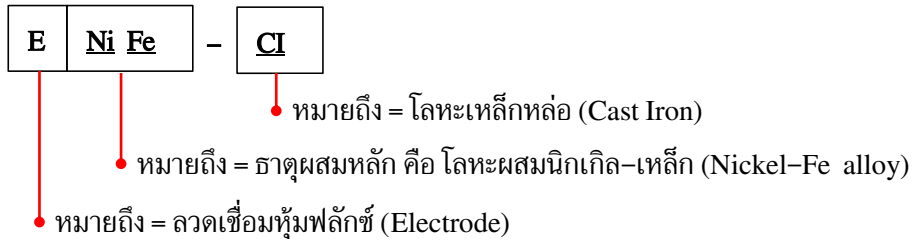
ผลิตภัณฑ์ จึงมักนิยมใช้ลวดเชื่อมเปลือย (Filler rod) กับขบวนการเชื่อมทิก (GTAW) หรือ ขบวนการเชื่อมมิก/แม็ก (GMAW) เพราะการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมเปลือยไม่ต้องมีการกำจัดสแลกที่จะเกิดอยู่บนผิวของแนวเชื่อม

4) AWS A5.15:1990 (R2016) ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อ (Specification for Welding Electrodes and Roads for Cast Iron) ซึ่งได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดออกมาดังนี้

AWS A5.15/A5.15M:R2016 **E XXX (X) –XX** ตัวอักษร และตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

A5.15/A5.15M หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมเหล็กหล่อ

1990(R2016) หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน 1990 ปรับปรุงปี 2016



ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อ เป็นชนิดลวดเชื่อมที่ใช้สำหรับงานซ่อมแซมชิ้นส่วนโลหะเหล็กหล่อเป็นสำคัญ ที่หล่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์มาแล้วเกิดความเสียหาย เช่น เกิดการแตกหักหรือแตกร้าว จากการใช้งาน ด้วยเพราะเหล็กหล่อมีสมบัติที่แข็งเปราะ และที่เป็นปัญหาที่ช่างเชื่อมมักจะกังวล คือ โลหะเหล็กหล่อมีความสามารถในการเชื่อมที่ต่ำมาก ผู้ผลิตจึงมีการผลิตลวดเชื่อมเหล็กหล่อโดยเฉพาะขึ้นที่จะใช้เชื่อมซ่อมแซมกับเหล็กหล่อชนิดต่าง ๆ ได้แก่ เหล็กหล่อสีเทา (Gray cast iron) เหล็กหล่อเหนียว (Ductile cast iron) เหล็กหล่อกราไฟต์กลม (Spheroidal graphite cast iron) และเหล็กหล่อผสม (Alloy cast iron) เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อในรูปที่ 7.8 โดยที่แกนลวดเชื่อมจะเป็นโลหะเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนสูงที่มีส่วนผสมของนิกเกิลเป็นส่วนประกอบหลัก ดังนั้นการแบ่งประเภทของลวดเชื่อมจะพิจารณาจากปริมาณของธาตุนิกเกิลที่ผสมอยู่เป็นสำคัญ ดังแสดงประเภทของลวดเชื่อมเหล็กหล่อตามส่วนผสมทางเคมีที่อ้างอิงมาตรฐาน AWS A5.15/A5.15 ในตารางที่ 7.10 ซึ่งเป็นเพียงตัวอย่างของลวดเชื่อมบางประเภทเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างความเข้าใจถึงรหัสที่กำหนดอยู่บนลวดเชื่อม โดยในปัจจุบันได้มีการผลิตลวดเชื่อมออกมาหลากหลายเพื่อตอบสนองต่อการเพิ่มขีดความสามารถในการเชื่อมเหล็กหล่อได้มากขึ้น ซึ่งมีทั้งการเชื่อมกันระหว่างเหล็กหล่อเชื่อมกับเหล็กหล่อ และเหล็กหล่อเชื่อมกับเหล็กกล้า และยังรวมไปถึงการเชื่อมเหล็กหล่อกับโลหะนอกกลุ่มเหล็กก็สามารถมีลวดเชื่อมที่สามารถเชื่อมได้ เมื่อพิจารณาจากรหัสหรือโค๊ดของลวดที่แสดงในตาราง

เพื่อความเข้าใจถึงความหมายที่ถูกต้องจึงขออธิบายแปลความของรหัสของลวดเชื่อมที่เน้นให้ทราบถึงการที่จะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชิ้นส่วนงานหล่อที่จะเชื่อม ดังนี้

ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อเป็นลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของโลหะนิกเกิลเป็นหลัก (Nickel–Base Electrodes) จนบางครั้งเรียกกันว่า ลวดนิกเกิล ซึ่งแบ่งเป็นชนิด ๆ ดังนี้

ตารางที่ 7.10 ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะเหล็กหล่อตามมาตรฐาน AWS A5.15

ที่มา : ANSI/AWS A5.15/A5.15M, 2016

ประเภทลวดเชื่อม	SAE/ASTM[d]	ส่วนผสมทางเคมี (% wt) a,b,c										
		C	Min	Si	P	S	Fe	Ni[e]	Mo	Cu[f]	Al	Other
ENi–CI	W82001	2.0	2.5	4.0	–	0.03	8.0	85 min	–	2.5	1.0	1.0
ENi–CI–A	W82003	2.0	2.5	4.0	–	0.03	8.0	85 min	–	2.5	1.0–3.0	1.0
ENiFe–CI	W82002	2.0	2.5	4.0	–	0.03	Rem.	45–60	–	2.5	1.0	1.0
ENiFe–CI–A	W82004	2.0	2.5	4.0	–	0.03	Rem.	45–60	–	2.5	1.0–3.0	1.0
ENiFeMn–CI	W82006	2.0	10–14	1.0	–	0.03	Rem.	35–45	–	2.5	1.0	1.0
ENiCu–A	W84001	0.35–0.55	2.3	0.75	–	0.025	3.0–6.0	50–60	–	35–45	–	1.0
ENiCu–B	W84002	0.35–0.55	2.3	0.75	–	0.025	3.0–6.0	60–70	–	225–35		1.0

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.10

- a = ส่วนผสมทางเคมีของแกนลวดเชื่อมหรือเนื้อเชื่อม
- b = ค่าที่แสดงค่าเดียวเป็นค่าสูงสุด
- c = ‘Rem” หมายถึง ปริมาณที่เหลือจนครบปริมาณ 100%
- d = SAE/ASTM Unified Numbering System for Metals and Alloys
- e = นิกเกิลรวมกับโคบอลต์
- f = ธาตุทองแดงผสมกับธาตุเงิน



รูปที่ 7.8 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะเหล็กหล่อ (Cast iron cover electrode)

ที่มา : Gemini Welding/Cast iron electrode, 2012

● ลวดเชื่อมประเภท ENi–CI ⟶ ลวดเชื่อมชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้ในการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อสีเทาเพื่อให้ติดกับเหล็กหล่อสีเทาชนิดเดียวกันเป็นสำคัญ แต่ก็ยังสามารถที่จะนำไปใช้เชื่อมเหล็กหล่อสีเทากับโลหะเหล็กชนิดอื่น ๆ ได้ หรือเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กก็สามารถเชื่อมได้ ในทางปฏิบัติการเชื่อมซ่อมโลหะเหล็กหล่อจะทำได้ยากและมีขีดจำกัดมาก เช่น ไม่เหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดที่ใหญ่เกินไป หรือต้องเป็นชิ้นงานที่ไม่มีความเค้นสะสมที่สูง (Stress concentration) หรือต้องมีกำมะถันผสมที่ต่ำ เป็นต้น เนื่องจากลวดเชื่อมประเภทนี้เมื่อเชื่อมแล้วเนื้อเชื่อมจะมีความแข็งแรงสูงมาก ซึ่งมีความเหนียวต่ำ (เปราะแตกร้าวง่าย)

● ลวดเชื่อมประเภท ENi–CI–A ⟶ ลวดเชื่อมชนิดนี้จะมีปริมาณของธาตุอลูมิเนียมผสมอยู่มาก เมื่อเชื่อมแล้วเนื้อเชื่อมจะมีความเหนียวสูง ซึ่งเป็นจุดเด่นของลวดชนิดนี้ที่ใช้เชื่อมเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความเหนียว ลดโอกาสที่จะเกิดการแตกร้าวอันเนื่องจากความแข็งเปราะของเหล็กหล่อ นอกจากนี้ยังช่วยในการปกคลุมและการไหลตัวของสแลกจากการเชื่อมได้ดี

● ลวดเชื่อมประเภท ENiFe–CI ⟶ ลวดเชื่อมชนิดนี้เหมาะสำหรับที่จะนำไปใช้กับการเชื่อมซ่อมแซม หรือเชื่อมต่อกันของโลหะเหล็กหล่อทุกชนิด รวมถึงเหล็กหล่อกราไฟต์กลม โดยสามารถเชื่อมได้ทั้งเหล็กหล่อกับเหล็กหล่อที่เป็นชนิดเดียวกัน และกับเหล็กหล่อต่างชนิดกัน นอกจากนี้ยังสามารถที่จะนำไปใช้เชื่อมเหล็กหล่อกับเหล็กกล้าคาร์บอน หรือเหล็กกล้าผสมชนิดต่าง ๆ รวมไปถึงโลหะนอกกลุ่มเหล็กบางชนิด และจะเหมาะมากกับการนำไปเชื่อมกับเหล็กหล่อที่มีฟอสฟอรัสผสมอยู่มากกว่า 0.2%

● ลวดเชื่อมประเภท ENiFeMn–CI ⟶ ลวดเชื่อมชนิดนี้มีความพิเศษกว่าชนิดอื่นที่มีแมงกานีสผสมสูงถึง 12% เจตนาก็เพื่อต้องการปรับปรุงสมบัติในการไหลตัวของน้ำโลหะเหลว (Flow ability) และเพิ่มความต้านทานต่อการแตกร้าวของเนื้อเชื่อม (Crack) นอกจากนี้แมงกานีสยังจะช่วยเพิ่มความเค้นแรงดึง และเพิ่มความเหนียวได้ดีอีกด้วย เนื้อเชื่อมที่ได้จากลวดเชื่อมชนิดนี้จะมีสมบัติที่ใกล้เคียงกับเนื้อของโลหะเหล็กหล่อกราไฟต์กลม ลวดเชื่อมชนิดนี้จะยังนิยมนำไปใช้เชื่อมพอกเสริมผิวบนบริเวณที่ต้องการให้มีความคงทนต่อการสึกหรอ ซึ่งมีอัตราการสึกหรอที่ต่ำมาก

● ลวดเชื่อมประเภท ENiCu–A และ ENiCu–B ⟶ ลวดเชื่อมชนิดนี้จะมีส่วนผสมที่พิเศษของโลหะทองแดงที่ผสมกับโลหะเงินมาแล้ว และมีนิกเกิล–โคบอลต์ผสมสูง เหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อทุกชนิด แต่ต้องระวังเนื้อเชื่อมเกิดการแตกร้าวได้งานในกรณีที่เนื้อเชื่อมมีขนาดที่ใหญ่ ดังนั้นจึงเหมาะกับการเชื่อมที่บ่อหลอมละลายไม่กว้างมาก และชิ้นงานเล็ก ๆ ด้วยเพราะลวดเชื่อมชนิดนี้ขณะทำการเชื่อมบ่อหลอมละลายจะค่อนข้างเล็ก (เนื้อโลหะงานหลอมละลายน้อย)

ถึงแม้ว่าจะมีการผลิตลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อออกมาให้เลือกใช้ก็ตาม แต่ช่างเชื่อมก็ต้องระลึกอยู่เสมอว่า แนวเชื่อมเหล็กหล่อมีความไวที่จะเกิดการแตกร้าวได้สูงมาก จึงต้องคอยควบคุมและระมัดระวังปัจจัยของการเชื่อมด้านต่าง ๆ ที่จะเป็นต้นเหตุของการเพิ่มความเค้นในเนื้อเชื่อมและความเค้นที่บริเวณกระทบร้อน (HAZ) ด้วยเพราะเหล็กหล่อมีคาร์บอนผสมสูงและจะเคลื่อนย้าย (Diffusion) ไปรวมตัวกันที่บริเวณเกิดความร้อนจากการอาร์กได้ง่ายและรวดเร็วทำให้

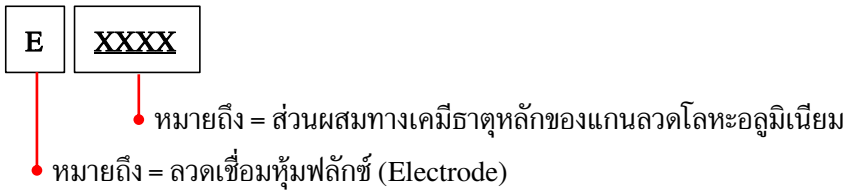
บริเวณดังกล่าวมีโครงสร้างที่เป็นคาร์ไบด์มากขึ้น (Fe_3C) นอกจากอิทธิพลทางส่วนผสมทางเคมีแล้วนั้น การออกแบบรอยต่อของการเชื่อมต้องเตรียมรอยบากหน้างานที่สามารถหลีกเลี่ยงมุมแหลมที่จะเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกร้าวได้ง่าย เช่น บากงานเป็นรูปตัว U หลีกเลี่ยงตัว V เป็นต้น

5) AWS A5.3/A5.3M:1999(R2007) เป็นข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะอลูมิเนียม (Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Electrodes for Shielded Metal Arc Welding) ซึ่งได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดออกมาดังนี้

AWS A5.3/A5.3M:1999(R2007) **E XXXX** ตัวอักษรและตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

A5.3/A5.3M หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะอลูมิเนียม

1999(R2007) หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน 1999 ปรับปรุงปี 2007



อ้างอิงตามมาตรฐานของ AWS A5.3 A5.3M:1999(R2007) ได้กำหนดรหัสตัวเลขบ่งชี้ถึงธาตุผสมหลัก(Main alloy element) ที่นอกเหนือจากเนื้อโลหะหลักที่เป็นธาตุอลูมิเนียมของแกนลวดเชื่อมโลหะอลูมิเนียม ซึ่งจะสอดคล้องกับการแบ่งเกรดโลหะอลูมิเนียมโครงสร้าง ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 7.11 และสามารถแบ่งชนิดของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะอลูมิเนียมตามส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 7.12 ควบคู่กับการแสดงผลสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมของแต่ละชนิด ลวดเชื่อมที่คาดว่าจะได้หลังเสร็จสิ้นการเชื่อมในตารางที่ 4.13 และตัวอย่างลวดเชื่อมในรูปที่ 7.9

ตารางที่ 7.11 รหัสธาตุผสมหลักของแกนลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะอลูมิเนียมตาม AWS A5.3

ที่มา : ANSI/AWS A5.3/A5.3M, 2007

สัญลักษณ์	ธาตุผสมหลัก (Main element)
1XXX	ธาตุอลูมิเนียมบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99% (Al-pure)
2XXX	ธาตุทองแดง (Al-Cu) ปริมาณทองแดง 1.9-6.8%
3XXX	ธาตุแมงกานีส (Al-Mn) ปริมาณแมงกานีส 0.3-1.5%
4XXX	ธาตุซิลิกอน (Al-Si) ปริมาณซิลิกอน 3.6-13.5%
5XXX	ธาตุแมกนีเซียม (Al-Mg) ปริมาณแมกนีเซียม 0.5-5.5%
6XXX	ธาตุแมกนีเซียมและซิลิกอน (Al-Mg-Si) ปริมาณ Mg 0.4-1.5% Si 0.2-1.7%
7XXX	ธาตุสังกะสี (Al-Zn) ปริมาณซิลิกอน 1.0-8.2%
8XXX	ธาตุลิเทียม (Al-Li) ปริมาณลิเทียม 2.5%

ตารางที่ 7.12 ชนิดและส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะอลูมิเนียมตาม AWS A5.3

ที่มา : ANSI/AWS A5.3/A5.3M, 2007

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (%wt)									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Be	Other	Al
E1100	(1)	(1)	0.05–0.20	0.05	(–)	0.10	(–)	0.0008	0.15	ต่ำสุด 9
E3003	0.6	0.7	0.05–0.20	1.0–1.5	(–)	0.10	(–)	0.0008	0.15	(2)
E4043	4.5–6.0	0.8	0.30	0.05	0.05	0.10	(–)	0.0008	0.15	(2)

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.12

- (1) = ธาตุซิลิกอนรวมกับธาตุเหล็กไม่ 0.95%
- (2) = ปริมาณธาตุที่เหลือรวมจนครบ 100%
- *(–)* = ค่าแสดงค่าเดียวเป็นค่าสูงสุด

ตารางที่ 7.13 สมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมลวดด้วยเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะอลูมิเนียมตาม AWS A5.3

ที่มา : ANSI/AWS A5.3/A5.3M, 2007

ประเภทลวดเชื่อม	ความต้านแรงเค้นดึงต่ำสุด	
	psi	Mpa
E1100	12000	82.7
E3003	14000	96.5
E4043	14000	96.5

จากข้อมูลมาตรฐานลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะอลูมิเนียมที่กล่าวมาข้างต้นช่างเชื่อมสามารถใช้เป็นแนวทางในการที่จะเลือกใช้ลวดเชื่อมได้ถูกต้อง โดยต้องพิจารณาร่วมกับเกรดของโลหะหลัก (Base metal) ที่ต้องการเชื่อมและรวมถึงลักษณะงานที่นำไปใช้ เช่น

- กรณีโลหะอลูมิเนียมที่ใช้ในงานโครงสร้างเกรด 5052 ที่มีปริมาณของแมกนีเซียมผสม 2.5% สามารถเลือกใช้ลวดเชื่อมชนิด E4043 เชื่อมง่าย มีอัตราความไวต่อการแตกร้าวต่ำ แนวเชื่อมสวยงาม สะเก็ดเชื่อมเกิดน้อย
- กรณีอลูมิเนียมโครงสร้างเกรดที่มีส่วนผสมของแมกนีเซียมเป็นหลัก (รหัส 5XXX) ได้แก่ เกรด 5086 หรือ เกรด 5083 จะไม่แนะนำให้เลือกใช้ลวดเชื่อมชนิด E4043 ด้วยเหตุผลเพราะลวดเชื่อมชนิดนี้มีส่วนผสมของปริมาณซิลิกอนมากถึง 5% เมื่อเชื่อมกับอลูมิเนียมที่มีแมกนีเซียมผสมหลักจะส่งผลทำให้เนื้อเชื่อมมีสมบัติทางกลที่แย่ลง
- กรณีต้องการแนวเชื่อมไปผ่านขบวนการอโนไดซ์ (Anodizing) หลังการเชื่อม ไม่แนะนำให้เลือกใช้ลวดเชื่อม 4043 เพราะซิลิกอนจะทำให้สีที่บริเวณของเนื้อเชื่อมเข้มกว่าสีของชิ้นงานโลหะหลัก ลวดเชื่อมที่เหมาะสมต้องเป็นชนิด E5356 จะเหมาะมากถ้าโลหะหลักเป็นอลูมิเนียมโครงสร้างเกรดที่มีธาตุแมกนีเซียมและซิลิกอนเป็นธาตุผสมหลัก (6XXX)

● กรณีต้องการปรับปรุงสมบัติแนวเชื่อมหรือเนื้อเชื่อมด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment) หลังจากการเชื่อมเสร็จ ไม่สามารถทำได้กับแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E1100 และ E4043 และ E 4365 โดยจะเหมาะกับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม E4643 บนอลูมิเนียมเกรด 6XXX และลวดเชื่อม E5180 บนอลูมิเนียมเกรด 7XXX ที่สามารถนำแนวเชื่อมไปทำการปรับปรุงสมบัติทางกลได้ดี เช่น การเชื่อมอลูมิเนียมโครงรถจักรยานที่ใช้อลูมิเนียมโครงสร้างเกรด 7005 เป็นต้น นอกจากนี้ก็ยังมีเกรดอื่น ๆ ที่สามารถทำได้ เช่น เกรด 2319 เกรด 2060 เกรด 4009 เกรด 4145 เกรด A356.0 เกรด C355.0 เกรด 357.0 เป็นต้น

จากกรณีตัวอย่างของการเลือกใช้ลวดเชื่อมให้เหมาะสมและข้อควรระวังที่แนะนำจากประสบการณ์ของผู้เขียนนั้น จะเห็นได้ชัดเจนว่ามีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ช่างเชื่อมต้องมีความรู้และความเข้าใจถึงเหตุผลของการที่จะนำมาพิจารณาเลือกใช้ลวดเชื่อม ดังนั้นจากข้อมูลที่ศึกษาค้นคว้ารวมกับทักษะประสบการณ์ด้านงานเชื่อมพอจะรวบรวมหลักเกณฑ์ที่จะนำมาใช้พิจารณาเลือกใช้ลวดเชื่อมดังนี้

(1) ความแข็งแรงของเนื้อเชื่อมหรือแนวเชื่อมที่ต้องการ

(2) อัตราความไวที่จะเกิดการแตกร้าวของแนวเชื่อม

(3) สภาพแวดล้อมหรือระดับของอุณหภูมิที่จะนำแนวเชื่อมไปใช้งาน

(4) ความสามารถในการยืดตัวหรือยืดหยุ่นของแนวเชื่อม

(5) ความสามารถในด้านการต้านทานการกัดกร่อนของแนวเชื่อม

(6) ความสามารถในการปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนภายหลังการเชื่อม

(7) ความสวยงามหรือความสมดุลของสีผิวแนวเชื่อมกับผิวโลหะชิ้นงานหลัก

อย่างไรก็ตามหลักเกณฑ์พิจารณาเหล่านี้ที่จะนำมาใช้ได้อย่างสมบูณ์และสามารถเสริมสร้างคุณภาพของแนวเชื่อมได้ตามต้องการนั้น จะต้องสัมพันธ์กับผู้ออกแบบข้อกำหนดในการเชื่อมเป็นสำคัญที่ต้องเข้าใจในลักษณะเฉพาะของโลหะอลูมิเนียมแต่ละประเภทรวมทั้งลักษณะของการนำไปใช้งาน



รูปที่ 7.9 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะอลูมิเนียม (Aluminum cover electrode)

ที่มา : Lincoln Electric/Aluminum cover electrode, 2013

4.2 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มาตรฐาน JIS (Japanese Industrial Standard)

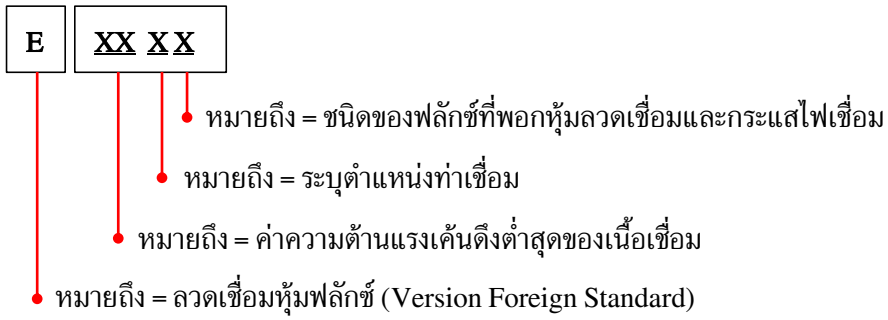
ประเทศญี่ปุ่นเป็นประเทศหนึ่งที่ถือว่ามีการพัฒนาด้านเทคโนโลยีการเชื่อมได้อย่างก้าวหน้ามาก จึงได้มีการสร้างหรือกำหนดมาตรฐานขึ้นเป็นของตัวเอง และก็เป็นที่ยอมรับในระดับนานาชาติ จึงได้มีการนำมาตรฐานญี่ปุ่นมาใช้เป็นข้อกำหนดการปฏิบัติงานด้านวิศวกรรมการเชื่อมกันมากขึ้น โดยเฉพาะประเทศไทย ดังนั้นผู้เขียนจึงมีเจตนาที่จะนำมาเขียนเป็นข้อมูลสำหรับความรู้ความเข้าใจถึงมาตรฐานและข้อกำหนดต่าง ๆ ของมาตรฐานลวดเชื่อมของแต่ละประเภทและแต่ละชนิดลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ดังนี้

1) JIS Z 3211–2008 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าคาร์บอนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานงานเย็น (Covered Electrodes for Mild Steel, High Tensile Strength Steel and Low Temperature Service Steel : Foreign Standard)โดยเป็นเวอร์ชันระดับสากล ซึ่งได้ทำการกำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานออกมาดังนี้

JIS Z 3211–1991(R2008) **E XX XX** ตัวอักษรและตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

JIS Z 3211 หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานงานเย็น

1991(R2008) หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน 1991 ปรับปรุงปี 2008



ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานงานเย็น ตามมาตรฐาน JIS Z 3211 นี้ จะมีรหัสหรือโค๊ดที่ระบุไว้บนลวดเชื่อม โดยจะสามารถทราบถึงชนิดของฟลักซ์ที่พอกหุ้ม ท่าเชื่อม และชนิดของกระแสไฟเชื่อมที่สามารถเลือกใช้ได้ ดังแสดงในตารางที่ 7.14 และขอยกตัวอย่างเป็นเบื้องต้น ตัวอย่างเช่น ลวดเชื่อม E4313 มีความหมายดังนี้

เป็นลวดเชื่อมที่พอกหุ้มฟลักซ์ชนิดไทเทเนียมออกไซด์ มีค่าความต้านทานแรงเค้นดึงของเนื้อเชื่อมต่ำสุด 420 N/mm^2 (43) โดยสามารถทำการเชื่อมได้ทุกตำแหน่งท่าเชื่อม (1) ซึ่งสามารถเลือกใช้กระแสไฟเชื่อม AC และ DCEN (3) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติมาตรฐาน JIS จะไม่ค่อยคุ้นเคยกันเนื่องจากเมื่อเทียบความเป็นมาตรฐานสากลจะยังนิยมอ้างอิงกับมาตรฐานของชาติสหรัฐอเมริกา (AWS) หรือไม่ก็เป็นมาตรฐานของกลุ่มชาติประเทศยุโรป (EN ISO) ซึ่งโดยปกติผู้ผลิตส่วนใหญ่มักจะระบุมาตรฐานไว้ในข้อแนะนำการใช้งานภายในกล่องบรรจุไว้มากกว่าหนึ่งมาตรฐานเพื่อการสอบ

เทียบเคียงมาตรฐาน ดังแสดงตัวอย่างเอกสารประกอบการใช้งานจากผู้ผลิตลวดเชื่อมของบริษัท KISWEL LTD. ของประเทศเกาหลีใต้ ในรูปที่ 7.10

COVERED ELECTRODE
KCL-11
KISWEL

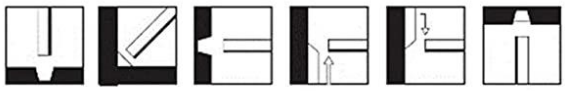
■ Description

- Covering is high cellulose type for welding of sheet, pipes in building
- As the welding in poor groove fit up and vertical down welding can be performed easily, it is used in all position welding
- Good mechanical properties and the weld metal needs requirement X-ray
- Gives high ductility root weld and easy slag removal
- Stables arc performance in almost welding current

■ Classification

• AWS A5.1	: E6011	• EN ISO 2560-A	: E 38 2 C 12
• JIS Z 3211	: E4311	• EN ISO 2560-B	: E 43 11 A

■ Welding Position



■ Base Materials

Industry	Steel Grades	Type
General structural	EN 10025	S185, S235, S275
Ship	ASTM A131	A, B, D
Cast	EN 10213-2	GP240R
Pipe	EN 10208	L210, L240, L290
	API 5LX	X42, X46
Boiler & Pressure vessel	EN10028-2	P235, P265, P295

รูปที่ 7.10 แสดงการระบุมาตรฐานลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่หลากหลายมาตรฐานของผู้ผลิต

ที่มา : KISWEL Premium Arc Weldung Electrode, 2019

ตารางที่ 7.14 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐาน JIS Z 3211

ที่มา : JIS Z 3211:1991 (R2008) (Version Foreign Standard), 2008

ประเภทลวดเชื่อม	ชนิดฟลักซ์หุ้ม	ตำแหน่งที่เชื่อม	กระแสไฟเชื่อม
E4301	อิลเมไรต์	F/ V/ O/ H	AC/DCEP/DCEN
E4303	ไลม์–ไมเทเนีย	F/ V/ O/ H	AC/DCEP/DCEN
E4311	เซลลูโลสสูง	F/ V/ O/ H	AC/DCEP/DCEN
E4313	ไทเทเนียมออกไซด์	F/ V/ O/ H	AC/DCEN
E4316	ไฮโดรเจนต่ำ	F/ V/ O/ H	AC/DCEP
E4324	ไทเทเนียมออกไซด์–ผงเหล็ก	F/ H	AC/DCEP/DCEN
E4326	ไฮโดรเจนต่ำ–ผงเหล็ก	F/ H	AC/DCEP
E4327	เหล็กออกไซด์–ผงเหล็ก	F	AC/DCEP/DCEN
		H	AC/DCEN
E4340	ฟลักซ์พิเศษ	F/ V/ O/ H	AC/DCEP/DCEN

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.14

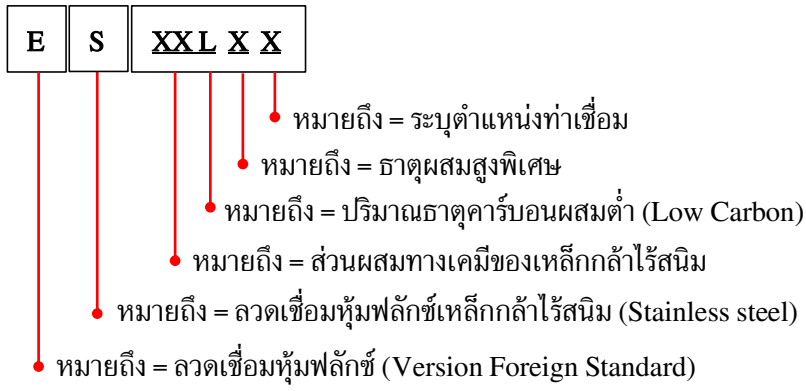
- F = การเชื่อมท่าราบ
- V = การเชื่อมท่าตั้ง
- H = การเชื่อมท่าระดับ
- O = การเชื่อมท่าเหนือศีรษะ
- E = ตัวอักษรที่แสดงถึงลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ของมาตรฐานญี่ปุ่นที่ใช้ในระดับสากล (Foreign Standard) แต่ถ้าเป็นระดับชาติของญี่ปุ่นเองจะใช้อักษรตัว D (เดงโกะ โยเซสึโบะ)

2) JIS Z 3221–2013 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel Covered Electrodes : Foreign Standard) เป็นเวอร์ชันระดับสากล ซึ่งได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานออกมาดังนี้

JIS Z 3221–1991(R2013) **ES XXL X X** ตัวอักษรและตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

JIS Z 3221 หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม

1991(R2013) หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน 1991 ปรับปรุงปี 2013



ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐาน JIS Z 3221 จะจัดแบ่งลวดเชื่อมออกเป็นประเภทต่าง ๆ โดยอ้างอิงตามกลุ่มและเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เป็นโลหะรูปพรรณที่มีการใช้งานกันทั่ว ๆ ไป ได้แก่ กลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steel) เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก (Martensitic stainless steel) เหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติก (Austenitic stainless steel) เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex stainless steel) ซึ่งได้นำแสดงมาเป็นตัวอย่างของประเภทลวดเชื่อมในตารางที่ 7.15 เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกใช้เมื่อข้อกำหนดของงานอ้างอิงตามมาตรฐาน JIS ซึ่งในรหัสหรือโค๊ดมาตรฐานนั้นจะระบุให้ทราบถึง เกรดของลวดแกนกลางเหล็กกล้าไร้สนิม ท่าเชื่อม และ ชนิดของกระแสไฟเชื่อมที่สามารถเลือกใช้ได้ รวมถึงการระบุถึงธาตุผสมพิเศษเพิ่มเติมและปริมาณธาตุคาร์บอนที่ต่ำ (L) เป็นต้น และได้แสดงตัวอย่างลวดเชื่อมที่ผลิตโดยบริษัทญี่ปุ่นอิงตามมาตรฐาน JIS Z 3221 ในรูปที่ 7.11 นอกจากนี้มาตรฐานของลวดเชื่อมยังบอกถึงส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม ที่จะทำนายได้ว่าเนื้อเชื่อมหลังการเชื่อมเสร็จสิ้นจะมีส่วนผสมทางเคมีของธาตุใดบ้างและมีปริมาณเท่าไหร่ของการเลือกใช้ลวดเชื่อมแต่ละประเภท ดังแสดงในตารางที่ 7.16 รวมไปถึงสามารถทราบสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมด้านการทดสอบแรงดึง ดังแสดงในตารางที่ 7.17

เป็นที่ทราบกันดีว่าการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมนอกจากความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม (Perfected weld bead) ความแข็งแรงของแนวเชื่อม และความสวยงานของแนวเชื่อมที่ต้องคำนึงแล้วนั้น ที่จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพิจารณา คือ ความทนทานต่อการกัดกร่อนของเนื้อเชื่อมหรือโดยรอบ ๆ แนวเชื่อม เพราะเป็นข้อเด่นของเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งต้องพิจารณากันถึงระดับโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อม โดยจะสัมพันธ์เกี่ยวข้องโดยตรงกับส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมที่เลือกใช้และส่วนผสมทางเคมีของโลหะหลักที่ต้องการเชื่อม โดยเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละเกรดแต่ละประเภทก็จะต้องการปริมาณและชนิดธาตุผสมที่เพียงพอต่อการป้องกันการกัดกร่อนที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นการที่ผู้ผลิตได้พยายามระบุส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมไว้ ถือว่าเป็นปัจจัยเครื่องมืออันสำคัญและมีประโยชน์ยิ่งต่อการพิจารณาเลือกใช้เลือกเชื่อมได้ถูกต้อง ดังแสดงเป็นตัวอย่างของลวดเชื่อมบางประเภทในตารางที่ 7.16



รูปที่ 7.11 ตัวอย่างลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐานของผู้ผลิตญี่ปุ่น (JIS Z 3221)
ที่มา : YAWATA Welding Electrode, 2015

ตารางที่ 7.15 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน JIS Z 3221–2013

ที่มา : JIS Z 3221–2013 (Version Foreign Standard), 2013

ประเภทลวดเชื่อม		ท่าเชื่อม	ชนิดของกระแสไฟฟ้า
E307	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E308	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E308L	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E309	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E309L	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E309 Nb	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E309 NbL	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E309 Mo	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E309 MoL	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E310	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E310 Mo	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E312	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E16–9–8–2	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E316	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E316L	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E316JIL	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E317	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E317L	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E318	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E329 JL	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E347	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E347L	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E349	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E410	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E410 Nb	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E430	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E430 Nb	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E630	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.15

- F = การเชื่อมท่าราบ
- V = การเชื่อมท่าตั้ง
- H = การเชื่อมท่าระดับ
- O = การเชื่อมท่าเหนือศีรษะ
- AC = ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternative current)
- DCEP = ไฟฟ้ากระแสตรง โดยลวดเชื่อมเป็นขั้วบวก (+)

ตารางที่ 7.16 ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐาน JIS Z 3221–2013

ที่มา : JIS Z 3221–2013 (Version Foreign Standard), 2013

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (% wt)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mb	Others
E307	0.13	0.9	3.0 to 8.0	0.04	0.03	9.0 to 11.0	18.0 to 21.0	0.5 to 1.5	–
E308	0.08	0.9	2.5	0.04	0.03	12.0 to 14.0	18.0 to 21.0	–	–
E308 L	0.04	0.9	2.5	0.04	0.03	9.0 to 14.0	18.0 to 21.0	–	–
E309	0.15	0.9	2.5	0.04	0.03	9.0 to 14.0	20.0 to 25.0	–	–
E309 L	0.04	0.9	2.5	0.04	0.03	9.0 to 14.0	20.0 to 25.0	–	–
E309 Nb	0.12	0.9	2.5	0.04	0.03	9.0 to 14.0	20.0 to 25.0	–	Nb 0.70 to 1.00
E309 NbL	0.04	0.9	2.5	0.04	0.03	9.0 to 14.0	20.0 to 25.0	–	Nb 0.70 to 1.00
E309 Mo	0.12	0.9	2.5	0.04	0.03	9.0 to 14.0	20.0 to 25.0	2.0 to 3.0	–
E309 MoL	0.04	0.9	2.5	0.04	0.03	9.0 to 14.0	20.0 to 25.0	2.0 to 3.0	–
E310	0.2	0.75	2.5	0.04	0.03	20.0 to 22.0	20.0 to 25.0	–	–
E310 Mo	0.12	0.75	2.5	0.04	0.03	20.0 to 22.0	25.0 to 28.0	2.0 to 3.0	–
E312	0.15	0.9	2.5	0.04	0.03	8.0 to 10.5	28.0 to 32.0	–	–
E16–8–2	0.1	0.9	2.5	0.04	0.03	7.5 to 9.5	14.5 to 16.5	1.0 to 3.0	–
E316	0.08	0.9	2.5	0.04	0.03	11.0 to 14.0	17.0 to 20.0	20.0 to 2.75	–
E316 L	0.04	0.9	2.5	0.04	0.03	11.0 to 14.0	17.0 to 20.0	12.0 to 2.75	–
E316 JIL	0.04	0.9	2.5	0.04	0.03	11.0 to 16.0	17.0 to 20.0	12.0 to 2.75	–
E317	0.08	0.9	2.5	0.04	0.03	12.0 to 14.0	18.0 to 21.0	3.0 to 4.0	–
E317 L	0.04	0.9	2.5	0.04	0.03	12.0 to 16.0	18.0 to 21.0	3.0 to 4.0	–
E318	0.08	0.9	2.5	0.04	0.03	11.0 to 14.0	17.0 to 20.0	2.0 to 2.5	Cu 1.0 to 2.50
E329 JL	0.08	0.9	2.5	0.04	0.03	6.0 to 8.0	23.0 to 28.0	1.0 to 3.0	–
E347	0.08	0.9	2.5	0.04	0.03	9.0 to 11.0	18.0 to 21.0	–	Nb 8xC% to 1.0
E347 L	0.04	0.9	2.5	0.04	0.03	9.00 to 11.0	18.0 to 21.0	–	Nb 8xC% to 1.0
E349	0.13	0.9	2.5	0.04	0.03	8.0 to 11.0	18.0 to 21.0	0.35 to 0.65	W 1.25 to 1.75 Nb 0.75 to 1.20
E410	0.12	0.9	1	0.04	0.03	0.06	11.0 to 14.0	–	–
E410 Nb	0.12	0.9	1	0.04	0.03	0.06	11.0 to 14.0	–	Nb 0.50 to 1.50
E430	0.1	0.9	1	0.04	0.03	0.06	15.0 to 18.0	–	–
E430 Nb	0.1	0.9	1	0.04	0.03	0.06	15.0 to 18.0	–	Nb 0.50 to 1.50
E630	0.05	0.75	2.50–0.75	0.04	0.03	4.50 – 5.0	16.0 to 16.75	0.35 to 0.65	Nb 0.15 to 0.30 Cu 3.25 to 4.0

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.16

- ค่าที่แสดง กรณีที่เป็นเดียวจะหมายถึง ค่าที่มากที่สุดของปริมาณธาตุผสม

ตารางที่ 7.17 สมบัติด้านแรงดึงลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐาน JIS Z 3221–2013

ที่มา : JIS Z 3221–2013 (Version Foreign Standard), 2013

ประเภทของลวดเชื่อม	การทดสอบแรงดึง (Tensile test)	
	ความเค้นแรงดึงต่ำสุด (N/mm^2)	เปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำสุด (%)
E307	590	30
E308	550	35
E308L	510	35
E309	550	30
E309L	510	30
E309 Nb	550	30
E309 Mo	510	30
E309LMo	510	30
E310	510	30
E310Mo	550	30
E312	660	22
E16–8–2	550	35
E316	550	30
E316L	510	35
E316JIL	510	35
E317	550	30
E317L	510	30
E318	550	25
E329JI	590	18
E347	550	30
E347L	510	30
E349	690	25
E410()[1]	480	25
E410 Nb()[1]	480	25
E430()[2]	480	20
E430 Nb()[2]	480	20
E630()[3]	930	7

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.17

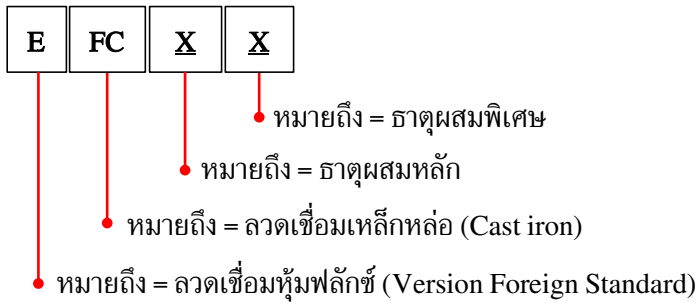
- ()[1] = ชิ้นงานอบที่ 840–870°C เวลา 2 ชม ปล่อยเย็นตัวถึง 590°C ที่ 55°C/ชม และให้เย็นตัวในอากาศ
- ()[2] = ชิ้นงานอบที่ 760–785°C เวลา 2 ชม ปล่อยเย็นตัวถึง 590°C ที่ 55°C/ชม และให้เย็นตัวในอากาศ
- ()[3] = ชิ้นงานอบที่1,025–1050°C เวลา 1 ชม ปล่อยเย็นตัวในอากาศ จากนั้นอบต่อที่ 601–630°C เป็นเวลา 4 ชม และก็ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

3) JIS Z 3252–2012 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะเหล็กหล่อ (Covered Electrodes, Solid Wire, Rods and Flux Cored Wires for Cast Iron : Foreign Standard) โดยเป็นมาตรฐานเวอร์ชันระดับสากล ซึ่งได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานออกมาดังนี้

JIS Z 3252–2012 **E FC X** ตัวอักษร และตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

JIS Z 3221 หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กหล่อ

1991(R2013) หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน 1991 ปรับปรุงปี 2013



ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ใช้สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อจะมีการผลิตออกมาไม่หลากหลายเหมือนลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ประเภทอื่น ๆ คงเป็นเหตุผลที่โลหะเหล็กหล่อมีความสามารถในการเชื่อมที่ต่ำ เชื่อมยากและมีโอกาสที่จะเกิดการแตกร้าวจากการเชื่อมค่อนข้างสูง จะมีการเชื่อมบ้างก็จะเป็นการเชื่อมเพื่อซ่อมแซมที่เกิดการใช้งานชิ้นส่วนเหล็กหล่อแล้วเกิดความแตกร้าวหรือแตกหักเสียหาย ดังนั้นประเภทของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเหล็กหล่อมีให้เลือกใช้น้อย โดยจะขอยกตัวอย่างลวดเชื่อมเหล็กหล่อบางชนิดที่นิยมใช้กันดังนี้

1) ลวดเชื่อม JIS Z 3252 EFCNi ⟶ เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่มีผงฟลักซ์ที่พอกหุ้มเป็นชนิดกราไฟต์ และแกนลวดเชื่อมเป็นโลหะนิกเกิลบริสุทธิ์ รอยเชื่อมที่ได้และบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) จะมีค่าความแข็งต่ำที่สุด ดังนั้น เนื้อเชื่อมที่ได้จะมีความสามารถในการกลึงตกแต่งด้วยเครื่องจักรได้ค่อนข้างดี (ไม่แข็งมาก) ในแง่ของความสามารถในการเชื่อมก็ค่อนข้างที่จะเชื่อมได้ดี การอาร์กคงที่สม่ำเสมอ สแลกกำจัดออกได้ง่าย เชื่อมได้โดยไม่จำเป็นต้องทำการ PWHT โดยลวดเชื่อมประเภทนี้จะรู้จักกันดีในชื่อ Ni Cast 98 ดังแสดงในรูปที่ 7.12 (ก) ซึ่งหมายถึงเป็นลวดเชื่อมที่มีธาตุโลหะนิกเกิล 98% (นิกเกิลบริสุทธิ์)

2) ลวดเชื่อม JIS Z 3252 EFCNiFe ⟶ เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่มีผงฟลักซ์พอกหุ้มเป็นชนิดกราไฟต์ โดยมีแกนลวดเชื่อมที่มีโลหะนิกเกิล (Ni) ผสมอยู่ที่ปริมาณ 55% ที่ผสมรวมกับโลหะเหล็ก (Fe)ดังแสดงในรูปที่ 7.12 (ข) จุดประสงค์เพื่อให้ความร้อนที่ลวดเชื่อมจะไม่สูงกินไป และจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติขณะทำการเชื่อม ซึ่งมีความสามารถในการเชื่อม (Welding abilities) ที่ดี เนื้อเชื่อมจะมีความแข็งสูงมากกว่าลวดเชื่อม JIS Z 3252 EFCNi ทนทานต่อการแตกร้าว มีสมบัติทางกลที่ดี เหมาะกับการเชื่อมเหล็กหล่อทั่วไปและเหล็กหล่อเหนียว

3) ลวดเชื่อม JIS Z 3252 EFCFe ⟶ เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่มีผงฟลักซ์เป็นชนิดไฮโดรเจนต่ำ โดยมีแกนลวดเชื่อมเป็นเหล็กบริสุทธิ์ เนื้อเชื่อมที่ได้จะมีความแข็งที่สูงมาก สูงกว่าลวดเชื่อมประเภท JIS Z 3252 EFCNi และ JIS Z 3252 EFCNiFe ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น ดังนั้น ลวดเชื่อมชนิดนี้จะเหมาะสมกับการเชื่อมชิ้นงานเหล็กหล่อที่ไม่ต้องผ่านการตกแต่งด้วยเครื่องจักรหลังการเชื่อม



(ก) ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อ 98%Ni **(ข)** ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อ 55%Ni

รูปที่ 7.12 ตัวอย่างลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อมาตรฐานของผู้ผลิตญี่ปุ่น (JIS Z 3252)

ที่มา : YAWATA Welding Electrode, 2015

จากรหัสหรือโค๊ดที่ระบุบนก้านลวดเชื่อมเหล็กหล่อของแต่ละชนิดสามารถที่จะระบุถึงส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมที่จะได้ในเนื้อเชื่อม โดยสามารถตรวจสอบได้จากคู่มือลวดเชื่อมจากผู้ผลิตตามมาตรฐาน ดังแสดงเป็นตัวอย่างส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อบางชนิดในตารางที่ 7.18 และแสดงสมบัติทางกลทางด้านแรงดึงของเนื้อเชื่อม ดังแสดงในตารางที่ 7.19 นอกจากนี้มาตรฐานยังบอกถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อมที่สัมพันธ์กับขนาดความยาวของลวดเชื่อม ที่ช่างเชื่อมสามารถใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมกับลักษณะงานที่จะทำการเชื่อม (แต่โดยในเชิงการพาณิชย์ผู้ผลิตจะระบุข้างกล่องบรรจุเป็นน้ำหนักของลวดเชื่อมทั้งกล่อง (กิโลกรัม/กล่อง เช่น ระบุ 2 กก./กล่อง หรือ 1 กก. /กล่อง) เป็นต้น

ตารางที่ 7.18 ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อมาตรฐาน JIS Z 3252–2012

ที่มา : YAWATA Welding Electrode อิงมาตรฐาน JIS Z 3252 (Version Foreign Standard), 2012

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Fe
JIS Z 3252 EFCNi	0.99	0.11	0.57	0.002	0.001	Bal.	1.71
JIS Z 3252 EFCNiFe	1.15	0.31	1.96	0.004	0.001	54.8	Bal.
JIS Z 3252 EFCFe	0.04	0.50	0.48	0.006	0.002	–	Bal.

ตารางที่ 7.19 สมบัติทางกลและขนาดลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อมาตรฐาน JIS Z 3252–2012

ที่มา : YAWATA Welding Electrode อิงมาตรฐาน JIS Z 3252 (Version Foreign Standard), 2012

ประเภทลวดเชื่อม	สมบัติทางกลของเนื้อเชื่อม		ขนาดของลวดเชื่อม			
	ความเค้นดึงต่ำสุด (MPa)	การยืดตัว (%)	ขนาด ø ลวดเชื่อม/ความยาว (มม)/(มม)			
JIS Z 3252 EFCNi	480	–	2.6/–	3.2/350	4.0/350	5.0/350
JIS Z 3252 EFCNiFe	520	–	2.6/300	3.2/300	4.0/350	5.0/–
JIS Z 3252 EFCFe	490	33	2.6/300	3.2/350	4.0/400	5.0/–

ข้อแนะนำหรือข้อเสนอแนะจากประสบการณ์ของผู้เขียนในขบวนการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อ ด้วยลวดเชื่อมนิกเกิล 55% (NiCast 55) และนิกเกิลบริสุทธิ์ 98% (NiCast 98) ควรเลือกใช้กระแสไฟเชื่อมที่ต่ำ และต้องรักษาระดับอุณหภูมิขณะเชื่อมไม่ให้เกิดความร้อนสะสมมากจนเกินไป เพราะถ้าเกิดมีปริมาณความร้อนสะสมมากจะมีผลทำให้แนวเชื่อมมีการแตกร้าวหลังการเย็นตัว ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นได้ง่ายและเป็นปัญหามากในการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อ นอกจากนี้การทำความสะอาดบริเวณผิวชิ้นงานก่อนเชื่อมก็เป็นสิ่งที่จำเป็นที่จะช่วยลดปัญหาการเกิดการแตกร้าวของการเชื่อมชิ้นงานโลหะเหล็กหล่อได้ โดยเฉพาะงานเชื่อมพอกอะไหล่ชิ้นส่วนจักรกล หรือการเชื่อมเสริมเนื้อลูกหีบ ลูกรีดต่าง ๆ ที่ต้องการผิวงานที่แข็งและทนทานต่อการสึกหรอไปใช้งาน นอกจากนี้ยังมีข้อเสนอแนะในทางเทคนิคการเชื่อมต่าง ๆ ได้แก่ ลวดเชื่อมต้องแห้งสนิทปราศจากความชื้นด้วยการอบที่อุณหภูมิ 80 – 120°C เป็นเวลาอย่างน้อย 60 นาที ผิวชิ้นงานต้องกำจัดชั้นผิวที่เสื่อมสภาพออกให้หมด การเชื่อมควรเชื่อมแนวสั้น ๆ ไม่ควรเชื่อมแนวต่อเนื่อง เพื่อลดความร้อนสะสมในโลหะชิ้นงานที่เชื่อม

สำหรับท่าเชื่อมของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมโลหะเหล็กหล่อ รหัสหรือโค๊ดจะไม่ระบุด้วยเหตุผลเพราะว่าลวดเชื่อมเหล็กหล่อทุกประเภทสามารถเชื่อมได้ทุกตำแหน่งที่เชื่อม (All position welding) ไม่มีปัญหาในเรื่องของการไหลตัวของน้ำเหล็กเหลวที่หลอมจากการอาร์ก เพราะสมบัติพื้นฐานการไหลตัวโลหะเหล็กหล่อมีสูงมากจากอิทธิพลของธาตุที่ผสมอยู่ในโลหะเหล็กหล่อ ดังนั้นมีข้อแนะนำว่ากรณีที่เชื่อมด้วยท่าเชื่อมลงในแนวดิ่ง (Vertical Downwards : VD) ทั้งแบบต่อชนและแบบต่อตัวที ช่างเชื่อมต้องควบคุมหัวเชื่อมอย่างระมัดระวังเป็นพิเศษเพราะน้ำโลหะเหลวจะไหลตัวเร็วมาก ซึ่งโดยปกติการเชื่อมซ่อมแซมโลหะเหล็กหล่อส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมโลหะที่เป็นชนิดและเกรดส่วนผสมเดียวกัน (Similar welding) จะเกิดปัญหาน้อยมากในเชิงโลหะวิทยางานเชื่อม แต่พบว่าผู้ผลิตมักจะระบุว่าสามารถเชื่อมโลหะเหล็กหล่อกับโลหะกับเหล็กเหนียวได้ ซึ่งในกรณีที่เป็นโลหะต่างเกรดส่วนผสมทางเคมีในลักษณะนี้ (Dissimilar welding) ถึงแม้ว่าลวดเชื่อมเหล็กหล่อจะสามารถเชื่อมได้ก็ตามแต่ในทางปฏิบัติการเชื่อม ต้องใช้ทักษะในการควบคุมการเชื่อม และปัจจัยการเชื่อมที่ถูกต้องแม่นยำ ไม่เช่นนั้นจะเกิดความไม่สมบูรณ์หรือเกิดข้อบกพร่องของแนวเชื่อมหรือเนื้อเชื่อมได้ง่าย

4.3 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มาตรฐานสากล ISO (International Organization for Standardization)

มาตรฐานลวดเชื่อมนี้จะใช้กันแพร่หลายในประเทศแถบยุโรปที่อาจถือได้ว่าเป็นมาตรฐานหลักของกลุ่มชาติทางโซนยุโรปในชื่อมาตรฐาน EUROPEAN STANDARDS : EN ซึ่งเมื่อสร้างกำหนดที่อิงกับ ISO จึงเกิดเป็นมาตรฐานยุโรปที่รู้จักกันดีในรหัส EN ISO นอกจากนี้บางประเทศที่ได้มีข้อกำหนดแยกออกมาก็จะสร้างรหัสเพิ่มเติม เช่น ประเทศสหราชอาณาจักร ใช้รหัส BS EN ISO ซึ่ง BS คือ British Standards สำหรับการนำเสนอมาตรฐานลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ในหัวข้อนี้จะอ้างอิงมาตรฐานสากล (International Standard)

1) ISO 2560 : 2020 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (Covered Electrodes for Manual Metal Arc Welding of Non−Alloy and Fine Grain Steels)

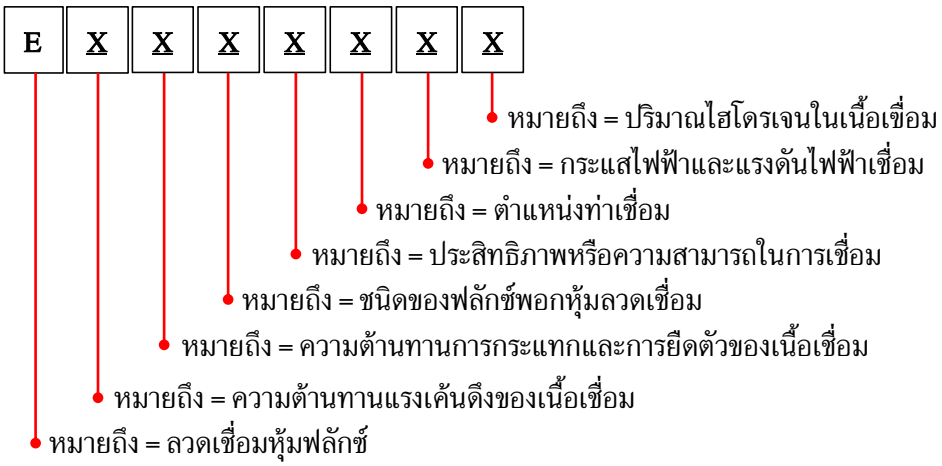
มาตรฐานลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สากล (ISO) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานออกมาประกอบด้วย 4 ส่วนสัญญลักษณ์ ดังนี้

– ส่วนสัญลักษณ์ของลวดเชื่อม – ส่วนสัญลักษณ์แสดงส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม
– ส่วนสัญลักษณ์แสดงสมบัติทางกล – ส่วนสัญลักษณ์บ่งชี้ชนิดของฟลักซ์พอกหุ้ม

ISO 2560 : 2012 **E X X X X X X X** ตัวอักษรและตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

ISO 2560 หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

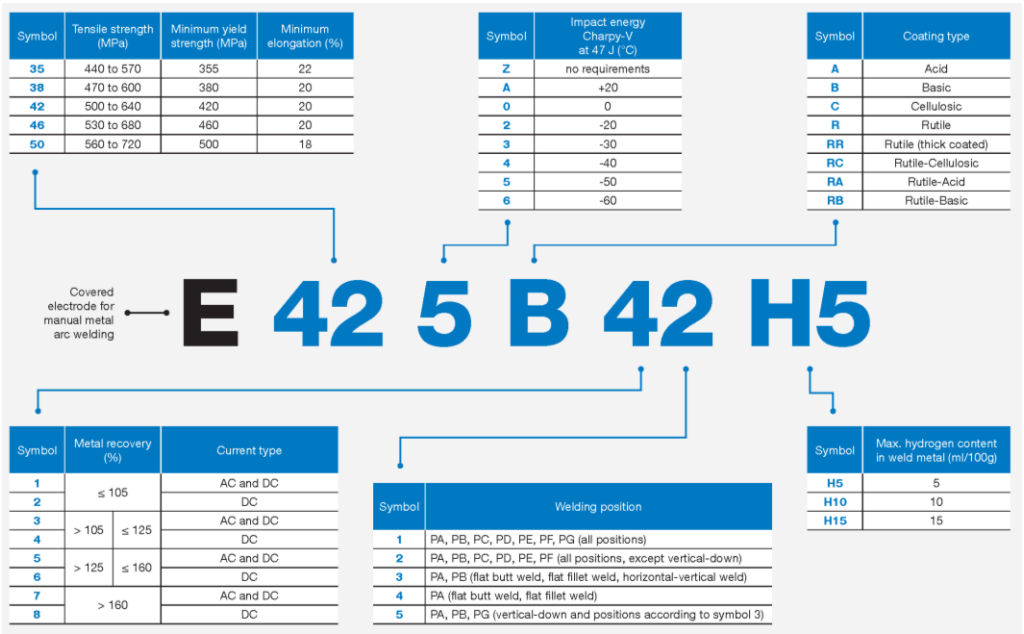
2012 หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน 2012



จากการแสดงถึงความหมายของข้อกำหนดรหัสหรือโค๊ดตามมาตรฐาน ISO 2560 : 2012 ในข้างต้นนั้น ซึ่งรหัสแต่ละตำแหน่งที่ระบุบนลวดเชื่อมจะบ่งชี้ถึงความหมายที่ชัดเจน เพื่อเสริมความเข้าใจถึงรหัสต่าง ๆ ของลวดเชื่อมและสามารถแปลความหมายได้ถูกต้อง จึงขอยกตัวอย่างลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มาตรฐาน ISO 2560 ที่สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้า ดังนี้

ลวดเชื่อม E 42 5 B 4 2 H5 แปลความหมายเพื่อการเลือกใช้โดยอ้างอิงตามข้อมูลตามมาตรฐานสากล (ISO) ดังที่แสดงในรูปที่ 7.13

- E = ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับการเชื่อมอาร์กไฟฟ้า
- 42 = ความต้านทานแรงเค้นดึงของเนื้อเชื่อม 500 ถึง 640 MPa
- 5 = ความต้านทานการกระแทก −50 J และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 20%
- B = เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ใช้ฟลักซ์ชนิดด่างพอกหุ้ม (Basic)
- 4 = มีความสามารถในการยืดตัว 105 ถึง 125% และสามารถเชื่อมได้ด้วยกระแสไฟ DC
- 2 = สามารถเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม ยกเว้น ท่าตั้งเชื่อมลง (Vertical−down)
- H5 = ปริมาณไฮโดรเจนผสมอยู่ในเนื้อเชื่อมไม่เกิน 5 ml/100g



รูปที่ 7.13 ความหมายของรหัสหรือโค๊ดลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้ามาตรฐานสากล (ISO)

ที่มา : Guide to EN ISO 2560:2012, MMA Electrode, 2012

เป็นที่ทราบกันดีว่าลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ใช้สำหรับการเชื่อมอาร์กด้วยไฟฟ้าหรือที่เรียกกันว่าเชื่อมไฟฟ้า นิยมใช้งานกันมากด้วยเพราะสามารถเชื่อมโลหะได้เกือบทุกชนิดโดยเฉพาะโลหะกลุ่มเหล็ก ผู้ผลิตลวดเชื่อมก็ผลิตออกมารองรับกับการเลือกใช้ลวดเชื่อมมากมายหลายเกรด ซึ่งไม่อาจที่นำมาแสดงไว้ในบทเรียนนี้ได้ทั้งหมด โดยจะคัดเลือกมาบางชนิดเพื่อเป็นตัวอย่างของลวดเชื่อมซึ่งจะแสดงถึงรหัสหรือโค๊ดของลวดเชื่อมพร้อมส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมดังแสดงในตารางที่ 7.20 และแสดงสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมที่จะได้หลังการเชื่อมของแต่ละรหัสหรือโค๊ดลวดเชื่อมในตารางที่ 7.21 พร้อมกับแสดงตัวอย่างการระบุมาตรฐานที่สามารถตรวจสอบได้บริเวณข้างกล่องบรรจุลวดเชื่อมในรูปที่ 7.14

ตารางที่ 7.20 ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้ามาตรฐาน ISO 2560:2012

ที่มา : International Standard ISO 2560:2012, 2012

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)										
	C	Min	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al
E4310	0.20	1.20	1.00	NS	NS	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E4311	0.20	1.20	1.00	NS	NS	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E4316	0.20	1.20	1.00	NS	NS	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E4319	0.20	1.20	1.00	NS	NS	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E4903	0.15	1.25	0.90	NS	NS	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E4911	0.15	1.25	0.90	0.035	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E4913	0.20	1.20	1.00	NS	NS	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E4915	0.15	1.25	0.90	0.035	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E4916−1	0.15	1.60	0.75	0.035	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E4918−1	0.15	1.60	0.90	0.035	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E4927	0.15	1.60	0.75	0.035	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E5716	0.12	1.60	0.90	0.03	0.03	1.00	0.30	0.35	NS	NS	NS
E5728	0.12	1.60	0.90	0.03	0.03	1.00	0.30	0.35	NS	NS	NS
E4910−P1	0.20	1.20	0.60	0.03	0.03	1.00	0.30	0.50	0.10	NS	NS
E5510−P1	0.20	1.20	0.60	0.03	0.03	1.00	0.30	0.50	0.10	NS	NS
E5518−P2	0.12	0.90−1.70	0.80	0.03	0.03	1.00	0.20	0.50	0.05	NS	NS
E4910−1M3	0.12	0.60	0.40	0.03	0.03	NS	NS	0.40−0.65	NS	NS	NS
E4915−1M3	0.12	0.90	0.60	0.03	0.03	NS	NS	0.40−0.65	NS	NS	NS
E4918−1M3	0.12	0.90	0.60	0.03	0.03	NS	NS	0.40−0.65	NS	NS	NS
E4920−1M3	0.12	0.90	0.40	0.03	0.03	NS	NS	0.40−0.65	NS	NS	NS
E5518−3M2	0.12	1.00−1.75	0.80	0.03	0.03	0.90	NS	0.25−0.45	NS	NS	NS
E5516−3M3	0.12	1.00−1.80	0.80	0.03	0.03	0.90	NS	0.40−0.65	NS	NS	NS
E5518−3M3	0.12	1.0−1.80	0.80	0.03	0.03	0.90	NS	0.40−0.65	NS	NS	NS
E5516−N1	0.12	0.60−1.60	0.90	0.03	0.03	0.30−1.00	NS	0.35	0.05	NS	NS
E4916−N2	0.08	0.40−1.40	0.50	0.03	0.03	0.80−1.10	0.15	0.35	0.05	NS	NS
E5516−N2	0.12	0.40−1.25	0.80	0.03	0.03	0.80−1.10	0.15	0.35	0.05	NS	NS
E5516−N3	0.10	1.25	0.60	0.03	0.03	1.10−2.00	NS	0.35	NS	NS	NS
E5516−3N3	0.10	1.60	0.60	0.03	0.03	1.10−2.00	NS	NS	NS	NS	NS
E4916−N5	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	2.00−2.75	NS	NS	NS	NS	NS
E5516−N5	0.12	1.25	0.60	0.03	0.03	2.00−2.75	NS	NS	NS	NS	NS
E4916−N7	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	3.00−3.75	NS	NS	NS	NS	NS
E4918−N7	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	3.00−3.75	NS	NS	NS	NS	NS

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.20

● a = ค่าที่แสดงค่าเดียว เป็นค่าที่สูงที่สุด (Values are maximum) ● b = ไม่ระบุค่า (Not specified : NS)

ตารางที่ 7.21 สมบัติทางกลของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้ามาตรฐาน ISO 2560:2012

ที่มา : International Standard ISO 2560:2012, 2012

ประเภทลวดเชื่อม	แรงต้านความเค้นแรงดึง [a] MPa	ความแข็งแรงที่จุดดราก[a] MPa	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว[a] (%)	อุณหภูมิการทดสอบแรงกระแทก (Charpy V−notch)[b] (°C)
E4310	430	330	20	0
E4311	430	330	20	−30
E4316	430	330	20	−30
E4319	430	330	20	−20
E4903	490	400	20	0
E4911	490 to 650	400	20	−30
E4913	490	400	16	NS
E4915	490	400	20	−30
E4916−1	490	400	20	−45
E4918−1	490	400	20	−45
E4927	490	400	20	−30
E5716	570	490	16	−30
E5728	570	490	16	−20
E4910−P1	490	420	20	−30
E5510−P1	550	460	17	−30
E5518−P2	550	460	17	−30
E4910−1M3	490	420	20	NS
E4915−1M3	490	400	20	NS
E4918−1M3	490	400	20	NS
E4920−1M3	490	400	20	NS
E5518−3M2	550	460	17	−50
E5516−3M3	550	460	17	−50
E5518−3M3	550	460	17	−50
E5516−N1	550	460	17	−40
E4916−N2	490	390	20	−40
E5516−N2	550	470 to 550	20	−40
E5516−N3	550	460	17	−50
E5516−3N3	550	460	17	−50
E4916−N5	490	390	20	−75
E5516−N5	550	460	17	−60
E4916−N7	490	390	20	−100
E4918−N7	490	390	20	−100

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.21

● a = ค่าที่แสดงค่าเดียว เป็นค่าสูงสุดที่ต้องการ (Requirements) ● b = ไม่ระบุค่า (Not specified : NS)



รูปที่ 7.14 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้ามาตรฐานสากล (ISO 2560)

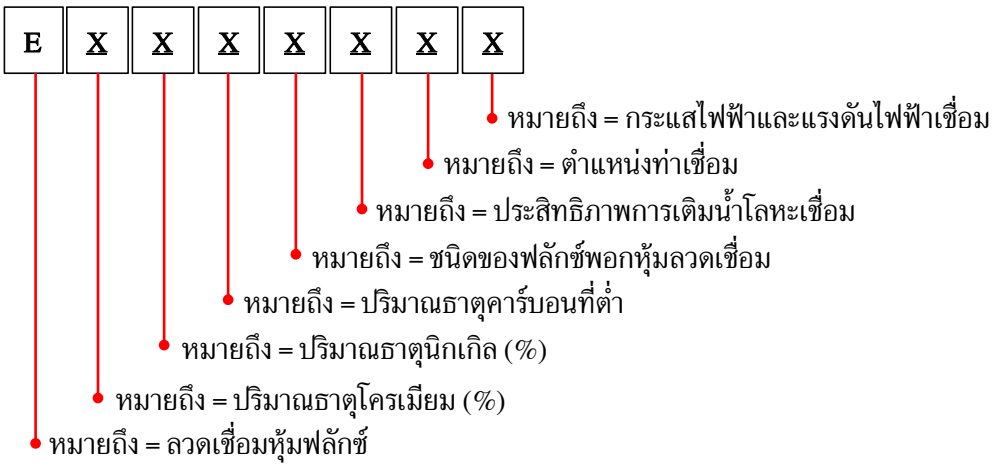
ที่มา : TIANJIN BRIDGE WELDING MATERIAL GROUP CO.,LTD, 2010

2) ISO 3581 : 2016 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าทนความร้อนสูง (Covered Electrodes for Manual Metal Arc Welding of Stainless and Heat−Resisting Steels) เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่อ้างอิงตามมาตรฐานสากล (ISO) โดยได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานออกมาดังนี้

ISO 3581:2012 **E XXXXXXX** ตัวอักษรและตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

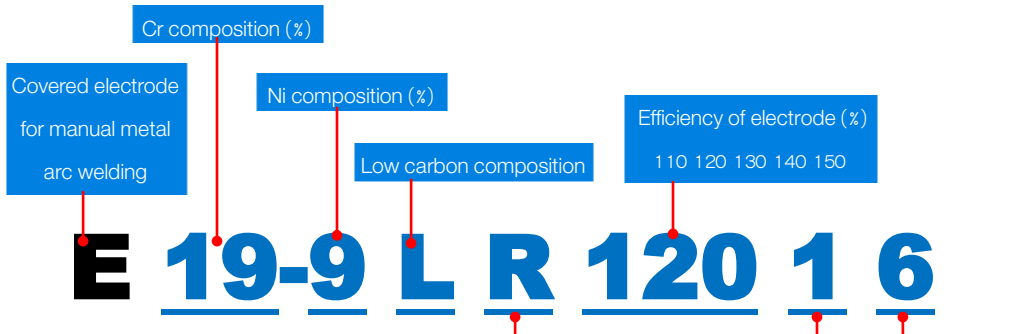
ISO 3581 หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าทนความร้อนสูง

2012 หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน 2012



จากข้อกำหนดตามมาตรฐาน ISO 3581:2016 รหัสของแต่ละตำแหน่งที่ระบุบนลวดเชื่อมจะแสดงค่าปริมาณและความหมายที่เฉพาะเจาะจง ดังที่แสดงในรูปที่ 7.15 โดยการแสดงปริมาณส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมจะแสดงไว้ในตารางที่ 7.22 เป็นที่น่าสังเกตว่าลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน ISO เมื่อพิจารณาเทียบรหัสหรือโค๊ดกับมาตรฐานอื่น ๆ ที่ยอมรับกันในวงการงานเชื่อมอาจจะเทียบรหัสกันไม่ได้ทุกประเภทของลวดเชื่อม ดังแสดงในตารางที่ 7.23 ลวดเชื่อม

หุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมมีราคาที่แพงกว่าลวดเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมอื่น ๆ และมักจะพบว่ามีบรรจุภัณฑ์ที่ค่อนข้างได้มาตรฐาน ดังแสดงตัวอย่างบรรจุภัณฑ์และการระบุรหัสหรือโค๊ดบนกล่องของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมในรูปที่ 7.16



Symbol	Coating type
B	Basic
R	Rutile
S	Other

Symbol	Welding position
1	PA,PB,PC,PD,PE,PF,PG (All positions)
2	PA,PB,PC,PD,PE,PF (All positions, except vertical-down)
3	PA,PB (Flat butt weld, flat fillet weld, horizontal-vertical weld)
4	PA (Flat butt weld, flat fillet weld)
5	PA,PB,PG (Vertical-down and positions according to symbol 3)

Symbol	DC	AC
0	+	–
1	+ or –	50
2	–	50
3	+	50
4	+ or –	70
5	–	70
6	+	70
7	+ or –	90
8	–	90
9	+	90

รูปที่ 7.15 ความหมายของรหัสหรือโค๊ดลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐานสากล (ISO)

ที่มา : Guide to EN ISO 2581:2016, MMA Electrode, 2016



รูปที่ 7.16 แสดงรหัสหรือโค๊ดที่ระบุบนกล่องของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐานสากล (ISO)

ที่มา : Welding Supplies Ireland, MMA Electrode, 2010

ตารางที่ 7.22 ส่วนผสมเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐาน ISO 3581:2016

ที่มา : International Standard ISO 3581:2016, 2016

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)				
	C (max)	Cr	Ni	Mo	ธาตุอื่น ๆ
13	0.12	11–14	–	–	–
13.1	0.07	12–15	18–1.5		–
13.4	0.07	12–15	3–5	1	–
17	0.10	15–18	–	–	–
17.01	0.25	15–18	–	1–1.5	–
19.9	0.08	18–21	8–11	–	–
19.9L	0.04	18–21	8–11	–	
19.9Nb	0.08	18–21	8–11	–	Nb
19.9L Nb	0.04	18–21	8–11	–	Nb
19.12.2	0.08	17–20	11–14	2–2.5	–
19.12.2L	0.04	17–20	11–14	2–2.5	–
19.12.2 Nb	0.08	17–20	11–14	2–2.5	Nb
19.12.3	0.08	17–20	10–14	2.5–3.5	–
19.12.3L	0.04	17–20	10–14	2.5–3.5	–
19.12.3 Nb	0.08	17–20	10–14	2.5–3.5	Nb
19.13.4	0.08	17–21	11–15	3.5–5.5	–
19.13.4L	0.04	17–21	11–15	3.5–5.5	–
19.13.4 Nb	0.08	17–21	11–15	3.5–5.5	Nb
22.12	0.15	20–23	10–13	–	–
23.12	0.15	22–26	11–15	–	–
23.12L	0.04	22–26	11–15	–	–
23.12 Nb	0.12	22–25	11–15	–	Nb
23.12W	0.20	22–25	11–15	–	W 2–4
23.12.2	0.12	22–25	11–15	2–3	–
16.8.2	0.10	14.5–16.5	7.5–9.5	1–2	–
17.8.2	0.10	16.5–8.5	8–9.5	1.5–2.5	–
18.8 Min	0.20	17–20	7–10	–	Min 5–8
18.15.3 L	0.04	16.5–19.5	13–16	2.5–3.5	–
25.2	0.20	24–28	18–22	–	–
25.20 L	0.04	24–28	18–22	–	–
25.20 Nb	0.12	24–28	18–22	–	Nb
25.20.2	0.12	25–28	20–22	2–3	–
25.20 C	0.25/45	24–28	18–22	–	–
25.25.2 Nb	0.10	24–27	24–26	2–2.5	Nb
18.20.2 Cu Nb	0.10	17–20	19–22	2–2.5	Cu 1.8–2.2 Nb
20.25.5 L Cu	0.04	19–22	24–26	4–6	Cu 1–3
23.27.3 L Cu Nb	0.04	21–25	25–29	2.5–4.3	Cu 2.5–3.5 Nb
25.16 C Min	0.25/45	23–26	14.5–17	–	Min 5–8
20.9 Nb	0.13	18–21	8–10	0.35–0.65	Nb
29.9.3	0.10	18.5–21	8–10	2–4	–
25.4	0.15	24–27	4–6	–	–
29.9	0.15	28–32	8–12	–	–
18.36	0.25	14–19	33–38	–	–
17.12 Si	0.15	17–19	11–13	–	Si 3.8–4.8
24.14 Si	0.12	22–25	13–15	–	Si 15–2.2

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.22

- ค่าที่แสดงค่าเดียว เป็นค่าที่สูงที่สุด

ตารางที่ 7.23 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิม เทียบมาตรฐาน ISO กับมาตรฐานอื่น ๆ

ที่มา : International Standard ISO 3581:2016, 2016

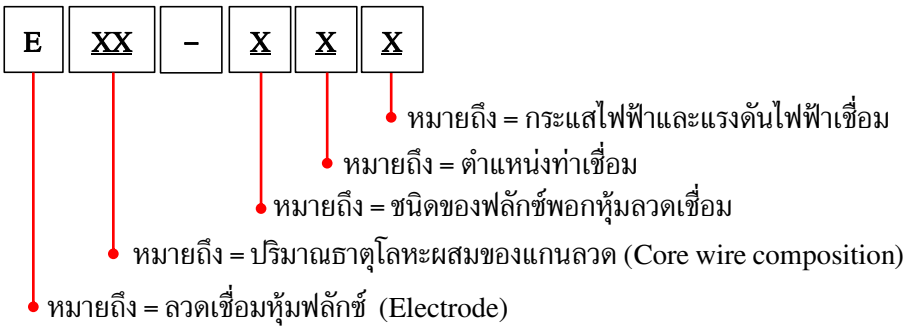
สัญลักษณลวดเชื่อม มาตรฐาน	เทียบเคียงกับมาตรฐานลวดเชื่อมหุมฟลักซ์อื่น ๆ		
ISO 3581:2016	AWS	BS	DIN
13	410	13	13
13.1	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
13.4	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	13.4
17	430	17	17
17.0.1	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
19.9	308	19.9	19.9
19.9 L	308 L	19.9 L	19.9 NC
19.9 Nb	347	19.9 Nb	19.9 Nb
19.9 L Nb	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
19.1.2.2	316	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
19.1.2.2 L	316 L	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
19.1.2.2 Nb	318	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
19.12.3	ไม่ระบุ	19.12.3	19.12.3
19.12.3 L	ไม่ระบุ	19.12.3 L	19.12.3 NC
19.12.3 Nb	ไม่ระบุ	19.12.3 Nb	19.12.3 Nb
19.13.4	317	19.13.4	19.13.4
19.13 AL	ไม่ระบุ	19.13.4 L	ไม่ระบุ
19.13.4 Nb	ไม่ระบุ	19.13.4 Nb	ไม่ระบุ
22.12	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	22.12
23.12	309	23.12	ไม่ระบุ
23.12 L	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	23.12 NC
23.12 Nb	309 Cb	23.12 Nb	23.12 Nb
23.12 W	ไม่ระบุ	13.12	ไม่ระบุ
23.12.2	209 Mo	23.12.2	ไม่ระบุ
16.8.2	16.8.2	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
17.8.2	ไม่ระบุ	17.8.2	ไม่ระบุ
18.8 Min	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	18.8 Min 6
18.15.3 L	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	18.15.3 NC
25.2	310	25.20	25.20
25.20 Nb	310 Cb	25.20 Nb	ไม่ระบุ
25.20.2	310 Mo	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
25.20 C	ไม่ระบุ	25.20 H	ไม่ระบุ
25.25.2 Nb	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	25.25.2 Nb
18.20.2 Cu Nb	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	18.20.2 Cu Nb
20.25.5 L Cu	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
23.27.3 L Cu Nb	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
25.1.6 C Mn	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
20.9 Nb	349	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
20.9.3	ไม่ระบุ	20.9.3	ไม่ระบุ
25.4	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	25.4
29.9	312	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
18.36	330	ไม่ระบุ	18.36

3) ISO 1071 : 2015 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะเหล็กหล่อ (Welding Consumables –Covered Electrodes, Wires, Rods and Tubular Cored Electrodes for Fusion Welding of Cast Iron) ตามมาตรฐานลวดเชื่อมสากล (ISO) เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ที่ว่าด้วยมาตรฐานรายละเอียดของลวดเชื่อมที่ใช้เชื่อมโลหะเหล็กหล่อ (Cast iron) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานออกมาดังนี้

ISO 1071:2015 **E X X –X X X** ตัวอักษรและตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

ISO 1071 หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กหล่อ

2015 หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน 2015



จากรหัสข้อกำหนดมาตรฐาน ISO ของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อ ได้แสดงให้เห็นถึงความหมายของรหัสในแต่ละตำแหน่งอย่างชัดเจน ซึ่งในแต่ละตำแหน่งจะมีข้อกำหนดที่เพิ่มเติม ดังแสดงในรูปที่ 7.17 และจะได้อธิบายเพิ่มเติมในแง่ของความหมายของรหัสดังนี้

– ปริมาณธาตุโลหะผสมของแกนลวด ซึ่งก็จะหมายถึงธาตุที่ผสมหลักของแกนลวดเชื่อม เช่น NiFe ก็คือเป็นลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของนิกเกิลเป็นหลักที่ผสมเพิ่มเติมโลหะเหล็ก

– ตัวอักษรเป็นบอกถึงชนิดของสารฟลักซ์พอกหุ้ม เช่น ตัว G เป็นรหัสที่บ่งชี้ถึงสารพอกหุ้มชนิดกราไฟต์ หรือตัว B หมายถึงสารพอกหุ้มชนิดด่าง เป็นต้น

– ตัวเลขก่อนตัวสุดท้าย จะบ่งบอกถึงตำแหน่งของท่าเชื่อม เช่น เลข 2 หมายถึง เชื่อมได้ทุกท่ายกเว้นท่าตั้งเชื่อมลง หรือ เลข 3 ใช้เชื่อมท่าราบต่อมุมท่าตั้งและท่าขนานนอน เป็นต้น

– ตัวเลขตัวสุดท้าย จะใช้บ่งบอกถึงชนิดของขั้วเชื่อมและชนิดของกระแสไฟเชื่อม เช่น เลข 2 สามารถเชื่อมด้วยกระแสตรง DCEP หรือ DCEN และกระสลับ (AC) ซึ่งจะมีการระบุไว้ในมาตรฐานและโดยปกติผู้ผลิตก็จะระบุไว้ชัดเจนในคู่มือแนะนำการใช้งานลวดเชื่อม ดังแสดงตัวอย่างใบคู่มือแนะนำการใช้ลวดเชื่อม ISO 1071–A ECNiFe–CI ในรูปที่ 7.18 และตัวอย่างการระบุรหัสมาตรฐานลวดเชื่อมที่ข้างกล่องบรรจุภัณฑ์ของลวดเชื่อม ในรูปที่ 7.19

ข้อแนะนำเพิ่มเติมสำหรับข้อกำหนดชนิดของสารฟลักซ์พอกหุ้ม (Cover flux) ถึงการนำใช้งาน

– อักษรตัวรหัส B (Basic) เป็นลวดเชื่อมที่สารฟลักซ์เป็นด่าง โดยใช้สารชนิดฟลูออร์สปาร์ (Fluorspar) ขี้ตะกรันเป็นเกล็ดหยาบ ๆ มีสีน้ำตาลสามารถเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม การหลอมละลายลึกปานกลาง โดยสามารถใช้เชื่อมได้กับไฟฟ้ากระแสตรง DCEP

– อักษรตัวรหัส G (Graphite) เป็นลวดเชื่อมที่สารฟลักซ์เป็นกราไฟต์ มีส่วนผสมของคาร์บอเนตและเหล็ก (Ferroalloys) ขี้ตะกรันเป็นเกล็ดละเอียดเล็ก ๆ มีสีดำ ง่ายต่อการกำจัดออก

– อักษรตัวรหัส S (Salt) เป็นลวดเชื่อมที่สารฟลักซ์เป็นคลอไรด์และฟลูออไรด์ ที่ใช้เชื่อมเหล็กหล่อกับโลหะนอกกลุ่มเหล็กและโลหะผสมต่ำ

– อักษรตัวรหัส V เป็นลวดเชื่อมที่สารฟลักซ์ชนิดพิเศษอื่น ๆ

Symbol	Coating type
B	Basic
G	Graphite
S	Salt
V	Other

Symbol	ตำแหน่งท่าเชื่อม (Welding position)
1	PA,PB,PC,PD,PE,PF,PG (All positions)
2	PA,PB,PC,PD,PE,PF (All positions, except vertical-down)
3	PA,PB (Flat butt weld, flat fillet weld, horizontal-vertical weld)
4	PA (Flat butt weld, flat fillet weld)
5	PA,PB,PG (Vertical-down and positions according to symbol 3)



Symbol	ชนิดของแกนลวดเชื่อม (Type of core wire)
FeC-1	โลหะเหล็กหล่อสีเทา (Gray cast iron)
FeC-2	โลหะเหล็กหล่อสีเทาผสมเหล็กกล้า (Gray cast iron alloy steel)
Fe	โลหะเหล็กกล้า (Steel)
NiFe	โลหะนิกเกิลผสมกับเหล็ก (Nickel alloy with ferrous)
NiCu-1	โลหะนิกเกิลผสมกับทองแดง (Nickel alloy with copper)
NiCu-2	โลหะนิกเกิลผสมกับทองแดง (Nickel alloy with copper)
Ni	โลหะนิกเกิล (Nickel)
CuAl	โลหะทองแดงผสมกับอลูมิเนียม (Copper alloy with aluminum)
CuSn-1	โลหะทองแดงผสมกับดีบุก (Copper alloy with tin)
CuSn-2	โลหะทองแดงผสมกับดีบุก (Copper alloy with tin)
Z	โลหะอื่น ๆ

Symbol	DC	AC
0	+	–
1	+	50
2	+or–	50
3	+	50
4	+ or –	70
5	–	70
6	+	70
7	+ or –	90
8	–	90
9	+	90

รูปที่ 7.17 ความหมายของรหัสลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อมาตรฐานสากล (ISO)

ที่มา : Guide to EN ISO 1071:2015, MMA Electrode, 2015

PRODUCT INFORMATION

SIFTRODE CAST NIFE

EN ISO 1071-A E C NiFe-Cl
AWS A5.15 E NiFe-Cl
DIN 8573 E NiFe BG1

DESCRIPTION

Cast iron electrode with NiFe bimetal core wire. Dedicated for cold welding grey, nodular and malleable cast iron and for joining cast iron with steel. Excellent welding properties, does not overheat, the speed of welding is high, almost no spatters, slag removes easily. Can be welded with AC Uo < 50V and DC (+) and (-).

WELDING POSITIONS



Welding Current: AC, DC+
Suitable positions: PA, PB, PC, PE, PF,PG

TYPICAL WELD METAL COMPOSITION

Ni	54.0 %
Fe	42.0 %

TYPICAL MECHANICAL PROPERTIES

Ult Tensile Strength	≥ 450 N/mm2
Redrying	180° / 1h
Hardness	160-190 [HB]

MATERIAL TO BE WELDED

Grey cast, malleable cast iron, nodular cast iron

AVAILABLE FORMATS

ELECTRODE RODS (MMA / SMAW)

Dia	1.0kg Pkt		Approx Pcs/KG
2.5mm	RE4002501		
3.2mm	RE4003201		
4.0mm	RE4004001		

CURRENT RANGE

Dia (mm)	Amps
2.5	60-80
3.2	80-110
4.0	110-150

รูปที่ 7.18 ข้อแนะนำจากผู้ผลิตของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อมาตรฐานสากล (ISO 1071)

ที่มา : Welding & Welder, 2014



รูปที่ 7.19 ตัวอย่างรหัสบนกล่องลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อมาตรฐานสากล (ISO 1071: 2015)

ที่มา : KISWEL Welding electrode, 2011

ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อตามมาตรฐาน ISO ที่ผลิตออกมาใช้งานสำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อมีจำนวนไม่มากชนิด ด้วยเพราะเกรดของโลหะเหล็กหล่อที่ต้องการเชื่อมก็มีไม่กี่ชนิด (ชนิดของเหล็ก) และด้วยปัญหาที่ทราบกันดีว่าเหล็กหล่อทำการเชื่อมยาก อย่างไรก็ตามมาตรฐานก็ได้มีการกำหนดประเภทของลวดเชื่อมเหล็กหล่อออกมาซึ่งมีทั้งประเภทที่ใช้เชื่อมโลหะเหล็กหล่อกับโลหะต่างชนิดอื่น ๆ (Dissimilar cover electrode) และประเภทที่ใช้เชื่อมโลหะเหล็กชนิดเดียวกัน (Similar cover electrode) โดยทั้งสองประเภทมีส่วนผสมทางเคมีที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 7.24 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

ตารางที่ 7.24 (ก) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมเหล็กหล่อกับโลหะต่างชนิด

ที่มา : International Standard ISO 1071:2015, 2015

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)[a]									
	C	Si	Min	P	S	Fe	Ni[b]	Cu[c]	Remark	other
Fe–1	2.0	1.5	0.5–1.5	0.04	0.04	Rem.	–	–	–	1.0
St	2.0	1.0	1.0	0.04	0.04	Rem.	–	0.35	–	1.0
Fe–2	0.2	1.5	0.3–1.5	0.04	0.04	Rem.	–	–	Nb + Vi 5.0–10.0	1.0
Ni–CI	2.0	4.0	2.5	–	0.03	8.0	min 85	2.5	Al:1.0	1.0
	1.0	0.75	2.5	–	0.03	4.0	min 90	4.0	–	1.0
Ni–CI–A	2.0	4.0	2.5	–	0.03	8.0	min 85	2.5	Al:1.0–3.0	1.0
NiFe–1	2.0	4.0	2.5	0.03	0.03	Rem.	45–75	4.0	Al:1.0	1.0
NiFe–2	2.0	4.0	1.0–5.0	0.03	0.03	Rem.	45–60	2.5	Al:1.0	1.0
NiFe–CI	2.0	4.0	2.5	–	0.03	Rem.	45–60	2.5	Al:1.0	1.0
NiFeT3–CI	2.0	1.0	3.0–5.0	–	0.03	Rem.	45–60	2.5	Al:10	1.0
NiFe–CI–A	2.0	4.0	2.5	–	0.03	Rem.	35–45	2.5	Al:1.0–3.0	1.0
NiFeMin–CI	2.0	1.0	10–14	–	0.03	Rem.	35–45	2.5	Al:1.0	1.0
	0.50	1.0	10–14	–	0.03	Rem.	35–45	2.5	Al:1.0	1.0
NiCu	1.7	1.0	2.5	–	0.04	5.0	50–75	Rem.	–	1.0
NiCu–A	0.35–0.55	0.75	2.3	–	0.025	3.0–6.0	50–60	35–45	–	1.0
NiCu–B	0.35–0.55	0.75	2.3	–	0.025	3.0–6.0	60–70	25–35	–	1.0

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.24 (ก)

- a = ค่าที่แสดงค่าเดียว เป็นค่าที่สูงที่สุด
- b = ค่าที่ต่ำสุดของนิกเกิลที่อาจรวมกับโคบอลต์
- c = ค่าที่ต่ำสุดของทองแดงที่อาจรวมกับโลหะเงิน

ตารางที่ 7.24 (ข) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมเหล็กหล่อชนิดเดียวกัน

ที่มา : International Standard ISO 1071:2015, 2015

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)[a]									
	C	Si	Min	P	S	Fe	Ni[b]	Cu[c]	Remark	Other
FeC−1	3.0−3.6	2.0−3.5	0.8	0.5	0.1	Rem.	–	–	Al:3.0	1.0
FeC−2	3.0−3.6	2.0−3.5	0.8	0.5	0.1	Rem.	–	–	Al:3.0	1.0
FeC−3	2.5−5.0	2.5−9.5	1.0	0.2	0.04	Rem.	–	–	–	1.0
FeC−4	3.2−3.5	2.7−3.0	0.6−0.75	0.5−0.75	0.10	Rem.	–	–	–	1.0
FeC−5	3.3−3.5	2.9−2.5	0.5−0.7	0.2−0.4	0.10	Rem.	1.2−1.6	–	Mo:0.5−0.45	1.0
FeC−GF	3.0−4.0	2.0−3.7	0.6	0.05	0.015	Rem.	1.5	–	Mg:0.02−0.10 Ce:0.20	1.0
FeC−Gp1	3.2−4.0	3.2−3.8	0.1−0.4	0.05	0.015	Rem.	0.50	–	Mg:0.04−0.10 Ce:0.20	1.0
FeC−Gp2	2.5−3.5	1.5−3.0	1.0	0.05	0.015	Rem.	2.5	1.0	Mg:0.02−0.10 Ce:0.20	1.0

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.24 (ข)

- a = ค่าที่แสดงค่าเดียว เป็นค่าที่สูงที่สุด
- b = ค่าที่ต่ำสุดของนิกเกิลที่อาจรวมกับโคบอลต์
- c = ค่าที่ต่ำสุดของทองแดงที่อาจรวมโลหะเงิน

ผู้ผลิตลวดเชื่อมเหล็กหล่อหลายราย ได้มีข้อแนะนำเทคนิคที่ควรปฏิบัติแก่ช่างเชื่อมในการที่จะเชื่อมโลหะเหล็กหล่ออย่างไรที่จะไม่เกิดปัญหา โดยมีข้อควรปฏิบัติดังนี้

1) ต้องรู้และเข้าใจชนิดและส่วนผสมของเหล็กหล่อที่จะเชื่อม เช่น เหล็กหล่ออบเหนียวเชื่อมแล้วคุณสมบัติจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสูญเสียความเหนียวไป หรือ เหล็กหล่อสีขาวแทบจะเชื่อมไม่ได้เลย หรือ เหล็กหล่อกราไฟต์กลม (Nodular cast iron) เชื่อมได้แต่ไม่ควรเชื่อมบ่อย หรือ เหล็กหล่อสีเทาสามารถเชื่อมได้ดีกว่าเหล็กหล่อชนิดอื่น ๆ เป็นต้น

2) ต้องทำความสะอาดผิวชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม

3) เลือกวิธีการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมอย่างถูกวิธี เช่น ใช้อุณหภูมิสูงเท่าไหร่ และนานแค่ไหน

4) เลือกขบวนการเชื่อมที่เหมาะสมกับชนิดของเหล็กหล่อ เช่น เหล็กหล่อ Ni−Resist จะเชื่อมได้เฉพาะขบวนการเชื่อม SMAW หรือเหล็กหล่อสีเทาสามารถเชื่อมได้ทุกวิธีการเชื่อม เป็นต้น

7.2. มาตรฐานของลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมด้วยแก๊สปกคลุม (Standards of filler electrode)

มาตรฐานลวดกลุ่มเชื่อมนี้ จะหมายถึงลวดเชื่อมที่ผลิตออกมาใช้สำหรับขบวนการเชื่อมที่ต้องใช้แหล่งแก๊สจากภายนอกป้อนเข้ามาปกคลุมบ่อหลอมละลายขณะทำการเชื่อม เป็นลวดเชื่อมที่ไม่มีสารพอกหุ้มใด ๆ เป็นเนื้อโลหะเส้นตันสำรับการเติมอย่างเดียวจนกล่าวขานกันในชื่อของ ลวดเชื่อมเปลือย โดยลวดเชื่อมกลุ่มนี้จะมีทั้งชนิดที่เป็นแบบเส้นลวดม้วนอยู่ในล้อขดม้วนลวด (Filler wire) และชนิดที่เป็นแบบเส้นลวดยาวเป็นเส้น ๆ (Filler rods) ดังแสดงในรูปที่ 7.20 (ก) และ (ข) ตามลำดับโดยชนิดที่เป็นแบบลักษณะเส้นลวดม้วนจะใช้กับขบวนการเชื่อมที่มีระบบการป้อนเติมลวดเชื่อมอย่างต่อเนื่อง (Continuous wire feeding) ได้แก่ ขบวนการเชื่อมมิก/แม็ก (GMAW) ขบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (SAW) และขบวนการเชื่อมอิเลคโทรสแลก (ESW) ส่วนชนิดที่เป็นแบบแท่งลวดตันยาวเป็นเส้น ๆ จะผลิตออกมาเพื่อใช้กับขบวนการเชื่อมที่เติมลวดด้วยช่างเชื่อมเอง (Filler) ได้แก่ ขบวนการเชื่อมทิก (GTAW) ขบวนการเชื่อมพลาสมา (PAW) และขบวนการเชื่อมแก๊สอะเซทิลีน (OAW) เป็นต้น

ลวดเชื่อมประเภทไม่มีฟลักซ์หุ้มหรือลวดเชื่อมเปลือยนี้ปัจจุบันเป็นที่นิยมและมีการเลือกนำมาใช้งานกันหลากหลายมากมาย และแต่ละมาตรฐานก็จะมีข้อกำหนดที่แตกต่างกันไป ซึ่งก็จะมีบางส่วนที่เหมือนกัน คล้ายกัน และก็มีในบางส่วนที่ต่างกันตามแต่ละมาตรฐาน โดยจะได้นำเสนอในรายละเอียดไว้ในแต่ละมาตรฐานและในแต่ละชนิดของโลหะลวดเชื่อม ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันในระดับสากล และเป็นที่นิยมนำมาอ้างอิงกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการเชื่อมภายในประเทศไทย มักจะอ้างอิงกับมาตรฐานของ AWS และ JIS รวมถึง EN ISO เป็นต้น และจะเน้นข้อมูลมาตรฐานของลวดเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กหล่อ และ โลหะนอกลุ่มเหล็กประเภทอลูมิเนียม เป็นสำคัญ ดังที่จะได้กล่าวต่อไปนี้



(ก) ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดม้วน (Filler wire) **(ข)** ลวดเชื่อมแบบแท่งยาว (Filler rod)

รูปที่ 7.20 ตัวอย่างลักษณะของลวดเชื่อมสำหรับแก๊สปกคลุม (ลวดเชื่อมเปลือย)

ที่มา : KOBELCO Welding electrode, 2013

1. ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมมาตรฐาน AWS (American Welding Society)

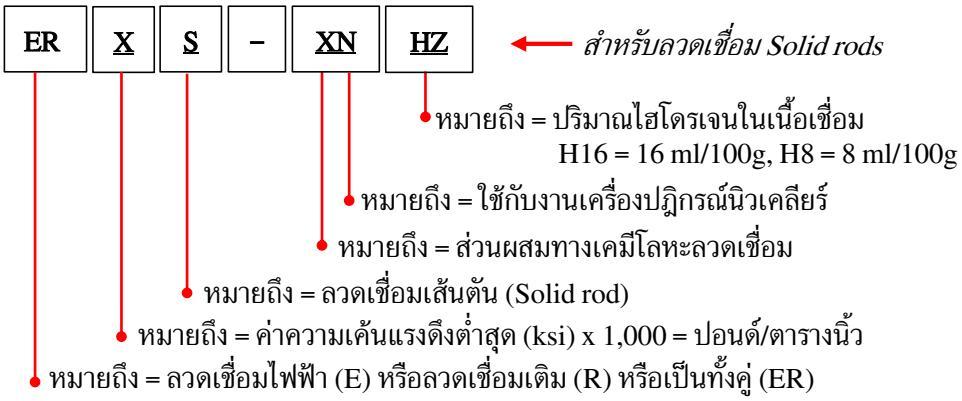
ลวดเชื่อมสำหรับขบวนการเชื่อมที่ใช้แก๊สจากแหล่งภายนอกเข้ามาปกคลุมตามมาตรฐานของสมาคมการเชื่อมแห่งสหรัฐอเมริกา ได้สร้างข้อกำหนดขึ้นเพื่อเป็นมาตฐานคุณภาพของงานเชื่อมและความเข้าใจที่ตรงกันในการสื่อสารทางภาษาวิศวกรรมการเชื่อม โดยมีรหัสหรือโค๊ดที่กำหนดไว้ดังนี้

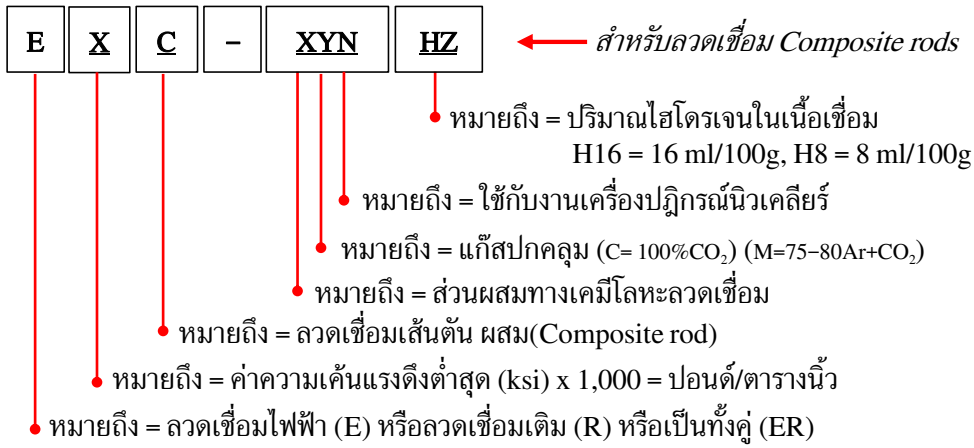
1.1) AWS A5.18/A5.18:2017 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมของโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน (Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielding Arc Welding) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้

AWS A5.18/A5.18:2017 ตัวอักษรและตัวเลขของรหัสของมาตรฐานแยกออกตามประเภทของลวดเชื่อมแบบที่เป็นลวดเชื่อมเส้นตัน (Solid rod) กับแบบที่เป็นเส้นตันผสม (Composite rod) มีความหมายของแต่ละประเภทดังนี้

AWS A5.18/A5.18 หมายถึง ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมสำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน

2017 หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน 2017





จากมาตรฐานรหัสหรือโค๊ดที่กำหนดความหมายไว้จะแสดงรายละเอียดเพิ่มเติมในตารางค่าต่าง ๆ ดังนี้ ตารางที่ 7.25 (ก) แสดงตัวอย่างประเภทและส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมชนิดเส้นลวดตัน (Solid rod) ตารางที่ 7.25 (ข) แสดงตัวอย่างประเภทและส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมชนิดเส้นลวดผสม (Composite rod) และ ตารางที่ 7.26 แสดงสมบัติทางกลพร้อมระบุชนิดแก๊สปกคลุมที่เหมาะสม สำหรับรูปที่ 7.21 ต้องการแสดงเป็นตัวอย่างลักษณะผลิตภัณฑ์ของลวดเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนที่ระบุมาตรฐาน AWS อย่างชัดเจนบนลวดเชื่อม

ตารางที่ 7.25 (ก) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมเหล็กกล้าคาร์บอน (Solid rod)

ที่มา : AWS A5.18/A5.18:2017, 2017

ประเภทลวดเชื่อม[b]	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)[a]												
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu[c]	Ti	Zr	Al
ER70S-2	0.07	0.40–0.70	0.9–1.4	0.025	0.035	(e)	(e)	(e)	(e)	0.50	0.05–0.15	0.02–0.12	0.05–0.15
ER70S-3	0.06–0.15	0.45–0.75	0.9–1.4	0.025	0.035	(e)	(e)	(e)	(e)	0.05	–	–	–
ER70S-4	0.07–0.15	0.65–0.85	1.0–1.5	0.025	0.035	(e)	(e)	(e)	(e)	0.05	–	–	–
ER70S-5	0.07–0.19	0.3–0.6	0.9–1.4	0.025	0.035	(e)	(e)	(e)	(e)	0.05	–	–	0.5–0.9
ER70S-6	0.06–0.15	0.8–1.15	1.4–1.85	0.025	0.035	(e)	(e)	(e)	(e)	0.05	–	–	–
ER70S-7	0.07–0.15	0.5–0.8	1.5–2.0[d]	0.025	0.035	(e)	(e)	(e)	(e)	0.05	–	–	–
ER70S-G[f]	ลวดเชื่อมประเภทนี้กำหดไว้สำหรับลวดเชื่อมพิเศษที่กำหนดส่วนผสมทางเคมีตามข้อตกลงระหว่างผลิตกับผู้ใช้ลวดเชื่อม												

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.25 (ก)

- a = ค่าที่แสดงค่าเดียว เป็นค่าที่สูงที่สุด
- b = ตัวเลขต่อท้ายสัญลักษณ์ (N) ใช้งานปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ที่จำกัด P <0.012%, V<0.05% และ Cu<0.08%
- c = โลหะทองแดงรวมทั้งที่เคลือบผิวลวดเชื่อมไม่เกิน 0.05%
- d = ลวดเชื่อมชนิดนี้แมงกานีสอาจเกิน 2% จึงต้องลด C ลงจาก 0.01% ต่อการเพิ่มแมงกานีส 0.05%
- e = ธาตุที่เหลืออื่น ๆ รวมไม่เกิน 0.05%

ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมหรือที่เรียกกันว่าลวดเชื่อมเปลือยเป็นที่นิยมเลือกใช้งานกันมาก ด้วยมีข้อดีของการที่ไม่ต้องกำจัดสแลกออก เชื่อมง่าย เกิดข้อบกพร่องน้อย เชื่อมได้รวดเร็ว และเหตุผลด้านอื่น ๆ อีกหลายอย่าง และยังสามารถเชื่อมโลหะได้ทุกชนิด ดังนั้น การที่จะเลือกลวดเชื่อมให้เหมาะสมกับโลหะงานที่จะเชื่อมมีความจำเป็นอย่างยิ่ง จึงขอชี้แนะแนวทางการเลือกใช้ลวดเชื่อมบางประเภทเพื่อเป็นตัวอย่างของเหตุผลในการพิจารณาเลือกใช้ลวดเชื่อมที่ถูกต้อง โดยเหตุผลที่จะนำมาชี้แนะนี้ได้

ตีความหมายมาจากมาตรฐานรหัสหรือโค๊ดที่ระบุไว้บนลวดเชื่อม ซึ่งเป็นตัวอย่างสำหรับการเลือกลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อม MIG/MAG ดังนี้

ลวดเชื่อม ER70S−1 เหมาะสำหรับใช้เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) และเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium carbon steel) จะใช้คู่กับแก๊สปกคลุมชนิด $Ar+O_2$ ผิวชิ้นงานต้องมีความสะอาด ไม่มีสนิมหรือสิ่งสกปรก

ลวดเชื่อม ER70S−2 เหมาะสำหรับใช้เชื่อมเหล็กที่กำจัดออกซิเจนแล้ว (Killed steel) เหล็กที่มีออกซิเจนเจือปนต่ำ (Semi killed steel) และเหล็กที่มีออกซิเจนเจือปนสูง (Rimmed steel) หรือเหล็กที่มีผิวไม่ค่อยสะอาดมากนัก สามารถเชื่อมแบบถ่ายโอนลัดวงจร (Short Circuit Transfer) ได้ทุกท่าเชื่อม (All position)

ลวดเชื่อม ER70S−3 เหมาะสำหรับใช้เชื่อมเหล็กในแนวยัดไส้ (Root pass) และสามารถเชื่อมเหล็กที่มีออกซิเจนเจือปนที่ต่ำ ในแนวที่ 2 และ แนวที่ 3 โดยใช้ขนาดลวดเชื่อมที่เล็ก ซึ่งสามารถเชื่อมแบบถ่ายโอนลัดวงจร (Short Circuit Transfer) ได้ทุกท่าเชื่อม (All position) ลวดเชื่อมชนิดนี้เป็นที่นิยมเลือกใช้งานกันมากที่สุด

ลวดเชื่อม ER70S−4 เป็นลวดเชื่อมที่มีปริมาณของธาตุ Si และ Mn ผสมสูง และเหมาะกับการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สปกคลุม เนื้อแนวเชื่อมที่ได้จะมีสมบัติที่สามารถรับแรงดึงได้สูง โดยไม่เหมาะกับการนำไปเชื่อมโลหะงานที่ต้องรับแรงกระแทก (Impact load)

ลวดเชื่อม ER70S−5 เป็นลวดเชื่อมที่เหมาะกับการเชื่อมเหล็กกล้าที่มีออกซิเจนผสมต่ำ ในการเชื่อมจะต้องใช้กระแสไฟเชื่อมที่สูง และสามารถเชื่อมบนผิวงานที่มีสารปนเปื้อนสนิมได้ แต่ไม่เหมาะกับการเชื่อมงานในลักษณะที่ต้องรับแรงแบบไดนามิก (Impact load)

ลวดเชื่อม ER70S−6 เป็นลวดเชื่อมชนิดที่มีปริมาณของธาตุ Si และ Mn ผสมในปริมาณที่สูง สามารถเชื่อมได้กับเหล็กกล้าทุกชนิด และผิวงานที่มีออกไซด์ ไม่เหมาะที่จะนำไปเชื่อมโลหะเหล็กที่มีออกซิเจนเจือปนสูง และสามารถเชื่อมได้กับกระแสไฟเชื่อมที่สูง ๆ

ลวดเชื่อม ER70S−7 เป็นลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของธาตุ Mn สูงมาก เหมาะกับการเชื่อมที่ใช้แก๊สผสม $Ar+CO_2$ หรือ 100% CO_2 เนื้อเชื่อมที่ได้จะมีความแข็งแรงน้อยกว่า ลวดเชื่อม ER70S−6 แต่สูงว่า ER70S−3

ลวดเชื่อม ER70S−G เป็นรหัสที่สร้างขึ้นใช้เป็นตัวแทนของการกำหนดลวดเชื่อมตามข้อตกลงระหว่างผู้ใช้กับผู้ผลิตลวดเชื่อม

ลวดเชื่อม ER70S−1B เป็นลวดเชื่อมที่เหมาะสมกับการเชื่อมโลหะที่มีธาตุกำจัดออกซิเจน สามารถนำไปเชื่อมได้กับทุกท่าเชื่อม ยกเว้นท่าราบ และสามารถเชื่อมได้ทั้งการเชื่อมแบบแนวเดียว (Single pass) และแบบหลายแนวซ้อนกัน (Multi pass)

จากการชี้แนะความเหมาะสมของความสามารถของลวดเชื่อมจะเห็นได้ว่ามีลวดเชื่อมหลายชนิดที่มีสมบัติที่ใกล้เคียงกัน สามารถใช้ทดแทนกันได้ในกรณีที่มีความจำเป็น และบางชนิดเป็นข้อห้าม

สำหรับการเชื่อมกับโลหะงานบางประเภท ดังนั้น การทำความเข้าใจและเลือกใช้ลวดเชื่อมจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับวิศวกรและช่างเชื่อม

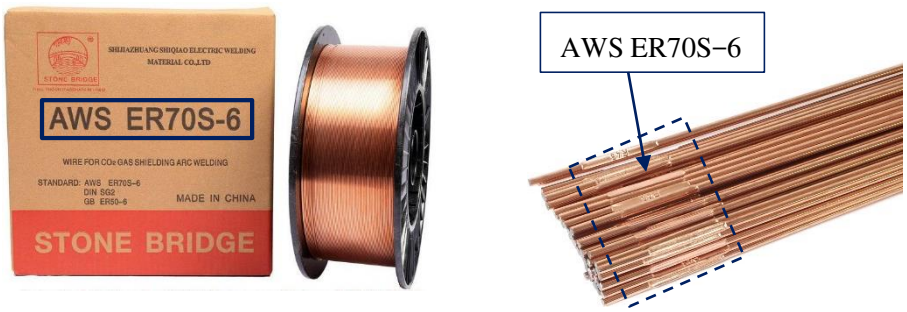
ตารางที่ 7.25 (ข) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมเหล็กกล้าคาร์บอน (Composite rod)

ที่มา : AWS A5.18/A5.18:2017, 2017

ประเภทลวดเชื่อม[b]	ชนิดแก๊สปกคลุม[c]	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)[a]									
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
ลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมหลายแนว (Multiple pass welding)											
E70C−3X	75−80% Ar+CO_2 หรือ %CO_2	0.12	0.90	1.75	0.03	0.03	(e)	(e)	(e)	(e)	0.50
E70C−6X	75−80% Ar+CO_2 หรือ %CO_2	0.12	0.90	1.75	0.03	0.03	(e)	(e)	(e)	(e)	0.50
E70C−G(X)	(d)	ไม่ระบุส่วนผสมเคมี[f]									
ลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมแนวเดียว (Single pass welding)											
E70C−GS(X)	(d)	ไม่ระบุส่วนผสมเคมี[g]									

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.25 (ข)

- a = ค่าที่แสดงค่าเดียว เป็นค่าที่สูงที่สุด
- b = ตัวอักษร “X” ต่อท้าย แทนอักษร “C” หรือ “M” ซึ่งหมายถึงชนิดของแก๊สคลุม C คือ 100%CO_2 และ M คือ แก๊สผสม 75−80%Ar ที่เหลือเป็น CO_2 สำหรับลวดเชื่อม E70C−G และ E70C−GS เมื่อไม่เติม C หรือ M ต่อท้าย หมายความว่า ไม่ใช้แก๊สคลุมจากภายนอก (ใช้แก๊สคลุมในตัวเอง)
- c = ถ้าใช้แก๊สปกคลุมนอกเหนือจากที่กำหนด เนื้อเชื่อมที่ได้จะมีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างออกไป
- d = แก๊สปกคลุมมีการตกลงกันระหว่างผู้ซื้อและผู้จัดหา
- e = ให้รายงานเมื่อต้องการเติม Ni, Cr, Mo และ V รวมแล้วไม่เกิน 0.05%
- f = ส่วนผสมจะต้องรายงาน เมื่อต้องมีการตกลงกันระหว่างผู้ซื้อและผู้จัดหา
- g = ลวดเชื่อมชนิดนี้ไม่กำหนดส่วนผสมทางเคมี เพราะต้องการเชื่อมเพียงแนวเดียว



(ก) ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดม้วน ER70S−6 **(ข)** ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดตรง ER70S−6

รูปที่ 7.21 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมเหล็กกล้าคาร์บอน มาตรฐาน AWS

ที่มา : SHIJIAZHUANG SHIQIAO ELECTRIC WELDING MATERIAL, 2012

ตารางที่ 7.26 สมบัติทางกลและแก๊สปกคลุมสำหรับลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอน

ที่มา : AWS A5.18/A5.18:2017, 2017

ประเภทลวดเชื่อม[a]	ชนิดแก๊สปกคลุม[c]	ความเค้นแรงดึงต่ำสุด		ความเค้นจำนน[b]		การยืดตัว
		psi	Mpa	psi	Mpa	%
ER70S−2	CO_2	70,000	480	58,000	400	22
ER70S−3	CO_2	70,000	480	58,000	400	22
ER70S−4	CO_2	70,000	480	58,000	400	22
ER70S−5	CO_2	70,000	480	58,000	400	22
ER70S−6	CO_2	70,000	480	58,000	400	22
ER70S−7	CO_2	70,000	480	58,000	400	22
ER70S−G	(d)	70,000	480	58,000	400	22
ER70C−3X	75−80%Ar+CO_2 หรือ 100%CO_2	70,000	480	58,000	400	22
ER70C−6X	75−80%Ar+CO_2 หรือ 100%CO_2	70,000	480	58,000	400	22
ER70C−G(X)	(d)	70,000	480	58,000	400	22
ER70C−GS(X)	(d)	70,000	480	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.26

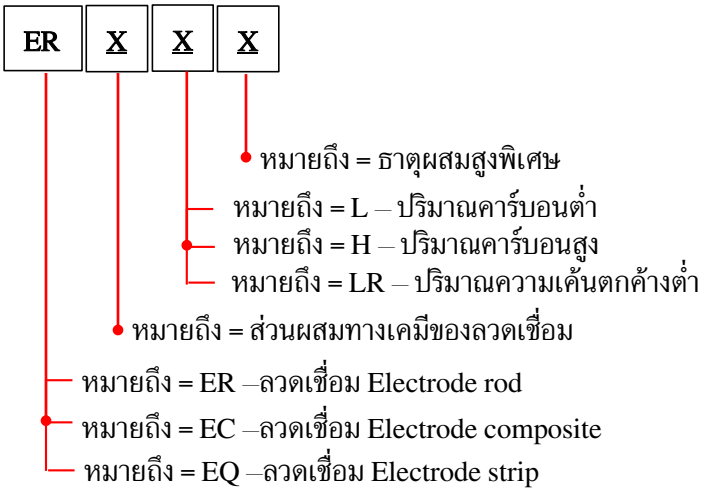
- a = ตัวอักษร “X” ต่อท้าย แทนอักษร “C” หรือ “M” ซึ่งหมายถึง ชนิดของแก๊สคลุม C คือ 100%CO_2 และ M คือ แก๊สผสม 75−80%Ar ที่เหลือเป็น CO_2 สำหรับลวดเชื่อม E70C−G และ E70C−GS เมื่อไม่เติม C หรือ M ต่อท้าย หมายความว่า ไม่ใช้แก๊สคลุมจากภายนอก (ใช้แก๊สคลุมในตัวเอง)
- b = ค่าความเค้นจำนน 0.25% offset และการยืดตัวของชิ้นทดสอบในความยาว 2 นิ้ว (51 มม.)
- c = แก๊ส CO_2 หมายถึง แก๊สปกคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ และถ้าผสมแก๊ส Ar+O_2 หรือ Ar+CO_2เนื้อเชื่อมจะมีความแข็งแรงและมีความสามารถในการยืดตัวต่ำลง
- d = แก๊สปกคลุมมีการตกลงกันระหว่างผู้ซื้อและผู้จัดหา

1.2) AWS A5.9/A5.9:2017 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม (Specification for Wire Electrodes, Strip Electrodes, Wires and Rods for Arc Welding of Stainless and Heat Resisting Steels) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้

AWS A5.9/A5.9:2017 มาตรฐานของลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมสำหรับการเชื่อมโลหะงานที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมนี้ จะรวมทั้งหมดของลักษณะลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ทั้งประเภทที่เป็นเส้นลวดม้วน (Electrode wire) ลวดเส้นตรง (Electrode rod) แผ่นแบน (Electrode strip) ที่รองรับกับขบวนการเชื่อม GMAW ขบวนการเชื่อม GTAW ขบวนการเชื่อม PAW และ ขบวนการเชื่อม SAW โดยมีการกำหนดตัวอักษรและตัวเลขรหัสของมาตรฐานที่มีความหมายดังต่อไปนี้

AWS A5.9/A5.9 หมายถึง ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมสำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม

2017 หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน 2017



ลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมได้ผลิตออกมาใช้งานที่หลากหลายมากมาย ซึ่งมีทั้งที่เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (AWS A5.4) ลวดเชื่อมเส้นตัน (AWS A5.9) และลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (AWS A5.22) เป็นต้น โดยแต่ละประเภทของลวดเชื่อมก็จะพยายามผลิตออกมาเพื่อให้สามารถเลือกใช้งานกับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมได้ทุกชนิดของโลหะหลักที่ต้องการเชื่อม ซึ่งในกรณีที่เกรดของลวดเชื่อมตรงกันกับเกรดของโลหะหลักเหล็กกล้าไร้สนิม (ลวดเชื่อม ER304 ใช้เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304) ลักษณะแบบนี้ไม่ต้องพิจารณาเลือกใช้ แต่พบว่าลวดเชื่อมจะผลิตออกมาไม่ตรงกันกับโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมทุกประเภทที่มี (ลวดเชื่อม ER309 ใช้เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด AISI 201) กรณีแบบนี้ช่างเชื่อมต้องพิจารณาเลือกใช้เกรดของลวดเชื่อมให้เหมาะสม จะมุ่งเน้นถึงส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างของเนื้อเชื่อมที่ได้เป็นสำคัญ โดยมีหลักการเลือกลวดเชื่อมที่ต้องมีส่วนผสมที่เจือสูงกว่าโลหะหลักที่จะเชื่อม เช่น การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติกจะเลือกลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของ Cr และ Ni ที่ผสมอยู่ในปริมาณที่สูงจะลดปัญหาเกิดการสูญเสียธาตุผสมในปริมาณที่เพียงพอต่อการป้องกันการเกิดกร่อนได้ดี ซึ่งในทางปฏิบัติจะต้องพิจารณาร่วมกับขบวนการเชื่อม (Welding process) และปัจจัยการเชื่อมด้วย (Welding parameter) เพราะทั้งประเด็นจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของแนวเชื่อมที่จะได้ ทั้งสมบัติทางกลและสมบัติทางด้านความต้านทานการกัดกร่อน

เป็นที่ทราบกันดีว่าการเลือกใช้ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจและสามารถทำนายโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมได้ด้วย ซึ่งก็คือ Schaeffler diagram ซึ่งจะทำนายจากสัดส่วนผสมทางเคมีที่อยู่ในลวดเชื่อม ดังแสดงชนิดของลวดเชื่อมและส่วนผสมทางเคมีในตารางที่ 7.27 พร้อมกับตัวอย่างการแสดงรายละเอียดของลวดเชื่อมที่แนะนำจากผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมในรูปที่ 7.22 และลักษณะรูปแบบของลวดเชื่อมเปลือยเหล็กกล้าไร้สนิมในรูปที่ 7.23

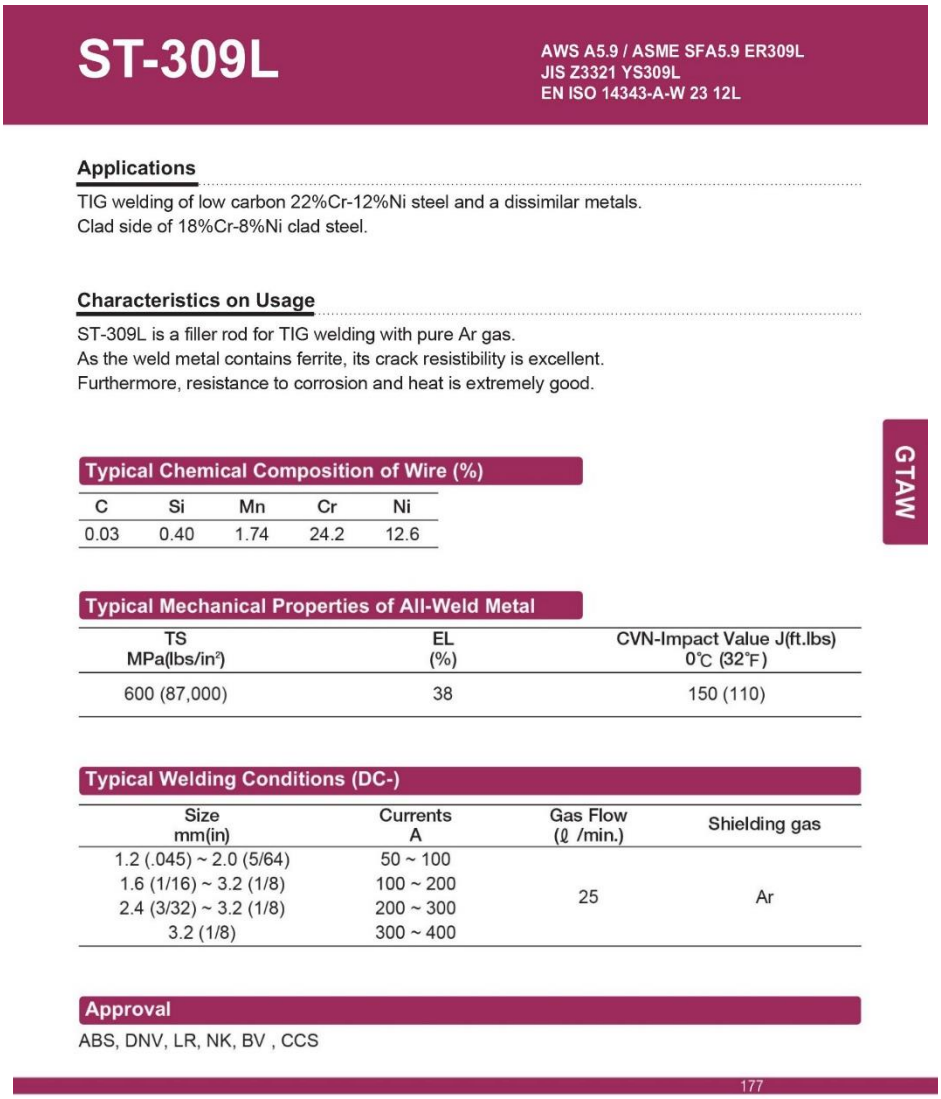
ตารางที่ 7.27 ชนิดและส่วนผสมเคมีลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐาน AWS

ที่มา : AWS A5.9/A5.9:2017, 2017

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)[a,b]									
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	N	Cu
ER209	0.05	20.5–24.0	9.5–24.0	1.5–3.0	4.0–7.0	0.90	0.03	0.03	0.10–0.30	0.75
ER218	0.10	16.0–18.0	8.0–9.0	0.75	7.0–9.0	4.5	0.03	0.03	0.08–0.18	0.75
ER219	0.05	19.0–21.5	5.5–7.0	0.75	8.0–1.0	1.0	0.03	0.03	0.10–0.30	0.75
ER240	0.05	17.0–19.0	4.0–6.0	0.75	10.5–13.5	1.0	0.03	0.03	0.10–0.30	0.75
ER307	0.14	19.5–22.0	8.0–10.7	0.5–1.5	3.3–4.75	0.3–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER308	0.08	19.5–22.0	9.0–11.0	0.75	1.0–2.5	0.3–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER308H	0.08	19.5–22.0	9.0–11.0	0.50	1.0–2.5	0.3–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER308L	0.03	19.5–22.0	9.0–11.0	0.75	1.0–2.5	0.3–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER308Mo	0.08	18.0–21.0	9.0–11.0	2.0–3.0	1.0–2.5	0.3–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER308Si	0.08	19.5–22.0	9.0–12.0	0.75	1.0–2.5	0.65–1.00	0.03	0.03	–	0.75
ER308LSi	0.03	19.5–22.0	9.0–11.0	0.75	1.0–2.5	0.65–1.00	0.03	0.03	–	0.75
ER309	0.12	23.0–25.0	9.0–11.0	0.75	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER309L	0.03	23.0–25.0	12.0–14.0	0.75	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER309Mo	0.12	23.0–25.0	12.0–14.0	2.0–3.0	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER309LMo	0.03	23.0–25.0	12.0–14.0	2.0–3.0	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER309Si	0.12	23.0–25.0	12.0–14.0	0.75	1.0–2.5	0.65–1.00	0.03	0.03	–	0.75
ER309LSi	0.03	23.0–25.0	12.0–14.0	0.75	1.0–2.5	0.65–1.00	0.03	0.03	–	0.75
ER310	0.15	25.0–28.0	20.0–22.5	0.75	1.0–2.5	0.65–1.00	0.03	0.03	–	0.75
ER312	0.15	28.0–32.0	8.0–10.5	0.75	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER316	0.08	18.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER316H	0.08	18.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER316L	0.03	18.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER316Si	0.08	18.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	1.0–2.5	0.65–1.00	0.03	0.03	–	0.75
ER316LSi	0.03	18.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	1.0–2.5	0.65–1.00	0.03	0.03	–	0.75
ER317	0.08	18.5–20.5	13.0–15.0	3.0–4.0	1.0–2.5	0.65–1.00	0.03	0.03	–	0.75
ER317L	0.03	18.5–20.5	13.0–15.0	3.0–4.0	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER318	0.08	18.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER320	0.07	19.0–21.0	32.0–36.0	2.0–3.0	2.5	0.60	0.03	0.03	–	3.0–4.0
ER320LR	0.025	19.0–21.0	32.0–36.0	2.0–3.0	1.5–2.0	0.15	0.015	0.03	–	3.0–4.0
ER321	0.08	18.5–20.5	9.0–10.5	0.75	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER330	0.25	15.0–17.0	34.0–37.0	0.75	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER347	0.08	19.0–21.5	9.0–11.0	0.75	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER347Si	0.08	19.0–21.5	9.0–11.0	0.75	1.0–2.5	0.65–1.00	0.03	0.03	–	0.75
ER383	0.025	26.5–28.5	30.0–33.0	3.2–4.2	1.0–2.5	0.50	0.02	0.03	–	0.70–1.5
ER385	0.025	19.52–21.5	24.0–25.0	4.2–6.2	1.0–2.5	0.50	0.03	0.03	–	1.2–2.0

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.27

- a = เป็นการกำหนดธาตุผสมหลักของลวดเชื่อม ส่วนธาตุอื่นที่ผสมรวมแล้วไม่เกิน 0.5%
- b = ค่าที่กำหนดค่าเดียว หมายถึง เป็นค่าสูงสุด



ST-309L

AWS A5.9 / ASME SFA5.9 ER309L
JIS Z3321 YS309L
EN ISO 14343-A-W 23 12L

Applications

TIG welding of low carbon 22%Cr-12%Ni steel and a dissimilar metals.
Clad side of 18%Cr-8%Ni clad steel.

Characteristics on Usage

ST-309L is a filler rod for TIG welding with pure Ar gas.
As the weld metal contains ferrite, its crack resistibility is excellent.
Furthermore, resistance to corrosion and heat is extremely good.

GTAW

Typical Chemical Composition of Wire (%)

C	Si	Mn	Cr	Ni
0.03	0.40	1.74	24.2	12.6

Typical Mechanical Properties of All-Weld Metal

TS MPa(lbs/in²)	EL (%)	CVN-Impact Value J(ft.lbs) 0℃ (32℉)
600 (87,000)	38	150 (110)

Typical Welding Conditions (DC-)

Size mm(in)	Currents A	Gas Flow (ℓ /min.)	Shielding gas
1.2 (.045) ~ 2.0 (5/64)	50 ~ 100	25	Ar
1.6 (1/16) ~ 3.2 (1/8)	100 ~ 200		
2.4 (3/32) ~ 3.2 (1/8)	200 ~ 300		
3.2 (1/8)	300 ~ 400		

Approval

ABS, DNV, LR, NK, BV , CCS

177

รูปที่ 7.22 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมเหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน AWS 5.9
ที่มา : HYUNDAI Welding Electrode, 2015

เหล็กกล้าไร้สนิมทุกชนิดมีส่วนผสมหลักที่มีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนคือธาตุโครเมียม (Cr) และต้องผสมอยู่ในปริมาณที่มากเพียงพอในการสร้างฟิล์มเพื่อป้องกันการกัดกร่อนที่จะเกิดขึ้น ส่วนธาตุผสมรองอื่น ๆ ผสมเข้าไปเพื่อที่จะมีหน้าที่ในการเสริมสมบัติพิเศษบางประการ ดังนั้น การพิจารณาเลือกใช้ลวดเชื่อมจะต้องตอบสนองหรือยังคงรักษาสมบัติพื้นฐานของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดนั้น ๆ ไว้ ซึ่งผู้ผลิตเองก็มักจะมีข้อแนะนำแก่ผู้เลือกใช้ลวดเชื่อมที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 7.28 ที่เป็นตัวอย่างคำแนะนำการเลือกลวดเชื่อมที่เหมาะสมกับโลหะหลักที่ต้องการเชื่อม ซึ่งโดยพื้นฐานการเลือกลวดเชื่อมจะเลือกลวดเชื่อมที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเดียวกัน เช่น กลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมซีรีย์ 300 ก็ต้องเลือกลวดเชื่อมกลุ่มที่ขึ้นต้นรหัส 3XX เป็นต้น ด้วยเหตุผลเพราะว่าพื้นฐานส่วนผสมหลักจะเหมือนกัน





(ก) ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดตรง ER 316L **(ข)** ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดม้วน ER 316L

รูปที่ 7.23 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมเหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน AWS

ที่มา : Lincoln Electric Blue Max, 2018

ตารางที่ 7.28 คำแนะนำในการเลือกใช้ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมชนิดเหล็กกล้าไร้สนิม

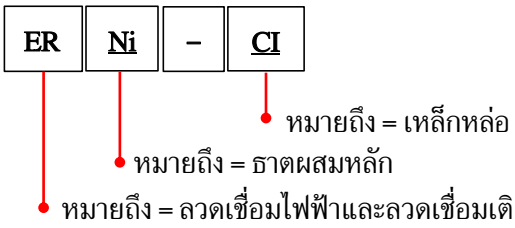
ที่มา : ThaiNox Stainless steel คู่มือเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมสเตนเลส, 2016

เกรดโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steels)	เกรดลวดเชื่อม (Filler electrode)
Austenitic stainless steel	
304/304L	308/308L
308	308
309/309S	308
310/310S	310
316/316L	316/316L
321/347	321/347/308
Ferritic stainless steel	
409/409L	430/409/409L/308L/309LSi
430	430/308L/309L
439	430/430Ti
Martensitic stainless steel	
403	410/309
410	410/309
414	410/309
420	410/309
Duplex stainless steel	
2205	2209

1.3) AWS A5.15/A5.15:R2016 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมของโลหะเหล็กหล่อ (Specification for Wire Electrodes and Rods for Cast Iron) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้

AWS A5.15/A5.15:R2016 หมายถึง ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมสำหรับเชื่อมโลหะเหล็กหล่อ

R2016 หมายถึง ปีที่กำหนดปรับปรุงมาตรฐาน 2016



ลวดเชื่อมเส้นตัน (Rod) สำหรับใช้เชื่อมโลหะเหล็กหล่อมีจำนวนที่ผลิตออกมาไม่มากชนิด เพราะโดยปกติแล้วเหล็กหล่อก็ไม่เป็นที่นิยมทำการเชื่อม จะมีไว้สำหรับงานเชื่อมซ่อมแซมเป็นสำคัญ โดยมีการผลิตออกมามีทั้งที่เป็นแบบเส้นลวดตรง (Filler rod) ที่ใช้กับการเชื่อมทิกหรือเชื่อมพลาสมา และเป็นแบบม้วน (Filler wire) ที่ใช้กับการเชื่อมมิก/แม็ก ดังแสดงเป็นตัวอย่างของลวดเชื่อม ERNi-CI ของทั้งสองแบบในรูปที่ 7.24 ส่วนผสมทางเคมีจะมีธาตุนิกเกิลเป็นตัวผสมหลัก ดังแสดงชนิดของลวดเชื่อมเหล็กหล่อและส่วนผสมทางเคมีในตารางที่ 7.29 และข้อแนะนำของผู้ผลิตในรูปที่ 7.25

ตารางที่ 7.29 ชนิดและส่วนผสมเคมีลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมชนิดเหล็กหล่อ มาตรฐาน AWS A5.15

ที่มา : AWS A5.15/A5.15, 2016

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)[a,b,c]									
	C	Si	Mn	P	S	Ni[d]	Fe	Cu[e]	Al	Total
ERNi-CI	1.0	0.75	2.5	-	0.03	90min	4.0	4.0	-	1.0
ERNiFeMn-CI	0.5	1.0	10-14	-	0.03	35-45	Rem	2.5	1.0	1.0

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.29

- a = การวิเคราะห์ธาตุในแกนลวดและเนื้อเชื่อม สำหรับธาตุอื่น ๆ จะรวมอยู่ในช่องรวม (Total)
- b = ค่าที่แสดงค่าเดียวเป็นค่าสูงสุด
- c = "Rem" หมายถึง ปริมาณที่เหลือจนครบ 100%
- d = ธาตุนิกเกิลรวมกับธาตุโคบอลต์
- e = ธาตุทองแดงรวมกับธาตุเงิน

การเลือกใช้ลวดเชื่อมเหล็กหล่อไปใช้งาน

ERNi-CI (นิกเกิล) เป็นลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของธาตุนิกเกิลสูงถึง 99% ไม่มีธาตุลดออกซิเจน ใช้ได้กับการเชื่อมเหล็กหล่อทุกชนิด เนื้อเชื่อมที่ได้จะผสมผสานเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกับโลหะที่เชื่อม ดังนั้นแนวเชื่อมจึงสามารถทำการตกแต่งด้วยเครื่องจักรได้

ERNiFeMn–CI (นิกเกิล–เหล็ก–แมงกานีส) เป็นลวดเชื่อมที่เหมาะกับการเชื่อมเหล็กหล่อที่มีความแข็งแรงสูง จำพวกเหล็กหล่อกราไฟต์กลม แนวเชื่อมไม่สามารถทำการตกแต่งด้วยเครื่องจักรได้





(ก) ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดตรง ERNi–CI **(ข)** ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดม้วน Nife 55

รูปที่ 7.24 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมเหล็กหล่อ มาตรฐาน AWS

ที่มา : Welding Materials Sales, 2019

GMAW and GTAW For Cast Iron

MC-Ni100M (MIG)
MC-Ni100R (TIG)

WELDING POSITIONS :

DESCRIPTION AND APPLICATIONS

High strength Fe-Ni Alloy for welding of cast iron and for joining cast iron to steel. Also suitable for welding ductile iron of which strength is required.

NOTES ON USAGE

1) For GTAW process, use DC-EN, Pure Argon.
2) For GMAW process, Spray Transfer or Short Circuit Transfer mode can be used.
3) Pure Argon, 98% Argon +2% O_2 and 80% Argon + 20% O_2.

WIRE ANALYSIS (Wt%)							
C	Si	Mn	P	Cu	Ni	Fe	Special Element
0.01	0.46	0.4	0.010	Max 0.2	99.2	0.2	Max 0.5

TYPICAL ALL WELD METAL MECHANICAL PROPERTIES •			
YIELD STRESS	TENSILE STRENGTH	ELONGATION	CVN IMPACT VALUES
-	600 N/mm^2	38%	-

• in “as welded” condition.

PRODUCT NAME	SIZE (mm)	PACKAGING (Kg)
MC-Ni100M (MIG)	1.2	12.5
MC-Ni100R (TIG)	1.6/2.4	5

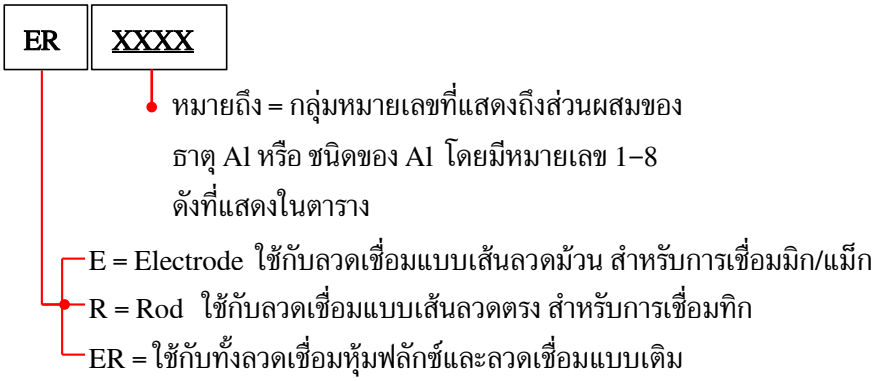
รูปที่ 7.25 ตัวอย่างข้อมูลแนะนำผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กหล่อ

ที่มา : HYUNDAI Welding Electrode, 2015

1.4) AWS A5.10/A5.10M:2017 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมของโลหะอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม (Welding Consumables−Wire Electrodes, Wires and Rods for Welding of Aluminum and Aluminum Alloy−Classification) ที่เป็นลวดเชื่อมเติมที่ใช้สำหรับขบวนการเชื่อมมิก/แม็ก ขบวนการเชื่อมทิก และขบวนการเชื่อมพลาสมา ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้

AWS A5.10/A5.10 หมายถึง ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมสำหรับเชื่อมโลหะอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม

R2017 หมายถึง ปีที่กำหนดปรับปรุงมาตรฐาน 2017



สัญลักษณ์	ธาตุที่ผสมหลัก
1xxx	อลูมิเนียมบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99%
2xxx	ทองแดง
3xxx	แมงกานีส
4xxx	ซิลิคอน
5xxx	แมกนีเซียม
6xxx	แมกนีเซียมและซิลิคอน
7xxx	สังกะสี
8xxx	ธาตุอื่น ๆ

ลวดเชื่อมโลหะอลูมิเนียมที่เป็นชนิดลวดเติม มีการใช้งานกันมากที่สามารถใช้เชื่อมได้ทั้งโลหะอลูมิเนียมบริสุทธิ์ และอลูมิเนียมผสม ผู้ผลิตจึงมีการผลิตลวดเชื่อมออกมาให้ตรงกับชนิดของอลูมิเนียมโลหะหลัก ดังแสดงในตารางที่ 7.30 จึงไม่ต้องยุ่งยากในการพิจารณาเลือกใช้ ซึ่งโดยหลักการเลือกลวดเชื่อมก็จะเลือกชนิดที่เป็นเกรดเดียวกัน จะทำให้ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมและเนื้อเชื่อมที่ได้เป็นเนื้อเดียวกันได้ดี เช่น อลูมิเนียมเกรด 1100 สามารถเลือกใช้ลวดเชื่อมได้ทั้ง ER1100 และ R1100 เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ช่างเชื่อมก็สามารถเลือกลวดเชื่อมที่เหมาะสมกับโลหะอลูมิเนียมในลักษณะงานที่ต้องการสมบัติพิเศษบางอย่างได้ และก็ยังมีข้อห้ามในการเลือกใช้ลวดเชื่อมบางเกรดกับโลหะอลูมิเนียมบางเกรด เช่น ไม่ควรใช้ลวดเชื่อม ER4043 กับงานอลูมิเนียมที่ต้องนำไปชุบอโนไดซ์ เพราะธาตุซิลิกอนจะทำให้สีบริเวณที่เป็นแนวเชื่อมเข้มกว่าบริเวณอื่นบนผิวของชิ้นงานอลูมิเนียม

ตารางที่ 7.30 ชนิดและส่วนผสมเคมีลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม

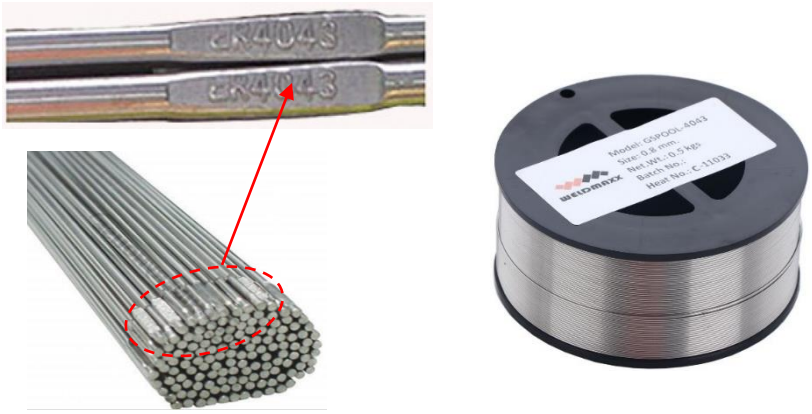
ที่มา : AWS A5.10/A5.10, 2017

ประเภทลวดเชื่อม[b]	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)[a,b]										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Each[d]	Total	Al
ER1100	c	c	0.05–0.2	0.05	–	–	0.1	–	0.5	0.15	99mim[e]
R1100	c	c	0.05–0.2	0.05	–	–	0.1	–	0.5	0.15	99min[e]
ER1188[f]	0.06	0.06	0.005	0.01	0.01	–	0.03	0.1	0.01	–	99.9min[e]
R1188[g]	0.06	0.06	0.005	0.01	0.01	–	0.03	0.1	0.01	–	99.9min[e]
ER2319[f]	0.02	0.3	5.8–6.8	0.2–0.4	0.02	–	0.10	0.1–0.2	0.5	0.15	Rema.
R2319[f]	0.02	0.3	5.8–6.8	0.2–0.4	0.02	–	0.10	0.1–0.2	0.5	0.15	Rema.
ER4009	4.5–5.5	0.02	1.0–1.5	0.1	0.45–0.6	–	0.10	0.2	0.5	0.15	Rema.
R4009	4.5–5.5	0.02	1.0–1.5	0.1	0.45–0.6	–	0.10	0.2	0.5	0.15	Rema.
ER4010	6.5–7.5	0.02	0.02	0.1	0.3–0.45	–	0.10	0.2	0.5	0.15	Rema.
R4010	6.5–7.5	0.02	0.02	0.1	0.3–0.45	–	0.10	0.2	0.5	0.15	Rema.
R4011	6.5–7.5	0.02	1.02	0.1	0.45–0.7	–	0.10	0.4–0.2	0.5	0.15	Rema.
ER4043	4.5–6.0	0.8	0.3	0.05	0.05	–	0.10	0.2	0.5	0.15	Rema.
R4043	4.5–6.0	0.8	0.3	0.05	0.05	–	0.10	0.2	0.5	0.15	Rema.
ER4047	1.0–13.0	0.8	0.3	0.15	0.1	–	0.20	–	0.5	0.15	Rema.
R4047	1.0–13.0	0.8	0.3	0.15	0.1	–	0.20	–	0.5	0.15	Rema.
ER4145	9.3–10.7	0.8	3.3–4.7	0.15	0.15	0.15	0.20	–	0.5	0.15	Rema.
R4145	9.3–10.7	0.8	3.3–4.7	0.15	0.15	0.15	0.20	–	0.5	0.15	Rema.
ER4643	3.6–4.6	0.8	0.1	0.05	0.1–0.3	–	0.10	0.15	0.5	0.15	Rema.
R4643	3.6–4.6	0.8	0.1	0.05	0.1–0.3	–	0.10	0.15	0.5	0.15	Rema.
ER5183	0.4	0.4	0.1	0.5–1.0	4.3–5.2	0.05–0.25	0.25	0.15	0.5	0.15	Rema.
R5183	0.4	0.4	0.1	0.5–1.0	4.3–5.2	0.05–0.25	0.25	0.06–0.2	0.5	0.15	Rema.
ER5356	0.25	0.4	0.1	0.05–0.2	4.5–5.5	0.05–0.2	0.10	0.06–0.2	0.5	0.15	Rema.
R5356	0..25	0.4	0.1	0.05–0.2	4.5–5.5	0.05–0.2	0.10	0.05–0.2	0.5	0.15	Rema.
ER5554	0.25	0.4	0.1	0.5–1.0	2.4–3.0	0.05–0.2	0.25	0.05–0.2	0.5	0.15	Rema.
R5554	0.25	0.4	0.1	0.5–1.0	2.4–3.0	0.05–0.2	0.25	0.05–0.2	0.5	0.15	Rema.
ER5556	0.25	0.4	0.1	0.5–1.0	4.7–5.5	0.05–0.2	0.25	0.05–0.2	0.5	0.15	Rema.
R5556	0.25	0.4	0.1	0.5–1.0	4.7–5.5	0.05–0.2	0.25	0.05–0.2	0.5	0.15	Rema.
ER5654	i	h	0.05	0.01	3.1–3.9	0.15–0.35	0.2	0.05–0.15	0.5	0.15	Rema.
R5654	i	h	0.05	0.01	3.1–3.9	0.15–0.35	0.2	0.05–0.15	0.5	0.15	Rema.

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.30

- a = โลหะผสมหลักที่กำหนดตามตาราง ส่วนผสมอื่น ๆ จะไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ตามตาราง
- b = ค่าที่แสดงค่าเดียวเป็นค่าสูงสุด ยกเว้นนอกจากกำหนดเป็นอย่างอื่น
- c = ปริมาณซิลิกอนรวมกับธาตุเหล็กต้องไม่เกิน 0.95%
- d = ธาตุแบริลเลียมต้องไม่เกิน0.0008%
- e = เป็นปริมาณอลูมิเนียมผสมสำหรับลวดเชื่อมอลูมิเนียมไม่ผสม
- f = วาเนเนียมผสมสูงสุด 0.05% แกลเลียมผสมสูงสุด 0.03%
- g = วาเนเดียมผสมอยู่ระหว่าง 0.05–0.15% และเซอร์โคเนียมผสมอยู่ 0.1–0.25%
- h = ซิลิกอนรวมกับเหล็กไม่เกิน 0.45%
- i = ดีบุกผสมไม่เกิน 0.05%

ลักษณะของลวดเชื่อมโลหะอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสมชนิดที่เป็นเส้นหรือแท่งตันจะมีรหัสหรือโค๊ดแสดงอยู่ที่ปลายของเส้นลวดดังแสดงในรูปที่ 7.26 (ก) ส่วนชนิดที่เป็นม้วนก็จะระบุไว้ที่ล้อม้วนลวดเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 7.26 (ข)



(ก) ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดตรง R4043 **(ข)** ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดม้วน ER4043

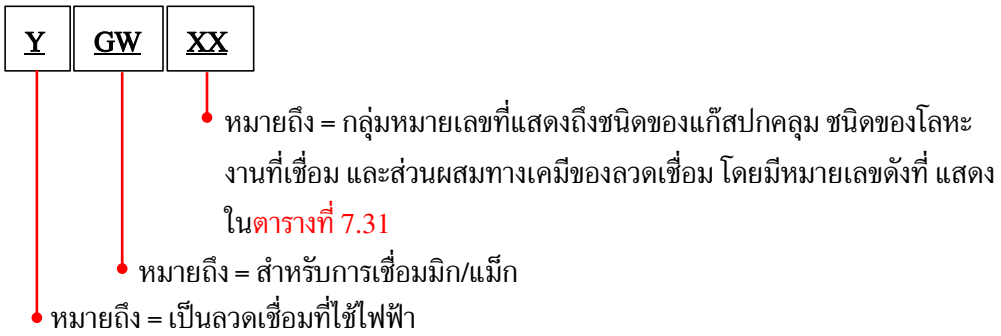
รูปที่ 7.26 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะอลูมิเนียมและอลุมิเนียมผสม

ที่มา : WELDMAXX Welding Electrode, 2018

2. ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมมาตรฐาน JIS (Japanese Industrial Standards)

ลวดเชื่อมสำหรับขบวนการเชื่อมที่ใช้แก๊สจากแหล่งภายนอกเข้ามาปกคลุมหรือที่นิยมเรียกกันว่าลวดเชื่อมเปลือยด้วยเพราะไม่มีฟลักซ์หุ้ม ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (JIS) ได้สร้างข้อกำหนดขึ้นเพื่อเป็นมาตฐานคุณภาพของงานเชื่อมและความเข้าใจที่ตรงกันในการสื่อสารทางภาษาวิศวกรรมการเชื่อม โดยมีรหัสหรือโค๊ดที่กำหนดไว้ดังนี้

2.1) JIS Z 3312 :2018 ข้อกำหนดมาตรฐานลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมของโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน (เหล็กกล้าละมุน) เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงและเหล็กกล้าสำหรับงานอุณหภูมิต่ำ ที่ใช้สำหรับขบวนการเชื่อมมิก/แม็ก (Solid wires for MAG and MIG welding of mild steel,high strength steel and low temperature service steel) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้



ข้อกำหนดตามมาตรฐาน JIS ก็ได้สร้างรหัสของตัวเลขและตัวอักษรเพื่อระบุถึงตัวตนของลวดเชื่อมแต่ละชนิด ซึ่งมีความหมายตามที่แสดงไว้ข้างต้น โดยชุดตัวเลขท้ายจะใช้ระบุถึงชนิดของแก๊สปกคลุม ชนิดของโลหะงานที่เชื่อม ดังแสดงในตารางที่ 7.31 และส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมดังแสดงในตารางที่ 7.32 ซึ่งมาตรฐานจะกำหนดไว้เป็นพื้นฐานของการเลือกชนิดของลวดเชื่อมให้เหมาะสมกับโลหะงานที่จะเชื่อม ที่รวมถึงการลือกใช้แก๊สปกคลุมที่ถูกต้อง แต่ในบางกรณีอาจมีเงื่อนไขของการเชื่อมที่ต้องการสมบัติพิเศษบางอย่างของเนื้อเชื่อม ซึ่งช่างเชื่อมหรือวิศวกรงานเชื่อมก็สามารถใช้ข้อกำหนดของมาตรฐานนี้เป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกใช้ลวดเชื่อมได้ หรือกรณีของแก๊สปกคลุมก็สามารถสร้างข้อตกลงจากผู้ผลิตให้ผลิตแก๊สปกคลุมชนิดพิเศษขึ้นได้ตามต้องการ

จากข้อกำหนดตามมาตรฐานลวดเชื่อมข้างต้นจะรองรับเฉพาะขบวนการเชื่อม MIG/MAG นั้นก็หมายถึงเป็นลวดเชื่อมแบบเส้นลวดม้วน (Filler wire) ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 7.27 และผู้ผลิตก็ยังมีข้อแนะนำถึงรายละเอียดด้านต่าง ๆ ของลวดเชื่อม เช่น การเทียบรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานต่าง ๆ ส่วงนผสมทางเคมี สมบัติทางกล กระแสไฟเชื่อม รวมถึงแก๊สปกคลุม ดังตัวอย่างลวดเชื่อมชนิดที่ใช้เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน (ละมุน) ความเค้นแรงดึง 490 N/mm^2 ลวดเชื่อม YGW11แสดงในรูปที่ 7.28

ตารางที่ 7.31 ชนิดลวดและการใช้งานของลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง สำหรับเชื่อมมิก/แม็ก ตามมาตรฐาน JIS Z 3312

ที่มา : JIS Z 3312:2018, 2018

ประเภทลวดเชื่อม	ชนิดแก๊สปกคลุม[a]	ชนิดของโลหะงานเชื่อม
YGW11 YGW12 YGW13 YGW14	คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ที่ระดับ 490 N/mm^2
YGW15 YGW16 YGW17	แก๊สผสมอาร์กอน 80% และคาร์บอนไดออกไซด์ 20% ($80Ar+20CO_2$)	เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ที่ระดับ 590 N/mm^2
YGW21 YGW22	คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ที่ระดับ 490 N/mm^2
YGW23 YGW24	แก๊สผสมอาร์กอน 80% และคาร์บอนไดออกไซด์ 20% ($80Ar+20CO_2$)	เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ที่ระดับ 590 N/mm^2

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.31

- a = กรณีที่มีการเลือกใช้แก๊สปกคลุมนอกไปจากนี้จะหมายถึงการตกลงกันของผู้ใช้และผู้ผลิต

Gas Metal Arc Welding

ZO-26

For mild steel and 490MPa tensil strength steel

Classifications

EN ISO 14341-A:2008	: G 46 2 C G0	AWS A5.18-05	: ER70S-G
	: G 46 2 M G0	KS D 7025	: YGW11
EN ISO 14341-B:2008	: G 49A 2 C G11	JIS Z 3312	: YGW11
	: G 49A 2 M G11		

Description

- For butt and fillet welding of ship-building, bridges, structural steel, steel buildings, machineries and vehicles
- Excellent defect resistant on high heat input
- Possible to acheive higher productivity due to low spatter and deep penetration
- Beautiful weld apperance on flat or horizontal welding position

Typical chemical composition of wire (%)

C	Si	Mn	P	S	Ti
0.06	0.80	1.53	0.014	0.010	0.18

Typical mechanical properties of all-weld metal

	Y.S (MPa)	T.S (MPa)	El. (%)	IV (J) -20℃	Remarks
AWS A5.18	min. 400	min. 480	min. 22		
EN ISO 14341-B	min. 390	490~670	min. 18	≥ 27	CO_2
Example	490	570	30	110	CO_2
	520	590	31	120	Mix

Operating data

Dia.(mm)		1.2	1.4
Current (Amp.)	Flat (PA/1G)	100 ~ 350	140 ~ 400
	Vertical (PF/3G)	70 ~ 200	100 ~ 250
	Overhead (PE/4G)	70 ~ 200	100 ~ 250

Polarity and Shielding gas

- DCEP (DC+)
- CO_2 : 100% CO_2
  Mix : Ar+20% CO_2 (15~25ℓ /min.)

Approvals

Shielding gas	ABS	BV	DNV	GL	LR	KR	NK
CO_2	3YSA	SA3YM	ⅢYMS	3YS	3YS H15	RSW53G	KSW53G

* Others : KS, JIS

160 KISWEL

รูปที่ 7.28 ข้อแนะนำลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน JIS Z 3312 ชนิด YGW11

ที่มา : KISWEL Welding Electrode, 2013

ตารางที่ 7.32 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง สำหรับเชื่อมมิก/แม็ก ตามมาตรฐาน JIS Z 3312

ที่มา : JIS Z 3312:2018, 2018

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)										
	C	Si	Mn	P	S	Cu[a]	Ni	Cr	Mo	Al	Ti+Zr
YGW11	0.15	0.55–1.10	1.4–1.9	0.03	0.03	0.5	–	–	–	0.1	0.3
YGW12	0.15	0.55–1.10	1.25–1.9	0.03	0.03	0.5	–	–	–	–	–
YGW13	0.15	0.55–1.10	1.3–1.9	0.03	0.03	0.5	–	–	–	0.1	0.3
YGW14	0.15	–	–	0.03	0.03	0.5	–	–	–	–	–
YGW15	0.15	0.40–1.00	1.0–1.6	0.03	0.03	0.5	–	–	–	0.1	0.3
YGW16	0.15	0.40–1.00	0.8–1.6	0.03	0.03	0.5	–	–	–	–	–
YGW17	0.15	–	–	0.03	0.03	0.5	–	–	–		–
YGW21	0.15	0.5–1.1	1.3–2.6	0.025	0.025	0.5	–	–	0.6	0.1	0.3
YGW22	0.15	–	–	0.025	0.025	0.5	–	–	–	–	–
YGW23	0.15	0.3–1.0	0.9–2.3	0.025	0.025	0.5	1.8	0.7	0.6	–	0.3
YGW24	0.15	–	–	0.025	0.025	0.5	–	–	–	–	–

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.32

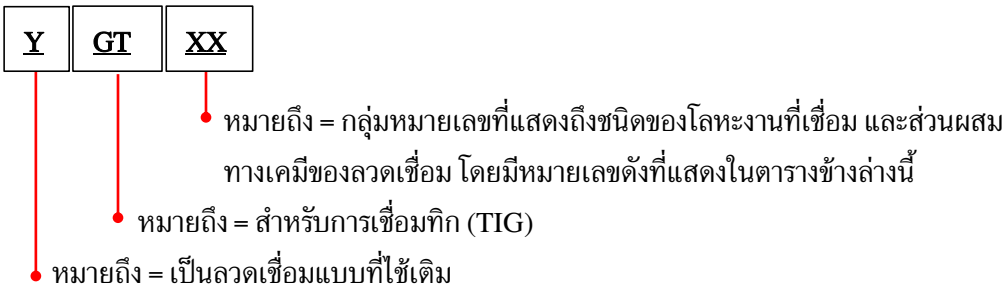
- a = โลหะทองแดงที่เคลือบลวดเชื่อมจะรวมอยู่ในปริมาณส่วนผสมนี้ด้วย



รูปที่ 7.27 ผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน JIS Z 3312 ชนิด YGW11

ที่มา : KISWEL Welding Electrode, 2013

2.2) JIS Z 3316:2017 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมของโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน (เหล็กกล้าละมุน) เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานอุณหภูมิต่ำ ที่ใช้สำหรับขบวนการเชื่อมทิก (Solid wires and rods for TIG welding of mild steel, high strength steel and low temperature service steel) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้



มาตรฐานลวดเชื่อม JIS Z 3316 นี้เป็นข้อกำหนดรหัสหรือโค๊ดที่ใช้ระบุถึงลวดเชื่อมแบบเส้นตันหรือแท่งตัน (Filler rod) ที่ใช้สำหรับขบวนการเชื่อม GTAW หรือ การเชื่อม TIG โดยกำหนดชุดตัวเลขท้ายเป็นตัวบ่งชี้ถึงชนิดของลวดเชื่อมที่เหมาะสมกับโลหะงานที่ต้องการเชื่อม ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7.33 และส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมแต่ละชนิด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7.34 โดยผู้ผลิตจะระบุรหัสหรือโค๊ดไว้ที่ปลายของเส้นลวดังแสดงตัวอย่างลักษณะรูปแบบของเส้นลวดในรูปที่ 7.29 พร้อมกับข้อนำแนะเพื่อการพิจารณาเลือกใช้ดังตัวอย่างลวดเชื่อม ชนิด YGT 50 ในรูปที่ 7.30

ตารางที่ 7.33 ชนิดและการใช้งานของลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง สำหรับเชื่อมทิก ตามมาตรฐาน JIS Z 3316

ที่มา : JIS Z 3316:2017, 2017

ประเภทลวดเชื่อม	ชนิดของโลหะงานเชื่อม
YGT 50	เหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน (เหล็กกล้าละมุน) และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง
YGT 60	
YGT 62	
YGT 70	
YGT 80	
YGT M	เหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าโมลิบดินัม และเหล็กกล้าโครเมียม–โมลิดินัม
YGT ML	
YGT 1 CM	
YGT 1 CML	
YGT 2 CM	
YGT 2 CML	
YGT 3 CM	
YGT 5 CM	

ตารางที่ 7.34 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงสำหรับเชื่อมทิก ตามมาตรฐาน JIS Z 3316

ที่มา : JIS Z 3316:2017, 2017

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)										
	C	Si	Mn	P	S	Cu[a]	Ni	Cr	Mo	Al	Ti+Zr
YGT 50	0.15	1.0	1.9	0.03	0.03	0.5	–	–	–	0.15	0.27
YGT 60	0.15	1.0	2.0	0.025	0.025	0.5	1.8	0.7	0.65	–	0.2
YGT 62	0.15	1.0	2.25	0.025	0.025	0.5	1.8	0.7	0.65	–	0.2
YGT 70	0.15	0.8	2.25	0.025	0.025	0.5	2.6	0.6	0.65	–	
YGT 80	0.15	0.8	2.25	0.025	0.025	0.5	3.8	0.6	0.9	–	
YGT M	0.05–0.15	0.8	2.0	0.025	0.025	0.4	–	–	0.4–0.65	–	
YGT ML	0.05–0.15	0.8	1.6	0.025	0.025	0.4	–	–	0.4–0.65	–	
YGT 1 CM	0.05–0.15	0.8	1.6	0.025	0.025	0.4	–	1–1.5	0.4–0.65	–	
YGT 1 CML	0.05	0.8	1.6	0.025	0.025	0.4	–	1–1.5	0.4–0.65	–	
YGT 2 CM	0.05–0.15	0.8	1.6	0.025	0.025	0.4	–	2–2.7	0.9–1.2	–	
YGT 2 CML	0.05	0.8	1.6	0.025	0.025	0.4	–	2–2.7	0.9–1.2	–	
YGT 3 CM	0.15	0.8	1.6	0.025	0.025	0.4	–	2.7–3.5	0.9–1.2	–	
YGT 5 CM	0.15	0.8	1.6	0.025	0.025	0.4	–	4–6	0.45–0.65	–	

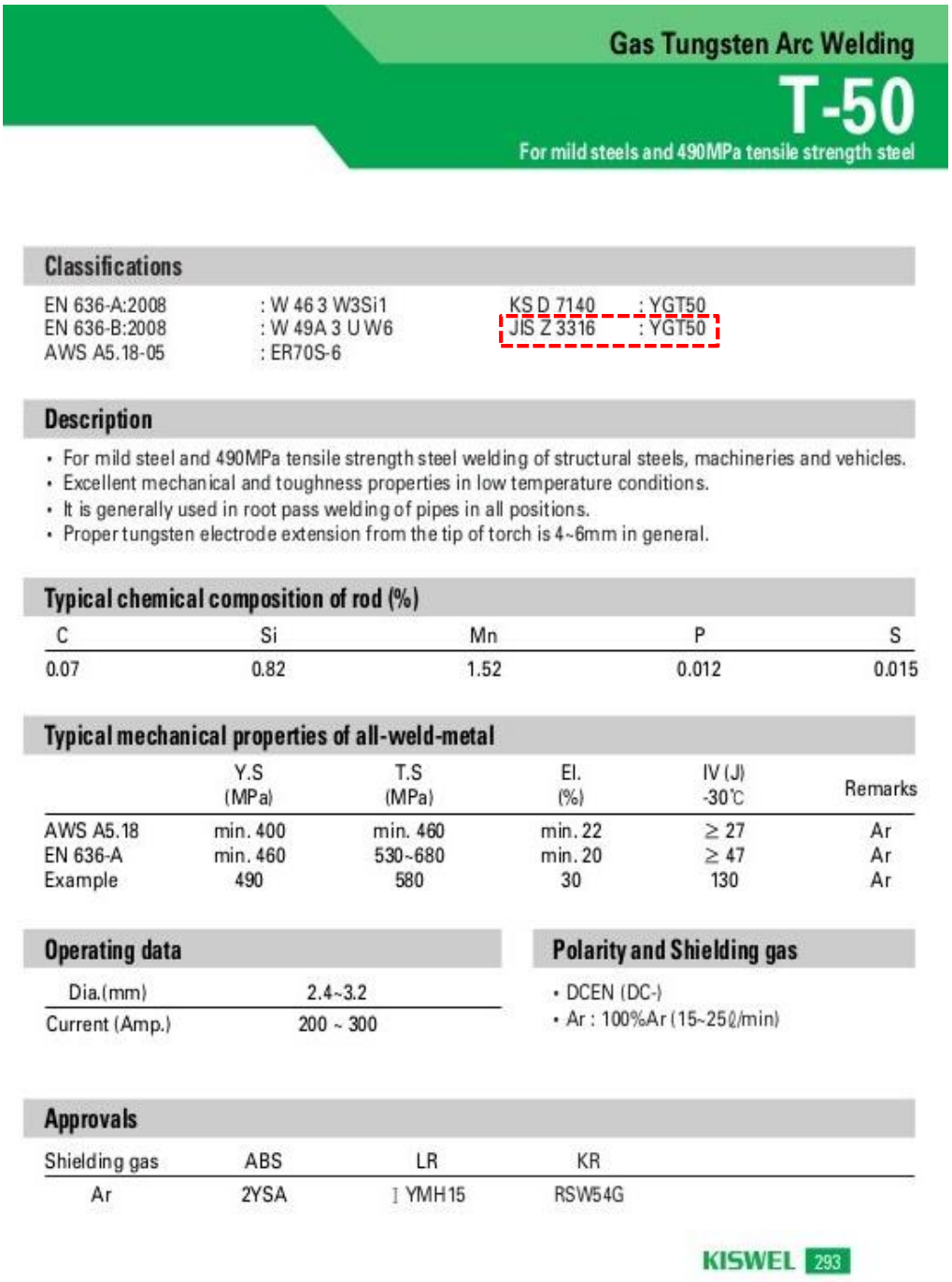
หมายเหตุ ของตารางที่ 7.34

- a = โลหะทองแดงที่เคลือบลวดเชื่อมจะรวมอยู่ในปริมาณส่วนผสมนี้ด้วย



รูปที่ 7.29 ข้อแนะนำลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน JIS Z 3316 ชนิด YGT50

ที่มา : KISWEL Welding Electrode, 2013



Gas Tungsten Arc Welding

T-50

For mild steels and 490MPa tensile strength steel

Classifications

EN 636-A:2008	: W 46 3 W3Si1	KS D 7140	: YGT50
EN 636-B:2008	: W 49A 3 U W6	JIS Z 3316	: YGT50
AWS A5.18-05	: ER70S-6		

Description

- For mild steel and 490MPa tensile strength steel welding of structural steels, machineries and vehicles.
- Excellent mechanical and toughness properties in low temperature conditions.
- It is generally used in root pass welding of pipes in all positions.
- Proper tungsten electrode extension from the tip of torch is 4~6mm in general.

Typical chemical composition of rod (%)

C	Si	Mn	P	S
0.07	0.82	1.52	0.012	0.015

Typical mechanical properties of all-weld-metal

	Y.S (MPa)	T.S (MPa)	El. (%)	IV (J) -30℃	Remarks
AWS A5.18	min. 400	min. 460	min. 22	≥ 27	Ar
EN 636-A	min. 460	530~680	min. 20	≥ 47	Ar
Example	490	580	30	130	Ar

Operating data

Dia.(mm)	2.4~3.2
Current (Amp.)	200 ~ 300

Polarity and Shielding gas

- DCEN (DC-)
- Ar : 100%Ar (15~25ℓ/min)

Approvals

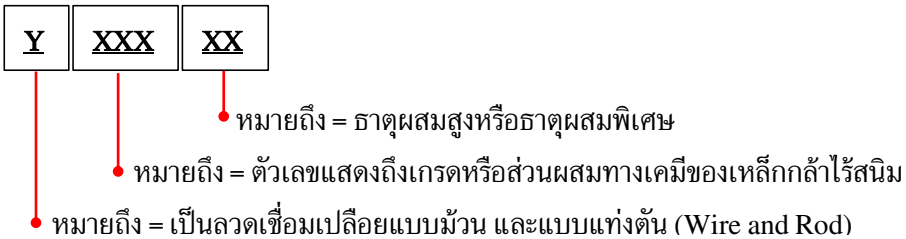
Shielding gas	ABS	LR	KR
Ar	2YSA	YMH15	RSW54G

KISWEL 293

รูปที่ 7.30 ข้อแนะนำลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน JIS Z 3316 ชนิด YGT50

ที่มา : KISWEL Welding Electrode, 2013

2.3) JIS Z 3321:2013 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมหรือลวดเชื่อมเปลือยของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel rods, wires and strip electrodes for welding) ที่ใช้เป็นลวดเชื่อมเติมสำหรับขบวนการเชื่อมทิก (GTAW) การเชื่อมมิก (GMAW) และการเชื่อมพลาสมา (PAW) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้



มาตรฐานลวดเชื่อมเปลือยของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน JIS 3321 ได้มีข้อกำหนดให้สามารถใช้ได้กับลวดเชื่อมทั้งแบบชนิดที่เป็นเส้นแท่งตัน (Rod) เส้นลวดม้วนตัน (Wire) และแบบแผ่นสติป ดังแสดงในรูปที่ 7.31ซึ่งแสดงเป็นตัวอย่างลวดเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดรหัสหรือโค๊ด Y 308 โดยมีอีกหลายชนิดพร้อมกับแสดงส่วนผสมทางเคมีของลวดชื่อมในตารางที่ 7.35 เป็นที่น่าสังเกตว่ามาตรฐาน JIS มีการกำหนดรหัสด้วยสี (Colour) บนลวดเชื่อม เช่น Y 312 กำหนดเป็นสีเขียว เป็นต้น ที่ซึ่งแตกต่างจากมาตรฐานอื่น ๆ และสีอื่น ๆ ตามชนิดของลวดเชื่อมดังแสดงในตารางที่ 7.35



(ก) ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดตรง Y308 **(ข)** ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดม้วน Y 308



(ค) ลวดเชื่อมแบบแผ่นสติป Y 308

รูปที่ 7.31 ตัวอย่างลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม JIS Z 3321 ชนิด Y 308

ที่มา : UNIMIG Welding Supplies, 2012

ตารางที่ 7.35 ชนิดและส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม ตามมาตรฐาน JIS Z 3321:2013 *ที่มา : JIS Z 3321:2013, 2013*

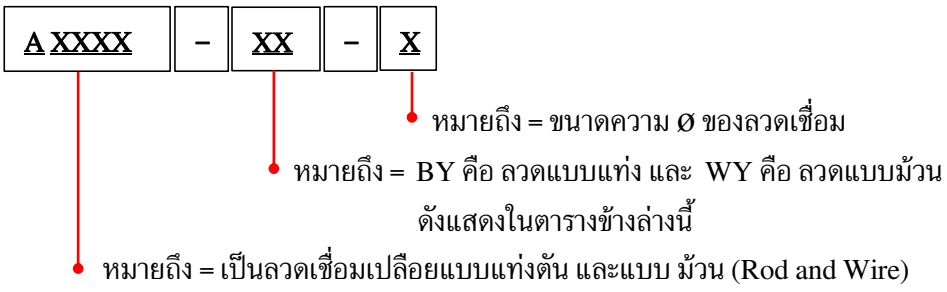
ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)[a]									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	อื่น ๆ	รหัสสี
Y 308[b]	0.08	0.65	1–2.5	0.03	0.03	9–11	19.5–22	–	–	เหลือง
Y 308 L[b]	0.03	0.65	1–2.5	0.03	0.03	9–11	19.5–22	–	–	แดง
Y 309[b]	0.12	0.65	1–2.5	0.03	0.03	12–14	23–25	–	–	ดำ
Y 309 L	0.03	0.65	1–2.5	0.03	0.03	12–14	23–25	–	–	เขียวอ่อน
Y 309 Mo	0.12	0.65	1–2.5	0.03	0.03	12–14	23–25	2–3	–	เงิน
Y 310	0.15	0.65	1–2.5	0.03	0.03	20–22.5	25–28	–	–	ทอง
Y 310 S	0.08	0.65	1–2.5	0.03	0.03	20–22.5	25–28	–	–	ชมพู
Y 312	0.15	0.65	1–2.5	0.03	0.03	8–10.5	28–32	–	–	เขียว
Y 16–8–2	0.1	0.65	1–2.5	0.03	0.03	7.5–9.5	14.5–16.5	1–2	–	ขาว
Y 316[b]	0.08	0.65	1–2.5	0.03	0.03	11–14	18.–20	2–3	–	ขาว
Y 316 L[b]	0.08	0.65	1–2.5	0.03	0.03	11–14	18–20	2–3	–	เขียว
Y 316 JIL	0.08	0.65	1–2.5	0.03	0.03	11–14	18–20	2–3	Cu 1–2.5	เทา
Y 317	0.08	0.65	1–2.5	0.03	0.03	13–15	18–20.5	3–4	–	น้ำตาลเข้ม
Y 317 L	0.03	0.65	1–2.5	0.03	0.03	13–15	18–20.5	3–4	–	น้ำตาลเข้ม
Y 321	0.08	0.65	1–2.5	0.03	0.03	9–10.5	18–20.5	–	Ti 9xC to 1.0	เขียวอ่อน
Y 347[b]	0.08	0.65	1–2.5	0.03	0.03	9–11	19–21.5	–	Nb 10xC to 1.0	น้ำเงิน
Y 347 L	0.03	0.65	1–2.5	0.03	0.03	9–11	19–21.5	–	Nb 10xC to 1.0	น้ำเงิน
Y 410	0.12	0.5	0.6	0.03	0.03	0.6	11.5–13.5	0.75	–	ม่วง
Y 430	0.1	0.5	0.6	0.03	0.03	0.6	13.5–17	–	–	น้ำตาลอ่อน

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.35

- a = ค่าที่แสดงค่าเดียว เป็นค่าที่สูงสุด
- b = ลวดเชื่อมที่สามารถใช้เป็นมาตรฐานซิลิกอนสูงได้ โดยซิลิกอนผสมได้สูงถึง 0.65–1.00%

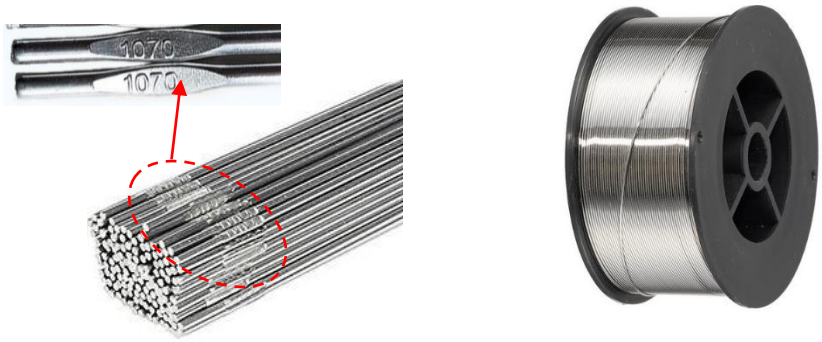
สำหรับลวดเชื่อมแบบแผ่นสติป (Strip electrode) จะผลิตออกมาใช้งานไม่มากชนิดเนื่องจากเป็นลวดเชื่อมที่ใช้กับขบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (SAW) ขบวนการเชื่อมอิเลคโทรสแลก (ESW) และขบวนการเชื่อมแบบไฮบริด (Hybrid) ซึ่งเหมาะกับงานขนาดใหญ่ต้องการเนื้อเชื่อม จะไม่ค่อยได้พบเห็นการใช้ลวดเชื่อมแบบแผ่นสติปกับงานเชื่อมทั่ว ๆ ไป โดยจะมีทั้งประเภทเหล็กกล้าไร้สนิม (Strip electrode stainless steel) และ เหล็กล้าผสมนิกเกิลสูง (Strip electrode nickel base alloys)

2.4) JIS Z 3232:2019 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมหรือลวดเชื่อมเปลือยของโลหะอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม (Aluminium and aluminium alloy welding rods and wires) ที่ใช้เป็นลวดเชื่อมเติมสำหรับขบวนการเชื่อมทิก (GTAW) การเชื่อมมิก (GMAW) และการเชื่อมพลาสมา (PAW) ซึ่งรองรับทั้งขบวนการเชื่อมด้วยมือช่างเชื่อมและขบวนการเชื่อมแบบอัตโนมัติและกึ่งอัตโนมัติ ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมที่มีส่วนที่ต่างกันระหว่าง ลวดเชื่อมแบบแท่งตัน (Rod/Bar electrode) ที่ระบุถึง ชนิดของลวดเชื่อม และขนาดความโตของแท่งลวดเชื่อม ลวดเชื่อมแบบแท่งนี้จะมีรหัสหรือโค๊ดสีเพิ่มเติมที่ใช้บอกชนิดของลวดเชื่อมแท่งตันดังแสดงในตารางข้างล่าง ส่วนลวดเชื่อมแบบเส้นม้วน (Wire electrode) จะระบุถึง ชนิดของลวดเชื่อม ขนาดความโตของเส้นลวดเชื่อม และน้ำหนักของลวดเชื่อม ลวดเชื่อมแบบม้วนจะไม่รหัสหรือโค๊ดสี



ลวดเชื่อมแบบแท่งตัน (Filler rod)		ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดม้วน (Filler wire)
A 1070–BY	(สีที่ปลายลวด = ดำ)	A 1070–WY
A 1100–BY	(สีที่ปลายลวด = แดง)	A 1100–WY
A 1200–BY	(สีที่ปลายลวด = น้ำตาล)	A 1200–WY
A 2319–BY	(สีที่ปลายลวด = ม่วง)	A 2319–WY
A 4043–BY	(สีที่ปลายลวด = ส้ม)	A 4043–WY
A 4047–BY	(สีที่ปลายลวด = ขาว)	A 4047–WY
A 5554–BY	(สีที่ปลายลวด = เหลือง)	A 5554–WY
A 5654–BY	(สีที่ปลายลวด = ชมพู)	A 5654–WY
A 5356–BY	(สีที่ปลายลวด = เหลืองเขียว)	A 5356–WY
A 5556–BY	(สีที่ปลายลวด = เขียว)	A 5556–WY
A 5183–BY	(สีที่ปลายลวด = น้ำเงิน)	A 5183–WY

ตัวอย่างเช่น รหัสลวดเชื่อม A 1070 BY–3.2 หมายถึง ลวดเชื่อมอลูมิเนียมบริสุทธิ์แบบแท่งตันขนาดเส้น Ø 3.2 มิลลิเมตร ดังแสดงลักษณะของลวดเชื่อมในรูปที่ 7.32 (ก) และตัวอย่างเช่น รหัสลวดเชื่อม A 4047 WY–2.4 หมายถึง ลวดเชื่อมอลูมิเนียมซิลิกอนที่เป็นแบบม้วน มีขนาดเส้น Ø 3.2 มิลลิเมตร ขนาดน้ำหนัก 1 กก. (2.5ปอนด์) ในรูปที่ 7.32 (ข) พร้อมสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมดังแสดงในตารางที่ 7.36



(ก) ลวดเชื่อมแท่งตัน A 1070 BY–3.2 **(ข)** ลวดเชื่อมเส้นม้วน A 4047 WY–2.4

รูปที่ 7.32 ตัวอย่างลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม JIS Z 3232

ที่มา : HARRIS Welding Supplies, 2012

ตารางที่ 7.36 สมบัติทางกลลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม ตาม มาตรฐาน JIS Z 3232:2019 *ที่มา : JIS Z 3232:2019, 2019*

ประเภทลวดเชื่อมชนิดแบบแท่งและแบบม้วน	สัญลักษณ์และชั้นการทดสอบโลหะงาน	ความแข็งแงดึงของนื้อเชื่อม kfg/mm^2 (N/mm^2)
A 1070–BY A 1070–WY	A 1070 P–O	5.5 (54)
A 1100–BY A 1100–WY	A 1100 P–O	7.5 (74)
A 1200–BY A 1200–WY	A 1200 P–O	7.5 (74)
A 2319–BY A 2319–WY	A 2014 P–O	25 (74)
A 4043–BY A 4043–WY	A 6061 P–O	17 (167)
A 4047–BY A 4047–WY	A 6061 P–O	17[b] (167)
A 5554–BY A 5554–WY	A 5454 P– O	22 (216)
A 5654–BY A 5654–WY	A 5254 P–O	21 (206)
A 5356–BY A 5356–WY	A 5083 P–O	27 (265)
A 5556–BY A 5556–WY	A 5083 P–O	28 (275)
A 5183–BY A 5183–WY	A 5083 P–O	28 (275)

7.3 มาตรฐานของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Standards code flux cored electrode)

ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ หรือเรียกอีกอย่างลวดเชื่อมแกนฟลักซ์ ซึ่งก็หมายถึง ลวดเชื่อมโลหะที่เป็นเส้นท่อกลวงแล้วบรรจุหรืออัดผงฟลักซ์ไว้ภายในท่อที่เรียกกันว่า “Flux cored” ลวดเชื่อมประเภทนี้อาจจะยังมีการใช้งานกันไม่แพร่หลาย ด้วยเพราะเป็นลวดเชื่อมที่พัฒนาขึ้น โดยเป็นการนำเอาข้อดีของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Cover electrode) กับลวดเชื่อมมิก (Filler electrode) มารวมกัน ซึ่งช่วยทำให้แนวเชื่อมมีความสมบูรณ์สวยงาม เพราะมีผงฟลักซ์อยู่ในท่อลวดทำหน้าที่ปกคลุมแนวเชื่อมได้ดี ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์นี้มีทั้งชนิดที่ไม่ต้องแก๊สปกคลุมจากถังภายนอก ที่เรียกกันว่า “Self Shielding Flux Core Wire” หรือ “Inner Shielding Flux Core Wire” และชนิดที่ต้องใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) หรือ ผสมกับแก๊สอาร์กอน CO_2 + Ar) ปกคลุมขณะเชื่อม ที่เรียกนิยมกันว่า “Gas Shielding Flux Cored Wire” หรือ“Outer Shielding Flux Cored Wire” ลวดเชื่อมแบบไส้ฟลักซ์นี้สามารถใช้กับขบวนการเชื่อม MIG/MAG ซึ่งเหมาะกับงานเชื่อมที่ต้องการคุณภาพของแนวเชื่อมที่สูง ดังแสดงตัวอย่างของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ในรูปที่ 7.33 ที่ผลิตออกมาจำหน่ายและใช้งานกัน มีหลายมาตรฐานที่รู้จักกันดี ได้แก่ มาตรฐาน AWS (มาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา) มาตรฐาน JIS (มาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น) มาตรฐาน EN ISO (มาตรฐานของกลุ่มประเทศยุโรป) ดังที่จะได้กล่าวในมาตรฐานต่าง ๆ และในแต่ละชนิดของโลหะลวดเชื่อม ดังต่อไปนี้



ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดเหล็กกล้าคาร์บอน ลวดเหล็กหล่อ

รูปที่ 7.33 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux cord wire)

ที่มา : NICETECH Welding electrode, 2014 และ Clarke Weld International, 2015

1. ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์มาตรฐาน AWS (Flux cord wire of American Welding Society)

ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์หรือแกนฟลักซ์ตามมาตรฐานของสมาคมการเชื่อมแห่งสหรัฐอเมริกา (AWS) ได้สร้างข้อกำหนดและรหัสหรือโค๊ดขึ้นเพื่อเป็นมาตฐานและความเข้าใจที่ตรงกันในการสื่อสารทางภาษาวิศวกรรมการเชื่อม มาตรฐาน AWS นี้เป็นที่ยอมรับกันทั่วโลก โดยเฉพาะประเทศไทยที่ใช้มาตรฐานนี้กันมาก โดยมีรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานที่กำหนดไว้แยกตามชนิดของโลหะเชื่อม เช่น ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้า เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กหล่อ และโลหะอลูมิเนียม ดังจะได้กล่าวต่อไปนี้

1.1) AWS A5.20/A5.20 M:2005 (R2015) ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์แก๊สปกคลุมของโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน (Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้

AWS A5.20/A5.20 หมายถึง ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน

M:2005(R2015) หมายถึง เป็นมาตรฐานของปี 2005 ปรับปรุงขึ้นใหม่ปี 2015



การแบ่งประเภทของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับลวดเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐาน AWS จะแบ่งได้เป็นชนิดต่าง ๆ ตามเงื่อนไขของท่าเชื่อม เงื่อนไขความสามารถในการใช้งาน รวมถึงการใช้หรือไม่ใช้แก๊สปกคลุม และสภาพการต่อขั้วเชื่อมกระแสไฟ ดังแสดงในตารางที่ 7.37 ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์จะไม่มีการกำหนดส่วนผสมทางเคมีของลวดที่จะเชื่อม ด้วยเพราะส่วนผสมทางเคมีที่จะได้ในเนื้อเชื่อมนั้นมาจากการผสมธาตุ ๆ ผสมไปกับผงฟลักซ์ที่บรรจุอยู่ภายในท่อลวดเชื่อม ซึ่งธาตุที่ผสมแต่ละตัวก็จะมีจุดประสงค์ที่แตกต่างกันไป ดังแสดงชนิดของธาตุที่ผสมพร้อมกับบทบาทหน้าที่ในตารางที่ 7.38 นอกจากนี้มาตรฐานยังระบุถึงสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ชนิดต่าง ๆ ทั้งความเค้นแรงดึง ความสามารถในการยืดตัว และความสามารถในการดูดซับแรงกระแทก ดังแสดงอยู่ในตารางที่ 7.39

ตารางที่ 7.37 ชนิดของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอน มาตรฐาน AWS A 5.20:2005

ที่มา : AWS A5.20/A5.20:2005(R2015), 2015

ตัวกำหนดใช้งาน	ประเภทลวดเชื่อม	ท่าเชื่อม[a,b]	แก๊สปกคลุม[c]	ขั้วเชื่อม[d]	การใช้งาน
1	E70T-1C	H,F	CO_2	DCEP	M
	E70T-1M	H,F	CO_2+75-80%Ar		M
	E71T-1C	H,F,VU,OH	CO_2		M
	E71T-1M	H,F,VU,OH	CO_2+75-80%Ar		M
2	E70T-2C	H,F	CO_2	DCEP	S
	E70T-2M	H,F	CO_2+75-80%Ar		S
	E71T-2C	H,F,VU,OH	CO_2		S
	E71T-2M	H,F,VU,OH	CO_2+75-80%Ar		S
3	E70T-3	H,F	None	DCEP	S
4	E70T-4	H,F	None	DCEP	M
5	E70T-5C	H,F	CO_2	DCEP	M
	E70T-5M	H,F	CO_2+75-80%Ar		M
	E71T-5C	H,F,VU,OH	CO_2	DCEP	M
	E71T-5M	H,F,VU,OH	CO_2+75-80%Ar	or DCEN	M
6	E70T-6	H,F	None	DCEP	M
7	E70T-7	H,F	None	DCEN	M
	E71T-7	H,F,VU,OH	None	DCEN	M
8	E70T-8	H,F	None	DCEN	M
	E71T-8	H,F,VU,OH	None	DCEN	M
9	E70T-9C	H,F	CO_2	DCEP	M
	E70T-9M	H,F	CO_2+75-80%Ar		M
	E71T-9C	H,F,VU,OH	CO_2		M
	E71T-9M	H,F,VU,OH	CO_2+75-80%Ar		M
10	E70T-10	H,F	None	DCEN	S
11	E70T-11	H,F	None	DCEN	M
	E71T-11	H,F,VU,OH	None	DCEN	M
12	E70T-12C	H,F	CO_2	DCEP	M
	E70T-12M	H,F	CO_2+75-80%Ar		M
	E71T-12C	H,F,VU,OH	CO_2		M
	E71T-12M	H,F,VU,OH	CO_2+75-80%Ar		M
13	E61T-13	H,F,VU,OH	None	DCEN	S
	E71T-13	H,F,VU,OH	None	DCEN	S
14	E71T-14	H,F,VU,OH	None	DCEN	S
G	E60T-G	H,F	Not Specified	Not Specified	M
	E70T-G	H,F	Not Specified	Not Specified	M
	E61T-G	H,F,VD,VU,OH	Not Specified	Not Specified	M
	E71T-G	H,F,VD,VU,OH	Not Specified	Not Specified	M
	E60T-GS	H,F	Not Specified	Not Specified	S
	E70T-GS	H,F	Not Specified	Not Specified	S
	E61T-GS	H,F,VD,VU,OH	Not Specified	Not Specified	S
	E71T-GS	H,F,VD,VU,OH	Not Specified	Not Specified	S

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.37

- a = ตำแหน่งท่าเชื่อม H คือ ท่าแนวนอน F คือ ท่าราบ OH คือ ท่าเหนือศรีษะ VU คือ ท่าตั้งเชื่อมขึ้น VD คือ ท่าตั้งเชื่อมลง
- b = ขนาดลวดเชื่อมที่เหมาะนอกเหนือจากท่าเชื่อมที่กำหนด จะเหมาะกับขนาดลวดเชื่อมที่เล็กกว่า 2.4 มม.
- c = สมบัติของเนื้อเชื่อมจากลวดที่ใช้แก๊สภายนอกจะแตกต่างกันกับลวดเชื่อมที่ใช้แก๊สภายในตัวลวดเอง
- d = DCEP คือ กระแสไฟตรงลวดเชื่อมต่อขั้วบวก DCEN คือ กระแสไฟตรงลวดเชื่อมต่อขั้วลบ
- e = "M" หมายถึง ใช้เชื่อมได้ทั้งแนวเดียวและแนวข้อน "S" หมายถึง ใช้เชื่อมได้แนวเดียวเท่านั้น

ตารางที่ 7.38 ธาตุต่าง ๆ ที่ผสมอยู่ในผงฟลักซ์เพื่อบรรจุภายในลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

ที่มา : LINCOLN Electric : Cored Wires Overview, 2013

ธาตุที่ผสม	สภาพที่ใช้งาน	จุดประสงค์การใช้ในการเชื่อม
อลูมิเนียม (Al)	ลักษณะเป็นผงโลหะ (Power)	เป็นตัว Deoxidize และ Denitrify
แคลเซียม (Ca)	กลุ่มแร่ เช่น Fluorspar (Caf_2) และ Limestone ($CaCo_3$)	ช่วยให้เกิดแก๊สปกคลุม และฟอร์มตัวเป็นสแลก
คาร์บอน (C)	เป็นธาตุผสมหรือทำเป็นผงโลหะ เช่น Ferromanganese	ช่วยให้เกิดความแข็งและความแข็งแรงสูงขึ้น
โครเมียม (Cr)	เป็นธาตุผสมหรือทำเป็นผงโลหะ (Metal power)	ช่วยให้เกิดความต้านทานการคืบตัว และเพิ่มความแข็งแรง พร้อมกับความต้านทานการกัดกร่อน
เหล็ก (Fe)	เป็นธาตุผสม (Ferroalloys) และ เป็นผงเหล็ก (Iron powder)	เป็นตัวเสริมให้เกิดอัตราการเพิ่มเนื้อเชื่อม โดยผสมกับนิกเกิลหรือโลหะนอกกลุ่มเหล็ก
แมงกานีส (Mn)	เป็นธาตุผสม เช่น Ferromanganese หรือ เป็นผงโลหะ	เป็นตัว Deoxidize ช่วยป้องกันการแตกร้อน (Hot crack) ผสมกับซัลเฟอร์ฟอร์มตัวเป็นสแลก
โมลิบดินัม (Mo)	เป็นธาตุผสม (Ferroalloy)	ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก เพื่อเพิ่มค่าความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) และยังให้ค่าความแข็งและความแข็งแรงที่สูงขึ้น
นิกเกิล (Ni)	เป็นผงโลหะ (Metal power)	เป็นโลหะผสมช่วยเพิ่มความแข็ง ความแข็งแรง ความเหนียว และทนทานการกัดกร่อน
โพแทสเซียม (K)	เป็นแร่ธาตุชนิดหนึ่งสีขาวร่วมเป็นฐานอยู่ใน Feldspars และ Silicates	ช่วยให้เกิดการอาร์กที่เสถียร และฟอร์มตัวเป็นสแลกได้ดี
ซิลิกอน (Si)	เป็นธาตุผสม เช่น Ferrosilicon หรือ Silicomangnes เป็นแร่ Silicates เช่น Feldspar	เป็นตัว Deoxidize และฟอร์มตัวเป็นสแลกได้ดี
โซเดียม (Na)	เป็นแร่ เช่น โซเดียม ร่วมเป็นฐานอยู่ใน Feldspars และ Silicate	ช่วยให้เกิดการอาร์กที่เสถียร และฟอร์มตัวเป็นสแลกได้ดี
ไทเทเนียม (Ti)	เป็นธาตผสม เช่น Ferrotitanium รวมตัวอยู่ในแร่ที่เรียกว่า Rutile	เป็นตัว Deoxidize และตัว Denitrify ฟอร์มตัวเป็นสแลก และช่วยให้คาร์บอนเสถียรในเหล็กกล้าไร้สนิมบางชนิด
เซอร์โคเนียม (Zr)	เป็น Oxide หรือเป็นผงโลหะ	เป็นตัว Deoxidize และตัว Denitrify ฟอร์มตัวเป็นสแลก
วาเนเดียม (V)	เป็น Oxide หรือเป็นผงโลหะ	ช่วยให้เกิดความแข็งแรงที่เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 7.39 สมบัติทางกลลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอน มาตรฐาน AWS A 5.20:2005

ที่มา : AWS A5.20/A5.20:2005(R2015), 2015

ประเภทลวดเชื่อม	ความเค้นแรงดึง (ksi)	ความเค้นครากต่ำสุด[a] (ksi)	การยืดตัวต่ำสุด[b] (%)	ต้านทานแรงกระแทก (V –notch)
E7XT–1C,–1M	70–95	58	22	20ft.lbf at 0°F
E7XT –2C[c],–2M[c]	70 min	Not Specified	Not Specified	Not Specified
E7XT–3	70 min	Not Specified	Not Specified	Not Specified
E7XT–4	70–95	58	22	Not Specified
E7XT–5C,–5M	70–95	58	22	20ft.lbf at 20°F
E7XT–6	70–95	58	22	20ft.lbf at 20°F
E7XT–7	70–95	58	22	Not Specified
E7XT–8	70–95	58	22	20ft.lbf at 20°F
E7XT–9C,–9M	70–95	58	22	20ft.lbf at 20°F
E7XT10[c]	70 min	Not Specified	Not Specified	Not Specified
E7XT11	70–95	58	20	Not Specified
E7XT12C,–12M	70–90	58	22	20ft.lbf at 20°F
E6XT–13[c]	60 min	Not Specified	Not Specified	Not Specified
E7XT–13[c]	70 min	Not Specified	Not Specified	Not Specified
E7XT–14[c]	70 min	Not Specified	Not Specified	Not Specified
E6XT–G	60–80	48	22	Not Specified
E7XT–G	70–95	58	22	Not Specified
E6XT–GS[c]	60 min	Not Specified	Not Specified	Not Specified
E7XT–Gs[c]	70 min	Not Specified	Not Specified	Not Specified

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.39

- a = ค่า Yield strength at 0.2% offset
- b = เป็นการทดสอบดึงชิ้นงานตามมาตรฐาน AWS B4.0
- c = ใช้สำหรับการเชื่อมแนวเดียวและการทดสอบความเค้นแรงดึงเท่านั้น

ข้อกำหนดตามมาตรฐาน AWS A5.20:2005 ของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์มีรายละเอียดที่มากกว่าที่กล่าวมาข้างต้น ด้วยเพราะบทบาทของผงฟลักซ์ที่บรรจุอยู่ภายในเป็นตัวกำหนดสมบัติของเนื้อเชื่อม และยังมีความแตกต่างของแต่ละผู้ผลิตลวดเชื่อม ดังนั้นผู้ที่ต้องการใช้งานลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์จะต้องทำความเข้าใจเพิ่มเติมถึงมาตรฐานและข้อแนะนำจากผู้ผลิตเป็นสำคัญ ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ปัจจุบันมีการผลิตออกมาใช้งานกันหลากหลาย ดังแสดงเป็นตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อม ชนิด E71T –GS (เหมะสำหรับใช้เชื่อมแนวเดียว) และ ชนิด E71T–11(เหมาะสำหรับใช้เชื่อมซ้อนแนว) ในรูปที่ 7.34 ซึ่งโดยปกติก็จะมีหลายขนาดของลวดให้เลือกใช้



ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ E17T−GS
ที่มา : VULCAN Consumables, 2017



ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ E17T−11
ที่มา : ONGEVITY Welder, 2016

รูปที่ 7.34 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ตามรหัสมาตรฐาน AWS A5.20:2005

1.2) AWS A5.22/A5.22 M:2012 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมที่รองรับกับขบวนการเชื่อม FCAW และ GTAW และ PAW (Specification for Stainless Steel Flux Cored and Metal Cored Welding Electrodes and Rods) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้

AWS A5.22/A5.22 หมายถึง ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม

M:2012 หมายถึง เป็นมาตรฐานที่เผยแพร่ปี 2012

E	XXX	T	X	−	X

- X หมายถึง = ระบุการใช้แก๊สจากภายนอกปกคลุม ดังแสดงในตารางข้างล่างนี้
- X หมายถึง = ตำแหน่งท่าเชื่อม เลข 0 คือ ท่าราบและท่าระดับ เลข 1 คือ ทุกท่าเชื่อม
- T หมายถึง = ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์
- XXX หมายถึง = ระบุส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมที่จะได้
- E หมายถึง = ลวดเชื่อม (E = ลวดม้วนสำหรับ FCAW, R = ลวดเส้นตรงสำหรับ GTAW)

ประเภทลวดเชื่อม	แก๊สปกคลุมภายนอก	สภาพขั้วเชื่อม	ขบวนการเชื่อม
EXXXTX−1	CO_2	DCEP	FCAW
EXXXTX−3	None (Self shielding)	DCEP	FCAW
EXXXTX−4	CO_2 + 75−80% Ar	DCEP	FCAW
EXXXTX−G	Not specified	Not specified	FCAW
RXXXT1−5	100% Ar	DCEN	GTAW
EXXXTX−G	Not specified	Not specified	FCAW
RXXXT1−G	Not specified	Not specified	GTAW

ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับใช้เชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน AWS A5.22:M2012 ได้สร้างข้อกำหนดเป็นรหัสหรือโค๊ดขึ้นโดยอาศัยองค์ประกอบร่วมกันของ แก๊สปกคลุม ท่าเชื่อม และส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงการแบ่งชนิดของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐานในตารางที่ 7.40 และสมบัติทางกลด้านการทดสอบแรงดึงดังแสดงในตารางที่ 7.41

ตารางที่ 7.40 ชนิดของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน AWS A 5.22:2005

ที่มา : AWS A5.22/A5.22:M2012, 2012

ส่วนผสมทางเคมี (wt%)[a,b]											
ประเภทลวดเชื่อม[c]	C	Cr	Ni	Mo	Cb(Nb) +Ta	Mn	Si	P	S	N	Cu
E307TX-X	0.13	18.0-20.5	9.0-10.5	0.5-1.5	-	3.30-4.75	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308TX-X	0.08	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308LTX-X	0.04	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308HTX-X	0.08	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308MoTX-X	0.08	18.0-21.0	9.0-11.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308LMoTX-X	0.04	18.0-21.0	9.0-12.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E309TX-X	0.10	22.0-25.0	12.0-14.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E309LCbTX-X	0.04	22.0-25.0	12.0-14.0	0.5	0.7-1.0	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E309LTX-X	0.04	22.0-25.0	12.0-14.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E309MoTX-X	0.12	21.0-25.0	12.0-16.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E309LMoTX-X	0.04	21.0-25.0	12.0-16.0	20.-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E309LNiMoTX-X	0.04	20.5-23.5	15.0-17.0	2.0-3.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E310TX-X	0.20	25.0-28.0	20.0-22.5	0.5	-	1.0-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E312TX-X	0.15	28.0-32.0	8.0-10.5	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E316TX-X	0.08	17.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E316LTX-X	0.04	17.0-20.0	11.0-14.0	3.0-4.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E317LTX-X	0.04	18.0-21.0	12.0-14.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E347TX-X	0.08	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	8xC min 1 max	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E3409TX-X[d]	0.10	10.5-13.5	0.60	0.5	-	0.80	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E410TX-X	0.12	11.0-13.5	0.60	0.4-0.7	-	1.2	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E410NiMoTX-X	0.06	11.0-12.5	4.0-5.0	0.5	-	1.0	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E410NiTiTX-X[d]	0.04	11.0-12.0	3.6-4.5	0.5	-	0.70	0.5	0.04	0.03	--	0.5
E430TX-X	0.10	15.0-18.0	0.60	0.65	-	1.2	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E502TX-X[e]	0.10	4.0-6.0	0.40	0.8-1.2	-	1.2	1.0	0.04	0.03	--	0.5

ตารางที่ 7.40 (ต่อ) ชนิดลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน AWS A 5.22:2005

ที่มา : AWS A5.22/A5.22:M2012, 2012

ส่วนผสมทางเคมี (wt%)											
ประเภทลวดเชื่อม	C	Cr	Ni	Mo	Cb(Nb) +Ta	Mn	Si	P	S	N	Cu
E505TX-X[e]	0.10	8.0-10.5	0.40	0.5-1.5	-	1.2	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E307T0-3	0.13	19.5-22.0	9.0-10.5	0.5	-	3.3-4.7	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308T0-3	0.08	19.5-22.0	9.0-11.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308LT0-3	0.03	19.5-22.0	9.0-11.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308HT0-3	0.08	19.5-22.0	9.0-11.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308MoT0-3	0.08	18.0-21.0	9.0-11.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308LMoT0-3	0.03	18.0-21.0	9.0-12.0	1.8-2.4	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308HMoT0-3	0.12	19.0-21.5	9.0-10.7	0.5	-	12.25	0.9	0.04	0.03	--	0.5
E309T0-3	0.10	23.0-25.5	12.0-14.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E309LT0-3	0.03	23.0-25.5	12.0-14.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E309LCbT0-3	0.03	23.0-25.5	12.0-14.0	2.0-3.0	0.7-1.0	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E309MoT0-3	0.12	21.0-25.0	12.0-16.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E309LMoT0-3	0.04	21.0-25.0	12.0-16.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E310T0-3	0.20	25.0-28.0	20.0-22.5	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E312T0-3	0.15	28.0-32.0	8.0-10.5	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E316T0-3	0.08	18.0-20.5	11.0-14.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E316LT0-3	0.03	18.0-20.5	11.0-14.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E316LKT0-3	0.04	17.0-20.0	11.0-14.0	3.0-4.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E317LT0-3	0.03	18.5-21.0	13.0-15.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E347T0-3	0.08	19.0-21.5	9.0-11.0		8 x C min 1.0 max	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E490T0-3[d]	0.10	10.5-13.5	0.60	0.5	-	0.80	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E410T0-3	0.12	11.0-13.5	0.60	0.5	-	1.0	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E410NiMoT0-3	0.06	11.0-12.5	4.0-5.0	0.4-0.7	-	1.0	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E410NiTiT0-3[d]	0.04	11.0-12.0	3.6-4.5	0.5	-	0.70	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E430T0-3	0.10	15.0-18.0	0.60	0.5	-	1.0	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E2209T0-X	0.04	21.0-24.0	7.5-10.0	2.5-4.0	-	0.5-2.0	1.0	0.04	0.03	0.2	0.5
E2553T0-X	0.04	24.0-27-0	8.5-10.5	2.9-3.0	-	0.5-1.5	1.0	0.04	0.03	0.2	2.5
R308LT1-5	0.03	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	-	0.5-2.5	1.2	0.04	0.03	-	0.5
R309LTI-5	0.03	22.0-25.0	12.0-14.0	0.5	-	0.5-2.5	1.2	0.04	0.03	-	0.5
R316LT1-5	0.03	17.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.2	0.04	0.03	-	0.5
R347T1-5	0.08	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	8 x C min 1.0 max	0.5-2.5	1.2	0.04	0.03-	-	0.5

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.40

- a = เป็นส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมจากกานำไปวิเคราะห์หาส่วนผสมทางเคมี
- b = ปริมาณส่วนผสมที่เป็นค่าเดียว จะเป็นค่าที่สูงที่สุด
- c = ตัวอักษร “X”ที่ตามหลังตัวอักษร “T” หมายถึงตำแหนางท่าเชื่อม 1 คือ เชื่อมได้ทุกท่า 0 ตือ เชื่อมท่าราบและท่าขนานนอน
- d = ไทเทเนียม 10 x C min., 1.5% Max.
- e = ใช้สำหรับการเชื่อมแนวเดียวและการทดสอบความเค้นแรงดึงเท่านั้น

ตารางที่ 7.41 สมบัติทางกลลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน AWS A 5.22*ที่มา : AWS A5.22/A5.22:M2012, 2012*

ประเภทลวดเชื่อม	ความเค้นแรงดึงต่ำสุด		เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ต่ำสุด (%)	การให้ความร้อนหลังเชื่อม (PWHT)
	ksi	MPa		
E307TX−X	85	590	30	None
E308TX−X	80	550	35	None
E308LTX−X	75	520	35	None
E308HTX−X	80	550	35	None
E308MoTX−X	80	550	35	None
E308LMoTX−X	75	520	35	None
E309TX−X	80	550	30	None
E309LCbTX−X	75	520	30	None
E309LTX−X	75	520	30	None
E309MoTX−X	80	550	25	None
E309LMoTX−X	75	520	25	None
E309LNiMoTX−X	75	520	25	None
E310TX−X	80	550	30	None
E312TX−X	95	660	22	None
E316TX−X	75	520	30	None
E316LTX−X	70	485	30	None
E317LTX−X	75	520	20	None
E347TX−X	75	520	30	None
E409TX−X	65	450	15	None
E410TX−X	75	520	20	732−760°C/ 1 ชม./Air cooled
E410NiMoTX−X	110	760	15	593−612°C/ 1 ชม./Air cooled
E410NiTiTX−X	110	760	15	593−612°C/ 1 ชม./Air cooled
E430TX−X	65	450	20	760−788°C/ 4 ชม./Furnace cooled

ตารางที่ 7.41 (ต่อ) สมบัติทางกลลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน AWS A 5.22

ที่มา : AWS A5.22/A5.22:M2012, 2012

ประเภทลวดเชื่อม	ความเค้นแรงดึงต่ำสุด		เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ต่ำสุด (%)	การให้ความร้อนหลังเชื่อม (PWHT)
	ksi	MPa		
E502TX−X	60	415	20	840−870°C/ 2 ชม./ Furnace cooled
E505TX−X	60	415	20	840−870°C/ 2 ชม./ Furnace cooled
E308HMoT0−3	80	550	30	None
E316LKT0−3	70	485	30	None
E2209TX−X	100	690	20	None
E2553TX−X	110	760	15	None
EXXXTX−G	Not Specified			
R308LT1−5	75	520	35	None
R309LT1−5	75	520	30	None
R316LT1−5	70	485	30	None
R347T1−5	75	520	30	None

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.41

- a = ตัวอักษร “X”ที่ตามหลังตัวอักษร “T” หมายถึงตำแหนางท่าเชื่อม 1 คือ เชื่อมได้ทุกท่า 0 ตือ เชื่อมท่าราบและท่าขนานนอน และตัวเลขที่ตามหลังตำแหน่งท่าเชื่อม –1, −3,−4 และ −5 หมายถึง แก๊สปกคลุมตามรหัสข้อกำหนดในตาราง

ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน AWS ที่ระบุในข้อกำหนดมีทั้งแบบที่เป็นม้วนและแบบที่เป็นเส้นตรง โดยแบบม้วนจะใช้ตัวอักษร “E” ส่วนแบบเส้นตรงจะใช้ตัวอักษร “R” ดังแสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมในรูปที่ 7.35



ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์แบบม้วน E 308LT1−1 ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์แบบเส้นตรง R308LT1−5

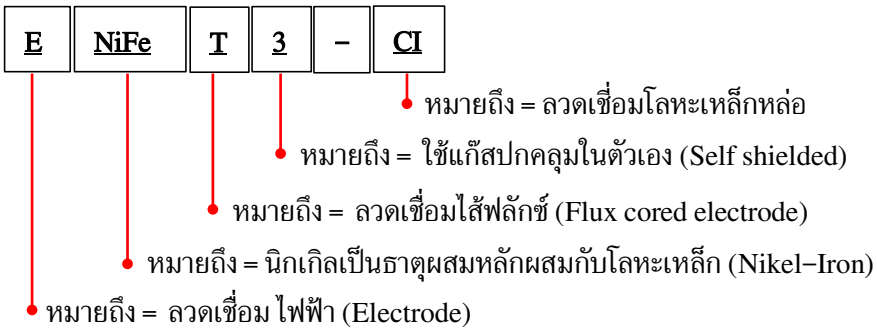
รูปที่ 7.35 ตัวอย่างลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน AWS A5.22:M2012

ที่มา : LINKWELD Welding Electrode, 2017

1.3) AWS A5.15/A5.15 :1990(R2016) เป็นมาตรฐานลวดเชื่อมประเภทที่ใช้สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อ (Specification for Welding Electrodes and Rods for Cast Iron) ข้อกำหนดของมาตรฐานนี้จะครอบคลุมทุกชนิดของลวดเชื่อมที่ใช้สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กหล่อของทุกขบวนการเชื่อม แต่หัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะลวดประเภทลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Electrode for flux cored arc welding) ที่ใช้ในการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อทุกชนิดและเป็นลวดเชื่อมที่รองรับกับขบวนการเชื่อมแบบ SMAW ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้

AWS A5.15/A5.15 หมายถึง ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กหล่อ

1990(R2016) หมายถึง ข้อกำหนดมาตรฐานปี 1990 ปรับปรุงปี 2016



ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อจะใช้แก๊สปกคุลมภายในตัวเอง (Self–shielded) แต่ก็สามารถใช้แก๊สปกคลุมจากภายนอกก็ได้ขึ้นอยู่กับคำแนะนำของผู้ผลิตลวดเชื่อม ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์เหล็กหล่อมีชนิดเดียวสามารถใช้เชื่อมได้กับเหล็กหล่อทุกชนิด ดังแสดงในตารางที่ 7.42 และตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อม ENiFeT3–CI ดังแสดงในรูปที่ 7.36

ตารางที่ 7.42 ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กหล่อ มาตรฐาน AWS A 5.15:R2016

ที่มา : AWS A5.15/A5.15:1990(R2016), 2016

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)										
	C	Mn	Si	P	S	Fe	Ni	Mo	Cu	Al	อื่น ๆ
ENiFeT3-CI	0.10	8.0-10.5	0.40	0.5-1.5	-	1.2	1.0	0.04	0.03	--	0.5



รูปที่ 7.36 ตัวอย่างลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กหล่อ ENiFeT3–CI

ที่มา : ESAB Welding Electrode, 2012

2. ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์มาตรฐาน JIS (Flux cord wire of Japanese Industrial Standards)

ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ หรือแกนฟลักซ์ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ของสมาคมมาตรฐานญี่ปุ่น (JSA : Japanese Standards Association) ได้สร้างข้อกำหนดและรหัสหรือโค๊ดขึ้นเพื่อเป็นมาตฐานทางด้านอุตสาหกรรมการเชื่อม มาตรฐาน JIS นี้เป็นที่ยอมรับและใช้กำหนดงานเชื่อมกันในประเทศไทย ในส่วนของหัวข้อนี้จะกล่าวถึงมาตรฐานของการเลือกใช้ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ของโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน กับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าไร้สนิม แยกตามชนิดของโลหะเชื่อม ดังจะได้กล่าวต่อไปนี้

2.1) JIS Z 3313:2009 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมชนิดลวดไส้ฟลักซ์ของโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานเย็น (Flux Cored Wires for Gas Shielded and Self−Shielded Metal Arc Welding of Mild Steel, High Strength Steel and Low Temperature Service Steel) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้

JIS Z 3313 หมายถึง ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน

2009 หมายถึง เป็นมาตรฐานของปี 2009

Y	FW	−	X	X	X	X

- X (ตำแหน่งที่ 7) = หมายถึง = ชนิดของฟลักซ์ปกคลุม (1)
- X (ตำแหน่งที่ 6) = หมายถึง = อุณหภูมิและพลังงานของการทดสอบแรงกระแทกของเนื้อเชื่อม (2)
- X (ตำแหน่งที่ 5) = หมายถึง = ค่าความเค้นแรงดึงต่ำสุดของเนื้อเชื่อม (3)
- X (ตำแหน่งที่ 4) = หมายถึง = ชนิดของแก๊สปกคลุม (4)
- FW = หมายถึง = ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานเย็น
- Y = หมายถึง = ลวดเชื่อมไฟฟ้า

(1) = R คือ ฟลักซ์รูไทล์, B คือ ฟลักซ์ด่าง, M คือ ฟลักซ์ที่โลหะผสมเป็นหลัก, G คือ ฟลักซ์อื่น ๆ

(2) = อุณหภูมิและพลังงานของการทดสอบแรงกระแทกของเนื้อเชื่อม ดังแสดงในตารางข้างล่างนี้

(3) = 43 คือ 420 N/mm^2, 50 คือ 490 N/mm^2 , 60 คือ 590 N/mm^2

(4) = C คือ แก๊ส CO_2, A คือ แก๊ส CO_2+Ar, S คือ ใช้แก๊สปกคลุมภายในตัวเอง (Self shielded)

รหัส	อุณหภูมิทดสอบ (°C)	พลังงานการทดสอบ (J)
O	0	27
D	0	47
E	−5	27
F	−5	47
2	−20	27
G	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด

ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานเย็น ตามมาตรฐาน JIS ได้สร้างข้อกำหนดรหัสหรือโค๊ดของชนิดลวดเชื่อมเป็นกลุ่มตามชนิดของแก๊สปกคลุม และความเหมาะสมของการนำไปใช้งาน ดังแสดงชนิดของลวดเชื่อมตามมาตรฐานที่กำหนดขึ้นดังแสดงในตารางที่ 7.43 และแสดงส่วนผสมทางเคมีในตารางที่ 7.44

ตารางที่ 7.43 ชนิดของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานเย็น มาตรฐาน JIS Z 3313:2009 *ที่มา : JIS Z 3313:2009, 2009*

ประเภทลวดเชื่อม	ชนิดแก๊สปกคลุม	ชนิดของโลหะเหล็กที่เชื่อม
YFW–C430X	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	เหล็กกล้าคาร์บอน
YFW–C500X	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	เหล็กกล้าคาร์บอน และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงระดับ 490N/mm^2
YFW–C50DX		
YFW–C502X		
YFW–C50GX		
YFW–C60EX	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงระดับ 590N/mm^2
YFW–C60FX		
YFW–C602X		
YFW–C60GX		
YFW–A430X	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) + แก๊สอาร์กอน (Ar)	เหล็กกล้าคาร์บอน
YFW–A500X	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) + แก๊สอาร์กอน (Ar)	เหล็กกล้าคาร์บอน และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงระดับ 490N/mm^2
YFW–A50DX		
YFW–A502X		
YFW–A50GX		
YFW–A60EX	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) + แก๊สอาร์กอน (Ar)	เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงระดับ 590N/mm^2
YFW–A60FX		
YFW–A602X		
YFW–A60GX		
YFW–S430X	ใช้แก๊สปกคลุมภายในตัวเอง (Self shielded)	เหล็กกล้าคาร์บอน
YFW–S500X	ใช้แก๊สปกคลุมภายในตัวเอง (Self shielded)	เหล็กกล้าคาร์บอน และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงระดับ 490N/mm^2
YFW–S50DX		
YFW–S502X		
YFW–S50GX		

ตารางที่ 7.44 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานเย็น มาตรฐาน JIS Z 3313:2009

ที่มา : JIS Z 3313:2009, 2009

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cu[a]	Ni	Mo	Al
YFW–C430X	0.2	0.09	1.5	0.03	0.04	0.5	–	–	–
YFW–C500X	0.2	0.09	2.0	0.03	0.04	0.5	–	–	–
YFW–C50DX	0.2	0.09	2.0	0.03	0.04	0.5	–	–	–
YFW–C502X	0.2	0.09	2.0	0.03	0.04	0.5	1.0	–	–
YFW–C50GX	–	–	–	0.03	0.04	–	–	–	–
YFW–C60EX	0.15	0.80	2.0	0.03	0.03	0.5	–	–	–
YFW–C60FX	0.15	0.80	2.0	0.03	0.03	0.5	0.2	0.65	–
YFW–C602X	0.15	0.80	2.0	0.03	0.03	0.5	0.2	0.65	–
YFW–C60GX	0.15	–	–	0.03	0.04	–	–	–	–
YFW–A430X	0.2	0.09	1.5	0.03	0.04	0.5	–	–	–
YFW–A500X	0.2	0.09	2.0	0.03	0.04	0.5	–	–	–
YFW–A50DX	0.2	0.09	2.0	0.03	0.04	0.5	–	–	–
YFW–A502X	0.2	0.09	2.0	0.03	0.04	0.5	1.0	–	–
YFW–A50GX	–	–	–	0.03	0.04	–	–	–	–
YFW–A60EX	0.15	0.80	2.0	0.03	0.03	0.5	–	–	–
YFW–A60FX	0.15	0.80	2.0	0.03	0.03	0.5	0.2	0.65	–
YFW–A602X	0.15	0.80	2.0	0.03	0.03	0.5	0.2	0.65	–
YFW–A60GX	–	–	–	0.03	0.04	–	–	–	–
YFW–S430X	0.2	0.50	1.2	0.03	0.04	–	0.2	–	2.0
YFW–S500X	0.2	0.90	2.0	0.03	0.04	–	2.0	–	2.0
YFW–S50DX	0.2	0.90	2.0	0.03	0.04	–	2.0	–	2.0
YFW–S502X	0.2	0.90	2.0	0.03	0.04	–	2.0	–	2.0
YFW–S50GX	–	–	–	0.03	0.04	–	–	–	–

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.44

- a = ส่วนผสมนี้รวมปริมาณของทองแดงที่เคลือบผิวลวด

สมบัติทางกลของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานเย็น ของเนื้อเชื่อมที่ทดสอบด้วยแรงดึงและการทดสอบแรงกระแทกที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 7.45 และตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ YFW–C50DR ในรูปที่ 7.37

ตารางที่ 7.45 สมบัติทางกลของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานเย็น มาตรฐาน JIS Z 3313:2009

ที่มา : JIS Z 3313:2009, 2009

ประเภทลวดเชื่อม	ความเค้นแรงดึงต่ำสุด (N/mm^2)	ความเค้นพิสูจน์ 0.2% (N/mm^2)	การยืดตัวต่ำสุด (%)	การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (V-notch)	
				อุณหภูมิทดสอบ (°C)	การดูดซับพลังงาน (J)
YFW-C430X	420	340	22	0	47
YFW-C500X	490	390	22	0	27
YFW-C50DX	490	–	–	0	47
YFW-C502X	490	390	22	−20	27
YFW-C50GX	490	–	–	–	–
YFW-C60EX	590	490	19	−5	27
YFW-C60FX	590	–	–	−5	47
YFW-C602X	590	490	19	−20	27
YFW-C60GX	590	–	–	–	–
YFW-A430X	420	340	22	0	27
YFW-A500X	490	390	22	0	27
YFW-A50DX	490	–	–	0	47
YFW-A502X	490	390	22	−20	27
YFW-A50GX	490	–	–	–	–
YFW-A60EX	590	490	19	−5	27
YFW-A60FX	590	–	–	−5	47
YFW-A602X	590	490	19	−20	27
YFW-A60GX	590	–	–	–	–
YFW-S430X	420	340	22	0	27
YFW-S500X	490	390	22	0	27
YFW-S50DX	490	390	22	0	47
YFW-S502X	490	–	–	−20	27
YFW-S50GX	490	–	–	–	–



รูปที่ 7.37 ตัวอย่างลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอน YFW–C50DR

ที่มา : YAWATA Welding Electrode, 2014

2.2) JIS Z 3323:2003 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมชนิดลวดไส้ฟลักซ์ของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel Flux Cored Wires) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้

JIS Z 3323 หมายถึง ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม

2003 หมายถึง เป็นมาตรฐานของปี 2003

Y	F	XXX	X

- X หมายถึง = ชนิดของฟลักซ์ปกคลุม ดังแสดงในตารางข้างล่างนี้
- XXX หมายถึง = ส่วนผสมทางเคมีเนื้อเชื่อม (เกรดของเหล็กกล้าไร้สนิม)
- F หมายถึง = ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม
- Y หมายถึง = ลวดเชื่อมไฟฟ้า

รหัส	ชนิดแก๊สปกคลุม	ชนิดกระแสไฟเชื่อม
C	แก๊ส 100%CO_2 และ แก๊ส Ar +CO_2 อย่างน้อย 20 %	ใช้กระแสไฟเชื่อม DCEP
S	ใช้แก๊สปกคลุมภายในตัวเอง (Self shielded)	ใช้กระแสไฟเชื่อมAC และ DCEP
G	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด

ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมมีผลิตออกมาใช้งานอ้างอิงตามเกรดหรือชนิดของเหล็กไร้สนิมที่เป็นโลหะหลักที่ใช้งานกันทั่ว ๆ ไป เช่น เกรด308 เกรด309 เกรด316 เกรด317 เกรด309L หรือ เกรด309LMo เป็นต้น ซึ่งโดยมาตรฐาน JIS ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ได้จัดแบ่งชนิดลวดเชื่อมออกเป็นกลุ่มตามชนิดของแก๊สปกคลุม คือ กลุ่มที่ต่อท้ายรหัสด้วยอักษรตัว C ตัว S และตัว G ดังแสดงในตารางที่ 7.46 พร้อมแสดงส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมที่ควรจะได้ ซึ่งมาตรฐานลวดเชื่อมรหัสหรือโค๊ดนี้จะเป็นลวดเชื่อมแบบเส้นลวดที่รองรับการเชื่อม GMAW หรือ MIG/MAG ดังแสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมชนิด YF309LC พร้อมข้อแนะนำจากผู้ผลิตในรูปที่ 7.38 และ 7.39 ตามลำดับ

ตารางที่ 7.46 ชนิดของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน JIS Z 3323:2003

ที่มา : JIS Z 3323:2003, 2003

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	อื่น ๆ
YF308C	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	9.0–11.0	18.0–21.0	–	–
YF308G	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	9.0–11.0	18.0–21.0	–	–
YF308LC	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	9.0–12.0	18.0–21.0	–	–
YF308LG	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	9.0–12.0	18.0–21.0	–	–
YF309C	1.00	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	22.0–25.0	–	–
YF309G	1.00	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	22.0–25.0	–	–
YF309LC	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	22.0–25.0	–	–
YF309LG	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	22.0–25.0	–	–
YF309JC	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	25.0–28.0	–	–
YF309JG	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	25.0–28.0	–	–
YF309MoC	12.0	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	22.0–25.0	2.0–3.0	–
YF309MoG	12.0	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	22.0–25.0	2.0–3.0	–
YF309MoLC	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	22.0–25.0	2.0–3.0	–
YF309MoLG	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	22.0–25.0	2.0–3.0	–
YF316C	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	11.0–14.0	17.0–20.0	2.0–3.0	–
YF316G	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	11.0–14.0	17.0–20.0	2.0–3.0	–
YF316LC	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	11.0–14.0	17.0–20.0	2.0–3.0	–
YF316LG	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	11.0–14.0	17.0–20.0	2.0–3.0	–
YF316JILC	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	11.0–16.0	17.0–20.0	1.2–2.75	Cu1–2.5
YF316JILG	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	11.0–16.0	17.0–20.0	1.2–2.75	Cu1–2.5
YF317LC	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–16.0	18.0–21.0	3.0–4.0	–
YF317LG	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–16.0	18.0–21.0	3.0–4.0	–
YF347C	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	9.0–11.0	18.0–21.0	–	Nb8xC–1.0
YF347G	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	9.0–11.0	18.0–21.0	–	Nb8xC–1.0
YF410C	0.12	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	0.6	11.0–13.5	0.5	–
YF410G	0.12	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	0.6	11.0–13.5	0.5	–
YF430C	0.10	1.0	1.2	0.04	0.03	0.6	15.0–18.0	0.5	–
YF430G	0.10	1.0	1.2	0.04	0.03	0.6	15.0–18.0	0.5	–

ตารางที่ 7.46 (ต่อ) ชนิดลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน JIS Z 3323:2003

ที่มา : JIS Z 3323:2003, 2003

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	อื่น ๆ
YF308S	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	9.0–11.0	19.5–22.0	–	–
YF308LS	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	9.0–12.0	19.5–22.0	–	–
YF309S	0.10	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	23.0–25.5	–	–
YF309LS	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	23.0–25.5	–	–
YF309JS	0.03	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	25.5–28.5	–	–
YF309MoS	0.12	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	22.0–25.0	2.0–3.0	–
YF309MoLS	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	22.0–25.0	2.0–3.0	–
YF316S	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	11.0–14.0	18.0–20.5	2.0–3.0	–
YF316LS	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	11.0–14.0	18.0–20.5	2.0–3.0	–
YF316JILS	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	11.0–16.0	18.0–20.5	1.2–2.75	Cu1–2.5
YF317LS	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–16.0	18.5–21.0	3.0–4.0	–
YF347S	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	9.0–11.0	19.0–21.5	–	Nb8x C–1.0
YF410S	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03	0.6	11.0–13.5	0.5	–
YF430S	0.10	1.0	1.0	0.04	0.03	0.6	15.0–18.0	0.5	–

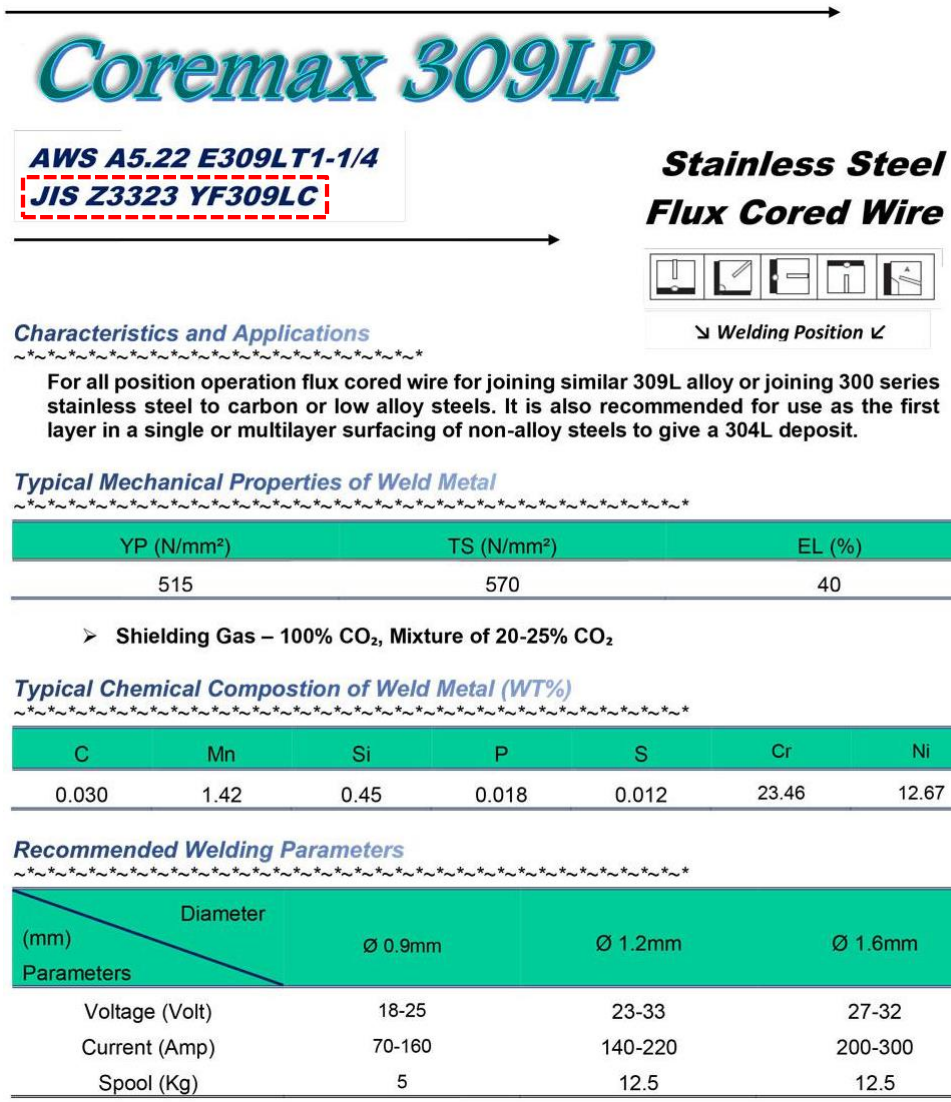
หมายเหตุ ของตารางที่ 7.46

- a = ค่าส่วนผสมที่แสดงค่าเดียวเป็นค่าที่สูงสุด



รูปที่ 7.38 ตัวอย่างลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอน YF309LC

ที่มา : YAWATA Welding Electrode, 2014



Coremax 309LP

AWS A5.22 E309LT1-1/4
JIS Z3323 YF309LC

Stainless Steel Flux Cored Wire

↘ Welding Position ↙

Characteristics and Applications

For all position operation flux cored wire for joining similar 309L alloy or joining 300 series stainless steel to carbon or low alloy steels. It is also recommended for use as the first layer in a single or multilayer surfacing of non-alloy steels to give a 304L deposit.

Typical Mechanical Properties of Weld Metal

YP (N/mm²)	TS (N/mm²)	EL (%)
515	570	40

➢ Shielding Gas – 100% CO_2, Mixture of 20-25% CO_2

Typical Chemical Compostion of Weld Metal (WT%)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
0.030	1.42	0.45	0.018	0.012	23.46	12.67

Recommended Welding Parameters

Diameter (mm) / Parameters	Ø 0.9mm	Ø 1.2mm	Ø 1.6mm
Voltage (Volt)	18-25	23-33	27-32
Current (Amp)	70-160	140-220	200-300
Spool (Kg)	5	12.5	12.5

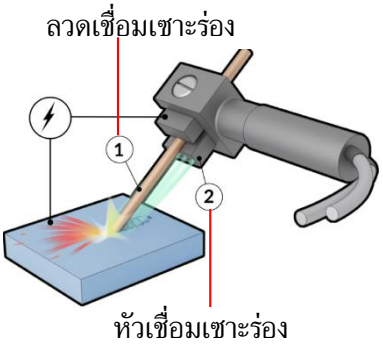
รูปที่ 7.39 ตัวอย่างคำแนะของผู้ผลิตลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม YF309LC

ที่มา : Leeden Powerweld Sdn Bhd, 2015

7.4 ลวดเชื่อมเซาะร่อง (Gouging electrode) การเชื่อมเซาะร่องหรือที่เรียกกันว่า “การเก๊าจ์” เป็นขบวนการตัดหรือการขจัดเนื้อโลหะออกด้วยการอาร์กของลวดเชื่อม ซึ่งลวดเชื่อมที่ใช้จะแตกต่างกับลวดเชื่อมทั่ว ๆ ไป โดยลวดเชื่อมประเภทนี้จะไม่ใช่เป็นการเพิ่มเนื้อโลหะแต่จะเป็นการอาร์กเพื่อเอาเนื้อโลหะออกไป จึงเรียกลวดเชื่อมประเภทนี้ว่า ลวดเชื่อมตัดหรือเซาะร่อง ซึ่งจะมีเครื่องเชื่อมเซาะร่อง (Gouging machine) โดยเฉพาะ หรือสามารถใช้กับเครื่องเชื่อมไฟฟ้าทั่วไปก็ได้ ดังแสดงหลักการเชื่อมเซาะร่องและเครื่องเชื่อมเซาะร่องในรูปที่ 7.40 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

ลวดเชื่อมเซาะร่องหรือลวดเซาะ เป็นลวดเชื่อมที่ผลิตจากการนำผงคาร์บอนมาอัดแน่นให้เป็นแท่ง โดยส่วนผสมของผงอัดจะประกอบไปด้วยสารต่าง ๆ ซึ่งแต่ละผู้ผลิตก็จะมีสูตรผสมที่เป็นเอกลักษณ์

ของตัวเอง ดังนั้นลวดเชื่อมเซาะร่องยังไม่มีการกำหนดมาตรฐานออกมาที่ชัดเจน จะกำหนดรหัสขึ้นตามความต้องการของผู้ผลิตเอง แต่พบว่าลักษณะทางกายภาพของลวดเชื่อมจะคล้ายกันหรือเหมือนกันก็ว่าได้ คือ ตัวของลวดเชื่อมจะถูกเคลือบด้วยโลหะทองแดงเพื่อต้องการให้นำกระแสไฟฟ้าได้ดี และช่วยในการป้องกันความชื้น





(ก) หลักการเชื่อมเซาะร่อง **(ข)** เครื่องเชื่อมเซาะร่อง (Gouging machine)

รูปที่ 7.40 หลักการเชื่อมเซาะร่องและเครื่องเชื่อมเซาะร่อง

ที่มา : Thematech, 2016

ลวดเชื่อมเซาะร่องมีทั้งแบบที่เป็นรูปร่างแท่งกลม (Rod gouging carbon air) และแบบรูปร่างแท่งแบน (Flat gouging carbon air) ดังแสดงในรูปที่ 7.41 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีหลายขนาดให้เลือกใช้ตามลักษณะความหนาของชิ้นงาน โดยแต่ละขนาดความหนาก็จะมีความยาวแต่ที่สัมพันธ์กัน คือขนาดที่โตขึ้นจะมีความยาวที่มากขึ้น เช่น ขนาด Ø คูณ ความยาว ได้แก่ 3.2 x 305 มม. 7.9 x 356 มม. หรือ 25.4 x 432 (ผู้ผลิต Arcair ESAB) ดังตัวอย่างแสดงขนาดลวดเชื่อมในรูปที่ 4.42 พร้อมตัวอย่างคำแนะจากผู้ผลิตในรูปที่ 4.43



(ก) ลวดเชื่อมเซาะร่องแบบแท่งกลม **(ข)** ลวดเชื่อมเซาะร่องแบบแท่งแบน

รูปที่ 7.41 ประเภทของเชื่อมเซาะร่องตามรูปทรงของเส้นลวด

ที่มา : ARCAIR ESAB, 2013



รูปที่ 7.42 ตัวอย่างของลวดเชื่อมเซาะร่องตามขนาดของเส้นลวด *ที่มา : ARCAIR ESAB, 2014*

GEMINI

ลวดเชื่อมสำหรับงานเชื่อมตัด เซาะร่อง

GEMINI CHAMFERTRODE

ลวดเชื่อมเจมินี่ CHAMFERTRODE เป็นลวดเชื่อมที่ออกแบบมาพิเศษสำหรับงานตัด เซาะร่องโดยไม่ต้องใช้ลมช่วย ในสารพอกหุ้มไม่มีธาตุคาร์บอน ทำให้เหมาะสำหรับงานเซาะร่องสเตนเลส เพราะคาร์บอนจะไม่ลงไปแทรกตัวในแนวเชื่อม ทำให้แนวเซาะร่องสะอาด ใช้ได้กับงานตัด เซาะร่องบนเหล็กเหนียว สเตนเลส อลูมิเนียม

ข้อแนะนำในการปรับตั้งกระแสไฟสำหรับงานตัดโลหะ

แผ่นวัสดุ	ความหนา (มม.)	ขนาดลวดเชื่อม (มม.)	กระแสไฟ (แอมแปร์)	ความเร็วในการตัด (ซ.ม./นาที)
เหล็กกล้าละมุน	12	2.6	130	7
เหล็กกล้าละมุน	12	3.2	190	10.5
เหล็กกล้าละมุน	20	4.0	280	8.5
เหล็กกล้าละมุน	25	5.0	350	8.5

ข้อแนะนำในการปรับตั้งกระแสไฟสำหรับงานเซาะร่อง

ความลึก (มม.)	ขนาดลวดเชื่อม (มม.)	กระแสไฟ (แอมแปร์)	ความเร็วในการเซาะ (ซ.ม./นาที)
3	2.6	150	26
3	3.2	200	36
3	4.0	280	39
3	5.0	350	49

กระแสไฟฟ้าที่ใช้เชื่อม

AC หรือ DC ±				
ขนาด /ความยาว (มม.)	2.6X300	3.2X350	4.0X350	5.0X350
กระแสไฟ ต่ำสุด/สูงสุด (แอมป์)	130-150	190-200	200-280	280-350

รูปที่ 7.43 ตัวอย่างของคำแนะจากผู้ผลิตในการใช้งานลวดเชื่อมเซาะร่องตามขนาดของเส้นลวดและปัจจัยการเชื่อม *ที่มา : GEMINI, 2012*

จากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่าลวดเชื่อมเชาะร่องยังไม่มีการกำหนดมาตรฐานที่เป็นทางการ ปัจจุบันจะเลือกใช้งานตามคำแนะนำของผู้ผลิตเป็นสำคัญ แต่สำหรับผู้ที่มีความเชี่ยวชาญหรือมีประสบการณ์ด้านการเชื่อมเชาะร่องก็อาจปรับเปลี่ยนปัจจัยการเชื่อมไปได้ตามความเหมาะสม โดยได้มีผู้เชี่ยวชาญได้ให้คำแนะนำไว้จากประสบการณ์ในการทำงาน สำหรับใช้กำหนดกระแสไฟเชื่อมเชาะร่องตามขนาดของลวดเชื่อมดังแสดงในตารางที่ 7.47

ตารางที่ 7.47 คำแนะนำปัจจัยการเลือกใช้ลวดเชื่อมเชาะร่อง

ที่มา : WEST WELD –Parameter Selection of Carbon Air Gouging Electrode, 2019

ประเภทของลวดเชื่อม	ขนาดของลวดเชื่อม (mm)	กระแสไฟเชื่อม (A)
แบบเส้นกลม (Rod)	3	150–180
	4	150–200
	5	150–250
	6	180–300
	7	200–350
	8	250–400
	9	350–450
	10	350–500
แบบเส้นแบน (Flat)	3 x 12	200–300
	4 x 12	200–400
	5 x 10	300–400
	5 x 12	350–450
	5 x 15	400–500
	5 x 18	450–550
	5 x 20	500–600

การกำหนดมาตรฐานของลวดเชื่อมก็เพื่อเป็นการสร้างความรู้และความเข้าใจถึงบทบาทหน้าที่และการเลือกใช้ลวดเชื่อมให้เหมาะสมและถูกต้อง พร้อมกับเป็นการกำหนดการสื่อสารด้านงานเชื่อมที่ตรงกันของการเทียบเคียงของแต่ละมาตรฐาน เพราะมาตรฐานของแต่ละประเทศที่เป็นเจ้าของมาตรฐานก็มักจะกำหนดมาตรฐานลวดเชื่อมตามมาตรฐานของตนเองเป็นหลัก ถึงแม้จะมีการแสดงการเทียบเคียงกับมาตรฐานอื่น ๆ ไว้บ้างแต่ไม่อาจครบถ้วนได้ทุกมาตรฐาน ดังนั้นข้อมูลที่นำมาแสดงในบทเรียนนี้ก็ไม่อาจนำมาแสดงได้ครบถ้วนทุกมาตรฐาน จะเน้นมาตรฐานที่เป็นที่นิยมหรือยอมรับกันในอุตสาหกรรมการเชื่อมในประเทศไทยเป็นสำคัญ อย่างไรก็ตามก็จะเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์สำหรับเป็นแนวทางในการเทียบเคียงหรือศึกษาเพิ่มเติมมาตรฐานลวดเชื่อมจากกแหล่งข้อมูลอื่น ๆ ต่อไป

ดัชนีคำศัพท์บทที่ 7

Acid cover flux – ฟลักซ์พอกหุ้มชนิดที่เป็นกรด

All position – ลวดเชื่อมที่สามารถเชื่อมได้ทุกตำแหน่งท่าเชื่อม

AWS. Standard electrode – มาตรฐานลวดของสมาคมการเชื่อมแห่งสหรัฐอเมริกา

Basic cover flux – ฟลักซ์พอกหุ้มชนิดที่เป็นด่าง

Cellulise cover flux – ฟลักซ์พอกหุ้มชนิดที่เป็นเคลลูโลส

Code – รหัสที่สร้างขึ้นตามข้อกำหนดของแต่ละมาตรฐาน

Colour code electrode – รหัสสีที่ใช้แบ่งชนิดลวดเชื่อมมาตรฐาน JIS 3321

Composite rod – ลวดเชื่อมเส้นตันแบบกำหนดส่วนผสมทางเคมี

Continuous wire feeding – การป้อนเติมลวดเชื่อมอย่างต่อเนื่อง

Core wire composition – ปริมาณธาตุผสมของแกนลวดโลหะ

Dissimilar cover electrode – ลวดสำหรับเชื่อมโลหะต่างชนิด

Electrode cast iron – ลวดเชื่อมสำหรับเชื่อมโลหะเหล็กหล่อ

Electrode classification – การแบ่งประเภทหรือชนิดของลวดเชื่อม

Electrode cover flux – ลวดเชื่อมโละที่มีสารฟลักซ์พอกหุ้ม

Electrode drying – การอบไล่ความชื้นออกจากลวดเชื่อม

Electrode drying oven – เตาอบลวดเชื่อมติดตั้งประจำตำแหน่ง

Electrode filler rod – ลวดโลหะเปลือยแบบแท่งเส้นตรง

Electrode filler wire – ลวดโลหะเปลือยแบบเส้นม้วน

Electrode strip – ลวดเชื่อมที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบน

Flat gouging carbon air – ลวดเชื่อมเซาะร่องแบบแท่งแบน

Flux core electrode – ลวดเชื่อมโลหะที่มีผงฟลักซ์อยู่ภายในท่อเส้นลวด

Gouging electrode – ลวดโลหะเชื่อมที่ผลิตออกมาสำหรับการตัดเซาะร่อง

Jetting action – เป็นพฤติกรรมที่แกนลวดหลอมเร็วกว่าฟลักซ์

JIS. Standard electrode – ลวดเชื่อมมาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศญี่ปุ่น

Military electrode – ลวดเชื่อมที่ใช้งานในวงการทหารกับงานเฉพาะทาง

Outer shielding flux core wire – ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ที่อาศัยแก๊สปกคลุมจากถังแก๊ส

Portable electrode drying oven – เตาอบลวดเชื่อมเฉพาะตัวบุคคลนำติดตัวไปเชื่อม

Power ferrous – ผงเหล็กออกไซด์ที่ผสมอยู่ในฟลักซ์ชนิดที่เป็นกรด

Rutile cover flux – ฟลักซ์พอกหุ้มชนิดที่เป็นรูไทล์

Self shielding flux core wire – ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ที่อาศัยแก๊สปกคลุมในตัวลวดเอง

Short circuit transfer – ลวดเชื่อมที่สามารถเชื่อมแบบถ่ายโอนลัดวงจร

Similar cover electrode – ลวดสำหรับเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน

Solid rod – ลวดเชื่อมเส้นตันแบบไม่กำหนดส่วนผสมทางเคมี

Stabilizes arc – หน้าที่ของฟลักซ์ที่ช่วยในการอาร์กมีความสม่ำเสมอตลอดขณะทำการเชื่อม

Standard filler electrode – มาตรฐานลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมด้วยแก๊สปกคลุม

Welding consumable – ลวดโลหะที่ใช้เติมลงในรอยเชื่อมที่สิ้นเปลือง

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 7

ข้อที่ 1. จงบอกหน้าที่หลักของลวดเชื่อม (Function of welding electode)

ข้อที่ 2. จงบอกประโยชน์ของการสร้างหรือกำหนดมาตรฐานของลวดเชื่อม

ข้อที่ 3. จงอธิบายความหมายของคำว่าลวดเชื่อมแบบ “Consumable”

ข้อที่ 4. จงอธิบายลักษณะและองค์ประกอบที่สำคัญของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Elecrode cover flux)

ข้อที่ 5. จงบอกถึงความแตกต่างของฟลักซ์แต่ละชนิดที่นำมาใช้พอกหุ้มแกนลวดโลหะ พร้อมบอกหน้าของฟลักซ์ที่พอกหุ้มมาโดยสังเขป

ข้อที่ 6. จงอธิบายลักษณะของลวดเชื่อมประเภทต่าง ๆ ดังนี้

- ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Covered electrode)
- ลวดเชื่อมเปลือย (Filler electrode)
- ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux core electrode)
- ลวดเชื่อมเซาะร่อง (Gouging ekectrode)

ข้อที่ 7. หน้าที่ของฟลักซ์ในการ Deoxidizer หมายถึงอะไร และใช้ธาตุใดผสมลงไปในผงฟลักซ์พอกหุ้ม

ข้อที่ 8. จงบอกเหตุผลของความจำเป็นที่ต้องทำการอบลวดเชื่อม และใช้อุปกรณ์อะไรในการอบ

ข้อที่ 9. จงแปลความหมายของลวดเชื่อมตามมาตรฐาน AWS A5.1/A5.1M:2012 ดังต่อไปนี้

- ลวดเชื่อม E3010 - ลวดเชื่อม E3013 - ลวดเชื่อม E3016

ข้อที่ 10. จงแปลความหมายของลวดเชื่อมตามมาตรฐาน AWS A5.15 /A5.15M:R2016 ดังต่อไปนี้

- ลวดเชื่อม ENi-CI - ลวดเชื่อม ENi-CI-A - ลวดเชื่อม ENiFeMn-CI

ข้อที่ 11. จงแปลความหมายของลวดเชื่อมตามมาตรฐาน JIS Z 3211-1991:R2008 ดังต่อไปนี้

- ลวดเชื่อม E4310 - ลวดเชื่อม E4316 - ลวดเชื่อม E4327

ข้อที่ 12. จงแปลความหมายของลวดเชื่อมตามมาตรฐาน JIS Z 3221-1991:R2013 ดังต่อไปนี้

- ลวดเชื่อม E308L - ลวดเชื่อม E309MoL - ลวดเชื่อม E309NbL

ข้อที่ 13. จงแปลความหมายของลวดเชื่อมตามมาตรฐาน ISO 2560:2012 ดังต่อไปนี้

- ลวดเชื่อม E425B42H5 - ลวดเชื่อม E4910-P1 - ลวดเชื่อม E5516-3M3

ข้อที่ 14. จงแปลความหมายของลวดเชื่อมตามมาตรฐาน ISO 2560:2012 ดังต่อไปนี้

- ลวดเชื่อม E425B42H5 - ลวดเชื่อม E4910-P1 - ลวดเชื่อม E5516-3M3

ข้อที่ 15. จงแปลความหมายของลวดเชื่อมตามมาตรฐาน AWS A.18/A5.18:2017 ดังต่อไปนี้

- ลวดเชื่อม ER70S-2 - ลวดเชื่อม ER70S-7 - ลวดเชื่อม ER70S-1B

ข้อที่ 16. จงแปลความหมายของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์มาตรฐาน AWS A.5.20/A5.20:2015 ดังต่อไปนี้

- ลวดเชื่อม E70T-1C - ลวดเชื่อม E71T-1M - ลวดเชื่อม E71T-12M
- ลวดเชื่อม E71T-12M - ลวดเชื่อม E70T-1C - ลวดเชื่อม E71T-5C

ข้อที่ 17. จงบอกส่วนที่เหมือนกันและส่วนที่แตกต่างกันของลวดเชื่อมคู่ที่แสดงในรูปนี้



(ก) ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อ 98%Ni **(ข)** ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อ 55%Ni

ที่มา : YAWATA Welding Electrode, 2015

ข้อที่ 18. จงบอกชื่อมาตรฐานและระบุชนิดของลวดเชื่อมตามรหัสลวดเชื่อมที่กำหนดให้ดังต่อไปนี้

– YF309LC	– YFW–A60EX	– E316LKT0–3	– E307TX–11
– A 4043–WY	– A 1070–BY	– YGT50	– YGW11
– ER308LSi	– FeC–GF	– ENiFe–G49	– E4327
– E9018M	– E7010–X	– E7016	– E316JIL

ข้อที่ 19. จงบอกคุณสมบัติและหน้าที่ของลวดเชื่อมเซาะร่อง (Gouging electrode) ดังแสดงในรูปมาโดยละเอียด พร้อมบอกเหตุผลของการเคลือบผิวลวดด้วยทองแดงมาพอเข้าใจ



(ก) ลวดเชื่อมเซาะร่องแบบแท่งกลม **(ข)** ลวดเชื่อมเซาะร่องแบบแท่งแบน

ที่มา : ARCAIR ESAB, 2013

บรรณานุกรมบทที่ 7

American Petroleum Institute (API), *Welding Processes, Inspection, and Metallurgy*. API Recommended Practice 577. Published by API, United States, 2010. 8th Edition, 2010.

American Petroleum Institute (API). *Welding Processes, Inspection, and Metallurgy*. API Recommended practice 577. 2nd Edition, December, 2013.

American Welding Society (AWS). AWS A2.4/A2.4:2007. *Standard Symbols for Welding, Brazing, and Nondestructive Examination*.Supersedes ANSI/AWS A2.4−98 6th Edition, March 23, 2007.

American Welding Society (AWS). AWS A5.10/A5.10:M2017. *Welding Consumables−Wire Electrodes, Wires and Rods for Welding of Aluminum and Aluminum Alloy− Classification.* 11th Edition, Supersedes AWS A5.10/M:2012. Approved by American National Standards Institute, November 22, 2016.

American Welding Society (AWS). AWS A5.15/A5.15:1990 (R2016). *Specification for Welding Electrodes and Rods for Cast Iron*. Approved by American National Standards Institute, May 5, 2016.

American Welding Society (AWS). AWS A5.18/A5.18M:2017. *Specification for Carbon Steel Electrode and Rods for Gas Shielding Arc Welding*. Approved by the American National Standards Institute. 7th Edition, 2017.

American Welding Society (AWS). AWS A5.20/A5.20:M2005(R2015). *Specification for Carbon steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding*. 2015 Edition, Supersedes ANSI/AWS A5.20−95. Approved by American National Standards Institute, July 22, 2015.

American Welding Society (AWS). AWS A5.22/A5.22:M2012. *Specification for Stainless Steel Flux Cored and Metal Cored Welding Electrodes and Rods*. 5th Edition, Supersedes AWS A5.22/A5.22M:2010. Approved by American National Standards Institute,

American Welding Society (AWS). AWS A5.9/A5.9M:2017. *Welding Consumables−Wire Electrodes, Strip Electrode, Wires and Rods for Arc Welding of Stainless and Heat Resisting Steels*. Approved by American National Standards Institute. 9th Edition, 2017.

American Welding Society (AWS). *Specification for Carbon Steel Electrode for Shielded Metal Arc Welding*. AWS A5.1/A5.1M : 2012, 14th Edition,USA : 2012.

American Welding Society (AWS). *Publications Catalog– Standard, Reference books*, Online Education, and More. Summer/Fall, 2017.

American Welding Society (AWS) A2.4:2007. *Standard Symbols for Welding, Brazing, and Nondestructive Examination*. Approved by the American National Standards Institute, by American Welding Society, Miami, United States, 2007.

American Welding Society, AWS A5.1/A5.1M:2012. *Specification for Carbon Steel Electrode for Shielded Metal Arc Welding*. Supersedes AWS A5.1/A5.1M:2004. Approved by the American National Standards Institute. 14th Edition, 2012.

American Welding Society, AWS A5.22/A5.22M:2010. *Specification for Stainless Steel Flux Cored and Metal Cored Welding Electrodes and Rods*. Supersedes AWS A5.22–95. Approved by the American National Standards Institute. 4th Edition, 2010.

Avesta Welding. *The Avesta Welding Manual–Practice and Products for Stainless Steel Welding*. Avesta Welding AB 2004, 2004.

David H. Phillips. *Welding Engineering– An Introduction*, 1st Edition, Published by John Wiley & Sons, Ltd., United Kingdom, 2016.

ESAB. *Repair and Maintenance Welding Handbook – Selection and Application Guide Esab Repair & Maintenance Consumables*. 2nd Edition, 2012.

ESAB. *DATABOOK–Welding Filler Metal*. USA, 2016.

ESAB. *Welding Handbook–Consumables for Manual and Automatic Welding*. 2014.

HOBART – *Filler Metals Full–Line Catalog* (Find You Solution Today). 12–2020.

Internation Standard ISO 18275:2018(E). *Welding Consumables–Covered Electrodes for Manual Metal Arc Welding of High–Strength Steels–Classification*. Third Edition, 08–2018.

Internation Standard: ISO 2560:2009(E). *Welding Consumables–Covered Electrodes for Manual Metal Arc Welding of Non–Alloy and File Grain Steels–Classification*. Third Edition, 15–10–2009.

International Organization for Standardization: ISO. ISO 1701:2015, *Welding Consumables–Covered Electrodes, Wire, Rods, and Tubular Cored Electrodes for Fusion Welding of Cast iron –Classification*. 3rd Edition, Number of pages 22, 2015.

International Organization for Standardization: ISO. ISO 2560:2020, *Welding Consumables–Covered Electrodes for Manual Metal Arc Welding of Non–Alloy and Fine Grain Steels–Classification*. 4th Edition, Number of pages 34, 2020.

International Organization for Standardization: ISO. ISO 3581:2016, *Welding Consumables–Covered Electrodes for Manual Metal Arc Welding of Stainless and Heat–Resisting Steels–Classification*. 3rd Edition, Number of pages 23, 2016.

Japanese Industrial Standard (JIS). JIS Z 3252:2001. *Covered Electrode, Solid Wire, Rods and Flux Cored Wires for Cast Iron (Foreign Standard)*. Published by Japanese Standard Association (JSA), 2001.

Japanese Industrial Standard (JIS). JIS Z 3313:2009. *Flux Cored Wires for Gas Shielded and Self–Shielded Metal Arc Welding of Mild Steel, High Strength Steel and Low Temperature Service Steel (Foreign Standard)*. Published by Japanese Standard Association (JSA), February 20, 2009.

Japanese Industrial Standard (JIS). JIS Z 3323:2003. *Stainless Steel Flux Cored Wires*. Published by Japanese Standard Association (JSA), January 01, 2003

Japanese Industrial Standards (JIS). JIS Z 3312:2018. *Solid wires for MAG and MIG welding of mild steel, high strength steel and low temperature service steel*. 9th Edition. Approved by Japanese Standards Association (JSA), October 22, 2018.

Japanese Industrial Standards (JIS). JIS Z 3316:2017. *Solid wires and rods for TIG welding of mild steel, high strength steel and low temperature service steel*. 2017 Edition. Approved by Japanese Standards Association (JSA), April 20, 2017.

Japanese Industrial Standards (JIS). JIS Z 3321:2013. *Stainless steel rods, wires and strip electrodes for welding*. 2013 Edition. Approved by Japanese Standards Association (JSA), March 21, 2013.

John Norrish. *Advanced Welding Processes–Technologies and Processes Control*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England. 2006.

Klas Weman. *Welding Processes Handbook*. 1st Edition, Published by Woodhead Publishing Ltd., Cambridge England, 2003.

KOBE STEEL, LTD (Kita–Shinagawa, Shinagawa–Ku). *The ABC's of Arc Welding and Inspection*. 4th Edition, Published by KOBE STEEL, LTD. Tokyo, Japan, 2011.

KOBELCO STEEL, LTD. *Arc Welding of Specific Steels and Cast Irons*, Published by KOBE STEEL, LTD, Kita–Shinagawa, Shinagawa–Ku, Tokyo, 2015.

KOBELCO. *Flux Cored Wires–For Easy and High Efficiency Welding in Every Field*. Published by Kobelco Welding of America INC. 2009.

KOBELCO. *Welding handbook-Welding Consumables and Processes*: Familiarc, Trustarc, Premiarc, 2011.

KOBELCO. *Welding Today-Kobelco Welding Consumables for Mild Steel and 490MPa HT Steel*. 2nd Special Edition, 2011.

Larry Jeffus and Lawrence Bower. *Welding: Skill, Processes and Practices for Entry-Level Welders*. 1st Edition. Delmar Cengage Learning. Cliftan Park, New York, UAS 2010.

Larry Jeffus. *Welding and Metal Fabrication*. DELMAR, Cengage Learning, 2012.

LINCOLN ELECTRIC. *Innershield Wire FCAW-S Welding*. Published by Lincoln Global Inc. Issue 03-2015.

LINCOLN ELECTRIC. *The Welding Experts: Welding Consumables Product Catalogue*. Issus 14, 2011.

NIPPON STEEL. *WELDREAM-Product Catalog*. Published by Nippon Steel Welding Engineering. 11th Edition. September, 2021.

R. Scott Funderburk. *Selecting Filler Metals: Matching Strength Criteria. Key Concepts in Welding Engineering*. Welding Innovation Vol.XVI, No.2, 1999.

Stanley Ness, Charles N. Sherlock, Patrick O. Moore and Paul Mclntire. *Non-Destructive Testing Handbook. Vol. 10-Non-Destructive Testing Overview*. 2nd Edition, Published by American Society for Nondestructive Testing (ASNT), 2001.

STOODY-An ESAB BRAND. *Nickel Based Flux Cored Wires for All Position Welding*. 03-11-2015.

TWI. *CSWIP 3.2-Senior Welding Inspector WIS10, Training and Examination Services*, Granta Park, Cambridge, UK, 2016.

บทที่ 7

ลวดเชื่อมและมาตรฐานลวดเชื่อม

Welding Consumables & Standardisation



ที่มา :Carbone : Electrodes –Wire rolls–Filler Material, 2017

จุดประสงค์การเรียนรู้ บทที่ 7 ลวดเชื่อมและมาตรฐานลวดเชื่อม

- รู้และเข้าใจถึงความหมายและความสำคัญของลวดเชื่อมประเภทต่าง ๆ
- รู้จักมาตรฐานและรหัสต่าง ๆ ที่กำหนดขึ้นของแต่ละประเภทของลวดเชื่อม
- เข้าใจและสามารถอธิบายถึงหลักการแบ่งประเภทของลวดเชื่อมชนิดต่าง ๆ
- สามารถแปลความหมายของรหัสหรือโค๊ดที่ระบุบนลวดเชื่อมของมาตรฐานต่าง ๆ
- สามารถเลือกใช้ลวดเชื่อมตามคำแนะนำของผู้ผลิตได้ถูกต้อง หรือสามารถประยุกต์ใช้ตามความเหมาะสมในกรณีที่มีลวดเชื่อมให้เลือกจำกัด
- สามารถเทียบเคียงรหัสลวดเชื่อมที่เป็นชนิดเดียวกันที่แต่มาตรฐานต่างกัน
- ตระหนักและมีจิตใต้สำนึกในการให้ความสำคัญกับการเลือกใช้ลวดเชื่อมที่ถูกต้อง
- มีจรรยาบรรณในการพิจารณาและตัดสินใจกับปัญหาการเลือกใช้ลวดเชื่อมเมื่อต้องตัดสินใจร่วมกับผู้อื่นที่เกี่ยวข้อง และต้องยอมรับผลการตัดสินใจที่ปราศจากอคติ

"Welding Consumable" หมายถึง ลวดที่ใช้ในการเชื่อม หรือการประสานเนื้อของโลหะให้ติดกัน ด้วยวิธีการเติมเนื้อโลหะลงไปในรอยต่อของโลหะชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม โดยจัดว่าเป็นวัสดุสิ้นเปลือง (Consumable) ของบขวนการเชื่อมแบบหลอมละลายเติมเนื้อเชื่อม

สาระที่น่าสนใจและประเด็นที่ต้องรู้จริงของบทเรียนนี้ ผู้เขียนมีเจตนาที่จะรวบรวมองค์ความรู้และประสบการณ์ที่ผ่านมาในงานด้านวิศวกรรมการเชื่อม ที่จำเป็นต้องเกี่ยวข้องกับประเภท หรือชนิดของลวดเชื่อม และรวมถึงมาตรฐานของลวดเชื่อมตามสากลนิยมเพื่อการสื่อสารและการเข้าใจ ถึงบทบาทและความสำคัญของโลหะลวดเชื่อมที่นำมาใช้ในการหลอมละลายเพื่อเติมเต็มลงในรอยต่อที่ต้องการเชื่อมให้ติดกัน ที่มีคำเรียกโลหะลวดเชื่อมกันหลากหลาย เช่น บ้างก็เรียกลวด Consumable บ้างก็เรียกลวด Electrode บ้างก็เรียก Electrode cover flux บ้างก็เรียก Filler rod และ บ้างก็เรียก Filler wire ซึ่งไม่มีคำเรียกใดที่ผิดเพราะคำเรียกเหล่านี้ล้วนมีความหมายเดียวกัน

R. Scott Funderburk (1999) ได้กล่าวไว้ว่าลวดเชื่อมถือว่าเป็นตัวการสำคัญที่จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของรอยเชื่อมต่อและหลักการเลือกใช้ลวดเชื่อมที่ถูกต้อง ช่างเชื่อมจะต้องเลือกลวดเชื่อมที่เป็นชนิดเดียวกันกับโลหะที่ต้องการเชื่อมที่เราเรียกกันว่า "Similar welding" ซึ่งจะได้เนื้อเชื่อมที่เป็นโลหะชิ้นเดียวกันตลอดโครงสร้าง และปัญหาข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นก็จะน้อย แต่ในความเป็นจริงของงานวิศวกรรมการเชื่อมมีงานเชื่อมมากมายที่ไม่สามารถเลือกใช้ลวดเชื่อมที่เป็นชนิดเดียวกับโลหะชิ้นงานได้ ด้วยเหตุผลมากมาย เช่น ไม่มีผู้ผลิตลวดเชื่อมได้ตรงกับโลหะได้ทุกชนิด หรือ มีความจำเป็นในการออกแบบรอยต่อที่ต้องใช้วัสดุต่างชนิด ซึ่งรวมไปถึงความต้องการสมบัติที่พิเศษบางประการของเนื้อเชื่อม ได้แก่ สมบัติที่ทนการสึกหรอ มีความคงทนต่อแรงสั่นสะเทือน หรือ ทนต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น ในงานเชื่อมที่มีข้อกำหนดแบบนี้ต้องอาศัยความสามารถของช่างหรือวิศวกรงานเชื่อมที่จะต้องพิจารณาเลือกใช้ลวดเชื่อมที่เหมาะสม การที่ต้องเชื่อมโดยโลหะด้วยลวดเชื่อมกับโลหะชิ้นงานที่จะเชื่อมต่างชนิดกัน เราเรียกว่า "Disimilar welding" การเชื่อมงานในลักษณะนี้ต้องมีความเข้าใจถึงคุณลักษณะของลวดเชื่อมที่ต้องเลือกใช้เป็นอย่างดี บทเรียนนี้ได้นำเอาข้อมูลของลวดเชื่อมในทุก ๆ มิติที่จะเป็นความรู้ให้แก่ผู้อ่านได้นำไปใช้พิจารณาเลือกใช้ลวดเชื่อมที่เหมาะสมและถูกต้อง

แต่ด้วยปัจจุบันลวดเชื่อมได้มีการพัฒนาปรับปรุงและผลิตออกมาให้สามารถเลือกใช้งานกันมาก นอกจากจะมีความหลากหลายของชนิด ประเภท หรือเกรดของลวดเชื่อมแล้ว ยังมีมาตรฐานลวดเชื่อมของแต่ละประเทศที่ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดขึ้นเพื่อใช้ในการสื่อสารที่ตรงกัน ดังนั้นการที่รู้เพียงสมบัติของลวดเชื่อมคงไม่เพียงพอ จำเป็นต้องทราบและเข้าใจถึงข้อกำหนดของมาตรฐานลวดเชื่อมต่าง ๆ ที่นิยมใช้งานและยอมรับกัน ดังนั้นบทเรียนนี้จึงนำเรื่องของลวดเชื่อมและข้อกำหนดที่เป็นมาตรฐานสากลที่วิศวกรงานเชื่อม ช่างเชื่อม ผู้ออกแบบงานเชื่อม และ ผู้ทดสอบงานเชื่อม ต้องรู้และเข้าใจในมาตรฐานที่ตรงกัน ไม่เช่นนั้นจะเกิดความผิดผลาดและเกิดการโต้แย้งกัน โดยเฉพาะกรณีที่มีความจำเป็นที่อาจต้องใช้สัญลักษณ์งานเชื่อมของมาตรฐานที่มากกว่าหนึ่งมาตรฐานร่วมกัน ผู้ปฏิบัติงานร่วมกันต่างก็ต้องรู้และต้องแปลความหมายของสัญลักษณ์ต่าง ๆ อย่างถูกต้องและมีจรรยาบรรณในการพิจารณาตัดสินใจ

ลวดเชื่อม (Welding consumable) เป็นวัสดุสิ้นเปลืองที่นำมาใช้เป็นตัวประสานหรือเชื่อมชิ้นงานโลหะสองชิ้นให้ติดกัน โดยจะเกิดขึ้นกับการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) และจะต้องเป็นขบวนการเชื่อมแบบชนิดเติมเนื้อโลหะ (Filling weld) ซึ่งจะไม่ใช้กับการเชื่อมแบบหลอมละลายโลหะหลักติดกัน (Autogenous welding) ลวดเชื่อมแบบสิ้นเปลืองนี้บางครั้งก็จะเรียกกันว่า Consumable electrode จากการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวของกับลวดเชื่อมพบว่าด้วยความหลากหลายของการผลิตลวดเชื่อมออกมาเพื่อรองรับกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน จึงได้มีการแบ่งชนิดของกลุ่มลวดเชื่อมตามหลักเกณฑ์ที่ต่างกันได้หลายลักษณะ ซึ่งสามารถพบเห็นได้ในเอกสารเผยแพร่หรือประชาสัมพันธ์มากมาย โดยเฉพาะผู้ผลิตลวดเชื่อมเองที่มักจะจัดแบ่งกลุ่มตามผลิตภัณฑ์ของตนเอง ทำให้การสื่อสารมักเกิดความสับสนต่อการสร้างข้อกำหนดต่าง ๆ ของขบวนการเชื่อม จากการที่ผู้เขียนได้ศึกษาเรียนรู้ศาสตร์ทางด้านงานเชื่อมมาตลอด และได้สนใจทำงานวิจัยด้านวิศวกรรมงานเชื่อมอย่างต่อเนื่องบวกกับประสบการณ์ทำงานด้านงานเชื่อมในภาคอุตสาหกรรม พอที่จะจัดแบ่งประเภทของลวดเชื่อมตามลักษณะรูปแบบของการนำไปใช้งานโดยอิงควบคู่กับขบวนการเชื่อมอ้างอิง KOBELCO (2009) ดังนี้

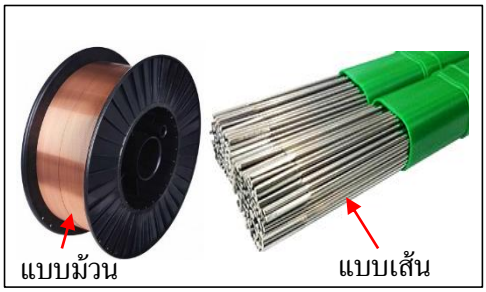
- ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Covered electrode) ลวดเชื่อมประเภทนี้จะหมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมที่ใช้ฟลักซ์ที่เป็นผงของแข็งพอกหุ้มแกนลวดโลหะไว้ เมื่อเกิดการอาร์กหลอมละลายจะกลายเป็นแก๊สใช้ทำหน้าที่ปกคลุมแนวเชื่อม (Shielding gas) โดยที่มีมากมายและหลากหลาย ตามชนิดของแกนกลางลวดโลหะที่ฟลักซ์หุ้ม และตามชนิดของสารฟลักซ์ที่พอกหุ้ม ดังแสดงตัวอย่างลวดเชื่อมในรูปที่ 7.1 (ก)
- ลวดเชื่อมเปลือย (Filler electrode) ลวดเชื่อมประเภทนี้จะหมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมที่ไม่มีสารพอกหุ้มใด ๆ จึงเรียกว่าลวดเปลือย โดยมีทั้งที่เป็นเส้นลวดยาวประมาณ 1000 มม. และที่เป็นลวดม้วนอยู่ในตลับ (Roll) ที่มีความยาวสามารถเชื่อมได้ต่อเนื่องมีหลายขนาดตามน้ำหนักของแต่ละม้วนดังแสดงตัวอย่างลวดเชื่อมในรูปที่ 7.1 (ข)
- ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux core electrode) ลวดเชื่อมประเภทนี้จะหมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมที่มีลักษณะของการใช้แผ่นโลหะม้วนให้เป็นท่อเล็กแกนกลวงซึ่งไว้บรรจุผงฟลักซ์ (Powder flux) ไว้แกนกลางภายใน เมื่อเกิดการอาร์กผงฟลักซ์ก็จะหลอมละลายกลายเป็นแก๊สปกคลุมแนวเชื่อม โดยจะมีทั้งลักษณะเป็นเส้นยาวอยู่ในม้วนตลับ สามารถป้อนเชื่อมได้ต่อเนื่อง และชนิดที่เป็นเส้นตรงยาวประมาณ 500 มม. ดังแสดงตัวอย่างลวดเชื่อมในรูปที่ 7.1 (ค)
- ลวดเชื่อมเซาะร่อง (Gouging electrode) หรือที่เรียกกันว่า ลวดเชื่อมเกาจ์ ลวดเชื่อมประเภทนี้เป็นแบบพิเศษที่ไม่ได้ใช้สำหรับการเติมเนื้อโลหะลงในรอยเชื่อม แต่จะเป็นลวดเชื่อมที่ใช้ในการกำจัดเนื้อโลหะที่ไม่ได้คุณภาพให้ออกไปจากชิ้นงาน เช่น การขจัดแนวเชื่อมที่มีข้อบกพร่องเพื่อทำการเชื่อมซ่อมแซมใหม่ และยังใช้ในการทำความสะอาดแนวเชื่อมเพื่อเตรียมชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม ซึ่งจะเหมาะสำหรับใช้ในการเซาะร่อง เจาะรู หรือใช้ในงานตัด โดยลักษณะจะเป็นแท่งยาวเหมือนลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ขนาดความยาวจะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เช่น ขนาด Ø 3.2 มม. จะยาว 350 มม. ขนาดโตขึ้นที่ขนาด Ø 4.0 มม. จะยาว 400 มม. เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างลวดเชื่อมในรูปที่ 7.1 (ง)

โดยประเภทที่จัดแบ่งไว้ข้างต้นนั้นถือว่าเป็นกลุ่มใหญ่ของประเภทลวดเชื่อม เพราะว่าในละประเภทยังสามารถแบ่งแยกออกเป็นชนิดย่อย ๆ อีกหลายชนิด เช่น แบ่งตามชนิดของวัสดุเส้นลวดเชื่อม (Type of metal materials) หรือ แบ่งตามชนิดของผงฟลักซ์ที่ใช้ผอกหุ้ม/บรรจุไว้ภายใน (Type of flux) หรือ แบ่งตามชนิดของขบวนการเชื่อม (Welding process) ซึ่งรายละเอียดปลีกย่อยของแต่ละประเภทของลวดเชื่อมดังจะได้กล่าวถึงเชิงบรรยายและภาพประกอบเพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจ โดยจะอ้างอิงตามมาตรฐานสากลนิยม (มีหลายมาตรฐาน) ร่วมกับข้อมูลจากผู้ผลิตลวดเชื่อมโดยตรง และจากองค์ความรู้จากงานวิจัยของผู้เขียนที่ได้เผยแพร่อยู่ในวารสารต่าง ๆ ทั้งในระดับชาติและนานาชาติ



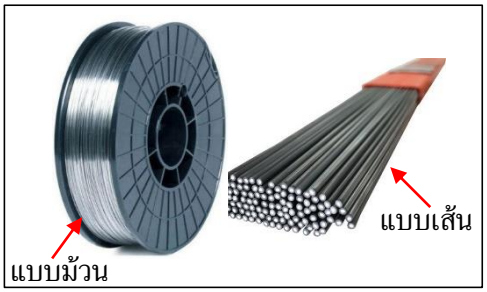
(ก) ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Covered electrode)

ที่มา : The Sun Thai Tool, 2018.



(ข) ลวดเชื่อมเปลือย (Filler electrode)

ที่มา : Siam Part Products, 2019.



(ค) ลวดเชื่อมใส้ฟลักซ์ (Flux core electrode)

ที่มา : The Sun Thai Tool, 2018.



(ง) ลวดเชื่อมเซาะร่อง (Gouging electrode)

ที่มา : Siam Part Products, 2019.

รูปที่ 7.1 การจัดแบ่งประเภทของลวดเชื่อมตามลักษณะรูปแบบของการนำไปใช้งาน

7.1 มาตรฐานลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Standard covered electrodes)

เป็นลวดเชื่อมพื้นฐานสำหรับเทคโนโลยีการเชื่อมก็ว่าได้ ด้วยเพราะเป็นลวดเชื่อมที่นิยมใช้งานกันจำนวนมาก สามารถพบเห็นการใช้งานกันทั่วไป ใช้ง่ายไม่ยุ่งยาก โดยสมาคมการเชื่อมแห่งอเมริกา (AWS) ได้ให้นิยามความหมายของลวดเชื่อมประเภทนี้ว่า “ ลวดเชื่อมที่ใช้สำหรับการเติมลงในแนวเชื่อมและเป็นตัวทำหน้าที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จากขั้วจ่ายไฟฟ้าผ่านตัวลวดเองไปยังการอาร์ก” โดยมีลักษณะเฉพาะของลวดคือ มีฟลักซ์แข็งที่พอกหุ้มแกนลวดโลหะ (Cover flux) ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์จะเป็นลวดเชื่อมที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้กับขบวนการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW/MMAW) หรือที่

รู้จักกันดีในชื่อของ ขบวนการเชื่อมไฟฟ้า หรือการเชื่อมธูป ดังแสดงลักษณะของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ใน รูปที่ 7.2 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์นี้สามารถเชื่อมได้กับชิ้นงานโลหะตระกูลเหล็ก (Ferrous) ได้ทุกชนิดและรวมถึงโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non–ferrous) บางชนิด โดยต้องทำการพิจารณาเลือกใช้ชนิดของลวดให้เหมาะสมตามข้อระบุคุณสมบัติของลวดเชื่อม ทั้งนี้ก็จะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่เป็นแกนลวดกับชนิดของฟลักซ์ที่นำมาพอกหุ้ม



รูปที่ 7.2 ส่วนประกอบของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์หรือลวดเชื่อมไฟฟ้า (Cover electrode)

ที่มา : ปราโมทย์ อุทัยวัฒน์, 2558

โดยพื้นฐานหรือมาตรฐานการผลิตลวดเชื่อม ชนิดของโลหะแกนลวดจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงชนิดของโลหะที่สามารถเชื่อมได้ ด้วยเพราะหลักพื้นฐานการเชื่อมโลหะที่เหมาะสม คือ โลหะชิ้นงานที่นำมาเชื่อมควรเป็นโลหะชนิดเดียวกันกับลวดเชื่อม (Similar welding) จนมีผู้ผลิตบางรายได้แบ่งประเภทของลวดเชื่อมตามชนิดของโลหะแกนลวด ดังตัวอย่างลวดเชื่อมที่นิยมใช้งานกันและจำหน่ายในท้องตลาด ดังนี้

– ลวดเชื่อมไฟฟ้าเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel electrodes)
– ลวดเชื่อมไฟฟ้าเหล็กกล้าผสมต่ำ (Low alloy steel electrodes)
– ลวดเชื่อมไฟฟ้าเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel electrode)
– ลวดเชื่อมไฟฟ้าเหล็กหล่อ (Cast iron electrode)
– ลวดเชื่อมไฟฟ้าทองแดงและผสม (Copper and copper alloy electrode)
– ลวดเชื่อมไฟฟ้าอลูมิเนียมและผสม (Aluminum and aluminum alloy electrode)
– ลวดเชื่อมไฟฟ้านิเกิลและผสม (Nickel and nickel alloy electrode)
– ลวดเชื่อมไฟฟ้าไทเทเนียมและผสม (Titanium and alloy electrode)
– ลวดเชื่อมไฟฟ้าเซอร์โคเนียมและผสม (Zirconium and alloy electrode)

แต่พบว่าชื่อเรียกเหล่านี้ไม่เป็นมาตรฐานสากลนิยมของวงการอุตสาหกรรมเชื่อม แต่อาจจะใช้สื่อสารกันในเฉพาะกลุ่มงานในบางประเภทหรือในบางมาตรฐาน เช่น กลุ่มงานประเภทของการเชื่อมโลหะท่อ (Pipe welding group) หรือเป็นข้อกำหนดในมาตรฐานเฉพาะใช้ในประเทศของตนเอง จากการศึกษารวบรวมข้อมูลการเลือกใช้ลวดเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์ เกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาตัดสินเลือกใช้ลวดเชื่อมที่เป็นมาตรฐานสากลนิยม จะใช้ชนิดของสารฟลักซ์พอกหุ้มเป็นตัวกำหนดที่สำคัญ ด้วยเพราะสารพอกหุ้มจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมเป็นสำคัญ โดยสารฟลักซ์ที่นำมาพอกหุ้มนั้นหลายคน

มักจะเข้าใจว่าจะทำหน้าที่หลัก คือ การปกป้องบ่อหลอมละลายของแนวเชื่อม (Shielding weld pool) ในระหว่างที่ทำการเชื่อมเพียงอย่างเดียว แต่แท้จริงแล้วฟลักซ์ที่พอกอยู่ที่ผิวของแกนลวดเชื่อมมีหน้าที่และประโยชน์มากกว่าที่เข้าใจ และชนิดของฟลักซ์ที่นำมาพอกก็จะมีบทบาทต่อการเชื่อมที่แตกต่างกัน ดังนั้น จึงมีการยอมรับกับการแบ่งชนิดหรือเกรดของลวดเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์ที่แบ่งด้วยเกณฑ์ของชนิดสารฟลักซ์พอกหุ้ม ซึ่งผู้เขียนจะขอกล่าวถึงสมบัติและหน้าที่ของสารฟลักซ์ที่นำมาใช้ประโยชน์ในแง่มุมต่าง ๆ ของขบวนการเชื่อมก่อน เพื่อที่จะเป็นพื้นฐานแนวทางความเข้าใจในเหตุผลของหลักการแบ่งชนิดลวดเชื่อมตามชนิดของสารพอกหุ้มในหัวข้อถัดไป ดังนี้

1. สมบัติและหน้าที่ของสารฟลักซ์พอกหุ้ม (Properties and functions of cover flux)

● สมบัติของสารฟลักซ์พอกหุ้ม (Properties of cover flux) สารพอกหุ้มหรือฟลักซ์จะมีสมบัติพื้นฐานที่พึงประสงค์ หรือเป็นสารพอกหุ้มที่ดีนั้นจะต้องมีลักษณะเฉพาะตัว ดังนี้ คือ

– ต้องมีความถ่วงจำเพาะที่ต่ำมากวัสดุโลหะ (Low specific gravity) หรือความหนาแน่นต่ำ (Low density) เพราะจะสามารถลอยตัวเหนือน้ำโลหะเหลวได้ดีในระหว่างการอาร์กหลอมละลาย

– ต้องมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำและสามารถหลอมละลายได้ง่าย ซึ่งต้องเกิดการหลอมละลายไปพร้อม ๆ กันกับลวดแกนกลางในขณะที่เกิดการอาร์กของเชื่อม

– ขณะอาร์กเป็นของเหลวจะต้องปล่อยแก๊สที่มีความหนาแน่นสูง (แก๊สเฉื่อย) หรือควันออกมาเพื่อทำหน้าที่ปกป้อง (Shielding) น้ำโลหะเหลวที่กำลังหลอมละลายในแนวเชื่อม ให้ปราศจากแก๊สหรืออากาศจากบริเวณโดยรอบเข้ามารวมตัวกับน้ำโลหะได้

– เมื่อน้ำโลหะในแนวเชื่อมเย็นตัวลง ฟลักซ์จะต้องลอยขึ้นและครอบคลุมอยู่ที่ผิวของแนวเชื่อมในสภาพของแข็ง และสามารถเคาะหรือกำจัดออกได้ง่าย

– ต้องไม่ดูดซับหรือสะสมความชื้นไว้ภายใน และถ้ามีความชื้นก็จะต้องกำจัดออกได้ง่าย

– ต้องยึดเกาะกับผิวของโลหะแกนลวดได้ดี ไม่หลุดหรือแตกออกได้ง่าย

– ต้องมีน้ำหนักที่เบา และพอกติดผิวแกนลวดได้ดี (ไม่หนาเกินไป)

– ต้องมีสภาพไม่เป็นควันพิษที่มีผลกระทบต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อม

จากสมบัติของฟลักซ์ที่ควรจะเป็นดังที่กล่าวมานั้น จะเห็นได้ว่าวัสดุที่จะนำมาใช้ผลิตเป็นฟลักซ์เพื่อพอกลวดเชื่อม หรือเป็นแก๊สปกคลุมแนวเชื่อมนั้นจะต้องผ่านการวิจัยและทดลองหาสมบัติดังกล่าวมาอย่างต่อเนื่อง เพื่อที่จะได้ฟลักซ์ตามสมบัติที่พึงประสงค์ โดยภายในองค์ประกอบของผงฟลักซ์ที่ต้องการจะต้องผสมด้วยสสารต่าง ๆ ที่มีหน้าที่ตามวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 7.1 โดยจะใช้โซเดียม (Na) และโปแตสเซียมซิลิเกต (K_2SiO_3) ทำเป็นกาวประสานผงฟลักซ์ และใช้สารจำพวกเฟอร์โรและผงโลหะบริสุทธิ์เพื่อทำหน้าที่ดึงแก๊สออกซิเจนออกจากแนวเชื่อม พร้อมกับทำหน้าที่เติมเป็นสารประกอบเชิงโลหะที่เป็นด่าง ซึ่งจะช่วยให้การอาร์กสม่ำเสมอ และใช้จำพวก ขี้เลื่อย เยื่อไม้ ฝ้าย เซลลูโลส ผสมเพื่อทำหน้าที่สร้างแก๊สปกคลุม ส่วนสารจำพวก ซิลิก้า อลูมิเนียม แร่เหล็ก หินแม่เหล็ก ดินเหนียว และสารประกอบ โปแตสเซียมไตตาเนต กับ ไทเทเนียมไดออกไซด์ จะทำหน้าที่

เป็นสแลกปกคุลมแนวเชื่อม ซึ่งเมื่อทำการผสมสสารที่เป็นองค์ประกอบร่วมทั้งหมดเข้าด้วยกัน เพื่อผลิตออกมาเป็นผงฟลักซ์ที่จะนำไปพอกหุ้มแกนลวดให้ได้ออกมาเป็นลวดเชื่อมไฟฟ้านั้น พบว่าชนิดของผงฟลักซ์หรือสารพอกหุ้มที่ผลิตออกมาใช้งานกันในปัจจุบันสามารถแบ่งได้ 4 ชนิด คือ

1. ฟลักซ์พอกหุ้มชนิดที่เป็นกรด (Acid type cover flux)
2. ฟลักซ์พอกหุ้มชนิดที่เป็นด่าง (Basic type cover flux)
3. ฟลักซ์พอกหุ้มชนิดที่เป็นรูไทล์ (Rutile type cover flux)
4. ฟลักซ์พอกหุ้มชนิดที่เป็นเซลลูโลส (Cellulose type cover flux)

ซึ่งแต่ละชนิดของฟลักซ์ที่พอกหุ้มนี้จะเหมาะกับการเชื่อมวัสดุโลหะแต่ละชนิดแต่ละเกรดแตกต่างกัน โดยจะสัมพันธ์กับสสารที่มีอยู่ในส่วนผสมของตัวผงฟลักซ์ ดังนั้นช่างเชื่อมก็ต้องเลือกใช้ชนิดของผงฟลักซ์บนลวดเชื่อมให้ถูกต้อง เพราะผงฟลักซ์ที่หุ้มอยู่บนลวดเชื่อมจะมีหน้าที่สำคัญ ๆ ของแต่ละตัวผสมที่เป็นองค์ประกอบอยู่ภายในซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 7.1 องค์ประกอบของสสารที่ผสมอยู่ในฟลักซ์ที่นำมาใช้พอกหุ้มลวดเชื่อม

ที่มา : ESAB–Welding Handbook. Consumable for Manual & Automatic welding, 2014

องค์ประกอบของสสารที่ผสมอยู่ในฟลักซ์พอกหุ้มลวดเชื่อม (Component of cover flux)	
– สารตั้งต้นที่เป็นผงฟลักซ์	– สารผสมเพิ่มความเสถียรในการอาร์ก
– สารลดออกซิเจน ไนโตรเจน และ ไฮโดรเจน	– สารเพิ่มปริมาณแก๊สเฉื่อยเพื่อปกคลุม
– สารผสมให้สแลกแข็งตัว	– สารตัวประสานการเกาะยึดของฟลักซ์
– ธาตุผสมที่เพิ่มในลวดเชื่อม	

● หน้าที่ของสารฟลักซ์พอกหุ้ม (Function of cover flux) สารพอกหุ้มหรือฟลักซ์หุ้มลวดเชื่อมจะมีบทบาทและหน้าที่ต่อเมื่อเกิดการอาร์กเชื่อมขึ้น โดยเมื่อได้ความร้อนจากการอาร์กก็จะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นของเหลว จากนั้นก็จะทำหน้าที่ต่อขบวนการเชื่อมอาร์กในแต่ละด้านดังต่อไปนี้ อ้างอิงข้อมูลจาก Avesta Welding (2004)

1. หน้าที่สร้างขบวนการอาร์ก (Stabilizes arc) โดยในส่วนประกอบของฟลักซ์หุ้ม สสารหลักในกลุ่มของคาร์บอเนตเมื่อได้รับความร้อนจะสลายตัวกลายเป็นแก๊สและจะถูกทำให้แตกตัว (Ionization) โดยตัวของอิเลคตรอนจากการไหลของกระแสไฟเชื่อมที่ข้ามผ่านการอาร์ก จะช่วยทำให้การอาร์กมีความเสถียรมากขึ้นและเริ่มต้นการอาร์กได้ง่ายขึ้น

2. หน้าที่เป็นแก๊สปกคลุม (Shielding gas) เป็นหน้าที่หลักที่สำคัญของสารพอกหุ้ม โดยสสารที่ผสมอยู่ในฟลักซ์จะหลอมละลายกลายเป็นแก๊สที่มีความหนาแน่นหรือมีน้ำหนักมากกว่าอากาศโดยรอบบ่อหลอมละลาย ซึ่งจะฟุ้งกระจายอยู่รอบ ๆ ติดกับแนวเชื่อม เช่น เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Co_2) โดยจะทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันไม่ให้บรรดาเหล่าแก๊สออกซิเจน (O_2) กับ แก๊สไนโตรเจน (N_2) ที่

เป็นส่วนประกอบหลักของบรรยากาศโดยรอบเข้ามารวมตัวกับแนวเชื่อมที่กำลังหลอมละลายจากการอาร์ก ซึ่งแก๊สปกป้องนี้จะเกิดจากสสารออร์แกนิค กับ สารกลุ่มคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ที่อยู่ในผงฟลักซ์

3. หน้าที่ลดออกซิเจน (Deoxidizer) ในขณะที่เกิดการอาร์กเนื้อโลหะก็จะหลอมละลายและก็จะเกิดการละลายของออกซิเจนออกมาด้วย ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อความเหนียวของแนวเชื่อมจึงจำเป็นที่จะต้องลดหรือกำจัดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น โดยการเติมธาตุในกลุ่มของเฟอร์โรซิลิกอน และเฟอร์โรแมงกานีสลงไปผสมในฟลักซ์เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวลดออกซิเจน ซึ่งก็จะช่วยเพิ่มสมบัติด้านความเหนียวและสมบัติทางกลด้านอื่น ๆ ของแนวเชื่อมดีขึ้น

4. หน้าที่กำจัดสารมลทินและสารปนเปื้อน (Impurity and contaminate) ข้อบกพร่องของงานเชื่อมจำนวนไม่น้อยที่เกิดจากสารมลทินและสารปนเปื้อนติดอยู่ในแนวเชื่อม ดังนั้นหน้าที่ในการทำความสะอาดของฟลักซ์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยการเติมธาตุผสมลงไปในผงฟลักซ์และเมื่อเกิดการหลอมละลายก็จะไปจับตัวกับสารมลทินและสารปนเปื้อนต่าง ๆ ที่ปะปนอยู่ในน้ำโลหะเหลวและด้วยสมบัติของธาตุผสมที่มีความถ่วงจำเพาะที่ต่ำก็จะนำสารมลทินและสารปนเปื้อนลอยสู่ผิวด้านบนของบ่อหลอมละลายเป็นลักษณะของสแลกเหลว

5. หน้าที่สร้างสแลกปกคลุมแนวเชื่อม (From slag after melting and covers weld) หลักการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เมื่อเกิดการอาร์กจะเกิดการหลอมละลายทั้งแกนลวดและฟลักซ์หุ้มลวดพร้อม ๆ กัน โดยแกนลวดจะทำหน้าที่เติมเนื้อโลหะในรอยต่อ ส่วนฟลักซ์ก็จะทำหน้าที่เป็นตัวปกป้อง แต่เมื่อน้ำโลหะเย็นตัว สารผสมในฟลักซ์จะทำหน้าที่ในการทำให้น้ำสแลกแข็งตัวก่อนน้ำโลหะเชื่อม เพื่อต้องการแยกออกจากน้ำโลหะที่แข็งตัวออกจากสแลก ไม่เช่นนั้น สแลกจะฝังตัวไปกับการแข็งตัวของแนวเชื่อม และสแลกต้องมีสมบัติที่สามารถเคาะออกได้ง่าย

6. หน้าที่เติมธาตุผสมในแนวเชื่อม (Increases alloy element) สมบัติเฉพาะบางอย่างที่ต้องการให้เกิดขึ้นในแนวเชื่อม นอกจากที่ได้มากับแกนลวดเชื่อมแล้วนั้นจะมาจากการเพิ่มเติมเข้าไปผสมไว้ในผงฟลักซ์หุ้มลวด เมื่อเกิดการอาร์กก็จะหลอมละลายเข้าไปรวมตัวกับเนื้อโลหะหลักในแนวเชื่อม ซึ่งจะส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีสมบัติเป็นไปตามที่ต้องการ เช่น มีสมบัติทางกลที่ดี มีความต้านทานการกัดกร่อนและสึกหรอ มีความต้านทานความร้อนสูง หรือความสามารถในการขึ้นรูปได้ดี เป็นต้น

7. หน้าที่ช่วยให้แนวเชื่อมซึมลึกดี (Increases penetration) การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์จะมีผลต่อแนวเชื่อมที่ซึมลึก (Root weld) และแนวเชื่อมด้านหน้า (Face weld) โดยถ้าขณะอาร์กแกนของลวดเชื่อมหลอมละลายเร็วกว่าฟลักซ์พอกหุ้ม พฤติกรรมการอาร์จะเป็นแบบ ที่พุ่งลงบ่อหลอมด้วยความเร็วสูง ที่เรียกว่า Jetting action จะช่วยให้เกิดการซึมลึกได้ดี ซึ่งมีชนิดของผงฟลักซ์ที่หลอมละลายยากกว่าแกนลวดโลหะ ในทางกลับกันก็มีผงฟลักซ์ชนิดที่หลอมละลายเร็วกว่าแกนลวด จะใช้กับการเชื่อมที่ไม่ต้องการแนวซึมลึกแต่ประสงค์เพื่อความสวยงามของผิวและรูปร่างของแนวเชื่อม

ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์จะประกอบด้วยสองส่วนหลัก ๆ ที่มีบทบาทสำคัญและมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกัน นั้นก็คือ ส่วนของแกนลวดโลหะ (Rod) กับ ส่วนของฟลักซ์ที่พอกหุ้ม (Cover flux) โดยที่

แกนลวดจะต้องเป็นวัสดุโลหะชนิดเดียวกันกับโลหะหลักที่จะทำการเชื่อมจึงไม่เป็นปัญหาในแง่ของการที่จะเลือกวัสดุมาผลิตลวดเชื่อมสำหรับในภาคส่วนของผู้ผลิต (Manufacturers) และในแง่ของการที่จะเลือกใช้งานลวดเชื่อมสำหรับในภาคส่วนของช่างเชื่อม (Welder) แต่ที่เป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพแนวของเชื่อมและข้อพกพร่องที่อาจเกิดขึ้นในแนวเชื่อม คือ ส่วนของฟลักซ์ที่หุ้มแกนลวดเชื่อม (Type of flux) ซึ่งชนิดของฟลักซ์จะมีอิทธิพลต่อการควบคุมคุณภาพของแนวเชื่อม ทั้งในแง่ของสมบัติที่พึงประสงค์และแง่มุมของการปกป้องข้อบกพร่องที่จะเกิดขึ้นในแนวเชื่อม ด้วยเหตุผลในส่วนนี้จึงนิยมที่จะแบ่งชนิดของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ตามชนิดของฟลักซ์ที่หุ้ม ดังรายละเอียดของแต่ละชนิดที่จะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2. การแบ่งลวดเชื่อมตามชนิดของสารฟลักซ์หุ้ม (Type of electrode flux)

ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ หรือที่รู้จักกันดีในนามของ “ลวดเชื่อมไฟฟ้า หรือลวดเชื่อมธูป” ผลิตออกมารองรับกับการเชื่อมวัสดุโลหะได้หลายชนิดหลายเกรด ทั้งเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steels) เหล็กกล้าผสม (Alloy steels) เหล็กหล่อ (Cast iron) และโลหะนอกกลุ่มเหล็กบางชนิด (Non–ferrous) โดยมีมาตรฐานที่รองรับก็หลากหลายเช่นกัน และลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่มีปริมาณการใช้มากที่สุดคือ ลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมกลุ่มของโลหะเหล็กกล้า ทั้งเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม โดยแบ่งตามชนิดของสารฟลักซ์หุ้ม อ้างอิงตาม ESAB Repair & Maintenance Welding Handbook (2012) ดังนี้

● ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดกรด (Acid welding electrode) ลวดเชื่อมชนิดนี้จะใช้ฟลักซ์พอกหุ้มที่มีส่วนผสมของสสารจำพวกเหล็กออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ และซิลิกา สแลกเมื่อแข็งตัวแล้วหลุดร่อนหรือเคาะออกได้ง่าย เกิดการหลอมละลายที่ลึกใช้ได้ทั้งเครื่องเชื่อมกระแสไฟตรง (DC) และกระแสไฟสลับ (AC) ลวดเชื่อมชนิดนี้มีแนวโน้มในการเกิดการแตกร้าวขณะร้อน (Hot crack) ได้ จึงเหมาะกับการเชื่อมโลหะที่มีความเหนียวสูง ดังแสดงลักษณะพฤติกรรมของการอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดนี้ในรูปที่ 7.3 (ก) โดยในทางการผู้ผลิตลวดเชื่อม ได้ผลิตลวดเชื่อมชนิดนี้ออกมาใช้งานมีอยู่ 2 ประเภท คือ

– ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กออกไซด์ผสมโซเดียม (EXX20) ลวดเชื่อมชนิดนี้สามารถเชื่อมด้วยความเร็วที่สูงได้ดี เพราะลวดเชื่อมมีอัตราการหลอมเหลวสูงซึ่งสังเกตได้ว่าปลายแกนลวดที่หลอมจะหดลึกเข้าไปข้างใน มีฟลักซ์ยื่นออกมาหุ้มอยู่ มีการหลอมลึกระดับปานกลาง เกิดสะเก็ดเชื่อมน้อย เหมาะกับการเชื่อมในท่าราบและการเชื่อมมุม (Fillet)

– ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กออกไซด์ผสมผงเหล็ก (EXX27) ลวดเชื่อมชนิดนี้มีอัตราการป้อนเติมเนื้อโลหะลงในรอยต่อได้ในอัตราที่สูงและรวดเร็ว มีอัตราการหลอมเลวสูง ด้วยเหตุเพราะมีปริมาณของโลหะผงเหล็ก (Power ferrous) ผสมอยู่มากสูงถึง 50% ของส่วนผสมฟลักซ์

● ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดด่าง (Basic welding electrode) หรือลวดเชื่อมชนิดไฮโดรเจนต่ำ (Low hydrogen) ฟลักซ์ที่นำมาใช้พอกหุ้มลวดเชื่อมชนิดนี้จะมีส่วนผสมของสารจำพวกแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) หรือคาร์บอเนตประเภทอื่น ๆ และฟลูออไรด์ (CaF2) หรือชื่อในทางการค้าว่าฟลูออร์สปาร์ส

(Fluorspar) โดยสารคาร์บอเนตที่เป็นตัวผสมหลักเมื่อได้รับความร้อนจากการอาร์ก จะทำให้เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีไฮโดรเจนต่ำปกคลุมบ่อหลอมละลาย ทำให้เนื้อเชื่อมมีปริมาณของแก๊สออกซิเจนจากภายนอกเข้าไปรวมตัวได้น้อยลง ฟลักซ์ชนิดนี้จะทำให้สแลกมีความหนา เป็นเงาและมีสีเข้ม เคาะหรือกำจัดออกได้ยาก ขณะเชื่อมเกิดควันมาก มีข้อแนะนำจากผู้ผลิตเสมอว่าก่อนนำไปเชื่อมต้องทำการอบไล่ความชื้นก่อนเสมอ เพื่อป้องกันการเกิดรูพรุนและการแตกร้าวของรอยเชื่อมได้เป็นอย่างดี โดยลวดเชื่อมสามารถที่จะใช้กับเครื่องเชื่อมทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ และเหมาะอย่างยิ่งกับการนำไปเชื่อมโลหะเหล็กกล้าความผสมแข็งแรงสูง (High strength alloy) เพราะขณะเชื่อมเกิดแก๊สไฮโดรเจนในปริมาณที่ต่ำ ดังแสดงลักษณะพฤติกรรมของการอาร์กของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดนี้ใน รูปที่ 7.3 (ข) ลวดเชื่อมชนิดนี้ผู้ผลิตได้ผลิตออกมา 3 ประเภท คือ

– ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ไฮโดรเจนต่ำผสมโซเดียม (EXXX5) ลวดเชื่อมประเภทนี้จะใช้แคลเซียมคาร์บอเนตหรือแคลเซียมฟลูออไรด์เป็นส่วนผสมหลัก ซึ่งเป็นสารที่สภาพเป็นด่าง จนนิยมเรียกกันว่าลวดเชื่อมประเภทด่าง สารพอกหุ้มประเภทนี้จะไม่ใช้ร่วมกับสารพอกหุ้มประเภทอื่นที่มีน้ำร่วมผสมอยู่ เพื่อสร้างจุดเด่นของลวดที่สามารถลดแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดจากการอาร์กของลวดเชื่อม โดยลวดเชื่อมประเภทนี้จะค่อนข้างให้สมบัติของแนวเชื่อมที่ดี มีความแข็งแรงสูง (ต้องเก็บไว้ในตู้อบเพื่อป้องปกจากความชื้น) ซึ่งมีความรุนแรงของการอาร์กอยู่ในระดับปานกลาง การหลอมลึกปานกลาง และอัตราการหลอมละลายเติมลวดก็อยู่ในระดับปานกลาง จะเหมาะสมกับการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมแบบกระแสตรงลวดเชื่อมเป็นขั้วบวก (DCEP)

– ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ไฮโดรเจนต่ำผสมโพแตสเซียม (EXXX6) ลวดเชื่อมประเภทนี้จะมีสมบัติและความสามารถใกล้เคียงกับ ประเภทผสมโซเดียมข้างต้น แต่จะมีความพิเศษกว่าที่สามารถใช้กับเครื่องเชื่อมได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับที่ลวดเชื่อมต่อขั้วบวกได้ จึงเป็นที่นิยมเลือกใช้งานกันมาก การอาร์กก็สม่ำเสมอ

– ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ไฮโดรเจนต่ำผสมโพแตสเซียม–ผงเหล็ก (EXXX8) ลวดเชื่อมประเภทนี้จะมีความสามารถโดยพื้นฐานเหมือนกับสองประเภทที่กล่าวมา เพียงแต่มีการเพิ่มปริมาณของผงเหล็กเข้าไปผสมในปริมาณที่มากสูงถึง 25–40% ทำให้ลวดเชื่อมประเภทนี้มีความสามารถในการป้อนเติมเนื้อเชื่อมได้สูง อัตราการหลอมเหลวสูง เหมาะกับการเชื่อมโลหะที่ต้องการปริมาณเนื้อโลหะเพื่อเติมเต็มลงในรอยต่อในปริมาณที่มาก

● ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดรูไทล์ (Rutile welding electrode) ลวดเชื่อมประเภทนี้ใช้สารพอกหุ้มจำพวกไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารผสมหลัก ที่มีความโดดเด่นในเรื่องของการช่วยทำให้สแลกหรือขี้ตะกรันไหลตัวได้ดี โดยที่การอาร์กไม่ต้องรุนแรง การหลอมลึกปานกลาง และผิวหน้าของแนวเชื่อมจะราบเรียบ ซึ่งมีข้อด้อยเรื่องของการป้องกันแก๊สไฮโดรเจนแทรกตัวเข้ามารวมตัวกับแนวเชื่อมจึงให้แนวเชื่อมมีความแข็งเพิ่มสูงขึ้น จึงไม่นิยมนำมาใช้เชื่อมเหล็กกล้า ดังแสดงลักษณะพฤติกรรมของการ

อาร์กของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดนี้ในรูปที่ 7.3 (ค) ลวดเชื่อมประเภทนี้เป็นที่นิยมกันมาก ผู้ผลิตได้จัดแบ่งออกเป็นประเภทย่อย ได้ 3 ประเภท คือ

– ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์รูไทล์ผสมโซเดียม (EXX12) ลวดเชื่อมประเภทนี้จะมีสมบัติที่เชื่อมที่อาร์กง่าย การไหลตัวของฟลักซ์ที่หลอมละลายไปรวมตัวกับสารมลทินการการไหลตัวที่ดีมาก ทำให้การควบคุมบ่อหลอมละลายก็เสถียร และเกิดสะเก็ดเชื่อมน้อยมาก ลวดเชื่อมประเภทนี้มักจะเพิ่มเติมส่วนผสมของผงเหล็กเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหลอมละลายให้สามารถป้อนเติมน้ำโลหะได้มากและรวดเร็วขึ้น แต่การหลอมลึกค่อนข้างน้อย สามารถใช้ได้กับเครื่องเชื่อมชนิดกระแสไฟตรงสลับและกระแสไฟตรงที่ลวดเชื่อมต่อเป็นขั้วลบ (DCEN)

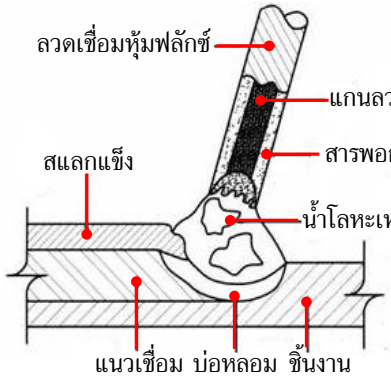
– ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์รูไทล์ผสมโพแตสเซียม (EXX13) ลวดเชื่อมประเภทนี้จะมีสมบัติที่ใกล้เคียงกับประเภทฟลักซ์รูไทล์ผสมโซเดียม จะต่างกันที่มีการอาร์กที่ราบเรียบและสม่ำเสมอมากกว่าและสามารถใช้ได้ดีกับทั้งการต่อขั้วแบบ DCEP และ แบบ DCEN

– ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์รูไทล์ผสมผงเหล็ก (EXXX4) ลวดเชื่อมประเภทนี้ปรับปรุงมาจากสองชนิดแรกโดยการผสมผงเหล็กมากขึ้นสูงถึง 25–40% ซึ่งเพิ่มความโดยเด่นในด้านการหลอมละลายและอัตราการป้อนเติมเนื้อเชื่อมที่สูง ขี้ตะกรันน้อยและขจัดออกได้ง่าย การหลอมลึกต่ำ ผิวหน้าแนวเชื่อมเป็นคลื่นเล็กน้อย ที่สำคัญสามารถใช้ได้กับเครื่องเชื่อมทุกชนิดของกระแสไฟเชื่อม

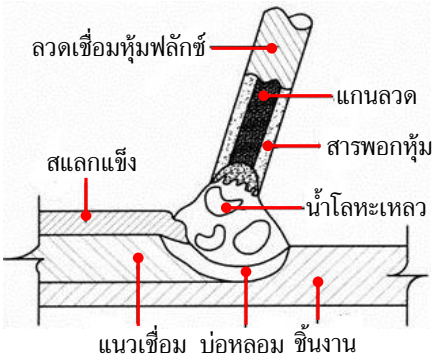
● ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดเซลลูโลส (Cellulose welding electrode) ลวดเชื่อมประเภทนี้จะใช้สารพอกหุ้มที่ได้จากสารอินทรีย์ที่เป็นเซลลูโลสจำพวกเยื่อไม้หรือส่วนที่เหลือจากการผลิตกระดาษ โดยเซลลูโลสเมื่อได้รับความร้อนจากการอาร์กจะทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนปกคลุมจำนวนมาก ปกป้องแก๊สจากภายนอกได้ดี ขณะเดียวกันการอาร์กก็ค่อนข้างรุนแรง ทำให้เกิดการหลอมลึกที่สูง ผิวแนวเชื่อมมีลักษณะเป็นคลื่นไม่ราบเรียบ เกิดสะเก็ดเชื่อมมาก ส่งผลให้เกิดสแลกน้อยและเคาะออกได้ง่าย มีความพิเศษที่สามารถใช้เชื่อมได้ทั้งแนวราก (Root) และ แนวทับหน้า (Face) ดังแสดงลักษณะพฤติกรรมของการอาร์กของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดนี้ในรูปที่ 7.3 (ง) ลวดเชื่อมชนิดนี้ผู้ผลิตได้แบ่งออกมาเป็น 2 ประเภทที่สำคัญ ๆ คือ

– ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เซลลูโลสผสมโซเดียม (EXX10) ลวดเชื่อมประเภทนี้จะมีสมบัติของสารพอกหุ้มที่ให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนช่วยในการปกคลุมแนวเชื่อมได้เป็นอย่างดี แนวเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรงสูงมาก และยังหลอมละลายได้ลึก จะสามารถใช้ได้กับการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมไฟกระแสตรง ลวดเชื่อมต่อขั้วบวก (DCEP) การอาร์กจึงค่อนข้างที่จะรุนแรง ส่งผลเสียทำให้แนวเชื่อมเกิดสะเก็ดโลหะ(Spatter) บริเวณแนวเชื่อมมาก

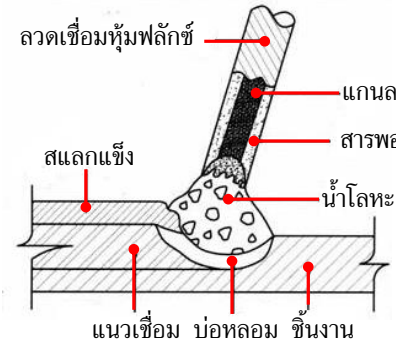
– ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เซลลูโลสผสมโพแตสเซียม (EXX11) ลวดเชื่อมประเภทนี้พัฒนาขึ้นมาจากประเภทแรกดังที่กล่าวมา ดังนั้น สมบัติและความสามารถเหมือนกันกับประเภทแรก แต่ที่แตกต่างกันคือเป็นลวดเชื่อมที่สามารถใช้กับเครื่องเชื่อมทั้งชนิดกระแสไฟสลับและกระแสไฟตรงลวดเชื่อมต่อขั้วบวก (DCEP)



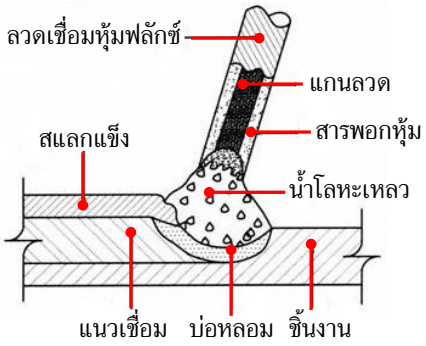
(ก) การอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดกรด



(ข) การอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดด่าง



(ค) การอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดรูไทล์



(ง) การอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดเซลลูโลส

รูปที่ 7.3 ลักษณะการอาร์กของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ใช้สารพอกหุ้มต่างชนิด

ที่มา : บทเรียนออนไลท์วิชาวัสดุประสานงานเชื่อม, 2011

3. การจัดเก็บและการอบลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Stored and Oven electrode)

ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ผลิตขึ้นมาจากการนำสารแร่ธาตุและสารประกอบออกไซด์ในประเภทต่าง ๆ นำมาผสมกันแล้วทำการบดให้เป็นรูปแบบผง (Powder) จากนั้นก็นำมาผสมกับน้ำแก้ว (Water glass) ทำเป็นฟลักซ์เพื่อใช้พอกหุ้มแกนลวดโลหะ จนได้เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ซึ่งด้วยเพราะองค์ประกอบของฟลักซ์และขบวนการพอกหุ้มที่มีไม่แข็งแรงมากนัก มีโอกาสที่ฟลักซ์พอกจะหลุดร่อนออกได้ง่าย และเมื่อสัมผัสกับน้ำหรือความชื้นต่าง ๆ จะมีสมบัติที่ดูดซับความชื้นได้มาก ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์สำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ดังนั้นวิธีการจัดเก็บที่จะให้คงสภาพใช้งานได้ดีและวิธีการอบไล่ความชื้นออกไปจากลวดเชื่อมจะต้องปฏิบัติให้ถูกวิธี

● วิธีการจัดเก็บลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ควรจัดเก็บให้อยู่ในกล่องบรรจุ (Packaging) จากผู้ผลิตในสภาพที่ดีมีการห่อหุ้มด้วยวัสดุป้องกันความชื้น สถานที่จัดเก็บควรมีระดับความชื้นที่ต่ำ มีระบบระบายอากาศที่ดี และมีชั้นวางเรียงไม่ซ้อนทับกัน กรณีที่เปิดกล่องลวดเชื่อมใช้แล้วส่วนที่เหลือใช้จะต้องจัดเก็บในห้องที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ที่ความแปรผันต้องไม่เกิน $\pm 5^{\circ}C$

ความชื้นสัมพัทธ์ต้องไม่เกิน 60% ที่ 15–25°C หรือที่ 50% ที่ 25–35°C และหากลวดเชื่อมเปียกน้ำ น้ำมัน หรือจาระบี จะต้องจัดแยกเก็บและนำไปทำความสะอาด (กรณีที่สามารถยังใช้งานได้) หรืออาจต้องทิ้งเพราะลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เมื่อสัมผัสกับสารปนเปื้อนจะทำให้คุณภาพลดลงซึ่งจะส่งผลทำให้แนวเชื่อมเกิดข้อพกพร่องได้ง่าย จึงเป็นข้อที่ต้องพิจารณาและไม่แนะนำเอาไปใช้กับงานเชื่อมที่ต้องการประสิทธิภาพของแนวเชื่อมสูง ดังแสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์กล่องบรรจุลวดเชื่อมซึ่งมีทั้งที่เป็นวัสดุพลาสติก และเป็นวัสดุกระดาษ ในรูปที่ 7.4 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

● วิธีการอบลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Electrode drying) ความชื้นของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์จะมีอิทธิพลต่อขบวนการเชื่อมอาร์กเป็นอย่างยิ่ง ไม่ว่าจะเป็นรูปแบบของความสม่ำเสมอของการอาร์ก คุณภาพของแนวเชื่อม การแตกร้าวของแนวเชื่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งโอกาสที่จะเกิดข้อบกพร่องในรูปแบบต่าง ๆ บนแนวเชื่อม ดังนั้นการขจัดความชื้นออกไปจากลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ก่อนที่จะไปใช้เชื่อมจึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งช่างเชื่อมหรือวิศวกรงานเชื่อมต้องรู้และเข้าใจถึงวิธีการปฏิบัติ เช่น อบอย่างไร อบด้วยเครื่องมือหรืออุปกรณ์ชนิดใด ลวดเชื่อมประเภทไหนที่ต้องอบบ้างและจะต้องอบที่ระดับอุณหภูมิเท่าไหร่ สิ่งเหล่านี้ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น การอบลวดเชื่อมครั้งต่อไปเมื่ออบแล้วใช้ไม่หมด จะแนะนำให้อบครั้งใหม่ที่ระดับอุณหภูมิ 140–200°C เป็นเวลา 2–12ชั่วโมง (จากประสบการณ์ที่นิยม คือ 6 ชั่วโมง ที่ 150°C และอบใหม่ได้ไม่ควรเกินจำนวน 6 รอบ) โดยปกติทั่วไปเป็นที่ทราบกันดีในกลุ่มงานวิชาชีพช่างเชื่อมว่าการอบลวดเชื่อมจะใช้เตาอบ (Electrode drying oven) ที่ได้ความร้อนจากขดลวดความต้านทานไฟฟ้า โดยจะมีทั้งที่เป็นเตาอบที่มีขนาดใหญ่ติดตั้งประจำตำแหน่ง (Stationary) อบได้ในปริมาณลวดเชื่อมที่มากตั้งแต่ปริมาณ 50 ถึง 200 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 260 ถึง 425 °C และ ดังแสดงในรูปที่ 7.5 (ก) และกระบอกอบลวดที่เป็นแบบเคลื่อนที่ (Portable electrode drying oven) ที่นิยมใช้เป็นตัวใส่ลวดเชื่อมที่เอาออกจากเตาอบหลักไปใช้หน้างานที่เชื่อม เพราะอบได้ที่อุณหภูมิ 30 ถึง 140 °C และในปริมาณที่ไม่มาก (ประมาณ 5 กิโลกรัม) จนในปัจจุบันมักเรียกกระบอกอบแบบนี้ว่า กระบอกอุ่นลวดเชื่อม โดยมีทั้งแบบวางตั้งตรง และแบบวางแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 7.5 (ค) และ (ง) ตามลำดับ

สำหรับประเภทของลวดเชื่อมที่ต้องผ่านการอบไล่ความชื้นก่อนนำไปใช้งานนั้น จะเป็นลวดเชื่อมประเภทไฮโดรเจนต่ำ (Low hydrogen electrodes) ซึ่งก็คือลวดเชื่อมชนิดด่าง (Basic electrode) ด้วยเพราะลวดเชื่อมประเภทนี้ออกแบบมาใช้งานที่ต้องการสมบัติของแนวเชื่อมที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น งานท่อส่งแก๊ส ท่อส่งน้ำมัน ถังภาชนะความดัน ซึ่งเนื้อเชื่อมของงานกลุ่มนี้มักเกิดการแตกร้าวจากแก๊สไดรเจน (H_2 Crack) จึงต้องเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีไฮโดรเจนต่ำมาใช้งาน นอกจากนี้ลวดเชื่อมประเภทนี้ยังโดดเด่นในด้านความเหนียวทนแรงกระแทก (Toughness) ที่ไม่ใช่ความเหนียวทนแรงดึง (Tensile strength) ได้ดีกว่าลวดเชื่อมชนิดอื่น ๆ ดังนั้นลวดเชื่อมที่ใช้เชื่อมต้องไม่มีความชื้นปะปนอยู่ในเนื้อฟลักซ์หุ้ม(ยอมให้มีได้แต่ต้องน้อยที่สุดเท่าที่สามารถกำจัดออกได้) เราจึงนิยมเรียกลวดเชื่อมชนิดนี้ว่า ลวดไฮโดรเจนต่ำ ส่วนลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ประเภทรูไทล์ ที่ออกแบบมาใช้โดยไม่ต้องอบไล่ความชื้นเนื่องจากฟลักซ์ดูดซับความชื้นได้ต่ำ และนิยมใช้กับงานที่เชื่อมโลหะบาง (Sheet metal) ซึ่งเนื้อ

เชื่อมไม่มากพอที่จะสะสมแก๊สไฮโดรเจนแล้วเกิดการแตกร้าว จึงไม่มีความจำเป็นต้องอบไล่ความชื้นก่อนนำไปใช้งาน (แต่ถ้าต้องการที่อบไล่ความชื้นก็สามารถทำได้) มีข้อแนะจากผู้ผลิตให้จัดวางกล่องลวดเชื่อมขณะปฏิบัติงานในแนวตั้งและเป็นช่องแคบ ๆ การดูดซับไฮโดรเจนจะต่ำลง แต่จะดีที่สุดถ้าจัดเก็บไว้ในกระบอกอุ่นลวด (ตามมาตรฐาน AWS D1.1 อุณหภูมิต้องไม่ต่ำกว่า 120°C)



(ก) บรรจุภัณฑ์ลวดเชื่อมกล่องพลาสติก

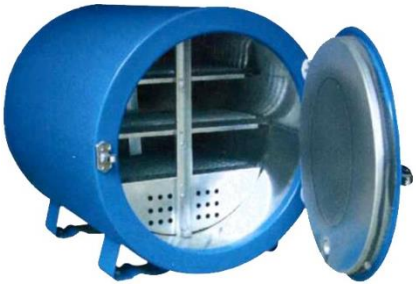
ที่มา : Castolin Eutectic, 2021



(ข) บรรจุภัณฑ์ลวดเชื่อมกล่องกระดาษ

ที่มา : KOBE Steel, 2020

รูปที่ 7.4 ตัวอย่างการจัดเก็บลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ในบรรจุภัณฑ์ของผู้ผลิต



(ก) เตาอบลวดเชื่อม



(ข) กระบอกอบลวดเชื่อมนอน



(ค) กระบอกอุ่นลวดเชื่อมตั้ง

รูปที่ 7.5 อุปกรณ์อบไล่ความชื้นและอุ่นในลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

ที่มา : Product of Speed arc, 2019

4. มาตรฐานต่าง ๆ ของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Classification standards code of covered electrode)

ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์หรือลวดเชื่อมไฟฟ้าที่ผลิตออกมาจำหน่ายและใช้งานกันมีหลายมาตรฐานที่รู้จักกันดี ได้แก่ มาตรฐาน AWS (มาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา) มาตรฐาน EN DIN ISO (มาตรฐานของประเทศในกลุ่มยุโรป) มาตรฐาน JIS (มาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น) และ มาตรฐาน มอก. (TIS) (มาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศไทย) และยังมีมาตรฐานอื่น ๆ อีกที่ไม่ได้กล่าวถึง เป็นต้น อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะมีหลายมาตรฐาน แต่สาระสำคัญที่ระบุถึงลวดเชื่อมจะไม่แตกต่างกันมาก ส่วน

ใหญ่จะต่างกันที่การระบุรหัส (Code) จากประสบการณ์ที่ผ่านมาของผู้เขียนพบว่า งานเชื่อมในประเทศไทยจะนิยมอ้างอิงตามมาตรฐาน AWS กับมาตรฐาน JIS และมาตรฐาน มอก. ซึ่งจะได้แสดงในรายละเอียดต่าง ๆ ของแต่ละมาตรฐานดังนี้

4.1 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มาตรฐาน AWS (American Welding Society)

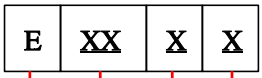
มาตรฐานที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้จัดกลุ่มแบ่งรหัสลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็ก ดังนี้

1) AWS A5.1/A5.1M:2012 ข้อกำหนดสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ของเหล็กกล้าคาร์บอน (Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding) ซึ่งได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดออกมาดังนี้

AWS A5.1/A5.1M:2012 **E XX X X** ตัวอักษรและตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

A5.1/A5.1M หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน

2012 หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน (2012)



- หมายถึง = ชนิดของฟลักซ์พอกหุ้ม และชนิดของกระแสไฟเชื่อม
- หมายถึง = ตำแหน่งท่าเชื่อม
- หมายถึง = ค่าความเค้นแรงดึงต่ำสุด กิโลปอนด์/ตารางนิ้ว ใช้หมายเลข 2–5
- หมายถึง = ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Electrode)

ตำแหน่งท่าเชื่อม

หมายเลข 0 หรือ 1 = เชื่อมได้ทุกตำแหน่งท่าเชื่อม

หมายเลข 2 = เชื่อมได้ในตำแหน่งท่าราบ และท่าแนวระดับ

หมายเลข 3 = เชื่อมได้ในตำแหน่งท่าราบ

หมายเลข 4 = เชื่อมได้ในตำแหน่งท่าราบ ท่าแนวระดับ และท่าเหนือศีรษะ

ชนิดของของฟลักซ์พอกหุ้มและชนิดกระแสไฟเชื่อม

หมายเลข 0 = ฟลักซ์เซลลูโลส–โซเดียม กระแสไฟเชื่อม DCEP

หมายเลข 1 = ฟลักซ์เซลลูโลส–โพแตสเซียม กระแสไฟเชื่อม AC/DCEP

หมายเลข 2 = ฟลักซ์รูไทล์–โซเดียม กระแสไฟเชื่อม AC/DCEN

หมายเลข 3 = ฟลักซ์รูไทล์–โพแตสเซียม กระแสไฟเชื่อม AC/DCEP/DCEN

หมายเลข 4 = ฟลักซ์รูไทล์–ผงเหล็ก กระแสไฟเชื่อม AC/DCEP/DCEN

หมายเลข 5 = ฟลักซ์ไฮโดรเจนต่ำ–โซเดียม กระแสไฟเชื่อม DCEP

หมายเลข 6 = ฟลักซ์ไฮโดรเจนต่ำ–โพแตสเซียม กระแสไฟเชื่อม AC/DCEP

หมายเลข 7 = ฟลักซ์เหล็กออกไซด์–ผงเหล็ก กระแสไฟเชื่อม AC/DCEP/DCEN

หมายเลข 8 = ฟลักซ์ไฮโดรเจนต่ำ–ผงเหล็ก กระแสไฟเชื่อม AC/DCEP

จากที่ได้บ่งชี้ถึงความหมายของรหัสหรือโค๊ด (Code) ที่ใช้จัดแบ่งประเภทของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ตามมาตรฐานของ AWS ในข้างต้นแล้วนั้น ผู้เขียนใคร่จะขอยกตัวอย่างชนิดลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์บางชนิดเพื่อเป็นตัวอย่างในการแปลความหมายของโค๊ดที่แสดงอยู่บนลวดเชื่อม และตัวอย่างการแสดงโค๊ดที่ผู้ผลิตระบุไว้บนลวดเชื่อมในรูปที่ 7.6 และลวดเชื่อมตัวอย่างที่จะแสดงความหมายมีดังนี้

ลวดเชื่อมชนิด E6010 หมายถึง ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดเซลลูโลส มีความเค้นแรงดึงสูงสุด 60,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว เชื่อมได้ทุกตำแหน่งท่าเชื่อม ใช้กระแสไฟเชื่อม DCEP การอาร์กรุนแรง หลอมลึกสูง (Deep)

ลวดเชื่อมชนิด E6013 หมายถึง ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดรูไทล์–โพแตสเซียม มีความเค้นแรงดึงสูงสุด 60,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว เชื่อมได้ทุกตำแหน่งท่าเชื่อม ใช้กระแสไฟเชื่อม AC/DCEP/DCEN การอาร์กนิ่มนวลไม่รุนแรง หลอมลึกต่ำ

ลวดเชื่อมชนิด E6016 หมายถึง ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิด มีความเค้นแรงดึงสูงสุด 60,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว เชื่อมได้ทุกตำแหน่งท่าเชื่อม ใช้กระแสไฟเชื่อม DCEP การอาร์กรุนแรง หลอมลึกสูง

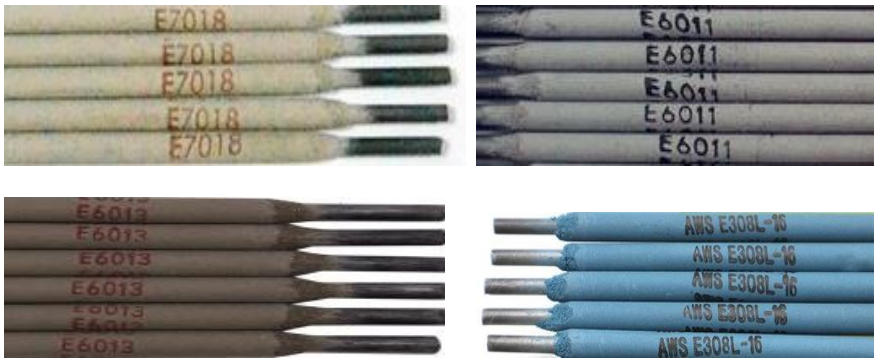
นอกจากนี้ยังมีรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์อื่น ๆ ของประเภท E 60 และ E 70 ที่แสดงถึงโค๊ด ชนิดของสารพอกหุ้ม ท่าเชื่อมและชนิดของกระแสไฟเชื่อม ดังแสดงในตารางที่ 7.2

ปัจจุบันผู้ผลิตลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ได้พัฒนาลวดเชื่อมชนิดแปลกใหม่ขึ้นมามาก เพื่อต้องการให้สามารถนำไปใช้งานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและตรงตามความต้องการของผู้ใช้มากขึ้น มาตรฐานก็มีการเพิ่มเติมรหัสโค๊ดบนลวดเชื่อมสำหรับลวดเชื่อมที่ใช้งานพิเศษเพาะทาง เช่น ลวดเชื่อมประเภท E 70 ยกตัวอย่าง E7018–1 H4 R รหัสพิเศษเพิ่มเติม คือ

1 หมายถึง เหมาะสำหรับงานเชื่อมที่รับแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature impact)

H4 หมายถึง ไฮโดรเจนผสมน้อยกว่า 4 มิลลิลิตร/100 กรัม (Hydrogen content)

R หมายถึง ผ่านการทดสอบการดูดซับความชื้น (Absorbed moisture test) ลวดเชื่อมบางชนิดกำหนดเป็นตัว M ซึ่งจะหมายถึงใช้ในงานด้านการทหาร (Military)



รูปที่ 7.6 ตัวอย่างการระบุรหัสหรือโค๊ดบนลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

ที่มา : KOBE Steel Welding Electrode, 2017

ตารางที่ 7.2 การแบ่งประเภทลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐาน AWS A5.1

ที่มา : ANSI/AWS A5.1/A5.1M, 2012

ลวดเชื่อมประเภท E60	สารพอกหุ้ม	ท่าเชื่อม	กระแสไฟเชื่อม
E6010	เซลลูโลส–โซเดียมสูง	F/V/OH/H	AC/DCEP
E6011	เซลลูโลส–โปแตสเซียมสูง	F/V/OH/H	AC/DCEP
E6012	ไทเทเนียม–โปแตสเซียมสูง	F/V/OH/H	AC/DCEN
E6013	ไทเทเนียม–โปแตสเซียมสูง	F/V/OH/H	AC/DCEP/DCEN
E6020	เหล็กออกไซด์สูง	H/FIL	AC/DCEP/DCEN
E6022	เหล็กออกไซด์สูง	F	AC/DCEN
E6027	ผงเหล็กออกไซด์สูง	H/FIL/F	AC/DCEN
E6028	ผงเหล็ก–เหล็กออกไซด์	H/FIL/F	AC/DCEN
ลวดเชื่อมประเภท E70	**สารพอกหุ้ม**	**ท่าเชื่อม**	**กระแสไฟเชื่อม**
E7014	ผงเหล็ก–ไทเทเนียม	F/V/OH/H	AC/DCEP/DCEN
E7015	ไฮโดรเจนต่ำ	F/V/OH/H	AC/DCEP
E7016	ไฮโดรเจนต่ำ–โปแตสเซียมสูง	F/V/OH/H	AC/DCEN
E7017	ผงเหล็ก–ไฮโดรเจนต่ำ	F/V/OH/H	AC/DCEP
E7018	ผงเหล็กไทเทเนียม	H/FIL/F	AC/DCEP/DCEN
E7024	เหล็กออกไซด์สูง–ผงเหล็ก	H/FIL/F	AC/DCEN
E7027	ผงเหล็ก–ไฮโดรเจนต่ำ	H/FIL/F	AC/DCEP
E7028	ไฮโดรเจนต่ำ	F/OH/H/FIL	AC/DCEP
E7028	ไฮโดรเจนต่ำ–โปแตสเซียม–ผงเหล็ก	F/OH/H V–Down	AC/DCEP

หมายเหตุ

- อักษรย่อแสดงท่าเชื่อม ดังนี้

  F = ท่าราบ H = ท่าขนานนอน FIL = เชื่อมมุมท่าระดับ V= ท่าตั้ง V–Down = ท่าตั้งเชื่อมลง

  OH = ท่าเหนือศีรษะ
- DCEP คือ กระแสไฟตรงลวดเชื่อมขั้วบวก และ DCEN คือ กระแสไฟตรงลวดเชื่อมขั้วลบ
- AC คือ กระแสไฟสลับ

มาตรฐานลวดเชื่อม AWS A5.1 นอกจากที่กล่าวมาข้างต้นในเรื่องของชนิดสารพอกหุ้ม ท่าเชื่อม และชนิดของกระแสไฟเชื่อมของแต่ละชนิดลวดเชื่อมให้สามารถเลือกใช้แล้วนั้น มาตรฐานยังบอกถึงสมบัติทางกลที่ได้จากการเลือกใช้ลวดเชื่อมของแต่ละชนิด ได้แก่ สมบัติความต้านทานแรงดึง ความเค้นจำนนที่จุด 0.2% Offset และ เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ดังแสดงเป็นตัวอย่างลวดบางชนิดในตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 สมบัติทางกลจากลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐาน AWS A5.1

ที่มา : ANSI/AWS A5.1/A5.1M , 2012

ประเภทลวดเชื่อม E60	ความต้านทานแรงดึง		ความเค้นจำนนที่ 0.2 Offset		การยืดตัว
	ksi	MPa	ksi	MPa	%
E6010	60	414	48	331	22
E6011	60	414	48	331	22
E6012	60	414	48	331	17
E6013	60	414	48	331	17
E6019	60	414	48	331	22
E6020	60	414	48	331	22
E6022[a]	60	414	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
E6027	60	414	48	331	22
ประเภทลวดเชื่อม E70					
E7014	70	482	58	399	17
E7015	70	482	58	399	22
E7016	70	482	58	399	22
E7018	70	482	58	399	22
E7024	70	482	58	399	17[b]
E7027	70	482	58	399	22
E7028	70	482	58	399	22
E7048	70	482	58	399	22
E7018M	70[d]	482	53–72[c]	365–496[c]	24

หมายเหตุ

- ชิ้นทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ใน AWS A5.1/A5.1M:2012
- สภาพของชิ้นงานทดสอบไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (As weld)
- ค่าทดสอบที่ระบุเป็นค่าต่ำสุด (Minimum)
- ข้อบ่งชี้ของตัวอักษร

a = การทดสอบแรงดึงและแรงดัดโค้ง อ้างอิงตามมาตรฐานที่กำหนดใน AWS 5.1/A5.1M:2012

b = กรณีเนื้อเชื่อมที่ได้จาก E7024–1 จะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำสุด 22%

c = กรณีขนาดลวดเชื่อม 2.4 มม. ค่าความเค้นจำนนสูงสุด 77 ksi (531 MPa)

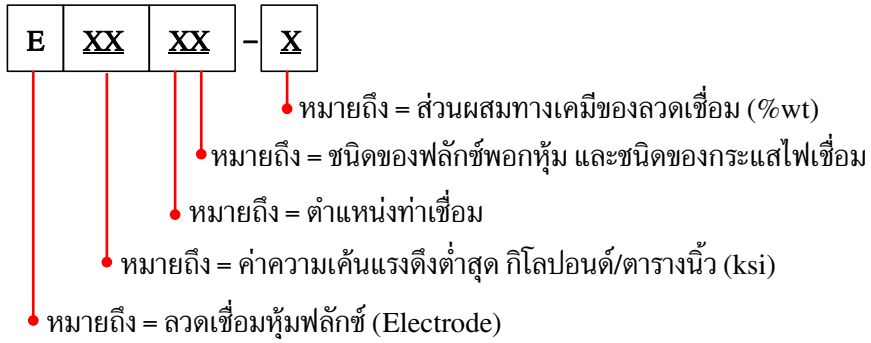
d = ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของเนื้อเชื่อมปกติ 70 ksi (MPa)

2) AWS A5.5/A5.5M:2014 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำ (Specification for Low Alloy Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding) ซึ่งได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดออกมาดังนี้

AWS A5.5/A5.5M:2014 **E XX XX–X** ตัวอักษร และตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

A5.5/A5.5M หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำ

2014 หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน (2014)



มาตรฐานข้อกำหนดลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ AWS ชุดนี้ใช้สำหรับการนำไปเลือกนำไปใช้กับการเชื่อมโลหะกลุ่มเหล็กกล้าผสมต่ำ (Low alloy steels) โดยในมาตรฐานจะมีการระบุถึงประเภทลวดเชื่อม ชนิดของฟลักซ์พอกหุ้ม ตำแหน่งท่าเชื่อม ชนิดของกระแสไฟเชื่อม ส่วนผสมทางเคมี และสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมที่ได้ ซึ่งรายละเอียดของข้อกำหนดหรือข้อบ่งชี้ของแต่ละด้านที่กล่าวถึงจะได้แสดงในรูปแบบตารางที่อ้างอิงมาจากคู่มือมาตรฐานของ AWS A5.5/A5.5M:2014 10th Edition ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 7.4 แสดงถึงข้อกำหนดที่ว่าด้วยประเภทของลวดเชื่อม ชนิดของฟลักซ์พอกหุ้ม ตำแหน่งท่าเชื่อม และชนิดของกระแสไฟเชื่อมกับขั้วเชื่อม ซึ่งช่างเชื่อมหรือวิศวกรงานเชื่อมสามารถใช้ตารางในการพิจารณาเลือกใช้ประเภทลวดเชื่อมและกำหนดปัจจัยการเชื่อมให้ถูกต้องและเหมาะสมกับโลหะชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม ลดปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับแนวเชื่อม ลดการแก้ไขซ่อมแซมแนวเชื่อมที่เกิดข้อบกพร่องจากการกำหนดหรือเลือกใช้ลวดเชื่อมที่ผิดพลาด

สำหรับข้อกำหนดมาตรฐานที่ระบุอยู่ในตารางที่ 7.5 เป็นการแสดงถึงส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมของลวดเชื่อมแต่ละประเภทที่ช่างเชื่อมสามารถที่จะเลือกลวดเชื่อมที่ต้องการส่วนผสมทางเคมีของเนื้อหลังการเชื่อมเสร็จ ที่มีสมบัติตามความต้องการ เช่น ต้องการแนวเชื่อมที่มีส่วนผสมทางเคมีที่ทนการกัดกร่อน ต้านทานการสึกหรอ มีโครงสร้างจุลภาคที่มีเกรนที่ละเอียด/เรียงตัวเป็นระเบียบ หรือความทนต่อการใช้งานอุณหภูมิที่สูง เป็นต้น

สว่นข้อกำหนดมาตรฐานสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมแต่ละประเภทดังแสดงในตารางที่ 7.6 เป็นค่าจากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ของเนื้อเชื่อม ที่ระบุถึงค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความเค้นจำนน ที่ 0.2% offset และค่าความสามารถในการยืดตัว พร้อมระบุสภาพการปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment)

ตารางที่ 7.4 การแบ่งประเภทลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M, 2014

ประเภทลวดเชื่อม[a]	ชนิดฟลักซ์พอกหุ้ม	ตำแหน่งท่าเชื่อม[b]	ชนิดกระแสไฟเชื่อม[c]
E7010–X	High–cellulose sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E7010–X	High–cellulose potassium	F/V/ OH/ H	AC / DCEP
E7015–X [d,e]	Low–hydrogen sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E7016–X [d,e]	Low–hydrogen potassium	F/V/ OH/ H	AC / DCEP
E718–X [d,e]	Low–hydrogen potassium, iron powder	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E7020–X	High–iron oxide	H–fillets F	AC / DCEP AC / DCEP / DCEN
E7027–X	High–iron oxide, iron powder	H–fillets F	AC / DCEP AC / DCEP / DCEN
E810–X	High–cellulose sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E8011–G	High–cellulose potassium	F, V, OH, H	AC / DCEP
E8013–G	High–titania potassium	F /V/ OH/ H	AC / DCEP / DCEN
E8015–X [d,e]	Low–hydrogen sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E8016–X [d,e]	Low–hydrogen potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E8018–X [d,e]	Low–hydrogen potassium, iron powder	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E9010–G	High–cellulose sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E9011–G	High–cellulose potassium	F/V/ OH/ H	AC / DCEP
E9013–G	High–titania potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP / DCEN
E9015–X [d,e]	Low–hydrogen sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E9016–X [d,e]	Low–hydrogen potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E9018–X [d,e]	Low–hydrogen potassium, iron powder	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E9018M [d,e]	Iron powder, low hydrogen	F/ V/ OH/ H	DCEP
E10010–G	High–cellulose sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E10011–G	High–cellulose potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E10013–G	High–titania potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP / DCEN
E10015–X [d,e]	Low–hydrogen sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E10016–X [d,e]	Low–hydrogen potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E10018–X [d,e]	Low–hydrogen potassium, iron powder	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E10018M [d,e]	Iron powder, low hydrogen	F/ V/ OH/ H	DCEP
E11010–G	High–cellulose sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP

ตารางที่ 7.4 (ต่อ) การแบ่งประเภทลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M, 2014

ประเภทลวดเชื่อม[a]	ชนิดฟลักซ์พอกหุ้ม	ตำแหน่งท่าเชื่อม[a]	ชนิดกระแสไฟเชื่อม[c]
E11011–G	High–cellulose potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E11013–G	High–titania potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP / DCEN
E11015–X [d,e]	Low–hydrogen sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E11016–X [d,e]	Low–hydrogen potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E11018–X [d,e]	Low–hydrogen potassium, iron powder	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E11018M [d,e]	Iron powder, low hydrogen	F/ V/ OH/ H	DCEP
E12010–G	High–cellulose sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E12011–G	High–cellulose potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E12013–G	High–titania potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP / DCEN
E12015–X [d,e]	Low–hydrogen sodium	F/ V/ OH/ H	DCEP
E12016–X [d,e]	Low–hydrogen potassium	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E12018–X [d,e]	Low–hydrogen potassium, iron powder	F/ V/ OH/ H	AC / DCEP
E12018M [d,e]	Iron powder, low hydrogen	F/ V/ OH/ H	DCEP
E12018M1 [d,e]	Iron powder, low hydrogen	F/ V/ OH/ H	DCEP

หมายเหตุ ของตาราง 7.4

- a = อักษรที่ต่อท้าย “X” ใช้แทนอักษรได้แก่ A_1 B_1 B_3 เป็นต้น และธาตุผสมทางเคมีดูได้จากตารางที่ 7.5
- b = ตำแหน่งท่าเชื่อม F = ท่าราบ H = ท่าระดับ H–FIL = เชื่อมมุมท่าระดับ V= ท่าตั้ง OH = ท่าเหนือศีรษะ
- c = กระแสไฟเชื่อม DCEP หมายถึง กระแสตรงลวดเชื่อมขั้วบวก และ DCEN หมายถึง กระแสตรงลวดเชื่อมขั้วลบ
- d = ลวดเชื่อมที่กำหนดปริมาณของความชื้นที่อยู่ในฟลักซ์พอกหุ้ม
- e = ลวดเชื่อมที่กำหนดปริมาณของไฮโดรเจนที่แพร่ซึมอยู่ในเนื้อเชื่อม

การกำหนดมาตรฐานลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ รหัสหรือโค๊ดที่อยู่บนลวดเชื่อมนอกจากจะระบุให้ทราบถึงชนิดฟลักซ์หุ้ม ท่าเชื่อม และชนิดของกระแสไฟเชื่อมแล้วนั้น ยังจะบอกถึงส่วนผสมทางเคมีที่จะได้ในเนื้อเชื่อมด้วย โดยจะบอกถึงชนิดของธาตุ (Type of elements) ที่ผสมหลัก ๆ และธาตุอื่น ๆ ที่เสริมเพื่อต้องการสมบัติที่พิเศษบางอย่างของเนื้อเชื่อม ซึ่งจะระบุจำนวนปริมาณของธาตุที่ผสมเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%wt.) ดังแสดงส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5/A5.5:M2014 ในตารางที่ 7.5 อย่างไรก็ตามในการปฏิบัติงานจริง การเชื่อมอาร์กเป็นเชื่อมแบบหลอมละลายที่มีอุณหภูมิของบ่อหลอมละลายที่สูงมาก ซึ่งมีโอกาสสูงมากที่จะทำให้ธาตุผสมบางตัวที่จุดหลอมเหลวต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะหลักเกิดการสูญเสียไปในบรรยากาศ (Lose elements) เป็นต้นเหตุของการที่เนื้อเชื่อมมีส่วนผสมทางเคมีที่ไม่เป็นไปตามที่ต้องการ และจะส่งผลกระทบต่อสมบัติของเนื้อเชื่อมที่พึงประสงค์ ปัญหานี้แก้ไขด้วยการควบคุมแก๊สปกคลุมแนวเชื่อมด้วยการเชื่อมในสถานที่ป้องกันแก๊สปกคลุมแนวเชื่อมไม่ให้กระจายตัวออกเร็วเกินไป

ตารางที่ 7.5 ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M, 2014

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
Carbon–Molybdenum Steel Electrodes											
E7010–A1	W17010	0.12	0.60	0.40	0.03	0.03	--	--	0.40–0.65	--	--
E7011–A1	W17011	0.12	0.60	0.40	0.03	0.03	--	--	0.40–0.65	--	--
E7015–A1	W17015	0.12	0.90	0.60	0.03	0.03	--	--	0.40–0.65	--	--
E7016–A1	W17016	0.12	0.90	0.60	0.03	0.03	--	--	0.40–0.65	--	--
E7018–A1	W17018	0.12	0.90	0.80	0.03	0.03	--	--	0.40–0.65	--	--
E7020–A1	W17020	0.12	0.60	0.40	0.03	0.03	--	--	0.40–0.65	--	--
E7027–A1	W17027	0.12	1.00	0.40	0.03	0.03	--	--	0.40–0.65	--	--
Chromium–Molybdenum Steel Electrodes											
E8016–B1	W51016	0.05–0.12	0.90	0.60	0.03	0.03	--	0.4–0.65	0.40–0.65	--	--
E8018–B1	W51018	0.05–0.12	0.90	0.80	0.03	0.03	--	0.4–0.65	0.40–0.65	--	--
E8016–B2	W51016	0.05–0.12	0.90	0.60	0.03	0.03	--	1.0–1.50	0.40–0.65	--	--
E8018–B2	W51018	0.05–0.12	0.90	0.80	0.03	0.03	--	1.0–1.50	0.40–0.65	--	--
E7015–B2L	W52115	0.05	0.90	1.00	0.03	0.03	--	1.0–1.50	0.40–0.65	--	--
E7016–B2L	W52116	0.05	0.90	0.60	0.03	0.03	--	1.0–1.50	0.40–0.65	--	--
E7018–B2L	W52118	0.05	0.90	0.80	0.03	0.03	--	1.0–1.50	0.40–0.65	--	--
E9015–B3	W53015	0.05–0.12	0.90	1.00	0.03	0.03	--	2.0–2.50	0.90–1.20	--	--

ตารางที่ 7.5 (ต่อ) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M. 2014

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
Chromium–Molybdenum Steel Electrodes											
E9016–B3	W53016	0.05–0.12	0.90	0.60	0.03	0.03	––	2.0–2.50	0.90–1.20	––	––
E9018–B3	W53018	0.05–0.12	0.90	0.80	0.03	0.03	––	2.0–2.50	0.90–1.20	––	––
E8015–B3L	W53115	0.05	0.90	1.00	0.03	0.03	––	2.0–2.50	0.90–1.20	––	––
E8018–B3L	W53118	0.05	0.90	0.80	0.03	0.03	––	2.0–2.50	0.90–1.20	––	––
E8015–B4L	W53115	0.05	0.90	1.00	0.03	0.03	––	1.75 – 2.25	0.40–0.65	––	––
E8016–B5	W51316	0.07–0.15	0.4–0.7	0.3–0.6	0.03	0.03	––	0.4–0.6	1.00–1.25	V	0.05

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
E8015–B6[e]	W50215	0.05–0.10	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	4.0–6.0	0.45–0.65	––	––
E8016–B6[e]	W50216	0.05–0.10	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	4.0–6.0	0.45–0.65	––	––
E8018–B6[e]	W50218	0.05–0.10	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	4.0–6.0	0.45–0.65	––	––
E8015–B6L[e]	W50205	0.05	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	4.0–6.0	0.45–0.65	––	––
E8016–B6L[e]	W50206	0.05	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	4.0–6.0	0.45–0.65	––	––
E8018–B6L[e]	W50208	0.05	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	4.0–6.0	0.45–0.65	––	––
B8015–B7[e]	W50315	0.05–0.10	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	6.0–8.0	0.45–0.65	––	––

ตารางที่ 7.5 (ต่อ) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M, 2014

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
B8016–B7[e]	W50316	0.05–0.10	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	6.0–8.0	0.45–0.65	--	--
B8018–B7[e]	W50318	0.05–0.10	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	6.0–8.0	0.45–0.65	--	--
B8015–B7L[e]	W50305	0.05	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	6.0–8.0	0.45–0.65	--	--
B8016–B7L[e]	W50306	0.05	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	6.0–8.0	0.45–0.65	--	--
B8018–B7L[e]	W50308	0.05	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	6.0–8.0	0.45–0.65	--	--
B8015–B8[e]	W50415	0.05–0.10	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	8.0–10.5	0.85–1.20	--	--
B8016–B8[e]	W50416	0.05–0.10	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	8.0–10.5	0.85–1.20	--	--
B8018–B8[e]	W50418	0.05–0.10	1.0	0.90	0.03	0.03	0.40	8.0–10.5	0.85–1.20	--	--

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
B8015–B8L[e]	W50405	0.05	1.0	0.90	0.03	0.03	0.4	8.0–10.5	0.85–1.20	--	--
B8016–B8L[e]	W50406	0.05	1.0	0.90	0.03	0.03	0.4	8.0–10.5	0.85–1.20	--	--
B8018–B8L[e]	W50408	0.05	1.0	0.90	0.03	0.03	0.4	8.0–10.5	0.85–1.20	--	--
E9015–B9	W50425	0.08–0.13	1.25	0.30	0.01	0.01	1.0	8.0–10.5	0.85–1.20	V Cu Al Nb N	0.15–0.30 0.25 0.04 0.02–0.10 0.02–0.07

ตารางที่ 7.5 (ต่อ) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M, 2014

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
E9016-B9	W50426	0.08–0.13	1.25	0.30	0.01	0.01	1.0	8.0–10.5	0.85–1.20	V Cu Al Nb N	0.15–0.30 0.25 0.04 0.02–0.10 0.02–0.07
E9018-B9	W50428	0.08–0.13	1.25	0.30	0.01	0.01	1.0	8.0–10.5	0.85–1.20	V Cu Al Nb N	0.15–0.30 0.25 0.04 0.02–0.10 0.02–0.07

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
					Nickel Steel Electrodes						
E8016-C1	W22016	0.12	1.25	0.60	0.03	0.03	2.00–2.75	--	--	--	--
E8018-C1	W22018	0.12	1.25	0.80	0.03	0.03	2.00–2.75	--	--	--	--
E8015-C1L	W22115	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	2.00–2.75	--	--	--	--
E8016-C1L	W22116	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	2.00–2.75	--	--	--	--
E8018-C1L	W22118	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	2.00–2.75	--	--	--	--
E8016-C2	W23016	0.12	1.25	0.60	0.03	0.03	3.00–3.75	--	--	--	--
E8018-C2	W23018	0.12	1.25	0.80	0.03	0.03	3.00–3.75	--	--	--	--
E7015-C2L	W23115	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	3.00–3.75	--	--	--	--
E7016-C2L	W23116	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	3.00–3.75	--	--	--	--
E7018-C2L	W23118	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	3.00–3.75	--	--	--	--

ตารางที่ 7.5 (ต่อ) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M, 2014

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
Nickel Steel Electrodes											
E8016-C3	W21016	0.12	0.40 – 1.25	0.80	0.03	0.03	0.80–1.10	0.15	0.35	V	0.05
E8018-C3	W21018	0.12	0.40 – 1.25	0.80	0.03	0.03	0.80–1.10	0.15	0.35	V	0.05
E7018-C3L	W20918	0.08	0.40 –1.4	0.50	0.03	0.03	0.80–1.10	0.15	0.35	V	0.05
E816-C4	W21916	0.10	1.25	0.60	0.03	0.03	1.10–2.00	--	--	--	--
E818-C4	W21918	0.10	1.25	0.60	0.03	0.03	1.10–2.00	--	--	--	--
E9015-C5L	W25018	0.05	0.4–1.0	0.5	0.03	0.03	6.00–7.25	--	--	--	--

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
Nickel–Molybdenum Steel Electrodes											
E8018-NM1	W2118	0.10	0.80–1.25	0.60	0.02	0.02	0.80–1.10	0.10	0.40–0.65	V Cu Al	0.02 0.10 0.05

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
Manganese–Molybdenum Steel Electrodes											
E8018-D1	W18118	0.12	1.00–1.75	0.80	0.03	0.03	0.90	--	0.25–0.45	--	--
E8015-D1	W19015	0.12	1.00–1.75	0.60	0.03	0.03	0.90	--	0.25–0.45	--	--
E9018-D1	W19018	0.12	1.00–1.75	0.80	0.03	0.03	0.90	--	0.25–0.45	--	--

ตารางที่ 7.5 (ต่อ) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M. 2014

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
E10015–D2	W10015	0.15	1.65–2.00	0.60	0.03	0.03	0.90	--	0.25–0.45	--	--
E10016–D2	W10016	0.15	1.65–2.00	0.60	0.03	0.03	0.90	--	0.25–0.45	--	--
E10018–D2	W10018	0.15	1.65–2.00	0.80	0.03	0.03	0.90	--	0.25–0.45	--	--
E8016–D3	W18016	0.12	1.00–1.80	0.60	0.03	0.03	0.90	--	0.40–0.65	--	--
E8018–D3	W18018	0.12	1.00–1.80	0.80	0.03	0.03	0.90	--	0.40–0.65	--	--
E8018–D3	W19018	0.12	1.00–1.80	0.80	0.03	0.03	0.90	--	0.40–0.65	--	--

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
General Low –Alloy Steel Electrodes											
EXX10–G[8]	--	--	1.00[h] min	0.80[h] min	--	--	0.50[h] min	0.30[h] min	0.20[h] min	V Cu	0.10[h] min 0.20[h] min
EXX11–G[8]	--	--	1.00[h] min	0.80[h] min	--	--	0.50[h] min	0.30[h] min	0.20[h] min	V Cu	0.10[h] min 0.20[h] min
EXX13–G[8]	--	--	1.00[h] min	0.80[h] min	--	--	0.50[h] min	0.30[h] min	0.20[h] min	V Cu	0.10[h] min 0.20[h] min
EXX15–G[8]	--	--	1.00[h] min	0.80[h] min	--	--	0.50[h] min	0.30[h] min	0.20[h] min	V Cu	0.10[h] min 0.20[h] min
EXX16–G[8]	--	--	1.00[h] min	0.80[h] min	--	--	0.50[h] min	0.30[h] min	0.20[h] min	V Cu	0.10[h] min 0.20[h] min
EXX18–G[8]	--	--	1.00[h] min	0.80[h] min	--	--	0.50[h] min	0.30[h] min	0.20[h] min	V Cu	0.10[h] min 0.20[h] min
E7020–G	--	--	1.00[h] min	0.80[h] min	--	--	0.50[h] min	0.30[h] min	0.20[h] min	V Cu	0.10[h] min 0.20[h] min
E7027–G	--	--	1.00[h] min	0.80[h] min	--	--	0.50[h] min	0.30[h] min	0.20[h] min	V Cu	0.10[h] min 0.20[h] min

ตารางที่ 7.5 (ต่อ) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M, 2014

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
Military−Similar Electrodes											
E9018M[i]	W21218	0.10	0.60−1.25	0.80	0.03	0.03	1.40−1.80	0.15	0.35	V	0.05
E10018M[i]	W21318	0.10	0.75−1.70	0.60	0.03	0.03	1.40−2.10	0.35	0.25−0.50	V	0.05
E11018M[i]	W21418	0.10	1.30−1.80	0.60	0.03	0.03	1.25−2.50	0.40	0.25−0.50	V	0.05
E12018M[i]	W22218	0.10	1.30−2.25	0.60	0.03	0.03	1.75−2.50	0.30−1.50	0.30−1.50	V	0.05
E12018M[i]	W23218	0.10	0.80−1.60	0.65	0.01	0.01	3.00−3.80	0.65	0.20−0.30	V	0.05

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
Pipeline Electrodes											
E7010−P1	W17110	0.20	1.20	0.60	0.30	0.03	1.00	0.30	0.50	V	0.10
E8010−P1	W18110	0.20	1.20	0.60	0.30	0.03	1.00	0.30	0.50	V	0.10

ประเภทลวดเชื่อม		ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]								ธาตุอื่น ๆ	
AWS	SAE/ ASTM[d]	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	ธาตุ	จำนวน
Weathering Steel Electrodes											
E7018−WP	W20018	0.12	0.40−0.70	0.40−0.70	0.025	0.025	0.20−0.40	0.15−0.30	−−	V Cu	0.08 0.30−0.60
E8018−W2	W20118	0.12	0.50−1.30	0.35−0.80	0.03	0.03	0.40−0.80	0.45−0.70	−−	Cu	0.30−0.75

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.5

- a = ค่ากำหนดมาค่าเดียว เป็นค่าสูงสุด นอกจากกำหนดเป็นค่าอื่น
- b = การวิเคราะห์จะพิจารณาธาตุที่ระบุในตารางเท่านั้น
- c = รหัสต่อท้าย A_1 B_3 C_3 หมายถึงส่วนผสมของเนื้อเชื่อม
- d = Unified Numbering System for Metals and Alloys
- e = รหัสลวดเชื่อมออกใหม่แทนตัวเดิมใน AWS A5.4−81
- f = อักษร “XX” ของ EXX13−G หมายถึง ค่าความต้านแรงดึงต่ำสุดในเนื้อเชื่อม ได้แก่ 80 90 100 110 และ 120 ksi
- g = อักษร “XX” ของรหัสลวดเชื่อม ยกเว้น EXX13−G หมายถึง ค่าความต้านแรงดึงต่ำสุดในเนื้อเชื่อม ได้แก่ 70 80 90 100 110 และ 120 ksi
- h= เนื้อเชื่อมต้องมีธาตุตามตารางอย่างน้อย 1 ธาตุ
- i = ผลิตมาคล้ายกับ MIL−E22200/1 และ MIL−E22200/10
- j = E7018−W1 คือ E7018−W และ E7018−W2 คือ E7018−W

ตารางที่ 7.6 ค่าทดสอบแรงดึงลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M, 2014

ประเภทลวดเชื่อม	ความต้านแรงดึง		ความเค้นจำนน 0.2% Offset		การยืดตัว	สภาพการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน
AWS	ksi	MPa	ksi	MPa	%	
E7010–P1	70	480	60	415	22	AW
E7010–A1	70	480	57	390	22	PWHT
E7010–G	70	480	57	390	22	AW / PWHT
E7011–A1	70	480	57	390	22	PWHT
E7011–G	70	480	57	390	22	AW / PWHT
E7015–X	70	480	57	390	25	PWHT
E7015–B2L	75	520	57	390	19	PWHT
E7015–G	70	480	57	390	25	AW / PWHT
E7016–X	70	480	57	390	25	PWHT
E7016–B2L	75	520	57	390	19	PWHT
E7016–G	70	480	57	390	25	AW / PWHT
E7018–X	75	480	57	390	25	PWHT
E7018–B2L	70	520	57	390	19	PWHT
E7018–C3L	70	480	57	390	25	AW
E7018–W1	70	480	60	415	25	AW
E7018–G	70	480	57	390	25	AW / PWHT
E7020–A1	70	480	57	390	25	PWHT
E7020–G	70	480	57	390	25	AW / PWHT
E7027–A1	70	480	57	390	25	PWHT
E7027–G	70	480	57	390	25	AW / PWHT
E8010–P1	80	550	67	460	19	AW
E8010–G	80	550	67	460	19	AW / PWHT
E8011–G	80	550	67	460	19	AW / PWHT
E8013–G	80	550	67	460	16	AW / PWHT
E8015–X	80	550	67	460	19	PWHT
E8015–B3L	80	550	67	460	17	PWHT
E8015–G	80	550	67	460	19	AW / PWHT
E8016–X	80	550	67	460	19	PWHT
E8016–C3	80	550	68–80	470–550[c]	24	AW
E8016–C4	80	550	67	460	19	AW
E8016–G	80	550	67	460	19	AW / PWHT
E8018–X	80	550	67	460	19	PWHT

ตารางที่ 7.6 (ต่อ) ค่าทดสอบแรงดึงลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M, 2014

ประเภทลวดเชื่อม	ความต้านแรงดึง		ความเค้นจำนน 0.2% Offset		การยืดตัว	สภาพการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน
AWS	ksi	MPa	ksi	MPa	%	
E8018–B3L	80	550	67	460	17	PWHT
E8018–C3	80	550	68–80	470–550[c]	24	AW
E8018–C4	80	550	67	460	19	AW
E8018–NM1	80	550	67	460	19	AW
E8018–W2	80	550	67	460	19	AW
E8018–G	80	550	67	460	19	AW / PWHT
E9010–G	90	620	77	530	17	AW / PWHT
E9011–G	90	620	77	530	17	AW / PWHT
E9013–G	90	620	77	530	14	AW / PWHT
E9015–X	90	620	77	530	17	PWHT
E9015–G	90	620	77	530	17	AW / PWHT
E9016–X	90	620	77	530	17	PWHT
E9016–G	90	620	77	530	17	AW / PWHT
E9018M	90	620	78–90	540–620[c]	24	AW
E9018–X	90	620	77	530	17	PWHT
E9018–G	90	620	77	530	17	AW / PWHT
E10010–G	100	690	87	600	16	AW / PWHT
E10011–G	100	690	87	600	16	AW / PWHT
E10013–G	100	690	87	600	13	AW / PWHT
E10015–X	100	690	87	600	16	PWHT
E10015–G	100	690	87	600	16	AW / PWHT
E10016–X	100	690	87	600	16	PWHT
E10016–G	100	690	87	600	16	AW / PWHT
E10018M	100	690	88–100	610–690[c]	20	AW
E10018–X	100	690	87	600	16	PWHT
E10018–G	100	690	87	600	16	AW / PWHT
E11010–G	110	760	97	670	15	AW / PWHT
E11011–G	110	760	97	670	15	AW / PWHT
E11013–G	110	760	97	670	13	AW / PWHT
E11015–G	110	760	97	670	15	AW / PWHT
E11016–G	110	760	97	670	15	AW / PWHT

ตารางที่ 7.6 (ต่อ) ค่าทดสอบแรงดึงลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AWS A5.5

ที่มา : ANSI/AWS A5.5/A5.5M, 2014

ประเภทลวดเชื่อม	ความต้านแรงดึง		ความเค้นจำนน 0.2% Offset		การยืดตัว	สภาพการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน
AWS	ksi	MPa	ksi	MPa	%	
E11018–G	110	760	97	670	15	AW / PWHT
E11018M	110	760	98–110	680–760[e]	20	AW
E12010–G	120	830	107	740	14	AW / PWHT
E12011–G	120	830	107	740	14	AW / PWHT
E12013–G	120	830	107	740	11	AW / PWHT
E12015–G	120	830	107	740	14	AW / PWHT
E12016–G	120	830	107	740	14	AW / PWHT
E12018–G	120	830	107	740	14	AW / PWHT
E12018M	120	830	108–120	745–830	18	AW
E12018M1	120	830	108–120	745–830	18	AW

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.6

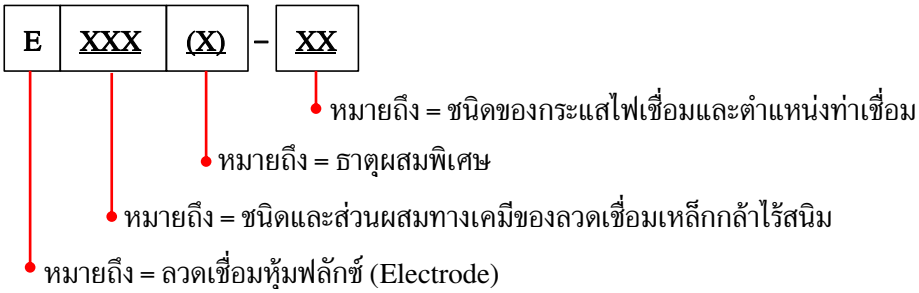
- ขนาดของลวดเชื่อมที่ทำการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด
- ค่าที่แสดงเป็นค่าผลการทดสอบค่าที่ต่ำสุด นอกจากจะกำหนดเป็นอย่างอื่น
- อักษร X ต่อท้าย แทน A_1 B_1 B_2 เป็นต้น ทดสอบในสภาพไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อน (As welded)
- AW = เนื้อเชื่อมสภาพเดิมไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อน
- PWHT = เนื้อเชื่อมผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อน
- "G" = AS หรือ PWHT เป็นตามข้อตกลงของผู้ผลิตกับลูกค้า
- "e" = สำหรับลวดเชื่อมขนาด 2.4 มม.(3/32 นิ้ว) ค่าความเค้นจำนนอาจสูงถึง 5 ksi (3.5 MPa) ซึ่งสูงกว่าที่กำหนดไว้

3) AWS A5.4/A5.4M:2012 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิม (Specification for Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding) ซึ่งได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดออกมาดังนี้

AWS A5.4/A5.4M:2012 **E XXX (X) –XX** ตัวอักษร และตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

A5.4/A5.4M หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม

2012 หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน (2012)



มาตรฐานลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีรหัสหรือโค๊ดเพิ่มเติมที่ต่างจากลวดเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมดังที่กล่าวมา คือ มีโค๊ดระบุธาตุผสมพิเศษ (X) ตามมาตรฐาน AWS A5.4/A5.4:2012 ได้จัดกลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ของเหล็กกล้าไร้สนิม ตามชนิดของกระแสไฟเชื่อมและตำแหน่งท่าเชื่อม ออกเป็น 5 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 7.7 และตัวอย่างลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมในรูปที่ 7.7

ตารางที่ 7.7 ประเภทลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน AWS A5.4

ที่มา : ANSI/AWS A5.4/A5.4M, 2012

ประเภทลวดเชื่อม AWS	กระแสไฟเชื่อม[a]	ตำแหน่งท่าเชื่อม[b]
EXXX(X)−15	DCEP	All[c]
EXXX(X)−25	DCEP	H/F
EXXX(X)−16	AC/DCEP	All[c]
EXXX(X)−17	AC/DCEP	All[c]
EXXX(X)−26	AC/DCEP	H/F

a หมายถึง DCEP = กระแสไฟตรงต่อขั้วบวก และ AC = กระแสไฟสลับ

b หมายถึง ตำแหน่งท่าเชื่อม F = ท่าราบ H = ท่าระดับ และ All = เชื่อมได้ทุกท่า

c หมายถึง ลวดเชื่อมขนาด 4.8 มม (3/16 นิ้ว) และใหญ่กว่าไม่แนะนำให้ใช้เชื่อมทุกท่าเชื่อม



รูปที่ 7.7 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel cover electrode)

ที่มา : Stainless steel/Alloys International, 2015

ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ ชนิดของฟลักซ์ที่ใช้พอกหุ้มจะเป็นตัวกำหนดสมบัติของลวดเชื่อมที่จะเลือกนำไปใช้ โดยในมาตรฐานได้กำหนดเป็นสัญลักษณ์หมายเลข 2 ตัวท้าย ของรหัสที่ระบุบนเส้นลวดเชื่อม ดังรายละเอียดที่จะได้กล่าวถึงของแต่ละประเภทของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์กลุ่มนี้ เพื่อความเข้าใจในการแปลความหมายของรหัสลวดเชื่อม ดังต่อไปนี้

● ลวดเชื่อมประเภท EXXX–15 ⟶ ตัวเลข –15 บนลวดเชื่อม มีความหมายว่า เป็นลวดเชื่อมชนิดที่ใช้ได้กับกระแสไฟตรงลวดเชื่อมต่อขั้วบวก (DCEP) เท่านั้น ไม่แนะนำให้ใช้กับไฟเชื่อมกระแสสลับกับงานที่ต้องการคุณภาพแนวเชื่อมที่สูง และลวดเชื่อมที่มีขนาดความโตไม่เกิน 4.0 มม. (5/32 นิ้ว) สามารถทำการเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม

● ลวดเชื่อมประเภท EXXX–16 ⟶ ตัวเลข –16 บนลวดเชื่อม มีความหมายว่า เป็นลวดเชื่อมที่มีธาตุที่ช่วยในการเกิดไอออนผสมอยู่ เช่น โปแตสเซียม เพื่อเป็นตัวช่วยให้การอาร์กสม่ำเสมอสำหรับการเชื่อมด้วยกระแสไฟสลับ (AC) ลวดเชื่อมที่มีขนาดความโตไม่เกิน 4.0 มม. (5/32 นิ้ว) สามารถทำการเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม

● ลวดเชื่อมประเภท EXXX–17 ⟶ ลวดเชื่อมประเภทนี้พัฒนาปรับปรุงมาจาก EXXX–16 โดยวิธีการเพิ่มเติมธาตุซิลิกา (Silica/SiO2) เข้าไปแทน ธาตุไทเทเนียม (Titanium) ซึ่งตัวเลข –17 บนลวดเชื่อม มีความหมายว่า เป็นลวดเชื่อมที่เหมาะสำหรับการเชื่อมต่อมุมในท่าระดับ (HF) ด้วยเพราะโดดเด่นในส่งถ่ายน้ำโลหะแบบสเปรย์ที่ทำให้ผิวหน้าแนวเชื่อมมีเกล็ดที่ละเอียด และมีรูปร่างของแนวเชื่อมมุมที่ได้จะเรียบแบนหรือเว้า สำหรับในกรณีที่เชื่อมต่อมุมท่าตั้ง (Vertical upwards fillet) จะต้องมีเทคนิคการส่ายลวดเชื่อมเข้ามาช่วยเสริม เพราะเนื่องจากลวดเชื่อมประเภทนี้สแลกจะเย็นตัวช้า ข้อดีของลวดเชื่อมประเภทนี้ที่สามารถเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม แต่ถ้าขนาดของลวดเชื่อมโตกว่า 4.8 มม. (3/16 นิ้ว) จะไม่แนะนำให้เชื่อมท่าตั้ง (V) และท่าเหนือศีรษะ (OH)

● ลวดเชื่อมประเภท EXXX–25 ⟶ ลวดเชื่อมประเภทนี้จะมีฟลักซ์พอกหุ้มคล้ายกับลวดเชื่อม EXXX–15 ทั้งส่วนผสมและสมบัติในการนำไปใช้งาน จะแตกต่างกันที่ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะลวดแกนกลาง เช่น แกนกลางเป็นโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน ตัวเลข –25 บนลวดเชื่อม มีความหมายว่าเป็นลวดเชื่อมที่ต้องกระแสไฟเชื่อมอาร์กที่สูง ธาตุที่ต้องการผสมลงไปในเนื้อเชื่อมจะเติมไว้ในฟลักซ์พอกหุ้ม ลวดเชื่อมประเภทนี้จะแนะนำให้ใช้ในการเชื่อมท่าราบ (F) และท่าระดับ (H) เท่านั้น (ลวดเชื่อม–25 จะมีขนาดที่โตกว่า ลวดเชื่อม –15)

● ลวดเชื่อมประเภท EXXX–26 ⟶ ลวดเชื่อมประเภทนี้พัฒนามาจาก EXXX–16 โดยมีชนิดของฟลักซ์พอกหุ้มที่เหมือนกันทั้งในส่วนของส่วนผสมทางเคมีและสมบัติความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน จะแตกต่างกันที่ลวดแกนกลางที่นำมาพอกหุ้มฟลักซ์ และขนาดของแกนลวดเชื่อมจะมีขนาดที่โตมากกว่า –16 จึงเหมาะและแนะนำให้ใช้ลวดเชื่อมประเภทนี้กับการเชื่อมในตำแหน่งท่าราบ (F) และท่าระดับ (H) เท่านั้น

จากการแปลความหมายของรหัสที่ระบุบนลวดเชื่อม ที่กล่าวมาข้างต้นนั้น จะเห็นได้ว่ารหัสของลวดเชื่อมกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีความแตกต่างกันในสภาพความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับสมบัติของเนื้อเชื่อมเป็นสำคัญ โดยสมบัติดังกล่าวจะมาจากอิทธิพลของชนิดและปริมาณของธาตุผสมทางเคมีที่มีอยู่ในเนื้อเชื่อม มาตรฐานลวดเชื่อมจึงมีระบุส่วนผสมทางเคมีที่จะได้ในเนื้อเชื่อมเป็นเกณฑ์มาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 7.8 และแสดงสมบัติทางกลด้านแรงดึงในตารางที่ 7.9

ตารางที่ 7.8 ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน AWS A5.4

ที่มา : ANSI/AWS A5.4/A5.4M. 2012

ประเภทลวดเชื่อม AWS[c]	SAE/ ASTM[d]	ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]										
		C	Cr	Ni	Mn	Cb(Nb) Plus Ta	Mn	Si	P	S	N	Cu
E209–XX[e]	W32210	0.06	20.5–24.0	9.5–12.0	1.5–3.0	––	4.0–7.0	0.90	0.04	0.03	0.10–0.30	0.75
E2199–XX	W32310	0.06	19.0–21.5	5.5–7.0	0.75	––	8.0–10.0	1.00	0.04	0.03	0.10–0.30	0.75
E240–XX	W32410	0.06	17.0–19.0	4.0–6.0	0.75	––	10.5–13.5	1.00	0.04	0.03	0.10–0.30	0.75
E307–XX	W30710	0.04–0.14	18.0–21.5	9.0–10.7	0.5–1.5	––	3.30–4.75	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E308–XX	W30810	0.08	18.0–21.0	9.0–11.0	0.75	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E308H–XX	W30810	0.04–0.08	18.0–21.0	9.0–11.0	0.75	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E308L–XX	W30813	0.04	18.0–21.0	9.0–11.0	0.75	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E308Mo–XX	W30820	0.08	18.0–21.0	9.0–12.0	2.0–3.0	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E308MoL–XX	W30823	0.04	18.0–21.0	9.0–12.0	2.0–3.0	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E309–XX	W30910	0.15	22.0–25.0	12.0–14.0	0.75	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E309L–XX	W30913	0.04	22.0–25.0	12.0–14.0	0.75	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E309Cb–XX	W30917	0.12	22.0–25.0	12.0–14.0	0.75	0.70–1.00	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E309Mo–XX	W30920	0.12	22.0–25.0	12.0–14.0	2.0–3.0	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E309MoL–XX	W30923	0.04	22.0–25.0	12.0–14.0	2.0–30	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E310–XX	W31010	0.08–0.20	25.0–28.0	20.0–22.5	0.75	––	1.0–2.5	0.75	0.03	0.03	––	0.75
E310H–XX	W31015	0.35–0.45	25.0–28.0	20.0–22.5	0.75	––	1.0–2.5	0.75	0.03	0.03	––	0.75
E310Cb–XX	W31017	0.12	25.0–28.0	20.0–22.0	0.75	0.70–1.00	1.0–2.5	0.75	0.03	0.03	––	0.75
E310Mo–XX	W31020	0.12	25.0–28.0	20.0–22	2.0–3.0	––	1.0–2.5	0.75	0.03	0.03	––	0.75
E312–XX	W31310	0.15	28.0–32.0	8.0–10.5	0.75	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E316–XX	W31610	0.08	17.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E316H–XX	W31610	0.04–0.08	17.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E316L–XX	W31613	0.04	17.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75

ตารางที่ 7.8 (ต่อ) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน AWS A5.4

ที่มา : ANSI/AWS A5.4/A5.4M, 2012

ประเภทลวดเชื่อม AWS[c]	SAE/ ASTM[d]	ส่วนผสมทางเคมี (%wt)[a,b]										
		C	Cr	Ni	Mn	Cb(Nb) Plus Ta	Mn	Si	P	S	N	Cu
E317–XX	W31710	0.08	18.0–21.0	12.0–14.0	3.0–4.0	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E317L–XX	W31713	0.04	18.0–21.0	12.0–14.0	3.0–4.0	––	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E318–XX	W31910	0.08	17.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	6xC, min to 1.00 max	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E320–XX	W88021	0.07	19.0–21.0	32.0–36.0	2.0–3.0	8xC, min to 1.00 max	0.5–2.5	0.60	0.04	0.03	––	3.0–4.0
E20LR–XX	W388022	0.03	19.0–21.0	32.0–36.0	2.0–3.0	8xC,min to 0.40 max	1.50–2.5	0.30	0.02	0.015	––	3.0–4.0
E330–XX	W88331	0.18–0.25	14.0–17.0	33.0–37.0	0.75	––	1.0–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E330H–XX	W88335	0.35–0.45	14.0–17.0	33.0–37.0	0.75	––	1.0–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E347–XX	W34710	0.08	18.0–21.0	9.0–11.0	0.75	8xC, min to 1.00 max	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E349–XX[e,f,g]	W34910	0.13	18.0–21.0	8.0–10.0	0.35–0.65	0.75–1.20	0.5–2.5	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E383–XX	W88028	0.03	26.5–29.0	30.0–33.0	3.2–4.2	––	0.5–2.5	0.90	0.02	0.02	––	0.6–1.5
E385–XX	W88904	0.03	19.5–21.5	24.0–26.0	4.2–5.2	––	1.0–2.5	0.75	0.03	0.02	––	1.2–2.0
E410–XX	W41010	0.12	11.0–13.5	0.7	0.75	––	1.0	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E410Nimo–XX	W41016	0.06	11.0–12.5	4.0–5.0	0.40–0.70	––	1.0	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E430–XX	W43010	0.10	15.0–18.0	0.6	0.75	––	1.0	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E502–XX[h]	W50210	0.10	4.0–6.0	0.4	0.45–0.65	––	1.0	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E505–XX[h]	W50410	0.10	8.10–10.5	0.4	0.85–1.20	––	1.0	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E630–XX	W37410	0.05	16.00–16.75	4.5–5.0	0.75	0.15–0.30	0.25–0.75	0.75	0.04	0.03	––	3.25–4.0
E16–8–2–XX	W36810	0.10	14.5–16.5	7.5–9.5	1.0–2.0	––	0.5–2.5	0.60	0.03	0.03	––	0.75
E7Cr–XX[b]	W50310	0.10	6.0–8.0	0.4	0.45–0.65	––	1.0	0.90	0.04	0.03	––	0.75
E2209–XX	W39209	0.04	21.5–23.5	8.5–10.5	2.5–3.5	––	0.5–2.0	0.90	0.04	0.03	0.08–0.20	0.75
E2553–XX	W39553	0.06	24.0–27.0	6.5–8.5	2.9–3.9	––	0.5–1.5	1.0	0.04	0.03	0.10–0.25	1.5–2.5

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.8

- a = ธาตุอื่น ๆ ที่ไม่ได้แสดงในคารางยกเว้นธาตุ Fe ต้องไม่เกิน 0.5%
- b = ค่าที่ให้มาค่าเดียวเป็นค่าที่สูงสุด
- c = รหัสต่อท้าย –XX หมายถึง –15 –16 –17 –25 หรือ –26
- d = SAE/ASTM Unified Numbering System for Metals and Alloys
- e = วาเนเดียมผสมอยู่ระหว่าง 0.1–0.3 %
- f = ไทเทเนียม ผสมสูงสุด 0.15%
- g = ทังสเตน ผสมอยู่ระหว่าง 1.25–1.75%
- h= เกรดนี้จะปรากฏอยู่ใน AWS A5.5

ตารางที่ 7.9 ค่าทดสอบแรงดึงลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน AWS A5.4

ที่มา : ANSI/AWS A5.4/A5.4M, 2012

ประเภทลวดเชื่อม	ความต้านแรงดึงต่ำสุด		% การยืดตัวต่ำสุด	การปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน
AWS	ksi	MPa		
E209–XX	100	690	15	None
E219–XX	90	620	15	None
E240–XX	100	690	15	None
E307–XX	85	590	30	None
E308–XX	80	550	35	None
E308H–XX	80	550	35	None
E308L–XX	75	520	35	None
E308Mo–XX	80	550	35	None
E308MoL–XX	75	520	35	None
E309–XX	80	550	30	None
E309L–XX	75	520	30	None
E309Cb–XX	80	550	30	None
E309Mo–XX	80	550	30	None
E309MoL–XX	75	520	30	None
E310–XX	80	550	30	None
E310H–XX	90	620	10	None
E310Cb–XX	80	550	25	None
E310Mo–XX	80	550	30	None
E312–XX	95	660	22	None
E316–XX	75	520	30	None
E316H–XX	75	520	30	None
E316L–XX	70	490	30	None
E317–XX	80	550	30	None
E317L–XX	75	520	30	None
E318–XX	80	550	25	None

ตารางที่ 7.9 (ต่อ) ค่าทดสอบแรงดึงลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน AWS A5.4

ที่มา : ANSI/AWS A5.4/A5.4M, 2012

ประเภทลวดเชื่อม AWS	ความต้านแรงดึงต่ำสุด ksi	ความต้านแรงดึงต่ำสุด MPa	% การยืดตัวต่ำสุด	การปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน
E320–XX	80	550	30	None
E320LR––XX	75	520	30	None
E330–XX	75	520	25	None
E330H–XX	90	620	10	None
E347–XX	75	520	30	None
E349–XX	100	690	25	None
E383–XX	75	520	30	None
E385–XX	75	520	30	None
E410–XX	75	450	20	a
E410NiMo–XX	110	760	15	c
E430–XX	65	450	20	d
E502–XX	60	420	20	b
E505–XX	60	420	20	b
E630–XX	135	930	7	e
E16–8–2–XX	80	550	35	None
E7Cr–XX	60	20	420	b
E2209–XX	100	690	20	None
E2553–XX	110	760	15	None

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.9

- a = ให้ความร้อน 730–760 °C เป็นเวลา 1 ชม. แล้วเย็นตัวในเตาด้วยอัตรา 55°C/ชม. จนถึง 315°C ออกจากเตาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง
- b = ให้ความร้อน 840–870 °C เป็นเวลา 2 ชม. แล้วเย็นตัวในเตาด้วยอัตรา 55°C/ชม. จนถึง 595°C ออกจากเตาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง
- c = ให้ความร้อน 595–620 °C เป็นเวลา 1 ชม. แล้วเย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง
- d = ให้ความร้อน 760–790 °C เป็นเวลา 2 ชม. แล้วเย็นตัวในเตาด้วยอัตรา 55°C/ชม. จนถึง 595°C ออกจากเตาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง
- e = ให้ความร้อน 1,025–1,050 °C เป็นเวลา 1 ชม. แล้วเย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง ต่อจากนั้นให้ตกผลึกแข็งที่อุณหภูมิ 610–630°C แช่ไว้เป็นเวลา 4 ชม. เอาออกจากเตาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง

ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับงานเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมมีการใช้งานกันไม่มากเมื่อเทียบกับลวดเชื่อมสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนหรือเหล็กกล้าผสมต่ำ เนื่องการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมมีปัญหาเรื่องการควบคุมคุณภาพเนื้อเชื่อมที่นอกจากความแข็งแรง ความต้านทานการกัดกร่อนแล้ว งานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมยังต้องการความสะอาดและความสวยงามของแนวเชื่อมที่ปรากฏบนโครงสร้างของ

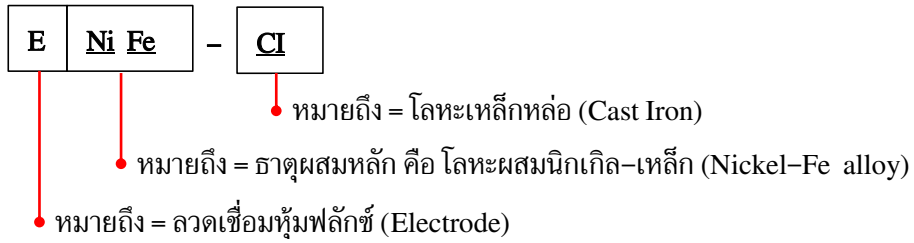
ผลิตภัณฑ์ จึงมักนิยมใช้ลวดเชื่อมเปลือย (Filler rod) กับขบวนการเชื่อมทิก (GTAW) หรือ ขบวนการเชื่อมมิก/แม็ก (GMAW) เพราะการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมเปลือยไม่ต้องมีการกำจัดสแลกที่จะเกิดอยู่บนผิวของแนวเชื่อม

4) AWS A5.15:1990 (R2016) ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อ (Specification for Welding Electrodes and Roads for Cast Iron) ซึ่งได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดออกมาดังนี้

AWS A5.15/A5.15M:R2016 **E XXX (X) –XX** ตัวอักษร และตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

A5.15/A5.15M หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมเหล็กหล่อ

1990(R2016) หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน 1990 ปรับปรุงปี 2016



ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อ เป็นชนิดลวดเชื่อมที่ใช้สำหรับงานซ่อมแซมชิ้นส่วนโลหะเหล็กหล่อเป็นสำคัญ ที่หล่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์มาแล้วเกิดความเสียหาย เช่น เกิดการแตกหักหรือแตกร้าว จากการใช้งาน ด้วยเพราะเหล็กหล่อมีสมบัติที่แข็งเปราะ และที่เป็นปัญหาที่ช่างเชื่อมมักจะกังวล คือ โลหะเหล็กหล่อมีความสามารถในการเชื่อมที่ต่ำมาก ผู้ผลิตจึงมีการผลิตลวดเชื่อมเหล็กหล่อโดยเฉพาะขึ้นที่จะใช้เชื่อมซ่อมแซมกับเหล็กหล่อชนิดต่าง ๆ ได้แก่ เหล็กหล่อสีเทา (Gray cast iron) เหล็กหล่อเหนียว (Ductile cast iron) เหล็กหล่อกราไฟต์กลม (Spheroidal graphite cast iron) และเหล็กหล่อผสม (Alloy cast iron) เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อในรูปที่ 7.8 โดยที่แกนลวดเชื่อมจะเป็นโลหะเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนสูงที่มีส่วนผสมของนิกเกิลเป็นส่วนประกอบหลัก ดังนั้นการแบ่งประเภทของลวดเชื่อมจะพิจารณาจากปริมาณของธาตุนิกเกิลที่ผสมอยู่เป็นสำคัญ ดังแสดงประเภทของลวดเชื่อมเหล็กหล่อตามส่วนผสมทางเคมีที่อ้างอิงมาตรฐาน AWS A5.15/A5.15 ในตารางที่ 7.10 ซึ่งเป็นเพียงตัวอย่างของลวดเชื่อมบางประเภทเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างความเข้าใจถึงรหัสที่กำหนดอยู่บนลวดเชื่อม โดยในปัจจุบันได้มีการผลิตลวดเชื่อมออกมาหลากหลายเพื่อตอบสนองต่อการเพิ่มขีดความสามารถในการเชื่อมเหล็กหล่อได้มากขึ้น ซึ่งมีทั้งการเชื่อมกันระหว่างเหล็กหล่อเชื่อมกับเหล็กหล่อ และเหล็กหล่อเชื่อมกับเหล็กกล้า และยังรวมไปถึงการเชื่อมเหล็กหล่อกับโลหะนอกกลุ่มเหล็กก็สามารถมีลวดเชื่อมที่สามารถเชื่อมได้ เมื่อพิจารณาจากรหัสหรือโค๊ดของลวดที่แสดงในตาราง

เพื่อความเข้าใจถึงความหมายที่ถูกต้องจึงขออธิบายแปลความของรหัสของลวดเชื่อมที่เน้นให้ทราบถึงการที่จะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชิ้นส่วนงานหล่อที่จะเชื่อม ดังนี้

ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อเป็นลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของโลหะนิกเกิลเป็นหลัก (Nickel–Base Electrodes) จนบางครั้งเรียกกันว่า ลวดนิกเกิล ซึ่งแบ่งเป็นชนิด ๆ ดังนี้

ตารางที่ 7.10 ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะเหล็กหล่อตามมาตรฐาน AWS A5.15

ที่มา : ANSI/AWS A5.15/A5.15M, 2016

ประเภทลวดเชื่อม	SAE/ASTM[d]	ส่วนผสมทางเคมี (% wt) a,b,c										
		C	Min	Si	P	S	Fe	Ni[e]	Mo	Cu[f]	Al	Other
ENi–CI	W82001	2.0	2.5	4.0	–	0.03	8.0	85 min	–	2.5	1.0	1.0
ENi–CI–A	W82003	2.0	2.5	4.0	–	0.03	8.0	85 min	–	2.5	1.0–3.0	1.0
ENiFe–CI	W82002	2.0	2.5	4.0	–	0.03	Rem.	45–60	–	2.5	1.0	1.0
ENiFe–CI–A	W82004	2.0	2.5	4.0	–	0.03	Rem.	45–60	–	2.5	1.0–3.0	1.0
ENiFeMn–CI	W82006	2.0	10–14	1.0	–	0.03	Rem.	35–45	–	2.5	1.0	1.0
ENiCu–A	W84001	0.35–0.55	2.3	0.75	–	0.025	3.0–6.0	50–60	–	35–45	–	1.0
ENiCu–B	W84002	0.35–0.55	2.3	0.75	–	0.025	3.0–6.0	60–70	–	225–35		1.0

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.10

- a = ส่วนผสมทางเคมีของแกนลวดเชื่อมหรือเนื้อเชื่อม
- b = ค่าที่แสดงค่าเดียวเป็นค่าสูงสุด
- c = ‘Rem” หมายถึง ปริมาณที่เหลือจนครบปริมาณ 100%
- d = SAE/ASTM Unified Numbering System for Metals and Alloys
- e = นิกเกิลรวมกับโคบอลต์
- f = ธาตุทองแดงผสมกับธาตุเงิน



รูปที่ 7.8 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะเหล็กหล่อ (Cast iron cover electrode)

ที่มา : Gemini Welding/Cast iron electrode, 2012

● ลวดเชื่อมประเภท ENi–CI ⟶ ลวดเชื่อมชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้ในการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อสีเทาเพื่อให้ติดกับเหล็กหล่อสีเทาชนิดเดียวกันเป็นสำคัญ แต่ก็ยังสามารถที่จะนำไปใช้เชื่อมเหล็กหล่อสีเทากับโลหะเหล็กชนิดอื่น ๆ ได้ หรือเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กก็สามารถเชื่อมได้ ในทางปฏิบัติการเชื่อมซ่อมโลหะเหล็กหล่อจะทำได้ยากและมีขีดจำกัดมาก เช่น ไม่เหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดที่ใหญ่เกินไป หรือต้องเป็นชิ้นงานที่ไม่มีความเค้นสะสมที่สูง (Stress concentration) หรือต้องมีกำมะถันผสมที่ต่ำ เป็นต้น เนื่องจากลวดเชื่อมประเภทนี้เมื่อเชื่อมแล้วเนื้อเชื่อมจะมีความแข็งแรงสูงมาก ซึ่งมีความเหนียวต่ำ (เปราะแตกร้าวง่าย)

● ลวดเชื่อมประเภท ENi–CI–A ⟶ ลวดเชื่อมชนิดนี้จะมีปริมาณของธาตุอลูมิเนียมผสมอยู่มาก เมื่อเชื่อมแล้วเนื้อเชื่อมจะมีความเหนียวสูง ซึ่งเป็นจุดเด่นของลวดชนิดนี้ที่ใช้เชื่อมเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความเหนียว ลดโอกาสที่จะเกิดการแตกร้าวอันเนื่องจากความแข็งเปราะของเหล็กหล่อ นอกจากนี้ยังช่วยในการปกคลุมและการไหลตัวของสแลกจากการเชื่อมได้ดี

● ลวดเชื่อมประเภท ENiFe–CI ⟶ ลวดเชื่อมชนิดนี้เหมาะสำหรับที่จะนำไปใช้กับการเชื่อมซ่อมแซม หรือเชื่อมต่อกันของโลหะเหล็กหล่อทุกชนิด รวมถึงเหล็กหล่อกราไฟต์กลม โดยสามารถเชื่อมได้ทั้งเหล็กหล่อกับเหล็กหล่อที่เป็นชนิดเดียวกัน และกับเหล็กหล่อต่างชนิดกัน นอกจากนี้ยังสามารถที่จะนำไปใช้เชื่อมเหล็กหล่อกับเหล็กกล้าคาร์บอน หรือเหล็กกล้าผสมชนิดต่าง ๆ รวมไปถึงโลหะนอกกลุ่มเหล็กบางชนิด และจะเหมาะมากกับการนำไปเชื่อมกับเหล็กหล่อที่มีฟอสฟอรัสผสมอยู่มากกว่า 0.2%

● ลวดเชื่อมประเภท ENiFeMn–CI ⟶ ลวดเชื่อมชนิดนี้มีความพิเศษกว่าชนิดอื่นที่มีแมงกานีสผสมสูงถึง 12% เจตนาก็เพื่อต้องการปรับปรุงสมบัติในการไหลตัวของน้ำโลหะเหลว (Flow ability) และเพิ่มความต้านทานต่อการแตกร้าวของเนื้อเชื่อม (Crack) นอกจากนี้แมงกานีสยังจะช่วยเพิ่มความเค้นแรงดึง และเพิ่มความเหนียวได้ดีอีกด้วย เนื้อเชื่อมที่ได้จากลวดเชื่อมชนิดนี้จะมีสมบัติที่ใกล้เคียงกับเนื้อของโลหะเหล็กหล่อกราไฟต์กลม ลวดเชื่อมชนิดนี้จะยังนิยมนำไปใช้เชื่อมพอกเสริมผิวบนบริเวณที่ต้องการให้มีความคงทนต่อการสึกหรอ ซึ่งมีอัตราการสึกหรอที่ต่ำมาก

● ลวดเชื่อมประเภท ENiCu–A และ ENiCu–B ⟶ ลวดเชื่อมชนิดนี้จะมีส่วนผสมที่พิเศษของโลหะทองแดงที่ผสมกับโลหะเงินมาแล้ว และมีนิกเกิล–โคบอลต์ผสมสูง เหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อทุกชนิด แต่ต้องระวังเนื้อเชื่อมเกิดการแตกร้าวได้งานในกรณีที่เนื้อเชื่อมมีขนาดที่ใหญ่ ดังนั้นจึงเหมาะกับการเชื่อมที่บ่อหลอมละลายไม่กว้างมาก และชิ้นงานเล็ก ๆ ด้วยเพราะลวดเชื่อมชนิดนี้ขณะทำการเชื่อมบ่อหลอมละลายจะค่อนข้างเล็ก (เนื้อโลหะงานหลอมละลายน้อย)

ถึงแม้ว่าจะมีการผลิตลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อออกมาให้เลือกใช้ก็ตาม แต่ช่างเชื่อมก็ต้องระลึกอยู่เสมอว่า แนวเชื่อมเหล็กหล่อมีความไวที่จะเกิดการแตกร้าวได้สูงมาก จึงต้องคอยควบคุมและระมัดระวังปัจจัยของการเชื่อมด้านต่าง ๆ ที่จะเป็นต้นเหตุของการเพิ่มความเค้นในเนื้อเชื่อมและความเค้นที่บริเวณกระทบร้อน (HAZ) ด้วยเพราะเหล็กหล่อมีคาร์บอนผสมสูงและจะเคลื่อนย้าย (Diffusion) ไปรวมตัวกันที่บริเวณเกิดความร้อนจากการอาร์กได้ง่ายและรวดเร็วทำให้

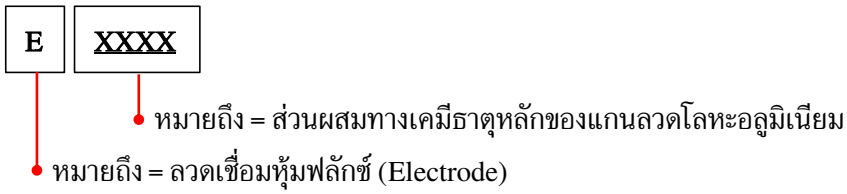
บริเวณดังกล่าวมีโครงสร้างที่เป็นคาร์ไบด์มากขึ้น (Fe_3C) นอกจากอิทธิพลทางส่วนผสมทางเคมีแล้วนั้น การออกแบบรอยต่อของการเชื่อมต้องเตรียมรอยบากหน้างานที่สามารถหลีกเลี่ยงมุมแหลมที่จะเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกร้าวได้ง่าย เช่น บากงานเป็นรูปตัว U หลีกเลี่ยงตัว V เป็นต้น

5) AWS A5.3/A5.3M:1999(R2007) เป็นข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะอลูมิเนียม (Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Electrodes for Shielded Metal Arc Welding) ซึ่งได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดออกมาดังนี้

AWS A5.3/A5.3M:1999(R2007) **E XXXX** ตัวอักษรและตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

A5.3/A5.3M หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะอลูมิเนียม

1999(R2007) หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน 1999 ปรับปรุงปี 2007



อ้างอิงตามมาตรฐานของ AWS A5.3 A5.3M:1999(R2007) ได้กำหนดรหัสตัวเลขบ่งชี้ถึงธาตุผสมหลัก(Main alloy element) ที่นอกเหนือจากเนื้อโลหะหลักที่เป็นธาตุอลูมิเนียมของแกนลวดเชื่อมโลหะอลูมิเนียม ซึ่งจะสอดคล้องกับการแบ่งเกรดโลหะอลูมิเนียมโครงสร้าง ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 7.11 และสามารถแบ่งชนิดของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะอลูมิเนียมตามส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 7.12 ควบคู่กับการแสดงผลสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมของแต่ละชนิด ลวดเชื่อมที่คาดว่าจะได้หลังเสร็จสิ้นการเชื่อมในตารางที่ 4.13 และตัวอย่างลวดเชื่อมในรูปที่ 7.9

ตารางที่ 7.11 รหัสธาตุผสมหลักของแกนลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะอลูมิเนียมตาม AWS A5.3

ที่มา : ANSI/AWS A5.3/A5.3M, 2007

สัญลักษณ์	ธาตุผสมหลัก (Main element)
1XXX	ธาตุอลูมิเนียมบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99% (Al-pure)
2XXX	ธาตุทองแดง (Al-Cu) ปริมาณทองแดง 1.9-6.8%
3XXX	ธาตุแมงกานีส (Al-Mn) ปริมาณแมงกานีส 0.3-1.5%
4XXX	ธาตุซิลิกอน (Al-Si) ปริมาณซิลิกอน 3.6-13.5%
5XXX	ธาตุแมกนีเซียม (Al-Mg) ปริมาณแมกนีเซียม 0.5-5.5%
6XXX	ธาตุแมกนีเซียมและซิลิกอน (Al-Mg-Si) ปริมาณ Mg 0.4-1.5% Si 0.2-1.7%
7XXX	ธาตุสังกะสี (Al-Zn) ปริมาณซิลิกอน 1.0-8.2%
8XXX	ธาตุลิเทียม (Al-Li) ปริมาณลิเทียม 2.5%

ตารางที่ 7.12 ชนิดและส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะอลูมิเนียมตาม AWS A5.3

ที่มา : ANSI/AWS A5.3/A5.3M, 2007

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (%wt)									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Be	Other	Al
E1100	(1)	(1)	0.05–0.20	0.05	(–)	0.10	(–)	0.0008	0.15	ต่ำสุด 9
E3003	0.6	0.7	0.05–0.20	1.0–1.5	(–)	0.10	(–)	0.0008	0.15	(2)
E4043	4.5–6.0	0.8	0.30	0.05	0.05	0.10	(–)	0.0008	0.15	(2)

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.12

- (1) = ธาตุซิลิกอนรวมกับธาตุเหล็กไม่ 0.95%
- (2) = ปริมาณธาตุที่เหลือรวมจนครบ 100%
- *(–)* = ค่าแสดงค่าเดียวเป็นค่าสูงสุด

ตารางที่ 7.13 สมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมลวดด้วยเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะอลูมิเนียมตาม AWS A5.3

ที่มา : ANSI/AWS A5.3/A5.3M, 2007

ประเภทลวดเชื่อม	ความต้านแรงเค้นดึงต่ำสุด	
	psi	Mpa
E1100	12000	82.7
E3003	14000	96.5
E4043	14000	96.5

จากข้อมูลมาตรฐานลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะอลูมิเนียมที่กล่าวมาข้างต้นช่างเชื่อมสามารถใช้เป็นแนวทางในการที่จะเลือกใช้ลวดเชื่อมได้ถูกต้อง โดยต้องพิจารณาร่วมกับเกรดของโลหะหลัก (Base metal) ที่ต้องการเชื่อมและรวมถึงลักษณะงานที่นำไปใช้ เช่น

- กรณีโลหะอลูมิเนียมที่ใช้ในงานโครงสร้างเกรด 5052 ที่มีปริมาณของแมกนีเซียมผสม 2.5% สามารถเลือกใช้ลวดเชื่อมชนิด E4043 เชื่อมง่าย มีอัตราความไวต่อการแตกร้าวต่ำ แนวเชื่อมสวยงาม สะเก็ดเชื่อมเกิดน้อย
- กรณีอลูมิเนียมโครงสร้างเกรดที่มีส่วนผสมของแมกนีเซียมเป็นหลัก (รหัส 5XXX) ได้แก่ เกรด 5086 หรือ เกรด 5083 จะไม่แนะนำให้เลือกใช้ลวดเชื่อมชนิด E4043 ด้วยเหตุผลเพราะลวดเชื่อมชนิดนี้มีส่วนผสมของปริมาณซิลิกอนมากถึง 5% เมื่อเชื่อมกับอลูมิเนียมที่มีแมกนีเซียมผสมหลักจะส่งผลทำให้เนื้อเชื่อมมีสมบัติทางกลที่แย่ลง
- กรณีต้องการแนวเชื่อมไปผ่านขบวนการอโนไดซ์ (Anodizing) หลังการเชื่อม ไม่แนะนำให้เลือกใช้ลวดเชื่อม 4043 เพราะซิลิกอนจะทำให้สีที่บริเวณของเนื้อเชื่อมเข้มกว่าสีของชิ้นงานโลหะหลัก ลวดเชื่อมที่เหมาะสมต้องเป็นชนิด E5356 จะเหมาะมากถ้าโลหะหลักเป็นอลูมิเนียมโครงสร้างเกรดที่มีธาตุแมกนีเซียมและซิลิกอนเป็นธาตุผสมหลัก (6XXX)

● กรณีต้องการปรับปรุงสมบัติแนวเชื่อมหรือเนื้อเชื่อมด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment) หลังจากการเชื่อมเสร็จ ไม่สามารถทำได้กับแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม E1100 และ E4043 และ E 4365 โดยจะเหมาะกับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม E4643 บนอลูมิเนียมเกรด 6XXX และลวดเชื่อม E5180 บนอลูมิเนียมเกรด 7XXX ที่สามารถนำแนวเชื่อมไปทำการปรับปรุงสมบัติทางกลได้ดี เช่น การเชื่อมอลูมิเนียมโครงรถจักรยานที่ใช้อลูมิเนียมโครงสร้างเกรด 7005 เป็นต้น นอกจากนี้ก็ยังมีเกรดอื่น ๆ ที่สามารถทำได้ เช่น เกรด 2319 เกรด 2060 เกรด 4009 เกรด 4145 เกรด A356.0 เกรด C355.0 เกรด 357.0 เป็นต้น

จากกรณีตัวอย่างของการเลือกใช้ลวดเชื่อมให้เหมาะสมและข้อควรระวังที่แนะนำจากประสบการณ์ของผู้เขียนนั้น จะเห็นได้ชัดเจนว่ามีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ช่างเชื่อมต้องมีความรู้และความเข้าใจถึงเหตุผลของการที่จะนำมาพิจารณาเลือกใช้ลวดเชื่อม ดังนั้นจากข้อมูลที่ศึกษาค้นคว้ารวมกับทักษะประสบการณ์ด้านงานเชื่อมพอจะรวบรวมหลักเกณฑ์ที่จะนำมาใช้พิจารณาเลือกใช้ลวดเชื่อมดังนี้

(1) ความแข็งแรงของเนื้อเชื่อมหรือแนวเชื่อมที่ต้องการ

(2) อัตราความไวที่จะเกิดการแตกร้าวของแนวเชื่อม

(3) สภาพแวดล้อมหรือระดับของอุณหภูมิที่จะนำแนวเชื่อมไปใช้งาน

(4) ความสามารถในการยืดตัวหรือยืดหยุ่นของแนวเชื่อม

(5) ความสามารถในด้านการต้านทานการกัดกร่อนของแนวเชื่อม

(6) ความสามารถในการปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนภายหลังการเชื่อม

(7) ความสวยงามหรือความสมดุลของสีผิวแนวเชื่อมกับผิวโลหะชิ้นงานหลัก

อย่างไรก็ตามหลักเกณฑ์พิจารณาเหล่านี้ที่จะนำมาใช้ได้อย่างสมบูณ์และสามารถเสริมสร้างคุณภาพของแนวเชื่อมได้ตามต้องการนั้น จะต้องสัมพันธ์กับผู้ออกแบบข้อกำหนดในการเชื่อมเป็นสำคัญที่ต้องเข้าใจในลักษณะเฉพาะของโลหะอลูมิเนียมแต่ละประเภทรวมทั้งลักษณะของการนำไปใช้งาน



รูปที่ 7.9 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะอลูมิเนียม (Aluminum cover electrode)

ที่มา : Lincoln Electric/Aluminum cover electrode, 2013

4.2 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มาตรฐาน JIS (Japanese Industrial Standard)

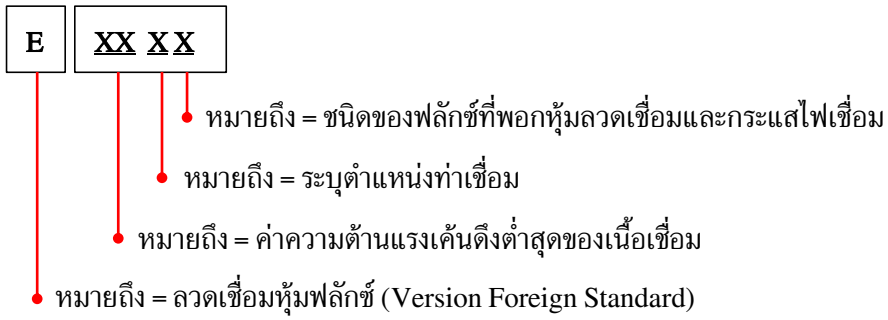
ประเทศญี่ปุ่นเป็นประเทศหนึ่งที่ถือว่ามีการพัฒนาด้านเทคโนโลยีการเชื่อมได้อย่างก้าวหน้ามาก จึงได้มีการสร้างหรือกำหนดมาตรฐานขึ้นเป็นของตัวเอง และก็เป็นที่ยอมรับในระดับนานาชาติ จึงได้มีการนำมาตรฐานญี่ปุ่นมาใช้เป็นข้อกำหนดการปฏิบัติงานด้านวิศวกรรมการเชื่อมกันมากขึ้น โดยเฉพาะประเทศไทย ดังนั้นผู้เขียนจึงมีเจตนาที่จะนำมาเขียนเป็นข้อมูลสำหรับความรู้ความเข้าใจถึงมาตรฐานและข้อกำหนดต่าง ๆ ของมาตรฐานลวดเชื่อมของแต่ละประเภทและแต่ละชนิดลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ดังนี้

1) JIS Z 3211–2008 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าคาร์บอนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานงานเย็น (Covered Electrodes for Mild Steel, High Tensile Strength Steel and Low Temperature Service Steel : Foreign Standard)โดยเป็นเวอร์ชันระดับสากล ซึ่งได้ทำการกำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานออกมาดังนี้

JIS Z 3211–1991(R2008) **E XX XX** ตัวอักษรและตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

JIS Z 3211 หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานงานเย็น

1991(R2008) หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน 1991 ปรับปรุงปี 2008



ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานงานเย็น ตามมาตรฐาน JIS Z 3211 นี้ จะมีรหัสหรือโค๊ดที่ระบุไว้บนลวดเชื่อม โดยจะสามารถทราบถึงชนิดของฟลักซ์ที่พอกหุ้ม ท่าเชื่อม และชนิดของกระแสไฟเชื่อมที่สามารถเลือกใช้ได้ ดังแสดงในตารางที่ 7.14 และขอยกตัวอย่างเป็นเบื้องต้น ตัวอย่างเช่น ลวดเชื่อม E4313 มีความหมายดังนี้

เป็นลวดเชื่อมที่พอกหุ้มฟลักซ์ชนิดไทเทเนียมออกไซด์ มีค่าความต้านทานแรงเค้นดึงของเนื้อเชื่อมต่ำสุด 420 N/mm^2 (43) โดยสามารถทำการเชื่อมได้ทุกตำแหน่งท่าเชื่อม (1) ซึ่งสามารถเลือกใช้กระแสไฟเชื่อม AC และ DCEN (3) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติมาตรฐาน JIS จะไม่ค่อยคุ้นเคยกันเนื่องจากเมื่อเทียบความเป็นมาตรฐานสากลจะยังนิยมอ้างอิงกับมาตรฐานของชาติสหรัฐอเมริกา (AWS) หรือไม่ก็เป็นมาตรฐานของกลุ่มชาติประเทศยุโรป (EN ISO) ซึ่งโดยปกติผู้ผลิตส่วนใหญ่มักจะระบุมาตรฐานไว้ในข้อแนะนำการใช้งานภายในกล่องบรรจุไว้มากกว่าหนึ่งมาตรฐานเพื่อการสอบ

เทียบเคียงมาตรฐาน ดังแสดงตัวอย่างเอกสารประกอบการใช้งานจากผู้ผลิตลวดเชื่อมของบริษัท KISWEL LTD. ของประเทศเกาหลีใต้ ในรูปที่ 7.10

COVERED ELECTRODE
KCL-11
KISWEL

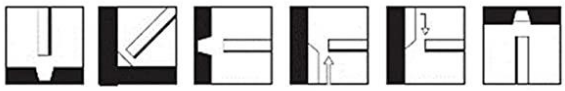
■ Description

- Covering is high cellulose type for welding of sheet, pipes in building
- As the welding in poor groove fit up and vertical down welding can be performed easily, it is used in all position welding
- Good mechanical properties and the weld metal needs requirement X-ray
- Gives high ductility root weld and easy slag removal
- Stables arc performance in almost welding current

■ Classification

• AWS A5.1	: E6011	• EN ISO 2560-A	: E 38 2 C 12
• JIS Z 3211	: E4311	• EN ISO 2560-B	: E 43 11 A

■ Welding Position



■ Base Materials

Industry	Steel Grades	Type
General structural	EN 10025	S185, S235, S275
Ship	ASTM A131	A, B, D
Cast	EN 10213-2	GP240R
Pipe	EN 10208	L210, L240, L290
	API 5LX	X42, X46
Boiler & Pressure vessel	EN10028-2	P235, P265, P295

รูปที่ 7.10 แสดงการระบุมาตรฐานลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่หลากหลายมาตรฐานของผู้ผลิต

ที่มา : KISWEL Premium Arc Weldung Electrode, 2019

ตารางที่ 7.14 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐาน JIS Z 3211

ที่มา : JIS Z 3211:1991 (R2008) (Version Foreign Standard), 2008

ประเภทลวดเชื่อม	ชนิดฟลักซ์หุ้ม	ตำแหน่งที่เชื่อม	กระแสไฟเชื่อม
E4301	อิลเมไรต์	F/ V/ O/ H	AC/DCEP/DCEN
E4303	ไลม์–ไมเทเนีย	F/ V/ O/ H	AC/DCEP/DCEN
E4311	เซลลูโลสสูง	F/ V/ O/ H	AC/DCEP/DCEN
E4313	ไทเทเนียมออกไซด์	F/ V/ O/ H	AC/DCEN
E4316	ไฮโดรเจนต่ำ	F/ V/ O/ H	AC/DCEP
E4324	ไทเทเนียมออกไซด์–ผงเหล็ก	F/ H	AC/DCEP/DCEN
E4326	ไฮโดรเจนต่ำ–ผงเหล็ก	F/ H	AC/DCEP
E4327	เหล็กออกไซด์–ผงเหล็ก	F	AC/DCEP/DCEN
		H	AC/DCEN
E4340	ฟลักซ์พิเศษ	F/ V/ O/ H	AC/DCEP/DCEN

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.14

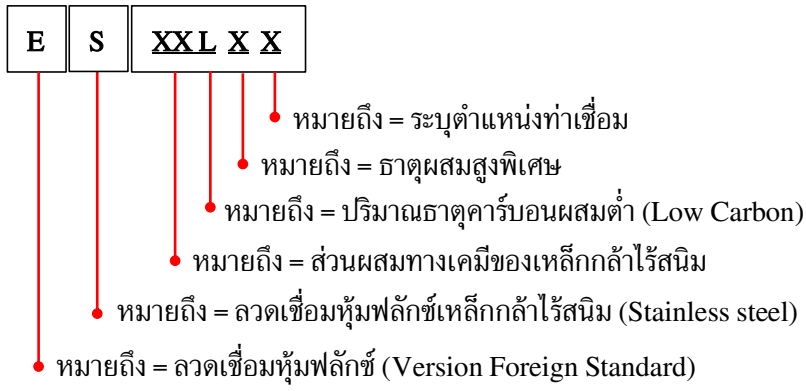
- F = การเชื่อมท่าราบ
- V = การเชื่อมท่าตั้ง
- H = การเชื่อมท่าระดับ
- O = การเชื่อมท่าเหนือศีรษะ
- E = ตัวอักษรที่แสดงถึงลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ของมาตรฐานญี่ปุ่นที่ใช้ในระดับสากล (Foreign Standard) แต่ถ้าเป็นระดับชาติของญี่ปุ่นเองจะใช้อักษรตัว D (เดงโกะ โยเซสึโบะ)

2) JIS Z 3221–2013 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel Covered Electrodes : Foreign Standard) เป็นเวอร์ชันระดับสากล ซึ่งได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานออกมาดังนี้

JIS Z 3221–1991(R2013) **ES XXL X X** ตัวอักษรและตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

JIS Z 3221 หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม

1991(R2013) หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน 1991 ปรับปรุงปี 2013



ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐาน JIS Z 3221 จะจัดแบ่งลวดเชื่อมออกเป็นประเภทต่าง ๆ โดยอ้างอิงตามกลุ่มและเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เป็นโลหะรูปพรรณที่มีการใช้งานกันทั่ว ๆ ไป ได้แก่ กลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steel) เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก (Martensitic stainless steel) เหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติก (Austenitic stainless steel) เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex stainless steel) ซึ่งได้นำแสดงมาเป็นตัวอย่างของประเภทลวดเชื่อมในตารางที่ 7.15 เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกใช้เมื่อข้อกำหนดของงานอ้างอิงตามมาตรฐาน JIS ซึ่งในรหัสหรือโค๊ดมาตรฐานนั้นจะระบุให้ทราบถึง เกรดของลวดแกนกลางเหล็กกล้าไร้สนิม ท่าเชื่อม และ ชนิดของกระแสไฟเชื่อมที่สามารถเลือกใช้ได้ รวมถึงการระบุถึงธาตุผสมพิเศษเพิ่มเติมและปริมาณธาตุคาร์บอนที่ต่ำ (L) เป็นต้น และได้แสดงตัวอย่างลวดเชื่อมที่ผลิตโดยบริษัทญี่ปุ่นอิงตามมาตรฐาน JIS Z 3221 ในรูปที่ 7.11 นอกจากนี้มาตรฐานของลวดเชื่อมยังบอกถึงส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม ที่จะทำนายได้ว่าเนื้อเชื่อมหลังการเชื่อมเสร็จสิ้นจะมีส่วนผสมทางเคมีของธาตุใดบ้างและมีปริมาณเท่าไหร่ของการเลือกใช้ลวดเชื่อมแต่ละประเภท ดังแสดงในตารางที่ 7.16 รวมไปถึงสามารถทราบสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมด้านการทดสอบแรงดึง ดังแสดงในตารางที่ 7.17

เป็นที่ทราบกันดีว่าการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมนอกจากความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม (Perfected weld bead) ความแข็งแรงของแนวเชื่อม และความสวยงานของแนวเชื่อมที่ต้องคำนึงแล้วนั้น ที่จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพิจารณา คือ ความทนทานต่อการกัดกร่อนของเนื้อเชื่อมหรือโดยรอบ ๆ แนวเชื่อม เพราะเป็นข้อเด่นของเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งต้องพิจารณากันถึงระดับโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อม โดยจะสัมพันธ์เกี่ยวข้องโดยตรงกับส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมที่เลือกใช้และส่วนผสมทางเคมีของโลหะหลักที่ต้องการเชื่อม โดยเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละเกรดแต่ละประเภทก็จะต้องการปริมาณและชนิดธาตุผสมที่เพียงพอต่อการป้องกันการกัดกร่อนที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นการที่ผู้ผลิตได้พยายามระบุส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมไว้ ถือว่าเป็นปัจจัยเครื่องมืออันสำคัญและมีประโยชน์ยิ่งต่อการพิจารณาเลือกใช้เลือกเชื่อมได้ถูกต้อง ดังแสดงเป็นตัวอย่างของลวดเชื่อมบางประเภทในตารางที่ 7.16



รูปที่ 7.11 ตัวอย่างลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐานของผู้ผลิตญี่ปุ่น (JIS Z 3221)
ที่มา : YAWATA Welding Electrode, 2015

ตารางที่ 7.15 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน JIS Z 3221–2013

ที่มา : JIS Z 3221–2013 (Version Foreign Standard), 2013

ประเภทลวดเชื่อม		ท่าเชื่อม	ชนิดของกระแสไฟฟ้า
E307	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E308	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E308L	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E309	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E309L	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E309 Nb	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E309 NbL	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E309 Mo	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E309 MoL	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E310	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E310 Mo	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E312	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E16–9–8–2	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E316	1.5	F/V/O/H	DCEP
	1.6	F/V/O/H	AC or DCEP
E316L	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E316JIL	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E317	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E317L	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E318	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E329 JL	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E347	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E347L	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E349	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E410	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E410 Nb	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E430	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E430 Nb	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP
E630	15	F/V/O/H	DCEP
	16	F/V/O/H	AC or DCEP

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.15

- F = การเชื่อมท่าราบ
- V = การเชื่อมท่าตั้ง
- H = การเชื่อมท่าระดับ
- O = การเชื่อมท่าเหนือศีรษะ
- AC = ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternative current)
- DCEP = ไฟฟ้ากระแสตรง โดยลวดเชื่อมเป็นขั้วบวก (+)

ตารางที่ 7.16 ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐาน JIS Z 3221–2013

ที่มา : JIS Z 3221–2013 (Version Foreign Standard), 2013

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (% wt)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mb	Others
E307	0.13	0.9	3.0 to 8.0	0.04	0.03	9.0 to 11.0	18.0 to 21.0	0.5 to 1.5	–
E308	0.08	0.9	2.5	0.04	0.03	12.0 to 14.0	18.0 to 21.0	–	–
E308 L	0.04	0.9	2.5	0.04	0.03	9.0 to 14.0	18.0 to 21.0	–	–
E309	0.15	0.9	2.5	0.04	0.03	9.0 to 14.0	20.0 to 25.0	–	–
E309 L	0.04	0.9	2.5	0.04	0.03	9.0 to 14.0	20.0 to 25.0	–	–
E309 Nb	0.12	0.9	2.5	0.04	0.03	9.0 to 14.0	20.0 to 25.0	–	Nb 0.70 to 1.00
E309 NbL	0.04	0.9	2.5	0.04	0.03	9.0 to 14.0	20.0 to 25.0	–	Nb 0.70 to 1.00
E309 Mo	0.12	0.9	2.5	0.04	0.03	9.0 to 14.0	20.0 to 25.0	2.0 to 3.0	–
E309 MoL	0.04	0.9	2.5	0.04	0.03	9.0 to 14.0	20.0 to 25.0	2.0 to 3.0	–
E310	0.2	0.75	2.5	0.04	0.03	20.0 to 22.0	20.0 to 25.0	–	–
E310 Mo	0.12	0.75	2.5	0.04	0.03	20.0 to 22.0	25.0 to 28.0	2.0 to 3.0	–
E312	0.15	0.9	2.5	0.04	0.03	8.0 to 10.5	28.0 to 32.0	–	–
E16–8–2	0.1	0.9	2.5	0.04	0.03	7.5 to 9.5	14.5 to 16.5	1.0 to 3.0	–
E316	0.08	0.9	2.5	0.04	0.03	11.0 to 14.0	17.0 to 20.0	20.0 to 2.75	–
E316 L	0.04	0.9	2.5	0.04	0.03	11.0 to 14.0	17.0 to 20.0	12.0 to 2.75	–
E316 JIL	0.04	0.9	2.5	0.04	0.03	11.0 to 16.0	17.0 to 20.0	12.0 to 2.75	–
E317	0.08	0.9	2.5	0.04	0.03	12.0 to 14.0	18.0 to 21.0	3.0 to 4.0	–
E317 L	0.04	0.9	2.5	0.04	0.03	12.0 to 16.0	18.0 to 21.0	3.0 to 4.0	–
E318	0.08	0.9	2.5	0.04	0.03	11.0 to 14.0	17.0 to 20.0	2.0 to 2.5	Cu 1.0 to 2.50
E329 JL	0.08	0.9	2.5	0.04	0.03	6.0 to 8.0	23.0 to 28.0	1.0 to 3.0	–
E347	0.08	0.9	2.5	0.04	0.03	9.0 to 11.0	18.0 to 21.0	–	Nb 8xC% to 1.0
E347 L	0.04	0.9	2.5	0.04	0.03	9.00 to 11.0	18.0 to 21.0	–	Nb 8xC% to 1.0
E349	0.13	0.9	2.5	0.04	0.03	8.0 to 11.0	18.0 to 21.0	0.35 to 0.65	W 1.25 to 1.75 Nb 0.75 to 1.20
E410	0.12	0.9	1	0.04	0.03	0.06	11.0 to 14.0	–	–
E410 Nb	0.12	0.9	1	0.04	0.03	0.06	11.0 to 14.0	–	Nb 0.50 to 1.50
E430	0.1	0.9	1	0.04	0.03	0.06	15.0 to 18.0	–	–
E430 Nb	0.1	0.9	1	0.04	0.03	0.06	15.0 to 18.0	–	Nb 0.50 to 1.50
E630	0.05	0.75	2.50–0.75	0.04	0.03	4.50 – 5.0	16.0 to 16.75	0.35 to 0.65	Nb 0.15 to 0.30 Cu 3.25 to 4.0

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.16

- ค่าที่แสดง กรณีที่เป็นเดียวจะหมายถึง ค่าที่มากที่สุดของปริมาณธาตุผสม

ตารางที่ 7.17 สมบัติด้านแรงดึงลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐาน JIS Z 3221–2013

ที่มา : JIS Z 3221–2013 (Version Foreign Standard), 2013

ประเภทของลวดเชื่อม	การทดสอบแรงดึง (Tensile test)	
	ความเค้นแรงดึงต่ำสุด (N/mm^2)	เปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำสุด (%)
E307	590	30
E308	550	35
E308L	510	35
E309	550	30
E309L	510	30
E309 Nb	550	30
E309 Mo	510	30
E309LMo	510	30
E310	510	30
E310Mo	550	30
E312	660	22
E16–8–2	550	35
E316	550	30
E316L	510	35
E316JIL	510	35
E317	550	30
E317L	510	30
E318	550	25
E329JI	590	18
E347	550	30
E347L	510	30
E349	690	25
E410()[1]	480	25
E410 Nb()[1]	480	25
E430()[2]	480	20
E430 Nb()[2]	480	20
E630()[3]	930	7

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.17

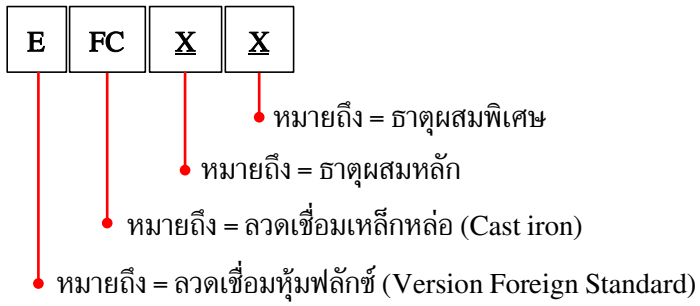
- ()[1] = ชิ้นงานอบที่ 840–870°C เวลา 2 ชม ปล่อยเย็นตัวถึง 590°C ที่ 55°C/ชม และให้เย็นตัวในอากาศ
- ()[2] = ชิ้นงานอบที่ 760–785°C เวลา 2 ชม ปล่อยเย็นตัวถึง 590°C ที่ 55°C/ชม และให้เย็นตัวในอากาศ
- ()[3] = ชิ้นงานอบที่1,025–1050°C เวลา 1 ชม ปล่อยเย็นตัวในอากาศ จากนั้นอบต่อที่ 601–630°C เป็นเวลา 4 ชม และก็ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

3) JIS Z 3252–2012 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะเหล็กหล่อ (Covered Electrodes, Solid Wire, Rods and Flux Cored Wires for Cast Iron : Foreign Standard) โดยเป็นมาตรฐานเวอร์ชันระดับสากล ซึ่งได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานออกมาดังนี้

JIS Z 3252–2012 **E FC X** ตัวอักษร และตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

JIS Z 3221 หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กหล่อ

1991(R2013) หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน 1991 ปรับปรุงปี 2013



ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ใช้สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อจะมีการผลิตออกมาไม่หลากหลายเหมือนลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ประเภทอื่น ๆ คงเป็นเหตุผลที่โลหะเหล็กหล่อมีความสามารถในการเชื่อมที่ต่ำ เชื่อมยากและมีโอกาสที่จะเกิดการแตกร้าวจากการเชื่อมค่อนข้างสูง จะมีการเชื่อมบ้างก็จะเป็นการเชื่อมเพื่อซ่อมแซมที่เกิดการใช้งานชิ้นส่วนเหล็กหล่อแล้วเกิดความแตกร้าวหรือแตกหักเสียหาย ดังนั้นประเภทของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเหล็กหล่อมีให้เลือกใช้น้อย โดยจะขอยกตัวอย่างลวดเชื่อมเหล็กหล่อบางชนิดที่นิยมใช้กันดังนี้

1) ลวดเชื่อม JIS Z 3252 EFCNi ⟶ เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่มีผงฟลักซ์ที่พอกหุ้มเป็นชนิดกราไฟต์ และแกนลวดเชื่อมเป็นโลหะนิกเกิลบริสุทธิ์ รอยเชื่อมที่ได้และบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) จะมีค่าความแข็งต่ำที่สุด ดังนั้น เนื้อเชื่อมที่ได้จะมีความสามารถในการกลึงตกแต่งด้วยเครื่องจักรได้ค่อนข้างดี (ไม่แข็งมาก) ในแง่ของความสามารถในการเชื่อมก็ค่อนข้างที่จะเชื่อมได้ดี การอาร์กคงที่สม่ำเสมอ สแลกกำจัดออกได้ง่าย เชื่อมได้โดยไม่จำเป็นต้องทำการ PWHT โดยลวดเชื่อมประเภทนี้จะรู้จักกันดีในชื่อ Ni Cast 98 ดังแสดงในรูปที่ 7.12 (ก) ซึ่งหมายถึงเป็นลวดเชื่อมที่มีธาตุโลหะนิกเกิล 98% (นิกเกิลบริสุทธิ์)

2) ลวดเชื่อม JIS Z 3252 EFCNiFe ⟶ เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่มีผงฟลักซ์พอกหุ้มเป็นชนิดกราไฟต์ โดยมีแกนลวดเชื่อมที่มีโลหะนิกเกิล (Ni) ผสมอยู่ที่ปริมาณ 55% ที่ผสมรวมกับโลหะเหล็ก (Fe)ดังแสดงในรูปที่ 7.12 (ข) จุดประสงค์เพื่อให้ความร้อนที่ลวดเชื่อมจะไม่สูงกินไป และจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติขณะทำการเชื่อม ซึ่งมีความสามารถในการเชื่อม (Welding abilities) ที่ดี เนื้อเชื่อมจะมีความแข็งสูงมากกว่าลวดเชื่อม JIS Z 3252 EFCNi ทนทานต่อการแตกร้าว มีสมบัติทางกลที่ดี เหมาะกับการเชื่อมเหล็กหล่อทั่วไปและเหล็กหล่อเหนียว

3) ลวดเชื่อม JIS Z 3252 EFCFe ⟶ เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่มีผงฟลักซ์เป็นชนิดไฮโดรเจนต่ำ โดยมีแกนลวดเชื่อมเป็นเหล็กบริสุทธิ์ เนื้อเชื่อมที่ได้จะมีความแข็งที่สูงมาก สูงกว่าลวดเชื่อมประเภท JIS Z 3252 EFCNi และ JIS Z 3252 EFCNiFe ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น ดังนั้น ลวดเชื่อมชนิดนี้จะเหมาะสมกับการเชื่อมชิ้นงานเหล็กหล่อที่ไม่ต้องผ่านการตกแต่งด้วยเครื่องจักรหลังการเชื่อม



(ก) ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อ 98%Ni **(ข)** ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อ 55%Ni

รูปที่ 7.12 ตัวอย่างลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อมาตรฐานของผู้ผลิตญี่ปุ่น (JIS Z 3252)

ที่มา : YAWATA Welding Electrode, 2015

จากรหัสหรือโค๊ดที่ระบุบนก้านลวดเชื่อมเหล็กหล่อของแต่ละชนิดสามารถที่จะระบุถึงส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมที่จะได้ในเนื้อเชื่อม โดยสามารถตรวจสอบได้จากคู่มือลวดเชื่อมจากผู้ผลิตตามมาตรฐาน ดังแสดงเป็นตัวอย่างส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อบางชนิดในตารางที่ 7.18 และแสดงสมบัติทางกลทางด้านแรงดึงของเนื้อเชื่อม ดังแสดงในตารางที่ 7.19 นอกจากนี้มาตรฐานยังบอกถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อมที่สัมพันธ์กับขนาดความยาวของลวดเชื่อม ที่ช่างเชื่อมสามารถใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมกับลักษณะงานที่จะทำการเชื่อม (แต่โดยในเชิงการพาณิชย์ผู้ผลิตจะระบุข้างกล่องบรรจุเป็นน้ำหนักของลวดเชื่อมทั้งกล่อง (กิโลกรัม/กล่อง เช่น ระบุ 2 กก./กล่อง หรือ 1 กก. /กล่อง) เป็นต้น

ตารางที่ 7.18 ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อมาตรฐาน JIS Z 3252–2012

ที่มา : YAWATA Welding Electrode อิงมาตรฐาน JIS Z 3252 (Version Foreign Standard), 2012

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Fe
JIS Z 3252 EFCNi	0.99	0.11	0.57	0.002	0.001	Bal.	1.71
JIS Z 3252 EFCNiFe	1.15	0.31	1.96	0.004	0.001	54.8	Bal.
JIS Z 3252 EFCFe	0.04	0.50	0.48	0.006	0.002	–	Bal.

ตารางที่ 7.19 สมบัติทางกลและขนาดลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อมาตรฐาน JIS Z 3252–2012

ที่มา : YAWATA Welding Electrode อิงมาตรฐาน JIS Z 3252 (Version Foreign Standard), 2012

ประเภทลวดเชื่อม	สมบัติทางกลของเนื้อเชื่อม		ขนาดของลวดเชื่อม			
	ความเค้นดึงต่ำสุด (MPa)	การยืดตัว (%)	ขนาด ø ลวดเชื่อม/ความยาว (มม)/(มม)			
JIS Z 3252 EFCNi	480	–	2.6/–	3.2/350	4.0/350	5.0/350
JIS Z 3252 EFCNiFe	520	–	2.6/300	3.2/300	4.0/350	5.0/–
JIS Z 3252 EFCFe	490	33	2.6/300	3.2/350	4.0/400	5.0/–

ข้อแนะนำหรือข้อเสนอแนะจากประสบการณ์ของผู้เขียนในขบวนการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อ ด้วยลวดเชื่อมนิกเกิล 55% (NiCast 55) และนิกเกิลบริสุทธิ์ 98% (NiCast 98) ควรเลือกใช้กระแสไฟเชื่อมที่ต่ำ และต้องรักษาระดับอุณหภูมิขณะเชื่อมไม่ให้เกิดความร้อนสะสมมากจนเกินไป เพราะถ้าเกิดมีปริมาณความร้อนสะสมมากจะมีผลทำให้แนวเชื่อมมีการแตกร้าวหลังการเย็นตัว ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นได้ง่ายและเป็นปัญหามากในการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อ นอกจากนี้การทำความสะอาดบริเวณผิวชิ้นงานก่อนเชื่อมก็เป็นสิ่งที่จำเป็นที่จะช่วยลดปัญหาการเกิดการแตกร้าวของการเชื่อมชิ้นงานโลหะเหล็กหล่อได้ โดยเฉพาะงานเชื่อมพอกอะไหล่ชิ้นส่วนจักรกล หรือการเชื่อมเสริมเนื้อลูกหีบ ลูกรีดต่าง ๆ ที่ต้องการผิวงานที่แข็งและทนทานต่อการสึกหรอไปใช้งาน นอกจากนี้ยังมีข้อเสนอแนะในทางเทคนิคการเชื่อมต่าง ๆ ได้แก่ ลวดเชื่อมต้องแห้งสนิทปราศจากความชื้นด้วยการอบที่อุณหภูมิ 80 – 120°C เป็นเวลาอย่างน้อย 60 นาที ผิวชิ้นงานต้องกำจัดชั้นผิวที่เสื่อมสภาพออกให้หมด การเชื่อมควรเชื่อมแนวสั้น ๆ ไม่ควรเชื่อมแนวต่อเนื่อง เพื่อลดความร้อนสะสมในโลหะชิ้นงานที่เชื่อม

สำหรับท่าเชื่อมของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมโลหะเหล็กหล่อ รหัสหรือโค๊ดจะไม่ระบุด้วยเหตุผลเพราะว่าลวดเชื่อมเหล็กหล่อทุกประเภทสามารถเชื่อมได้ทุกตำแหน่งที่เชื่อม (All position welding) ไม่มีปัญหาในเรื่องของการไหลตัวของน้ำเหล็กเหลวที่หลอมจากการอาร์ก เพราะสมบัติพื้นฐานการไหลตัวโลหะเหล็กหล่อมีสูงมากจากอิทธิพลของธาตุที่ผสมอยู่ในโลหะเหล็กหล่อ ดังนั้นมีข้อแนะนำว่ากรณีที่เชื่อมด้วยท่าเชื่อมลงในแนวดิ่ง (Vertical Downwards : VD) ทั้งแบบต่อชนและแบบต่อตัวที ช่างเชื่อมต้องควบคุมหัวเชื่อมอย่างระมัดระวังเป็นพิเศษเพราะน้ำโลหะเหลวจะไหลตัวเร็วมาก ซึ่งโดยปกติการเชื่อมซ่อมแซมโลหะเหล็กหล่อส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมโลหะที่เป็นชนิดและเกรดส่วนผสมเดียวกัน (Similar welding) จะเกิดปัญหาน้อยมากในเชิงโลหะวิทยางานเชื่อม แต่พบว่าผู้ผลิตมักจะระบุว่าสามารถเชื่อมโลหะเหล็กหล่อกับโลหะกับเหล็กเหนียวได้ ซึ่งในกรณีที่เป็นโลหะต่างเกรดส่วนผสมทางเคมีในลักษณะนี้ (Dissimilar welding) ถึงแม้ว่าลวดเชื่อมเหล็กหล่อจะสามารถเชื่อมได้ก็ตามแต่ในทางปฏิบัติการเชื่อม ต้องใช้ทักษะในการควบคุมการเชื่อม และปัจจัยการเชื่อมที่ถูกต้องแม่นยำ ไม่เช่นนั้นจะเกิดความไม่สมบูรณ์หรือเกิดข้อบกพร่องของแนวเชื่อมหรือเนื้อเชื่อมได้ง่าย

4.3 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มาตรฐานสากล ISO (International Organization for Standardization)

มาตรฐานลวดเชื่อมนี้จะใช้กันแพร่หลายในประเทศแถบยุโรปที่อาจถือได้ว่าเป็นมาตรฐานหลักของกลุ่มชาติทางโซนยุโรปในชื่อมาตรฐาน EUROPEAN STANDARDS : EN ซึ่งเมื่อสร้างกำหนดที่อิงกับ ISO จึงเกิดเป็นมาตรฐานยุโรปที่รู้จักกันดีในรหัส EN ISO นอกจากนี้บางประเทศที่ได้มีข้อกำหนดแยกออกมาก็จะสร้างรหัสเพิ่มเติม เช่น ประเทศสหราชอาณาจักร ใช้รหัส BS EN ISO ซึ่ง BS คือ British Standards สำหรับการนำเสนอมาตรฐานลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ในหัวข้อนี้จะอ้างอิงมาตรฐานสากล (International Standard)

1) ISO 2560 : 2020 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (Covered Electrodes for Manual Metal Arc Welding of Non−Alloy and Fine Grain Steels)

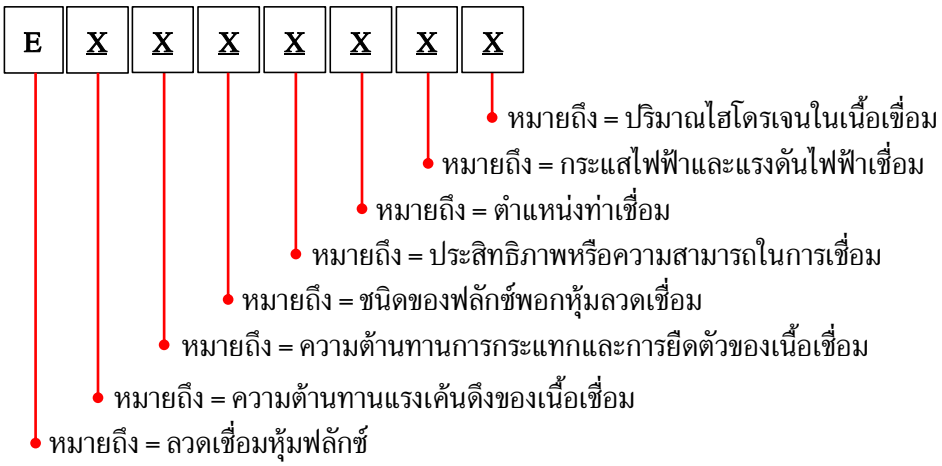
มาตรฐานลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สากล (ISO) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานออกมาประกอบด้วย 4 ส่วนสัญญลักษณ์ ดังนี้

– ส่วนสัญลักษณ์ของลวดเชื่อม – ส่วนสัญลักษณ์แสดงส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม
– ส่วนสัญลักษณ์แสดงสมบัติทางกล – ส่วนสัญลักษณ์บ่งชี้ชนิดของฟลักซ์พอกหุ้ม

ISO 2560 : 2012 **E X X X X X X X** ตัวอักษรและตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

ISO 2560 หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

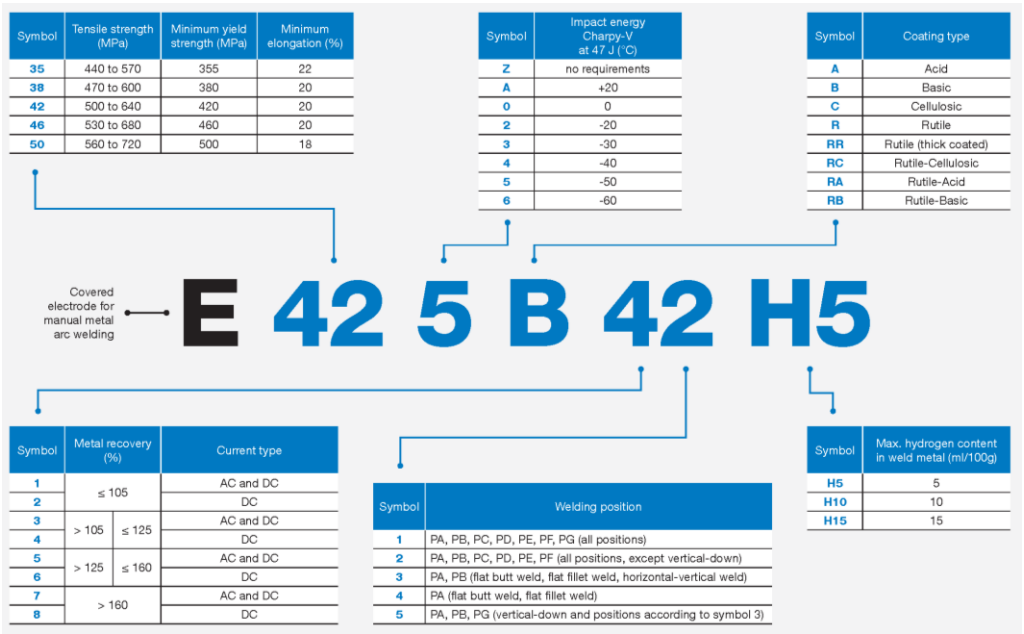
2012 หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน 2012



จากการแสดงถึงความหมายของข้อกำหนดรหัสหรือโค๊ดตามมาตรฐาน ISO 2560 : 2012 ในข้างต้นนั้น ซึ่งรหัสแต่ละตำแหน่งที่ระบุบนลวดเชื่อมจะบ่งชี้ถึงความหมายที่ชัดเจน เพื่อเสริมความเข้าใจถึงรหัสต่าง ๆ ของลวดเชื่อมและสามารถแปลความหมายได้ถูกต้อง จึงขอยกตัวอย่างลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มาตรฐาน ISO 2560 ที่สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้า ดังนี้

ลวดเชื่อม E 42 5 B 4 2 H5 แปลความหมายเพื่อการเลือกใช้โดยอ้างอิงตามข้อมูลตามมาตรฐานสากล (ISO) ดังที่แสดงในรูปที่ 7.13

- E = ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับการเชื่อมอาร์กไฟฟ้า
- 42 = ความต้านทานแรงเค้นดึงของเนื้อเชื่อม 500 ถึง 640 MPa
- 5 = ความต้านทานการกระแทก −50 J และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 20%
- B = เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ใช้ฟลักซ์ชนิดด่างพอกหุ้ม (Basic)
- 4 = มีความสามารถในการยืดตัว 105 ถึง 125% และสามารถเชื่อมได้ด้วยกระแสไฟ DC
- 2 = สามารถเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม ยกเว้น ท่าตั้งเชื่อมลง (Vertical−down)
- H5 = ปริมาณไฮโดรเจนผสมอยู่ในเนื้อเชื่อมไม่เกิน 5 ml/100g



รูปที่ 7.13 ความหมายของรหัสหรือโค๊ดลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้ามาตรฐานสากล (ISO)

ที่มา : Guide to EN ISO 2560:2012, MMA Electrode, 2012

เป็นที่ทราบกันดีว่าลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ใช้สำหรับการเชื่อมอาร์กด้วยไฟฟ้าหรือที่เรียกกันว่าเชื่อมไฟฟ้า นิยมใช้งานกันมากด้วยเพราะสามารถเชื่อมโลหะได้เกือบทุกชนิดโดยเฉพาะโลหะกลุ่มเหล็ก ผู้ผลิตลวดเชื่อมก็ผลิตออกมารองรับกับการเลือกใช้ลวดเชื่อมมากมายหลายเกรด ซึ่งไม่อาจที่นำมาแสดงไว้ในบทเรียนนี้ได้ทั้งหมด โดยจะคัดเลือกมาบางชนิดเพื่อเป็นตัวอย่างของลวดเชื่อมซึ่งจะแสดงถึงรหัสหรือโค๊ดของลวดเชื่อมพร้อมส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมดังแสดงในตารางที่ 7.20 และแสดงสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมที่จะได้หลังการเชื่อมของแต่ละรหัสหรือโค๊ดลวดเชื่อมในตารางที่ 7.21 พร้อมกับแสดงตัวอย่างการระบุมาตรฐานที่สามารถตรวจสอบได้บริเวณข้างกล่องบรรจุลวดเชื่อมในรูปที่ 7.14

ตารางที่ 7.20 ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้ามาตรฐาน ISO 2560:2012

ที่มา : International Standard ISO 2560:2012, 2012

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)										
	C	Min	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al
E4310	0.20	1.20	1.00	NS	NS	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E4311	0.20	1.20	1.00	NS	NS	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E4316	0.20	1.20	1.00	NS	NS	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E4319	0.20	1.20	1.00	NS	NS	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E4903	0.15	1.25	0.90	NS	NS	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E4911	0.15	1.25	0.90	0.035	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E4913	0.20	1.20	1.00	NS	NS	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E4915	0.15	1.25	0.90	0.035	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E4916−1	0.15	1.60	0.75	0.035	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E4918−1	0.15	1.60	0.90	0.035	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E4927	0.15	1.60	0.75	0.035	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	NS	NS
E5716	0.12	1.60	0.90	0.03	0.03	1.00	0.30	0.35	NS	NS	NS
E5728	0.12	1.60	0.90	0.03	0.03	1.00	0.30	0.35	NS	NS	NS
E4910−P1	0.20	1.20	0.60	0.03	0.03	1.00	0.30	0.50	0.10	NS	NS
E5510−P1	0.20	1.20	0.60	0.03	0.03	1.00	0.30	0.50	0.10	NS	NS
E5518−P2	0.12	0.90−1.70	0.80	0.03	0.03	1.00	0.20	0.50	0.05	NS	NS
E4910−1M3	0.12	0.60	0.40	0.03	0.03	NS	NS	0.40−0.65	NS	NS	NS
E4915−1M3	0.12	0.90	0.60	0.03	0.03	NS	NS	0.40−0.65	NS	NS	NS
E4918−1M3	0.12	0.90	0.60	0.03	0.03	NS	NS	0.40−0.65	NS	NS	NS
E4920−1M3	0.12	0.90	0.40	0.03	0.03	NS	NS	0.40−0.65	NS	NS	NS
E5518−3M2	0.12	1.00−1.75	0.80	0.03	0.03	0.90	NS	0.25−0.45	NS	NS	NS
E5516−3M3	0.12	1.00−1.80	0.80	0.03	0.03	0.90	NS	0.40−0.65	NS	NS	NS
E5518−3M3	0.12	1.0−1.80	0.80	0.03	0.03	0.90	NS	0.40−0.65	NS	NS	NS
E5516−N1	0.12	0.60−1.60	0.90	0.03	0.03	0.30−1.00	NS	0.35	0.05	NS	NS
E4916−N2	0.08	0.40−1.40	0.50	0.03	0.03	0.80−1.10	0.15	0.35	0.05	NS	NS
E5516−N2	0.12	0.40−1.25	0.80	0.03	0.03	0.80−1.10	0.15	0.35	0.05	NS	NS
E5516−N3	0.10	1.25	0.60	0.03	0.03	1.10−2.00	NS	0.35	NS	NS	NS
E5516−3N3	0.10	1.60	0.60	0.03	0.03	1.10−2.00	NS	NS	NS	NS	NS
E4916−N5	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	2.00−2.75	NS	NS	NS	NS	NS
E5516−N5	0.12	1.25	0.60	0.03	0.03	2.00−2.75	NS	NS	NS	NS	NS
E4916−N7	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	3.00−3.75	NS	NS	NS	NS	NS
E4918−N7	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	3.00−3.75	NS	NS	NS	NS	NS

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.20

● a = ค่าที่แสดงค่าเดียว เป็นค่าที่สูงที่สุด (Values are maximum) ● b = ไม่ระบุค่า (Not specified : NS)

ตารางที่ 7.21 สมบัติทางกลของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้ามาตรฐาน ISO 2560:2012

ที่มา : International Standard ISO 2560:2012, 2012

ประเภทลวดเชื่อม	แรงต้านความเค้นแรงดึง [a] MPa	ความแข็งแรงที่จุดดราก[a] MPa	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว[a] (%)	อุณหภูมิการทดสอบแรงกระแทก (Charpy V−notch)[b] (°C)
E4310	430	330	20	0
E4311	430	330	20	−30
E4316	430	330	20	−30
E4319	430	330	20	−20
E4903	490	400	20	0
E4911	490 to 650	400	20	−30
E4913	490	400	16	NS
E4915	490	400	20	−30
E4916−1	490	400	20	−45
E4918−1	490	400	20	−45
E4927	490	400	20	−30
E5716	570	490	16	−30
E5728	570	490	16	−20
E4910−P1	490	420	20	−30
E5510−P1	550	460	17	−30
E5518−P2	550	460	17	−30
E4910−1M3	490	420	20	NS
E4915−1M3	490	400	20	NS
E4918−1M3	490	400	20	NS
E4920−1M3	490	400	20	NS
E5518−3M2	550	460	17	−50
E5516−3M3	550	460	17	−50
E5518−3M3	550	460	17	−50
E5516−N1	550	460	17	−40
E4916−N2	490	390	20	−40
E5516−N2	550	470 to 550	20	−40
E5516−N3	550	460	17	−50
E5516−3N3	550	460	17	−50
E4916−N5	490	390	20	−75
E5516−N5	550	460	17	−60
E4916−N7	490	390	20	−100
E4918−N7	490	390	20	−100

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.21

● a = ค่าที่แสดงค่าเดียว เป็นค่าสูงสุดที่ต้องการ (Requirements) ● b = ไม่ระบุค่า (Not specified : NS)



รูปที่ 7.14 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้ามาตรฐานสากล (ISO 2560)

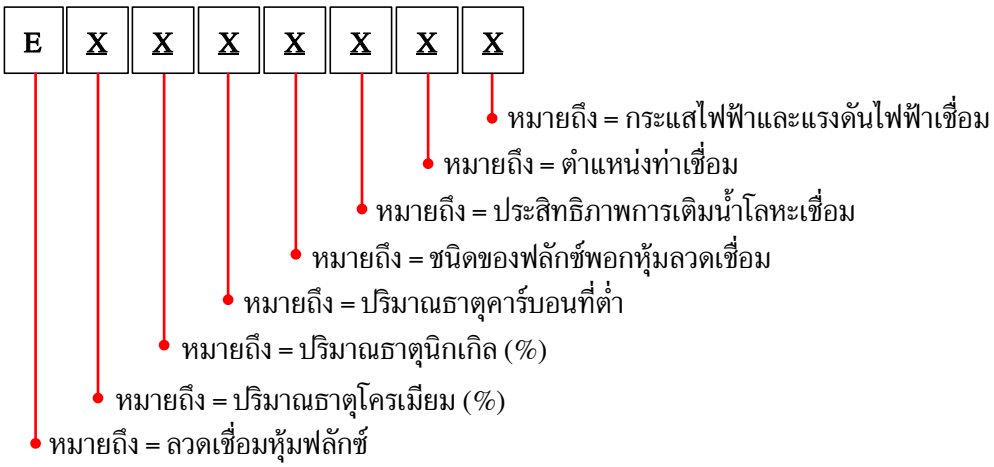
ที่มา : TIANJIN BRIDGE WELDING MATERIAL GROUP CO.,LTD, 2010

2) ISO 3581 : 2016 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าทนความร้อนสูง (Covered Electrodes for Manual Metal Arc Welding of Stainless and Heat−Resisting Steels) เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่อ้างอิงตามมาตรฐานสากล (ISO) โดยได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานออกมาดังนี้

ISO 3581:2012 **E XXXXXXX** ตัวอักษรและตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

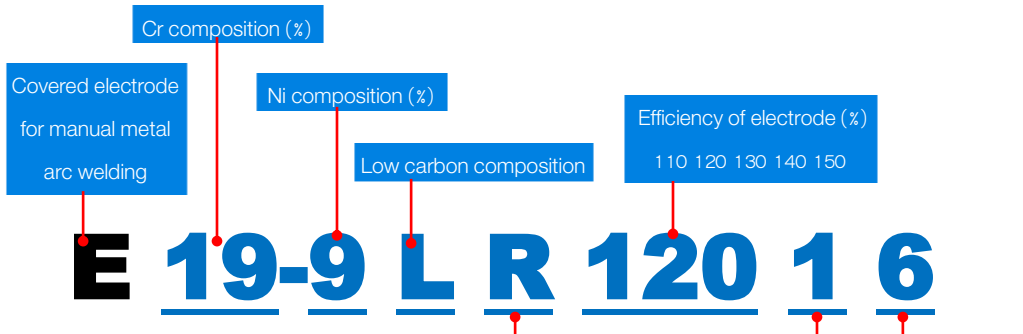
ISO 3581 หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าทนความร้อนสูง

2012 หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน 2012



จากข้อกำหนดตามมาตรฐาน ISO 3581:2016 รหัสของแต่ละตำแหน่งที่ระบุบนลวดเชื่อมจะแสดงค่าปริมาณและความหมายที่เฉพาะเจาะจง ดังที่แสดงในรูปที่ 7.15 โดยการแสดงปริมาณส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมจะแสดงไว้ในตารางที่ 7.22 เป็นที่น่าสังเกตว่าลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน ISO เมื่อพิจารณาเทียบรหัสหรือโค๊ดกับมาตรฐานอื่น ๆ ที่ยอมรับกันในวงการงานเชื่อมอาจจะเทียบรหัสกันไม่ได้ทุกประเภทของลวดเชื่อม ดังแสดงในตารางที่ 7.23 ลวดเชื่อม

หุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมมีราคาที่แพงกว่าลวดเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมอื่น ๆ และมักจะพบว่ามีบรรจุภัณฑ์ที่ค่อนข้างได้มาตรฐาน ดังแสดงตัวอย่างบรรจุภัณฑ์และการระบุรหัสหรือโค๊ดบนกล่องของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมในรูปที่ 7.16



Symbol	Coating type
B	Basic
R	Rutile
S	Other

Symbol	Welding position
1	PA,PB,PC,PD,PE,PF,PG (All positions)
2	PA,PB,PC,PD,PE,PF (All positions, except vertical-down)
3	PA,PB (Flat butt weld, flat fillet weld, horizontal-vertical weld)
4	PA (Flat butt weld, flat fillet weld)
5	PA,PB,PG (Vertical-down and positions according to symbol 3)

Symbol	DC	AC
0	+	–
1	+ or –	50
2	–	50
3	+	50
4	+ or –	70
5	–	70
6	+	70
7	+ or –	90
8	–	90
9	+	90

รูปที่ 7.15 ความหมายของรหัสหรือโค๊ดลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐานสากล (ISO)

ที่มา : Guide to EN ISO 2581:2016, MMA Electrode, 2016



รูปที่ 7.16 แสดงรหัสหรือโค๊ดที่ระบุบนกล่องของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐานสากล (ISO)

ที่มา : Welding Supplies Ireland, MMA Electrode, 2010

ตารางที่ 7.22 ส่วนผสมเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐาน ISO 3581:2016

ที่มา : International Standard ISO 3581:2016, 2016

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)				
	C (max)	Cr	Ni	Mo	ธาตุอื่น ๆ
13	0.12	11–14	–	–	–
13.1	0.07	12–15	18–1.5		–
13.4	0.07	12–15	3–5	1	–
17	0.10	15–18	–	–	–
17.01	0.25	15–18	–	1–1.5	–
19.9	0.08	18–21	8–11	–	–
19.9L	0.04	18–21	8–11	–	
19.9Nb	0.08	18–21	8–11	–	Nb
19.9L Nb	0.04	18–21	8–11	–	Nb
19.12.2	0.08	17–20	11–14	2–2.5	–
19.12.2L	0.04	17–20	11–14	2–2.5	–
19.12.2 Nb	0.08	17–20	11–14	2–2.5	Nb
19.12.3	0.08	17–20	10–14	2.5–3.5	–
19.12.3L	0.04	17–20	10–14	2.5–3.5	–
19.12.3 Nb	0.08	17–20	10–14	2.5–3.5	Nb
19.13.4	0.08	17–21	11–15	3.5–5.5	–
19.13.4L	0.04	17–21	11–15	3.5–5.5	–
19.13.4 Nb	0.08	17–21	11–15	3.5–5.5	Nb
22.12	0.15	20–23	10–13	–	–
23.12	0.15	22–26	11–15	–	–
23.12L	0.04	22–26	11–15	–	–
23.12 Nb	0.12	22–25	11–15	–	Nb
23.12W	0.20	22–25	11–15	–	W 2–4
23.12.2	0.12	22–25	11–15	2–3	–
16.8.2	0.10	14.5–16.5	7.5–9.5	1–2	–
17.8.2	0.10	16.5–8.5	8–9.5	1.5–2.5	–
18.8 Min	0.20	17–20	7–10	–	Min 5–8
18.15.3 L	0.04	16.5–19.5	13–16	2.5–3.5	–
25.2	0.20	24–28	18–22	–	–
25.20 L	0.04	24–28	18–22	–	–
25.20 Nb	0.12	24–28	18–22	–	Nb
25.20.2	0.12	25–28	20–22	2–3	–
25.20 C	0.25/45	24–28	18–22	–	–
25.25.2 Nb	0.10	24–27	24–26	2–2.5	Nb
18.20.2 Cu Nb	0.10	17–20	19–22	2–2.5	Cu 1.8–2.2 Nb
20.25.5 L Cu	0.04	19–22	24–26	4–6	Cu 1–3
23.27.3 L Cu Nb	0.04	21–25	25–29	2.5–4.3	Cu 2.5–3.5 Nb
25.16 C Min	0.25/45	23–26	14.5–17	–	Min 5–8
20.9 Nb	0.13	18–21	8–10	0.35–0.65	Nb
29.9.3	0.10	18.5–21	8–10	2–4	–
25.4	0.15	24–27	4–6	–	–
29.9	0.15	28–32	8–12	–	–
18.36	0.25	14–19	33–38	–	–
17.12 Si	0.15	17–19	11–13	–	Si 3.8–4.8
24.14 Si	0.12	22–25	13–15	–	Si 15–2.2

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.22

- ค่าที่แสดงค่าเดียว เป็นค่าที่สูงที่สุด

ตารางที่ 7.23 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิม เทียบมาตรฐาน ISO กับมาตรฐานอื่น ๆ

ที่มา : International Standard ISO 3581:2016, 2016

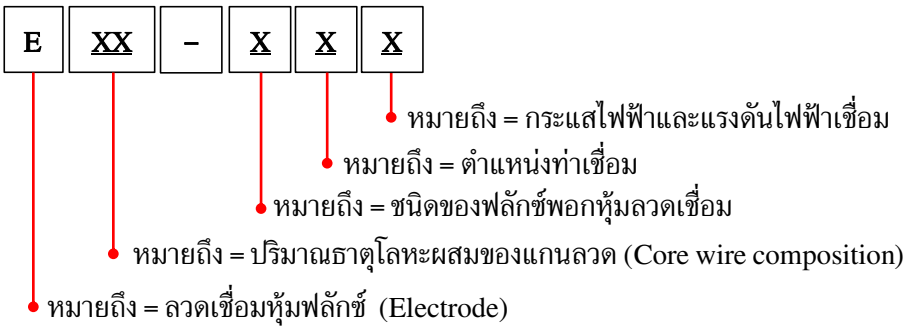
สัญลักษณลวดเชื่อม มาตรฐาน	เทียบเคียงกับมาตรฐานลวดเชื่อมหุมฟลักซ์อื่น ๆ		
ISO 3581:2016	AWS	BS	DIN
13	410	13	13
13.1	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
13.4	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	13.4
17	430	17	17
17.0.1	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
19.9	308	19.9	19.9
19.9 L	308 L	19.9 L	19.9 NC
19.9 Nb	347	19.9 Nb	19.9 Nb
19.9 L Nb	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
19.1.2.2	316	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
19.1.2.2 L	316 L	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
19.1.2.2 Nb	318	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
19.12.3	ไม่ระบุ	19.12.3	19.12.3
19.12.3 L	ไม่ระบุ	19.12.3 L	19.12.3 NC
19.12.3 Nb	ไม่ระบุ	19.12.3 Nb	19.12.3 Nb
19.13.4	317	19.13.4	19.13.4
19.13 AL	ไม่ระบุ	19.13.4 L	ไม่ระบุ
19.13.4 Nb	ไม่ระบุ	19.13.4 Nb	ไม่ระบุ
22.12	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	22.12
23.12	309	23.12	ไม่ระบุ
23.12 L	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	23.12 NC
23.12 Nb	309 Cb	23.12 Nb	23.12 Nb
23.12 W	ไม่ระบุ	13.12	ไม่ระบุ
23.12.2	209 Mo	23.12.2	ไม่ระบุ
16.8.2	16.8.2	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
17.8.2	ไม่ระบุ	17.8.2	ไม่ระบุ
18.8 Min	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	18.8 Min 6
18.15.3 L	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	18.15.3 NC
25.2	310	25.20	25.20
25.20 Nb	310 Cb	25.20 Nb	ไม่ระบุ
25.20.2	310 Mo	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
25.20 C	ไม่ระบุ	25.20 H	ไม่ระบุ
25.25.2 Nb	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	25.25.2 Nb
18.20.2 Cu Nb	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	18.20.2 Cu Nb
20.25.5 L Cu	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
23.27.3 L Cu Nb	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
25.1.6 C Mn	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
20.9 Nb	349	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
20.9.3	ไม่ระบุ	20.9.3	ไม่ระบุ
25.4	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	25.4
29.9	312	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
18.36	330	ไม่ระบุ	18.36

3) ISO 1071 : 2015 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์โลหะเหล็กหล่อ (Welding Consumables –Covered Electrodes, Wires, Rods and Tubular Cored Electrodes for Fusion Welding of Cast Iron) ตามมาตรฐานลวดเชื่อมสากล (ISO) เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ที่ว่าด้วยมาตรฐานรายละเอียดของลวดเชื่อมที่ใช้เชื่อมโลหะเหล็กหล่อ (Cast iron) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานออกมาดังนี้

ISO 1071:2015 **E X X –X X X** ตัวอักษรและตัวเลขของรหัส มีความหมายดังนี้

ISO 1071 หมายถึง กลุ่มลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กหล่อ

2015 หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน 2015



จากรหัสข้อกำหนดมาตรฐาน ISO ของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อ ได้แสดงให้เห็นถึงความหมายของรหัสในแต่ละตำแหน่งอย่างชัดเจน ซึ่งในแต่ละตำแหน่งจะมีข้อกำหนดที่เพิ่มเติม ดังแสดงในรูปที่ 7.17 และจะได้อธิบายเพิ่มเติมในแง่ของความหมายของรหัสดังนี้

– ปริมาณธาตุโลหะผสมของแกนลวด ซึ่งก็จะหมายถึงธาตุที่ผสมหลักของแกนลวดเชื่อม เช่น NiFe ก็คือเป็นลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของนิกเกิลเป็นหลักที่ผสมเพิ่มเติมโลหะเหล็ก

– ตัวอักษรเป็นบอกถึงชนิดของสารฟลักซ์พอกหุ้ม เช่น ตัว G เป็นรหัสที่บ่งชี้ถึงสารพอกหุ้มชนิดกราไฟต์ หรือตัว B หมายถึงสารพอกหุ้มชนิดด่าง เป็นต้น

– ตัวเลขก่อนตัวสุดท้าย จะบ่งบอกถึงตำแหน่งของท่าเชื่อม เช่น เลข 2 หมายถึง เชื่อมได้ทุกท่ายกเว้นท่าตั้งเชื่อมลง หรือ เลข 3 ใช้เชื่อมท่าราบต่อมุมท่าตั้งและท่าขนานนอน เป็นต้น

– ตัวเลขตัวสุดท้าย จะใช้บ่งบอกถึงชนิดของขั้วเชื่อมและชนิดของกระแสไฟเชื่อม เช่น เลข 2 สามารถเชื่อมด้วยกระแสตรง DCEP หรือ DCEN และกระสลับ (AC) ซึ่งจะมีการระบุไว้ในมาตรฐานและโดยปกติผู้ผลิตก็จะระบุไว้ชัดเจนในคู่มือแนะนำการใช้งานลวดเชื่อม ดังแสดงตัวอย่างใบคู่มือแนะนำการใช้ลวดเชื่อม ISO 1071–A ECNiFe–CI ในรูปที่ 7.18 และตัวอย่างการระบุรหัสมาตรฐานลวดเชื่อมที่ข้างกล่องบรรจุภัณฑ์ของลวดเชื่อม ในรูปที่ 7.19

ข้อแนะนำเพิ่มเติมสำหรับข้อกำหนดชนิดของสารฟลักซ์พอกหุ้ม (Cover flux) ถึงการนำใช้งาน

– อักษรตัวรหัส B (Basic) เป็นลวดเชื่อมที่สารฟลักซ์เป็นด่าง โดยใช้สารชนิดฟลูออร์สปาร์ (Fluorspar) ขี้ตะกรันเป็นเกล็ดหยาบ ๆ มีสีน้ำตาลสามารถเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม การหลอมละลายลึกปานกลาง โดยสามารถใช้เชื่อมได้กับไฟฟ้ากระแสตรง DCEP

– อักษรตัวรหัส G (Graphite) เป็นลวดเชื่อมที่สารฟลักซ์เป็นกราไฟต์ มีส่วนผสมของคาร์บอเนตและเหล็ก (Ferroalloys) ขี้ตะกรันเป็นเกล็ดละเอียดเล็ก ๆ มีสีดำ ง่ายต่อการกำจัดออก

– อักษรตัวรหัส S (Salt) เป็นลวดเชื่อมที่สารฟลักซ์เป็นคลอไรด์และฟลูออไรด์ ที่ใช้เชื่อมเหล็กหล่อกับโลหะนอกกลุ่มเหล็กและโลหะผสมต่ำ

– อักษรตัวรหัส V เป็นลวดเชื่อมที่สารฟลักซ์ชนิดพิเศษอื่น ๆ

Symbol	Coating type
B	Basic
G	Graphite
S	Salt
V	Other

Symbol	ตำแหน่งท่าเชื่อม (Welding position)
1	PA,PB,PC,PD,PE,PF,PG (All positions)
2	PA,PB,PC,PD,PE,PF (All positions, except vertical-down)
3	PA,PB (Flat butt weld, flat fillet weld, horizontal-vertical weld)
4	PA (Flat butt weld, flat fillet weld)
5	PA,PB,PG (Vertical-down and positions according to symbol 3)



Symbol	ชนิดของแกนลวดเชื่อม (Type of core wire)
FeC-1	โลหะเหล็กหล่อสีเทา (Gray cast iron)
FeC-2	โลหะเหล็กหล่อสีเทาผสมเหล็กกล้า (Gray cast iron alloy steel)
Fe	โลหะเหล็กกล้า (Steel)
NiFe	โลหะนิกเกิลผสมกับเหล็ก (Nickel alloy with ferrous)
NiCu-1	โลหะนิกเกิลผสมกับทองแดง (Nickel alloy with copper)
NiCu-2	โลหะนิกเกิลผสมกับทองแดง (Nickel alloy with copper)
Ni	โลหะนิกเกิล (Nickel)
CuAl	โลหะทองแดงผสมกับอลูมิเนียม (Copper alloy with aluminum)
CuSn-1	โลหะทองแดงผสมกับดีบุก (Copper alloy with tin)
CuSn-2	โลหะทองแดงผสมกับดีบุก (Copper alloy with tin)
Z	โลหะอื่น ๆ

Symbol	DC	AC
0	+	–
1	+	50
2	+or–	50
3	+	50
4	+ or –	70
5	–	70
6	+	70
7	+ or –	90
8	–	90
9	+	90

รูปที่ 7.17 ความหมายของรหัสลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อมาตรฐานสากล (ISO)

ที่มา : Guide to EN ISO 1071:2015, MMA Electrode, 2015

PRODUCT INFORMATION

SIFTRODE CAST NIFE

EN ISO 1071-A E C NiFe-Cl
AWS A5.15 E NiFe-Cl
DIN 8573 E NiFe BG1

DESCRIPTION

Cast iron electrode with NiFe bimetal core wire. Dedicated for cold welding grey, nodular and malleable cast iron and for joining cast iron with steel. Excellent welding properties, does not overheat, the speed of welding is high, almost no spatters, slag removes easily. Can be welded with AC Uo < 50V and DC (+) and (-).

WELDING POSITIONS



Welding Current: AC, DC+
Suitable positions: PA, PB, PC, PE, PF,PG

TYPICAL WELD METAL COMPOSITION

Ni	54.0 %
Fe	42.0 %

TYPICAL MECHANICAL PROPERTIES

Ult Tensile Strength	≥ 450 N/mm2
Redrying	180° / 1h
Hardness	160-190 [HB]

MATERIAL TO BE WELDED

Grey cast, malleable cast iron, nodular cast iron

AVAILABLE FORMATS

ELECTRODE RODS (MMA / SMAW)

Dia	1.0kg Pkt		Approx Pcs/KG
2.5mm	RE4002501		
3.2mm	RE4003201		
4.0mm	RE4004001		

CURRENT RANGE

Dia (mm)	Amps
2.5	60-80
3.2	80-110
4.0	110-150

รูปที่ 7.18 ข้อแนะนำจากผู้ผลิตของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อมาตรฐานสากล (ISO 1071)

ที่มา : Welding & Welder, 2014



รูปที่ 7.19 ตัวอย่างรหัสบนกล่องลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อมาตรฐานสากล (ISO 1071: 2015)

ที่มา : KISWEL Welding electrode, 2011

ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อตามมาตรฐาน ISO ที่ผลิตออกมาใช้งานสำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อมีจำนวนไม่มากชนิด ด้วยเพราะเกรดของโลหะเหล็กหล่อที่ต้องการเชื่อมก็มีไม่กี่ชนิด (ชนิดของเหล็ก) และด้วยปัญหาที่ทราบกันดีว่าเหล็กหล่อทำการเชื่อมยาก อย่างไรก็ตามมาตรฐานก็ได้มีการกำหนดประเภทของลวดเชื่อมเหล็กหล่อออกมาซึ่งมีทั้งประเภทที่ใช้เชื่อมโลหะเหล็กหล่อกับโลหะต่างชนิดอื่น ๆ (Dissimilar cover electrode) และประเภทที่ใช้เชื่อมโลหะเหล็กชนิดเดียวกัน (Similar cover electrode) โดยทั้งสองประเภทมีส่วนผสมทางเคมีที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 7.24 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

ตารางที่ 7.24 (ก) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมเหล็กหล่อกับโลหะต่างชนิด

ที่มา : International Standard ISO 1071:2015, 2015

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)[a]									
	C	Si	Min	P	S	Fe	Ni[b]	Cu[c]	Remark	other
Fe–1	2.0	1.5	0.5–1.5	0.04	0.04	Rem.	–	–	–	1.0
St	2.0	1.0	1.0	0.04	0.04	Rem.	–	0.35	–	1.0
Fe–2	0.2	1.5	0.3–1.5	0.04	0.04	Rem.	–	–	Nb + Vi 5.0–10.0	1.0
Ni–CI	2.0	4.0	2.5	–	0.03	8.0	min 85	2.5	Al:1.0	1.0
	1.0	0.75	2.5	–	0.03	4.0	min 90	4.0	–	1.0
Ni–CI–A	2.0	4.0	2.5	–	0.03	8.0	min 85	2.5	Al:1.0–3.0	1.0
NiFe–1	2.0	4.0	2.5	0.03	0.03	Rem.	45–75	4.0	Al:1.0	1.0
NiFe–2	2.0	4.0	1.0–5.0	0.03	0.03	Rem.	45–60	2.5	Al:1.0	1.0
NiFe–CI	2.0	4.0	2.5	–	0.03	Rem.	45–60	2.5	Al:1.0	1.0
NiFeT3–CI	2.0	1.0	3.0–5.0	–	0.03	Rem.	45–60	2.5	Al:10	1.0
NiFe–CI–A	2.0	4.0	2.5	–	0.03	Rem.	35–45	2.5	Al:1.0–3.0	1.0
NiFeMin–CI	2.0	1.0	10–14	–	0.03	Rem.	35–45	2.5	Al:1.0	1.0
	0.50	1.0	10–14	–	0.03	Rem.	35–45	2.5	Al:1.0	1.0
NiCu	1.7	1.0	2.5	–	0.04	5.0	50–75	Rem.	–	1.0
NiCu–A	0.35–0.55	0.75	2.3	–	0.025	3.0–6.0	50–60	35–45	–	1.0
NiCu–B	0.35–0.55	0.75	2.3	–	0.025	3.0–6.0	60–70	25–35	–	1.0

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.24 (ก)

- a = ค่าที่แสดงค่าเดียว เป็นค่าที่สูงที่สุด
- b = ค่าที่ต่ำสุดของนิกเกิลที่อาจรวมกับโคบอลต์
- c = ค่าที่ต่ำสุดของทองแดงที่อาจรวมกับโลหะเงิน

ตารางที่ 7.24 (ข) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับเชื่อมเหล็กหล่อชนิดเดียวกัน

ที่มา : International Standard ISO 1071:2015, 2015

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)[a]									
	C	Si	Min	P	S	Fe	Ni[b]	Cu[c]	Remark	Other
FeC−1	3.0−3.6	2.0−3.5	0.8	0.5	0.1	Rem.	–	–	Al:3.0	1.0
FeC−2	3.0−3.6	2.0−3.5	0.8	0.5	0.1	Rem.	–	–	Al:3.0	1.0
FeC−3	2.5−5.0	2.5−9.5	1.0	0.2	0.04	Rem.	–	–	–	1.0
FeC−4	3.2−3.5	2.7−3.0	0.6−0.75	0.5−0.75	0.10	Rem.	–	–	–	1.0
FeC−5	3.3−3.5	2.9−2.5	0.5−0.7	0.2−0.4	0.10	Rem.	1.2−1.6	–	Mo:0.5−0.45	1.0
FeC−GF	3.0−4.0	2.0−3.7	0.6	0.05	0.015	Rem.	1.5	–	Mg:0.02−0.10 Ce:0.20	1.0
FeC−Gp1	3.2−4.0	3.2−3.8	0.1−0.4	0.05	0.015	Rem.	0.50	–	Mg:0.04−0.10 Ce:0.20	1.0
FeC−Gp2	2.5−3.5	1.5−3.0	1.0	0.05	0.015	Rem.	2.5	1.0	Mg:0.02−0.10 Ce:0.20	1.0

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.24 (ข)

- a = ค่าที่แสดงค่าเดียว เป็นค่าที่สูงที่สุด
- b = ค่าที่ต่ำสุดของนิกเกิลที่อาจรวมกับโคบอลต์
- c = ค่าที่ต่ำสุดของทองแดงที่อาจรวมโลหะเงิน

ผู้ผลิตลวดเชื่อมเหล็กหล่อหลายราย ได้มีข้อแนะนำเทคนิคที่ควรปฏิบัติแก่ช่างเชื่อมในการที่จะเชื่อมโลหะเหล็กหล่ออย่างไรที่จะไม่เกิดปัญหา โดยมีข้อควรปฏิบัติดังนี้

1) ต้องรู้และเข้าใจชนิดและส่วนผสมของเหล็กหล่อที่จะเชื่อม เช่น เหล็กหล่ออบเหนียวเชื่อมแล้วคุณสมบัติจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสูญเสียความเหนียวไป หรือ เหล็กหล่อสีขาวแทบจะเชื่อมไม่ได้เลย หรือ เหล็กหล่อกราไฟต์กลม (Nodular cast iron) เชื่อมได้แต่ไม่ควรเชื่อมบ่อย หรือ เหล็กหล่อสีเทาสามารถเชื่อมได้ดีกว่าเหล็กหล่อชนิดอื่น ๆ เป็นต้น

2) ต้องทำความสะอาดผิวชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม

3) เลือกวิธีการอุ่นชิ้นงานก่อนเชื่อมอย่างถูกวิธี เช่น ใช้อุณหภูมิสูงเท่าไหร่ และนานแค่ไหน

4) เลือกขบวนการเชื่อมที่เหมาะสมกับชนิดของเหล็กหล่อ เช่น เหล็กหล่อ Ni−Resist จะเชื่อมได้เฉพาะขบวนการเชื่อม SMAW หรือเหล็กหล่อสีเทาสามารถเชื่อมได้ทุกวิธีการเชื่อม เป็นต้น

7.2. มาตรฐานของลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมด้วยแก๊สปกคลุม (Standards of filler electrode)

มาตรฐานลวดกลุ่มเชื่อมนี้ จะหมายถึงลวดเชื่อมที่ผลิตออกมาใช้สำหรับขบวนการเชื่อมที่ต้องใช้แหล่งแก๊สจากภายนอกป้อนเข้ามาปกคลุมบ่อหลอมละลายขณะทำการเชื่อม เป็นลวดเชื่อมที่ไม่มีสารพอกหุ้มใด ๆ เป็นเนื้อโลหะเส้นตันสำรับการเติมอย่างเดียวจนกล่าวขานกันในชื่อของ ลวดเชื่อมเปลือย โดยลวดเชื่อมกลุ่มนี้จะมีทั้งชนิดที่เป็นแบบเส้นลวดม้วนอยู่ในล้อขดม้วนลวด (Filler wire) และชนิดที่เป็นแบบเส้นลวดยาวเป็นเส้น ๆ (Filler rods) ดังแสดงในรูปที่ 7.20 (ก) และ (ข) ตามลำดับโดยชนิดที่เป็นแบบลักษณะเส้นลวดม้วนจะใช้กับขบวนการเชื่อมที่มีระบบการป้อนเติมลวดเชื่อมอย่างต่อเนื่อง (Continuous wire feeding) ได้แก่ ขบวนการเชื่อมมิก/แม็ก (GMAW) ขบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (SAW) และขบวนการเชื่อมอิเลคโทรสแลก (ESW) ส่วนชนิดที่เป็นแบบแท่งลวดตันยาวเป็นเส้น ๆ จะผลิตออกมาเพื่อใช้กับขบวนการเชื่อมที่เติมลวดด้วยช่างเชื่อมเอง (Filler) ได้แก่ ขบวนการเชื่อมทิก (GTAW) ขบวนการเชื่อมพลาสมา (PAW) และขบวนการเชื่อมแก๊สอะเซทิลีน (OAW) เป็นต้น

ลวดเชื่อมประเภทไม่มีฟลักซ์หุ้มหรือลวดเชื่อมเปลือยนี้ปัจจุบันเป็นที่นิยมและมีการเลือกนำมาใช้งานกันหลากหลายมากมาย และแต่ละมาตรฐานก็จะมีข้อกำหนดที่แตกต่างกันไป ซึ่งก็จะมีบางส่วนที่เหมือนกัน คล้ายกัน และก็มีในบางส่วนที่ต่างกันตามแต่ละมาตรฐาน โดยจะได้นำเสนอในรายละเอียดไว้ในแต่ละมาตรฐานและในแต่ละชนิดของโลหะลวดเชื่อม ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันในระดับสากล และเป็นที่นิยมนำมาอ้างอิงกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการเชื่อมภายในประเทศไทย มักจะอ้างอิงกับมาตรฐานของ AWS และ JIS รวมถึง EN ISO เป็นต้น และจะเน้นข้อมูลมาตรฐานของลวดเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กหล่อ และ โลหะนอกลุ่มเหล็กประเภทอลูมิเนียม เป็นสำคัญ ดังที่จะได้กล่าวต่อไปนี้



(ก) ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดม้วน (Filler wire) **(ข)** ลวดเชื่อมแบบแท่งยาว (Filler rod)

รูปที่ 7.20 ตัวอย่างลักษณะของลวดเชื่อมสำหรับแก๊สปกคลุม (ลวดเชื่อมเปลือย)

ที่มา : KOBELCO Welding electrode, 2013

1. ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมมาตรฐาน AWS (American Welding Society)

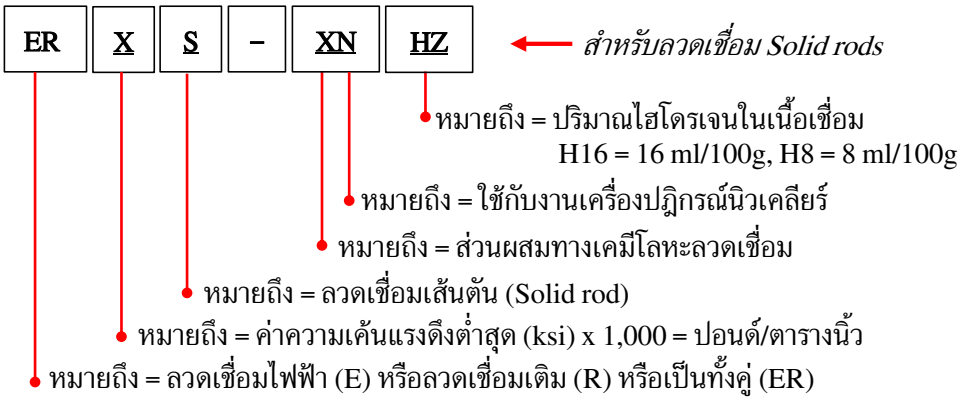
ลวดเชื่อมสำหรับขบวนการเชื่อมที่ใช้แก๊สจากแหล่งภายนอกเข้ามาปกคลุมตามมาตรฐานของสมาคมการเชื่อมแห่งสหรัฐอเมริกา ได้สร้างข้อกำหนดขึ้นเพื่อเป็นมาตฐานคุณภาพของงานเชื่อมและความเข้าใจที่ตรงกันในการสื่อสารทางภาษาวิศวกรรมการเชื่อม โดยมีรหัสหรือโค๊ดที่กำหนดไว้ดังนี้

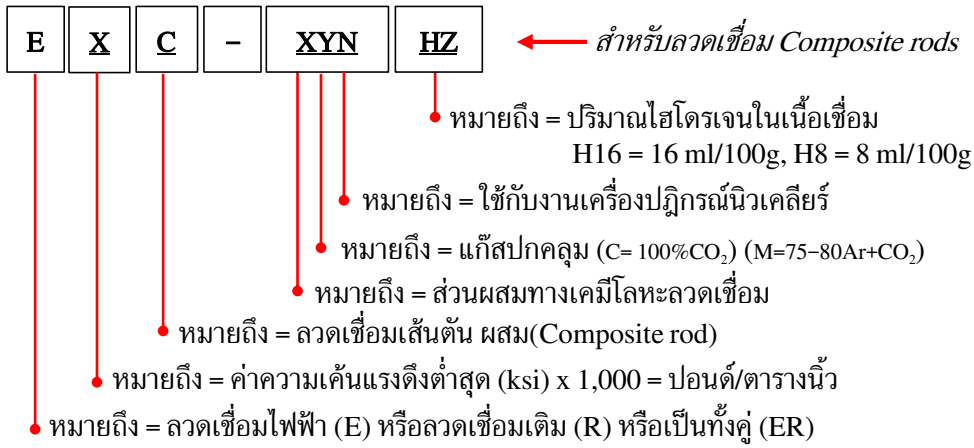
1.1) AWS A5.18/A5.18:2017 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมของโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน (Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielding Arc Welding) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้

AWS A5.18/A5.18:2017 ตัวอักษรและตัวเลขของรหัสของมาตรฐานแยกออกตามประเภทของลวดเชื่อมแบบที่เป็นลวดเชื่อมเส้นตัน (Solid rod) กับแบบที่เป็นเส้นตันผสม (Composite rod) มีความหมายของแต่ละประเภทดังนี้

AWS A5.18/A5.18 หมายถึง ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมสำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน

2017 หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน 2017





จากมาตรฐานรหัสหรือโค๊ดที่กำหนดความหมายไว้จะแสดงรายละเอียดเพิ่มเติมในตารางค่าต่าง ๆ ดังนี้ ตารางที่ 7.25 (ก) แสดงตัวอย่างประเภทและส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมชนิดเส้นลวดตัน (Solid rod) ตารางที่ 7.25 (ข) แสดงตัวอย่างประเภทและส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมชนิดเส้นลวดผสม (Composite rod) และ ตารางที่ 7.26 แสดงสมบัติทางกลพร้อมระบุชนิดแก๊สปกคลุมที่เหมาะสม สำหรับรูปที่ 7.21 ต้องการแสดงเป็นตัวอย่างลักษณะผลิตภัณฑ์ของลวดเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนที่ระบุมาตรฐาน AWS อย่างชัดเจนบนลวดเชื่อม

ตารางที่ 7.25 (ก) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมเหล็กกล้าคาร์บอน (Solid rod)

ที่มา : AWS A5.18/A5.18:2017, 2017

ประเภทลวดเชื่อม[b]	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)[a]												
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu[c]	Ti	Zr	Al
ER70S-2	0.07	0.40–0.70	0.9–1.4	0.025	0.035	(e)	(e)	(e)	(e)	0.50	0.05–0.15	0.02–0.12	0.05–0.15
ER70S-3	0.06–0.15	0.45–0.75	0.9–1.4	0.025	0.035	(e)	(e)	(e)	(e)	0.05	–	–	–
ER70S-4	0.07–0.15	0.65–0.85	1.0–1.5	0.025	0.035	(e)	(e)	(e)	(e)	0.05	–	–	–
ER70S-5	0.07–0.19	0.3–0.6	0.9–1.4	0.025	0.035	(e)	(e)	(e)	(e)	0.05	–	–	0.5–0.9
ER70S-6	0.06–0.15	0.8–1.15	1.4–1.85	0.025	0.035	(e)	(e)	(e)	(e)	0.05	–	–	–
ER70S-7	0.07–0.15	0.5–0.8	1.5–2.0[d]	0.025	0.035	(e)	(e)	(e)	(e)	0.05	–	–	–
ER70S-G[f]	ลวดเชื่อมประเภทนี้กำหดไว้สำหรับลวดเชื่อมพิเศษที่กำหนดส่วนผสมทางเคมีตามข้อตกลงระหว่างผลิตกับผู้ใช้ลวดเชื่อม												

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.25 (ก)

- a = ค่าที่แสดงค่าเดียว เป็นค่าที่สูงที่สุด
- b = ตัวเลขต่อท้ายสัญลักษณ์ (N) ใช้งานปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ที่จำกัด P <0.012%, V<0.05% และ Cu<0.08%
- c = โลหะทองแดงรวมทั้งที่เคลือบผิวลวดเชื่อมไม่เกิน 0.05%
- d = ลวดเชื่อมชนิดนี้แมงกานีสอาจเกิน 2% จึงต้องลด C ลงจาก 0.01% ต่อการเพิ่มแมงกานีส 0.05%
- e = ธาตุที่เหลืออื่น ๆ รวมไม่เกิน 0.05%

ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมหรือที่เรียกกันว่าลวดเชื่อมเปลือยเป็นที่นิยมเลือกใช้งานกันมาก ด้วยมีข้อดีของการที่ไม่ต้องกำจัดสแลกออก เชื่อมง่าย เกิดข้อบกพร่องน้อย เชื่อมได้รวดเร็ว และเหตุผลด้านอื่น ๆ อีกหลายอย่าง และยังสามารถเชื่อมโลหะได้ทุกชนิด ดังนั้น การที่จะเลือกลวดเชื่อมให้เหมาะสมกับโลหะงานที่จะเชื่อมมีความจำเป็นอย่างยิ่ง จึงขอชี้แนะแนวทางการเลือกใช้ลวดเชื่อมบางประเภทเพื่อเป็นตัวอย่างของเหตุผลในการพิจารณาเลือกใช้ลวดเชื่อมที่ถูกต้อง โดยเหตุผลที่จะนำมาชี้แนะนี้ได้

ตีความหมายมาจากมาตรฐานรหัสหรือโค๊ดที่ระบุไว้บนลวดเชื่อม ซึ่งเป็นตัวอย่างสำหรับการเลือกลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อม MIG/MAG ดังนี้

ลวดเชื่อม ER70S−1 เหมาะสำหรับใช้เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) และเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium carbon steel) จะใช้คู่กับแก๊สปกคลุมชนิด $Ar+O_2$ ผิวชิ้นงานต้องมีความสะอาด ไม่มีสนิมหรือสิ่งสกปรก

ลวดเชื่อม ER70S−2 เหมาะสำหรับใช้เชื่อมเหล็กที่กำจัดออกซิเจนแล้ว (Killed steel) เหล็กที่มีออกซิเจนเจือปนต่ำ (Semi killed steel) และเหล็กที่มีออกซิเจนเจือปนสูง (Rimmed steel) หรือเหล็กที่มีผิวไม่ค่อยสะอาดมากนัก สามารถเชื่อมแบบถ่ายโอนลัดวงจร (Short Circuit Transfer) ได้ทุกท่าเชื่อม (All position)

ลวดเชื่อม ER70S−3 เหมาะสำหรับใช้เชื่อมเหล็กในแนวยัดไส้ (Root pass) และสามารถเชื่อมเหล็กที่มีออกซิเจนเจือปนที่ต่ำ ในแนวที่ 2 และ แนวที่ 3 โดยใช้ขนาดลวดเชื่อมที่เล็ก ซึ่งสามารถเชื่อมแบบถ่ายโอนลัดวงจร (Short Circuit Transfer) ได้ทุกท่าเชื่อม (All position) ลวดเชื่อมชนิดนี้เป็นที่นิยมเลือกใช้งานกันมากที่สุด

ลวดเชื่อม ER70S−4 เป็นลวดเชื่อมที่มีปริมาณของธาตุ Si และ Mn ผสมสูง และเหมาะกับการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สปกคลุม เนื้อแนวเชื่อมที่ได้จะมีสมบัติที่สามารถรับแรงดึงได้สูง โดยไม่เหมาะกับการนำไปเชื่อมโลหะงานที่ต้องรับแรงกระแทก (Impact load)

ลวดเชื่อม ER70S−5 เป็นลวดเชื่อมที่เหมาะกับการเชื่อมเหล็กกล้าที่มีออกซิเจนผสมต่ำ ในการเชื่อมจะต้องใช้กระแสไฟเชื่อมที่สูง และสามารถเชื่อมบนผิวงานที่มีสารปนเปื้อนสนิมได้ แต่ไม่เหมาะกับการเชื่อมงานในลักษณะที่ต้องรับแรงแบบไดนามิก (Impact load)

ลวดเชื่อม ER70S−6 เป็นลวดเชื่อมชนิดที่มีปริมาณของธาตุ Si และ Mn ผสมในปริมาณที่สูง สามารถเชื่อมได้กับเหล็กกล้าทุกชนิด และผิวงานที่มีออกไซด์ ไม่เหมาะที่จะนำไปเชื่อมโลหะเหล็กที่มีออกซิเจนเจือปนสูง และสามารถเชื่อมได้กับกระแสไฟเชื่อมที่สูง ๆ

ลวดเชื่อม ER70S−7 เป็นลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของธาตุ Mn สูงมาก เหมาะกับการเชื่อมที่ใช้แก๊สผสม $Ar+CO_2$ หรือ 100% CO_2 เนื้อเชื่อมที่ได้จะมีความแข็งแรงน้อยกว่า ลวดเชื่อม ER70S−6 แต่สูงว่า ER70S−3

ลวดเชื่อม ER70S−G เป็นรหัสที่สร้างขึ้นใช้เป็นตัวแทนของการกำหนดลวดเชื่อมตามข้อตกลงระหว่างผู้ใช้กับผู้ผลิตลวดเชื่อม

ลวดเชื่อม ER70S−1B เป็นลวดเชื่อมที่เหมาะสมกับการเชื่อมโลหะที่มีธาตุกำจัดออกซิเจน สามารถนำไปเชื่อมได้กับทุกท่าเชื่อม ยกเว้นท่าราบ และสามารถเชื่อมได้ทั้งการเชื่อมแบบแนวเดียว (Single pass) และแบบหลายแนวซ้อนกัน (Multi pass)

จากการชี้แนะความเหมาะสมของความสามารถของลวดเชื่อมจะเห็นได้ว่ามีลวดเชื่อมหลายชนิดที่มีสมบัติที่ใกล้เคียงกัน สามารถใช้ทดแทนกันได้ในกรณีที่มีความจำเป็น และบางชนิดเป็นข้อห้าม

สำหรับการเชื่อมกับโลหะงานบางประเภท ดังนั้น การทำความเข้าใจและเลือกใช้ลวดเชื่อมจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับวิศวกรและช่างเชื่อม

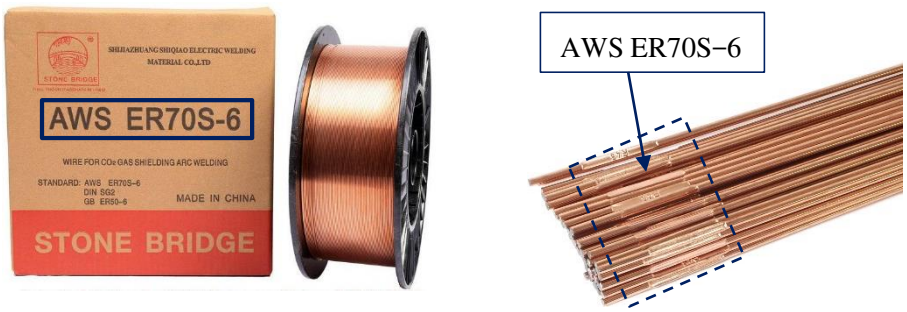
ตารางที่ 7.25 (ข) ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมเหล็กกล้าคาร์บอน (Composite rod)

ที่มา : AWS A5.18/A5.18:2017, 2017

ประเภทลวดเชื่อม[b]	ชนิดแก๊สปกคลุม[c]	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)[a]									
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
ลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมหลายแนว (Multiple pass welding)											
E70C−3X	75−80% Ar+CO_2 หรือ %CO_2	0.12	0.90	1.75	0.03	0.03	(e)	(e)	(e)	(e)	0.50
E70C−6X	75−80% Ar+CO_2 หรือ %CO_2	0.12	0.90	1.75	0.03	0.03	(e)	(e)	(e)	(e)	0.50
E70C−G(X)	(d)	ไม่ระบุส่วนผสมเคมี[f]									
ลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมแนวเดียว (Single pass welding)											
E70C−GS(X)	(d)	ไม่ระบุส่วนผสมเคมี[g]									

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.25 (ข)

- a = ค่าที่แสดงค่าเดียว เป็นค่าที่สูงที่สุด
- b = ตัวอักษร “X” ต่อท้าย แทนอักษร “C” หรือ “M” ซึ่งหมายถึงชนิดของแก๊สคลุม C คือ 100%CO_2 และ M คือ แก๊สผสม 75−80%Ar ที่เหลือเป็น CO_2 สำหรับลวดเชื่อม E70C−G และ E70C−GS เมื่อไม่เติม C หรือ M ต่อท้าย หมายความว่า ไม่ใช้แก๊สคลุมจากภายนอก (ใช้แก๊สคลุมในตัวเอง)
- c = ถ้าใช้แก๊สปกคลุมนอกเหนือจากที่กำหนด เนื้อเชื่อมที่ได้จะมีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างออกไป
- d = แก๊สปกคลุมมีการตกลงกันระหว่างผู้ซื้อและผู้จัดหา
- e = ให้รายงานเมื่อต้องการเติม Ni, Cr, Mo และ V รวมแล้วไม่เกิน 0.05%
- f = ส่วนผสมจะต้องรายงาน เมื่อต้องมีการตกลงกันระหว่างผู้ซื้อและผู้จัดหา
- g = ลวดเชื่อมชนิดนี้ไม่กำหนดส่วนผสมทางเคมี เพราะต้องการเชื่อมเพียงแนวเดียว



(ก) ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดม้วน ER70S−6 **(ข)** ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดตรง ER70S−6

รูปที่ 7.21 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมเหล็กกล้าคาร์บอน มาตรฐาน AWS

ที่มา : SHIJIAZHUANG SHIQIAO ELECTRIC WELDING MATERIAL, 2012

ตารางที่ 7.26 สมบัติทางกลและแก๊สปกคลุมสำหรับลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอน

ที่มา : AWS A5.18/A5.18:2017, 2017

ประเภทลวดเชื่อม[a]	ชนิดแก๊สปกคลุม[c]	ความเค้นแรงดึงต่ำสุด		ความเค้นจำนน[b]		การยืดตัว
		psi	Mpa	psi	Mpa	%
ER70S−2	CO_2	70,000	480	58,000	400	22
ER70S−3	CO_2	70,000	480	58,000	400	22
ER70S−4	CO_2	70,000	480	58,000	400	22
ER70S−5	CO_2	70,000	480	58,000	400	22
ER70S−6	CO_2	70,000	480	58,000	400	22
ER70S−7	CO_2	70,000	480	58,000	400	22
ER70S−G	(d)	70,000	480	58,000	400	22
ER70C−3X	75−80%Ar+CO_2 หรือ 100%CO_2	70,000	480	58,000	400	22
ER70C−6X	75−80%Ar+CO_2 หรือ 100%CO_2	70,000	480	58,000	400	22
ER70C−G(X)	(d)	70,000	480	58,000	400	22
ER70C−GS(X)	(d)	70,000	480	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.26

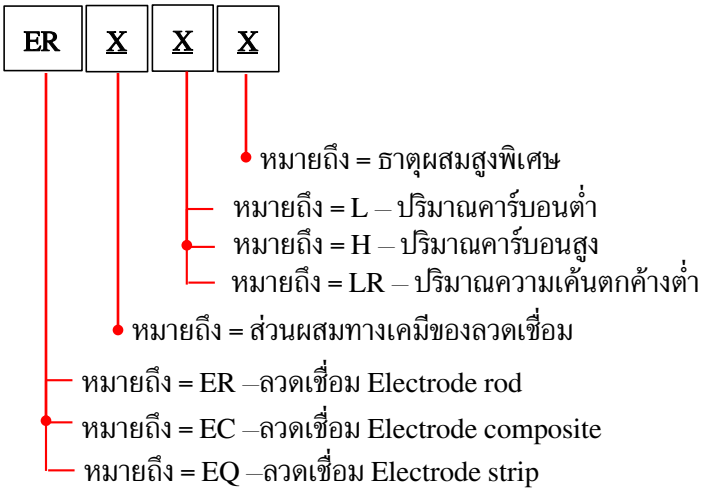
- a = ตัวอักษร “X” ต่อท้าย แทนอักษร “C” หรือ “M” ซึ่งหมายถึง ชนิดของแก๊สคลุม C คือ 100%CO_2 และ M คือ แก๊สผสม 75−80%Ar ที่เหลือเป็น CO_2 สำหรับลวดเชื่อม E70C−G และ E70C−GS เมื่อไม่เติม C หรือ M ต่อท้าย หมายความว่า ไม่ใช้แก๊สคลุมจากภายนอก (ใช้แก๊สคลุมในตัวเอง)
- b = ค่าความเค้นจำนน 0.25% offset และการยืดตัวของชิ้นทดสอบในความยาว 2 นิ้ว (51 มม.)
- c = แก๊ส CO_2 หมายถึง แก๊สปกคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ และถ้าผสมแก๊ส Ar+O_2 หรือ Ar+CO_2เนื้อเชื่อมจะมีความแข็งแรงและมีความสามารถในการยืดตัวต่ำลง
- d = แก๊สปกคลุมมีการตกลงกันระหว่างผู้ซื้อและผู้จัดหา

1.2) AWS A5.9/A5.9:2017 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม (Specification for Wire Electrodes, Strip Electrodes, Wires and Rods for Arc Welding of Stainless and Heat Resisting Steels) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้

AWS A5.9/A5.9:2017 มาตรฐานของลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมสำหรับการเชื่อมโลหะงานที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมนี้ จะรวมทั้งหมดของลักษณะลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ทั้งประเภทที่เป็นเส้นลวดม้วน (Electrode wire) ลวดเส้นตรง (Electrode rod) แผ่นแบน (Electrode strip) ที่รองรับกับขบวนการเชื่อม GMAW ขบวนการเชื่อม GTAW ขบวนการเชื่อม PAW และ ขบวนการเชื่อม SAW โดยมีการกำหนดตัวอักษรและตัวเลขรหัสของมาตรฐานที่มีความหมายดังต่อไปนี้

AWS A5.9/A5.9 หมายถึง ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมสำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม

2017 หมายถึง ปีที่กำหนดมาตรฐาน 2017



ลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมได้ผลิตออกมาใช้งานที่หลากหลายมากมาย ซึ่งมีทั้งที่เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (AWS A5.4) ลวดเชื่อมเส้นตัน (AWS A5.9) และลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (AWS A5.22) เป็นต้น โดยแต่ละประเภทของลวดเชื่อมก็จะพยายามผลิตออกมาเพื่อให้สามารถเลือกใช้งานกับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมได้ทุกชนิดของโลหะหลักที่ต้องการเชื่อม ซึ่งในกรณีที่เกรดของลวดเชื่อมตรงกันกับเกรดของโลหะหลักเหล็กกล้าไร้สนิม (ลวดเชื่อม ER304 ใช้เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304) ลักษณะแบบนี้ไม่ต้องพิจารณาเลือกใช้ แต่พบว่าลวดเชื่อมจะผลิตออกมาไม่ตรงกันกับโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมทุกประเภทที่มี (ลวดเชื่อม ER309 ใช้เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด AISI 201) กรณีแบบนี้ช่างเชื่อมต้องพิจารณาเลือกใช้เกรดของลวดเชื่อมให้เหมาะสม จะมุ่งเน้นถึงส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างของเนื้อเชื่อมที่ได้เป็นสำคัญ โดยมีหลักการเลือกลวดเชื่อมที่ต้องมีส่วนผสมที่เจือสูงกว่าโลหะหลักที่จะเชื่อม เช่น การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติกจะเลือกลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของ Cr และ Ni ที่ผสมอยู่ในปริมาณที่สูงจะลดปัญหาเกิดการสูญเสียธาตุผสมในปริมาณที่เพียงพอต่อการป้องกันการเกิดกร่อนได้ดี ซึ่งในทางปฏิบัติจะต้องพิจารณาร่วมกับขบวนการเชื่อม (Welding process) และปัจจัยการเชื่อมด้วย (Welding parameter) เพราะทั้งประเด็นจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของแนวเชื่อมที่จะได้ ทั้งสมบัติทางกลและสมบัติทางด้านความต้านทานการกัดกร่อน

เป็นที่ทราบกันดีว่าการเลือกใช้ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจและสามารถทำนายโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมได้ด้วย ซึ่งก็คือ Schaeffler diagram ซึ่งจะทำนายจากสัดส่วนผสมทางเคมีที่อยู่ในลวดเชื่อม ดังแสดงชนิดของลวดเชื่อมและส่วนผสมทางเคมีในตารางที่ 7.27 พร้อมกับตัวอย่างการแสดงรายละเอียดของลวดเชื่อมที่แนะนำจากผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมในรูปที่ 7.22 และลักษณะรูปแบบของลวดเชื่อมเปลือยเหล็กกล้าไร้สนิมในรูปที่ 7.23

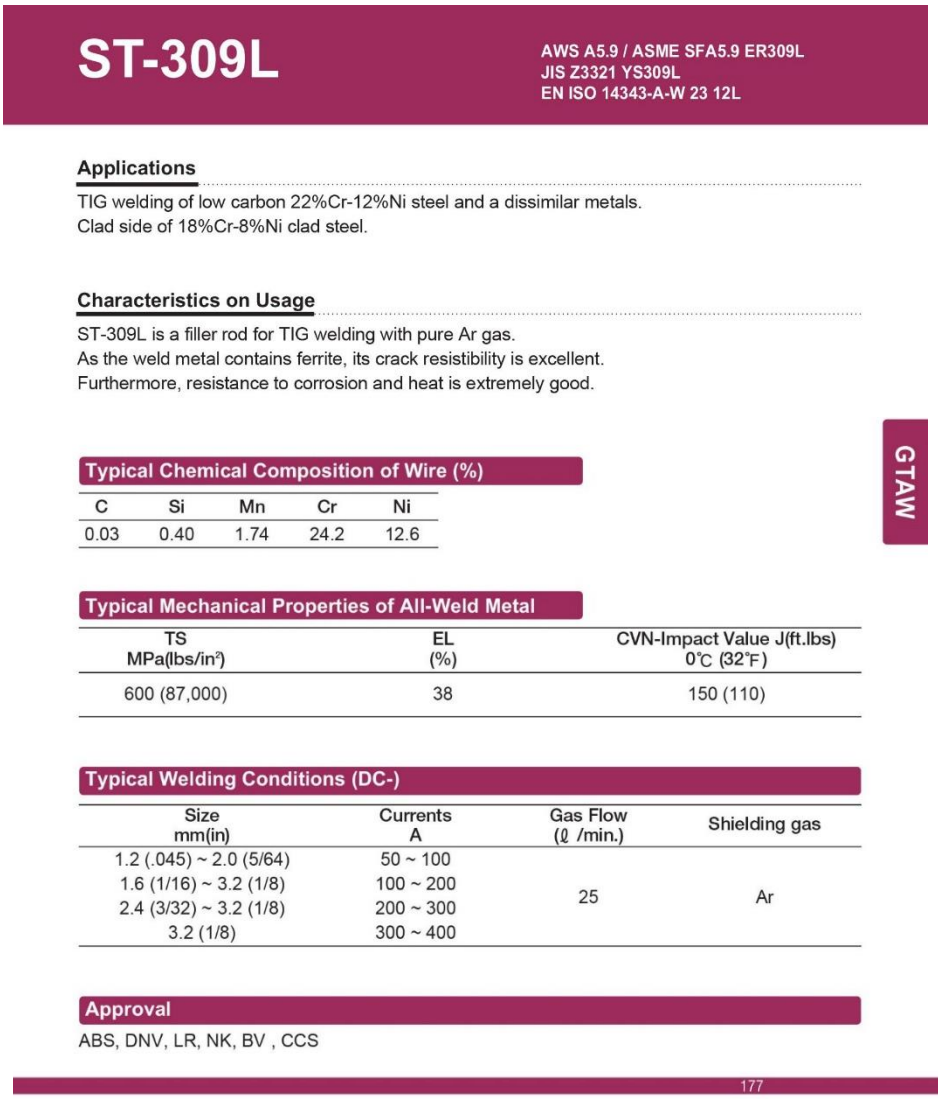
ตารางที่ 7.27 ชนิดและส่วนผสมเคมีลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมมาตรฐาน AWS

ที่มา : AWS A5.9/A5.9:2017, 2017

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)[a,b]									
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	N	Cu
ER209	0.05	20.5–24.0	9.5–24.0	1.5–3.0	4.0–7.0	0.90	0.03	0.03	0.10–0.30	0.75
ER218	0.10	16.0–18.0	8.0–9.0	0.75	7.0–9.0	4.5	0.03	0.03	0.08–0.18	0.75
ER219	0.05	19.0–21.5	5.5–7.0	0.75	8.0–1.0	1.0	0.03	0.03	0.10–0.30	0.75
ER240	0.05	17.0–19.0	4.0–6.0	0.75	10.5–13.5	1.0	0.03	0.03	0.10–0.30	0.75
ER307	0.14	19.5–22.0	8.0–10.7	0.5–1.5	3.3–4.75	0.3–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER308	0.08	19.5–22.0	9.0–11.0	0.75	1.0–2.5	0.3–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER308H	0.08	19.5–22.0	9.0–11.0	0.50	1.0–2.5	0.3–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER308L	0.03	19.5–22.0	9.0–11.0	0.75	1.0–2.5	0.3–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER308Mo	0.08	18.0–21.0	9.0–11.0	2.0–3.0	1.0–2.5	0.3–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER308Si	0.08	19.5–22.0	9.0–12.0	0.75	1.0–2.5	0.65–1.00	0.03	0.03	–	0.75
ER308LSi	0.03	19.5–22.0	9.0–11.0	0.75	1.0–2.5	0.65–1.00	0.03	0.03	–	0.75
ER309	0.12	23.0–25.0	9.0–11.0	0.75	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER309L	0.03	23.0–25.0	12.0–14.0	0.75	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER309Mo	0.12	23.0–25.0	12.0–14.0	2.0–3.0	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER309LMo	0.03	23.0–25.0	12.0–14.0	2.0–3.0	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER309Si	0.12	23.0–25.0	12.0–14.0	0.75	1.0–2.5	0.65–1.00	0.03	0.03	–	0.75
ER309LSi	0.03	23.0–25.0	12.0–14.0	0.75	1.0–2.5	0.65–1.00	0.03	0.03	–	0.75
ER310	0.15	25.0–28.0	20.0–22.5	0.75	1.0–2.5	0.65–1.00	0.03	0.03	–	0.75
ER312	0.15	28.0–32.0	8.0–10.5	0.75	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER316	0.08	18.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER316H	0.08	18.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER316L	0.03	18.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER316Si	0.08	18.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	1.0–2.5	0.65–1.00	0.03	0.03	–	0.75
ER316LSi	0.03	18.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	1.0–2.5	0.65–1.00	0.03	0.03	–	0.75
ER317	0.08	18.5–20.5	13.0–15.0	3.0–4.0	1.0–2.5	0.65–1.00	0.03	0.03	–	0.75
ER317L	0.03	18.5–20.5	13.0–15.0	3.0–4.0	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER318	0.08	18.0–20.0	11.0–14.0	2.0–3.0	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER320	0.07	19.0–21.0	32.0–36.0	2.0–3.0	2.5	0.60	0.03	0.03	–	3.0–4.0
ER320LR	0.025	19.0–21.0	32.0–36.0	2.0–3.0	1.5–2.0	0.15	0.015	0.03	–	3.0–4.0
ER321	0.08	18.5–20.5	9.0–10.5	0.75	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER330	0.25	15.0–17.0	34.0–37.0	0.75	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER347	0.08	19.0–21.5	9.0–11.0	0.75	1.0–2.5	0.30–0.65	0.03	0.03	–	0.75
ER347Si	0.08	19.0–21.5	9.0–11.0	0.75	1.0–2.5	0.65–1.00	0.03	0.03	–	0.75
ER383	0.025	26.5–28.5	30.0–33.0	3.2–4.2	1.0–2.5	0.50	0.02	0.03	–	0.70–1.5
ER385	0.025	19.52–21.5	24.0–25.0	4.2–6.2	1.0–2.5	0.50	0.03	0.03	–	1.2–2.0

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.27

- a = เป็นการกำหนดธาตุผสมหลักของลวดเชื่อม ส่วนธาตุอื่นที่ผสมรวมแล้วไม่เกิน 0.5%
- b = ค่าที่กำหนดค่าเดียว หมายถึง เป็นค่าสูงสุด



ST-309L

AWS A5.9 / ASME SFA5.9 ER309L
JIS Z3321 YS309L
EN ISO 14343-A-W 23 12L

Applications

TIG welding of low carbon 22%Cr-12%Ni steel and a dissimilar metals.
Clad side of 18%Cr-8%Ni clad steel.

Characteristics on Usage

ST-309L is a filler rod for TIG welding with pure Ar gas.
As the weld metal contains ferrite, its crack resistibility is excellent.
Furthermore, resistance to corrosion and heat is extremely good.

GTAW

Typical Chemical Composition of Wire (%)

C	Si	Mn	Cr	Ni
0.03	0.40	1.74	24.2	12.6

Typical Mechanical Properties of All-Weld Metal

TS MPa(lbs/in²)	EL (%)	CVN-Impact Value J(ft.lbs) 0℃ (32℉)
600 (87,000)	38	150 (110)

Typical Welding Conditions (DC-)

Size mm(in)	Currents A	Gas Flow (ℓ /min.)	Shielding gas
1.2 (.045) ~ 2.0 (5/64)	50 ~ 100	25	Ar
1.6 (1/16) ~ 3.2 (1/8)	100 ~ 200		
2.4 (3/32) ~ 3.2 (1/8)	200 ~ 300		
3.2 (1/8)	300 ~ 400		

Approval

ABS, DNV, LR, NK, BV , CCS

177

รูปที่ 7.22 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมเหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน AWS 5.9
ที่มา : HYUNDAI Welding Electrode, 2015

เหล็กกล้าไร้สนิมทุกชนิดมีส่วนผสมหลักที่มีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนคือธาตุโครเมียม (Cr) และต้องผสมอยู่ในปริมาณที่มากเพียงพอในการสร้างฟิล์มเพื่อป้องกันการกัดกร่อนที่จะเกิดขึ้น ส่วนธาตุผสมรองอื่น ๆ ผสมเข้าไปเพื่อที่จะมีหน้าที่ในการเสริมสมบัติพิเศษบางประการ ดังนั้น การพิจารณาเลือกใช้ลวดเชื่อมจะต้องตอบสนองหรือยังคงรักษาสมบัติพื้นฐานของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดนั้น ๆ ไว้ ซึ่งผู้ผลิตเองก็มักจะมีข้อแนะนำแก่ผู้เลือกใช้ลวดเชื่อมที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 7.28 ที่เป็นตัวอย่างคำแนะนำการเลือกลวดเชื่อมที่เหมาะสมกับโลหะหลักที่ต้องการเชื่อม ซึ่งโดยพื้นฐานการเลือกลวดเชื่อมจะเลือกลวดเชื่อมที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเดียวกัน เช่น กลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมซีรีย์ 300 ก็ต้องเลือกลวดเชื่อมกลุ่มที่ขึ้นต้นรหัส 3XX เป็นต้น ด้วยเหตุผลเพราะว่าพื้นฐานส่วนผสมหลักจะเหมือนกัน





(ก) ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดตรง ER 316L **(ข)** ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดม้วน ER 316L

รูปที่ 7.23 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมเหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน AWS

ที่มา : Lincoln Electric Blue Max, 2018

ตารางที่ 7.28 คำแนะนำในการเลือกใช้ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมชนิดเหล็กกล้าไร้สนิม

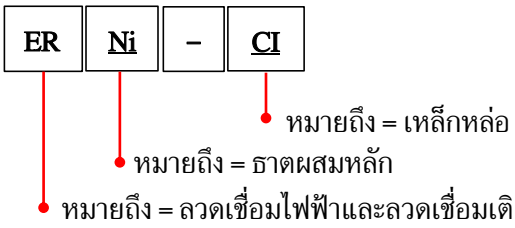
ที่มา : ThaiNox Stainless steel คู่มือเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมสเตนเลส, 2016

เกรดโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steels)	เกรดลวดเชื่อม (Filler electrode)
Austenitic stainless steel	
304/304L	308/308L
308	308
309/309S	308
310/310S	310
316/316L	316/316L
321/347	321/347/308
Ferritic stainless steel	
409/409L	430/409/409L/308L/309LSi
430	430/308L/309L
439	430/430Ti
Martensitic stainless steel	
403	410/309
410	410/309
414	410/309
420	410/309
Duplex stainless steel	
2205	2209

1.3) AWS A5.15/A5.15:R2016 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมของโลหะเหล็กหล่อ (Specification for Wire Electrodes and Rods for Cast Iron) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้

AWS A5.15/A5.15:R2016 หมายถึง ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมสำหรับเชื่อมโลหะเหล็กหล่อ

R2016 หมายถึง ปีที่กำหนดปรับปรุงมาตรฐาน 2016



ลวดเชื่อมเส้นตัน (Rod) สำหรับใช้เชื่อมโลหะเหล็กหล่อมีจำนวนที่ผลิตออกมาไม่มากชนิด เพราะโดยปกติแล้วเหล็กหล่อก็ไม่เป็นที่นิยมทำการเชื่อม จะมีไว้สำหรับงานเชื่อมซ่อมแซมเป็นสำคัญ โดยมีการผลิตออกมามีทั้งที่เป็นแบบเส้นลวดตรง (Filler rod) ที่ใช้กับการเชื่อมทิกหรือเชื่อมพลาสมา และเป็นแบบม้วน (Filler wire) ที่ใช้กับการเชื่อมมิก/แม็ก ดังแสดงเป็นตัวอย่างของลวดเชื่อม ERNi-CI ของทั้งสองแบบในรูปที่ 7.24 ส่วนผสมทางเคมีจะมีธาตุนิกเกิลเป็นตัวผสมหลัก ดังแสดงชนิดของลวดเชื่อมเหล็กหล่อและส่วนผสมทางเคมีในตารางที่ 7.29 และข้อแนะนำของผู้ผลิตในรูปที่ 7.25

ตารางที่ 7.29 ชนิดและส่วนผสมเคมีลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมชนิดเหล็กหล่อ มาตรฐาน AWS A5.15

ที่มา : AWS A5.15/A5.15, 2016

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)[a,b,c]									
	C	Si	Mn	P	S	Ni[d]	Fe	Cu[e]	Al	Total
ERNi-CI	1.0	0.75	2.5	-	0.03	90min	4.0	4.0	-	1.0
ERNiFeMn-CI	0.5	1.0	10-14	-	0.03	35-45	Rem	2.5	1.0	1.0

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.29

- a = การวิเคราะห์ธาตุในแกนลวดและเนื้อเชื่อม สำหรับธาตุอื่น ๆ จะรวมอยู่ในช่องรวม (Total)
- b = ค่าที่แสดงค่าเดียวเป็นค่าสูงสุด
- c = "Rem" หมายถึง ปริมาณที่เหลือจนครบ 100%
- d = ธาตุนิกเกิลรวมกับธาตุโคบอลต์
- e = ธาตุทองแดงรวมกับธาตุเงิน

การเลือกใช้ลวดเชื่อมเหล็กหล่อไปใช้งาน

ERNi-CI (นิกเกิล) เป็นลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของธาตุนิกเกิลสูงถึง 99% ไม่มีธาตุลดออกซิเจน ใช้ได้กับการเชื่อมเหล็กหล่อทุกชนิด เนื้อเชื่อมที่ได้จะผสมผสานเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกับโลหะที่เชื่อม ดังนั้นแนวเชื่อมจึงสามารถทำการตกแต่งด้วยเครื่องจักรได้

ERNiFeMn–CI (นิกเกิล–เหล็ก–แมงกานีส) เป็นลวดเชื่อมที่เหมาะกับการเชื่อมเหล็กหล่อที่มีความแข็งแรงสูง จำพวกเหล็กหล่อกราไฟต์กลม แนวเชื่อมไม่สามารถทำการตกแต่งด้วยเครื่องจักรได้





(ก) ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดตรง ERNi–CI **(ข)** ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดม้วน Nife 55

รูปที่ 7.24 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมเหล็กหล่อ มาตรฐาน AWS

ที่มา : Welding Materials Sales, 2019

GMAW and GTAW For Cast Iron

MC-Ni100M (MIG)
MC-Ni100R (TIG)

WELDING POSITIONS :

DESCRIPTION AND APPLICATIONS

High strength Fe-Ni Alloy for welding of cast iron and for joining cast iron to steel. Also suitable for welding ductile iron of which strength is required.

NOTES ON USAGE

1) For GTAW process, use DC-EN, Pure Argon.
2) For GMAW process, Spray Transfer or Short Circuit Transfer mode can be used.
3) Pure Argon, 98% Argon +2% O_2 and 80% Argon + 20% O_2.

WIRE ANALYSIS (Wt%)							
C	Si	Mn	P	Cu	Ni	Fe	Special Element
0.01	0.46	0.4	0.010	Max 0.2	99.2	0.2	Max 0.5

TYPICAL ALL WELD METAL MECHANICAL PROPERTIES •			
YIELD STRESS	TENSILE STRENGTH	ELONGATION	CVN IMPACT VALUES
-	600 N/mm^2	38%	-

• in “as welded” condition.

PRODUCT NAME	SIZE (mm)	PACKAGING (Kg)
MC-Ni100M (MIG)	1.2	12.5
MC-Ni100R (TIG)	1.6/2.4	5

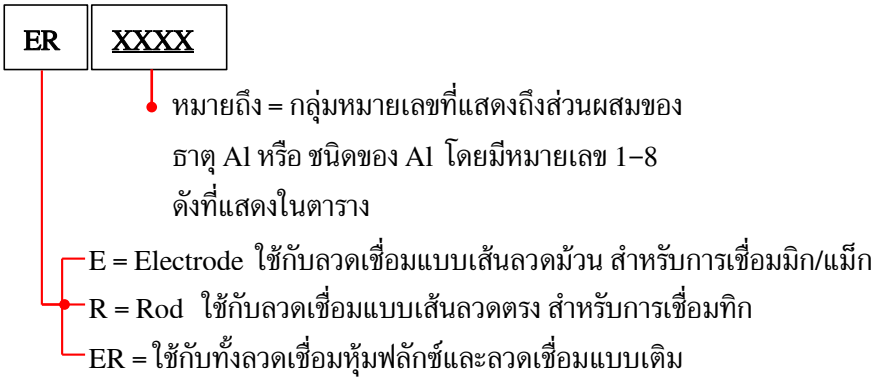
รูปที่ 7.25 ตัวอย่างข้อมูลแนะนำผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กหล่อ

ที่มา : HYUNDAI Welding Electrode, 2015

1.4) AWS A5.10/A5.10M:2017 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมของโลหะอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม (Welding Consumables−Wire Electrodes, Wires and Rods for Welding of Aluminum and Aluminum Alloy−Classification) ที่เป็นลวดเชื่อมเติมที่ใช้สำหรับขบวนการเชื่อมมิก/แม็ก ขบวนการเชื่อมทิก และขบวนการเชื่อมพลาสมา ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้

AWS A5.10/A5.10 หมายถึง ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมสำหรับเชื่อมโลหะอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม

R2017 หมายถึง ปีที่กำหนดปรับปรุงมาตรฐาน 2017



สัญลักษณ์	ธาตุที่ผสมหลัก
1xxx	อลูมิเนียมบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99%
2xxx	ทองแดง
3xxx	แมงกานีส
4xxx	ซิลิคอน
5xxx	แมกนีเซียม
6xxx	แมกนีเซียมและซิลิคอน
7xxx	สังกะสี
8xxx	ธาตุอื่น ๆ

ลวดเชื่อมโลหะอลูมิเนียมที่เป็นชนิดลวดเติม มีการใช้งานกันมากที่สามารถใช้เชื่อมได้ทั้งโลหะอลูมิเนียมบริสุทธิ์ และอลูมิเนียมผสม ผู้ผลิตจึงมีการผลิตลวดเชื่อมออกมาให้ตรงกับชนิดของอลูมิเนียมโลหะหลัก ดังแสดงในตารางที่ 7.30 จึงไม่ต้องยุ่งยากในการพิจารณาเลือกใช้ ซึ่งโดยหลักการเลือกลวดเชื่อมก็จะเลือกชนิดที่เป็นเกรดเดียวกัน จะทำให้ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมและเนื้อเชื่อมที่ได้เป็นเนื้อเดียวกันได้ดี เช่น อลูมิเนียมเกรด 1100 สามารถเลือกใช้ลวดเชื่อมได้ทั้ง ER1100 และ R1100 เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ช่างเชื่อมก็สามารถเลือกลวดเชื่อมที่เหมาะสมกับโลหะอลูมิเนียมในลักษณะงานที่ต้องการสมบัติพิเศษบางอย่างได้ และก็ยังมีข้อห้ามในการเลือกใช้ลวดเชื่อมบางเกรดกับโลหะอลูมิเนียมบางเกรด เช่น ไม่ควรใช้ลวดเชื่อม ER4043 กับงานอลูมิเนียมที่ต้องนำไปชุบอโนไดซ์ เพราะธาตุซิลิกอนจะทำให้สีบริเวณที่เป็นแนวเชื่อมเข้มกว่าบริเวณอื่นบนผิวของชิ้นงานอลูมิเนียม

ตารางที่ 7.30 ชนิดและส่วนผสมเคมีลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม

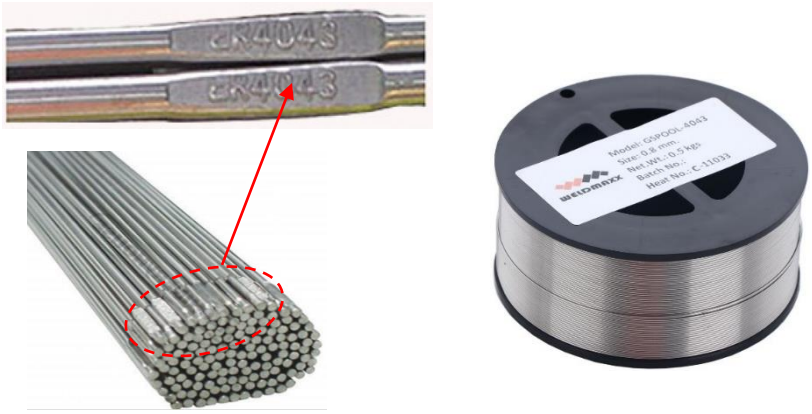
ที่มา : AWS A5.10/A5.10, 2017

ประเภทลวดเชื่อม[b]	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)[a,b]										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Each[d]	Total	Al
ER1100	c	c	0.05–0.2	0.05	–	–	0.1	–	0.5	0.15	99mim[e]
R1100	c	c	0.05–0.2	0.05	–	–	0.1	–	0.5	0.15	99min[e]
ER1188[f]	0.06	0.06	0.005	0.01	0.01	–	0.03	0.1	0.01	–	99.9min[e]
R1188[g]	0.06	0.06	0.005	0.01	0.01	–	0.03	0.1	0.01	–	99.9min[e]
ER2319[f]	0.02	0.3	5.8–6.8	0.2–0.4	0.02	–	0.10	0.1–0.2	0.5	0.15	Rema.
R2319[f]	0.02	0.3	5.8–6.8	0.2–0.4	0.02	–	0.10	0.1–0.2	0.5	0.15	Rema.
ER4009	4.5–5.5	0.02	1.0–1.5	0.1	0.45–0.6	–	0.10	0.2	0.5	0.15	Rema.
R4009	4.5–5.5	0.02	1.0–1.5	0.1	0.45–0.6	–	0.10	0.2	0.5	0.15	Rema.
ER4010	6.5–7.5	0.02	0.02	0.1	0.3–0.45	–	0.10	0.2	0.5	0.15	Rema.
R4010	6.5–7.5	0.02	0.02	0.1	0.3–0.45	–	0.10	0.2	0.5	0.15	Rema.
R4011	6.5–7.5	0.02	1.02	0.1	0.45–0.7	–	0.10	0.4–0.2	0.5	0.15	Rema.
ER4043	4.5–6.0	0.8	0.3	0.05	0.05	–	0.10	0.2	0.5	0.15	Rema.
R4043	4.5–6.0	0.8	0.3	0.05	0.05	–	0.10	0.2	0.5	0.15	Rema.
ER4047	1.0–13.0	0.8	0.3	0.15	0.1	–	0.20	–	0.5	0.15	Rema.
R4047	1.0–13.0	0.8	0.3	0.15	0.1	–	0.20	–	0.5	0.15	Rema.
ER4145	9.3–10.7	0.8	3.3–4.7	0.15	0.15	0.15	0.20	–	0.5	0.15	Rema.
R4145	9.3–10.7	0.8	3.3–4.7	0.15	0.15	0.15	0.20	–	0.5	0.15	Rema.
ER4643	3.6–4.6	0.8	0.1	0.05	0.1–0.3	–	0.10	0.15	0.5	0.15	Rema.
R4643	3.6–4.6	0.8	0.1	0.05	0.1–0.3	–	0.10	0.15	0.5	0.15	Rema.
ER5183	0.4	0.4	0.1	0.5–1.0	4.3–5.2	0.05–0.25	0.25	0.15	0.5	0.15	Rema.
R5183	0.4	0.4	0.1	0.5–1.0	4.3–5.2	0.05–0.25	0.25	0.06–0.2	0.5	0.15	Rema.
ER5356	0.25	0.4	0.1	0.05–0.2	4.5–5.5	0.05–0.2	0.10	0.06–0.2	0.5	0.15	Rema.
R5356	0..25	0.4	0.1	0.05–0.2	4.5–5.5	0.05–0.2	0.10	0.05–0.2	0.5	0.15	Rema.
ER5554	0.25	0.4	0.1	0.5–1.0	2.4–3.0	0.05–0.2	0.25	0.05–0.2	0.5	0.15	Rema.
R5554	0.25	0.4	0.1	0.5–1.0	2.4–3.0	0.05–0.2	0.25	0.05–0.2	0.5	0.15	Rema.
ER5556	0.25	0.4	0.1	0.5–1.0	4.7–5.5	0.05–0.2	0.25	0.05–0.2	0.5	0.15	Rema.
R5556	0.25	0.4	0.1	0.5–1.0	4.7–5.5	0.05–0.2	0.25	0.05–0.2	0.5	0.15	Rema.
ER5654	i	h	0.05	0.01	3.1–3.9	0.15–0.35	0.2	0.05–0.15	0.5	0.15	Rema.
R5654	i	h	0.05	0.01	3.1–3.9	0.15–0.35	0.2	0.05–0.15	0.5	0.15	Rema.

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.30

- a = โลหะผสมหลักที่กำหนดตามตาราง ส่วนผสมอื่น ๆ จะไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ตามตาราง
- b = ค่าที่แสดงค่าเดียวเป็นค่าสูงสุด ยกเว้นนอกจากกำหนดเป็นอย่างอื่น
- c = ปริมาณซิลิกอนรวมกับธาตุเหล็กต้องไม่เกิน 0.95%
- d = ธาตุแบริลเลียมต้องไม่เกิน0.0008%
- e = เป็นปริมาณอลูมิเนียมผสมสำหรับลวดเชื่อมอลูมิเนียมไม่ผสม
- f = วาเนเนียมผสมสูงสุด 0.05% แกลเลียมผสมสูงสุด 0.03%
- g = วาเนเดียมผสมอยู่ระหว่าง 0.05–0.15% และเซอร์โคเนียมผสมอยู่ 0.1–0.25%
- h = ซิลิกอนรวมกับเหล็กไม่เกิน 0.45%
- i = ดีบุกผสมไม่เกิน 0.05%

ลักษณะของลวดเชื่อมโลหะอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสมชนิดที่เป็นเส้นหรือแท่งตันจะมีรหัสหรือโค๊ดแสดงอยู่ที่ปลายของเส้นลวดดังแสดงในรูปที่ 7.26 (ก) ส่วนชนิดที่เป็นม้วนก็จะระบุไว้ที่ล้อม้วนลวดเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 7.26 (ข)



(ก) ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดตรง R4043 **(ข)** ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดม้วน ER4043

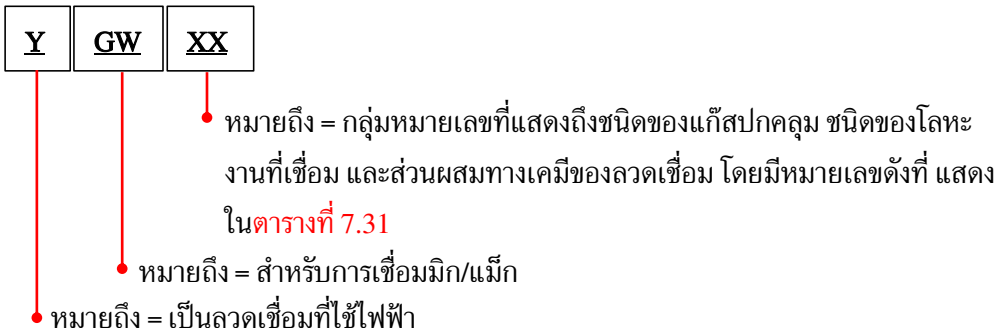
รูปที่ 7.26 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะอลูมิเนียมและอลุมิเนียมผสม

ที่มา : WELDMAXX Welding Electrode, 2018

2. ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมมาตรฐาน JIS (Japanese Industrial Standards)

ลวดเชื่อมสำหรับขบวนการเชื่อมที่ใช้แก๊สจากแหล่งภายนอกเข้ามาปกคลุมหรือที่นิยมเรียกกันว่าลวดเชื่อมเปลือยด้วยเพราะไม่มีฟลักซ์หุ้ม ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (JIS) ได้สร้างข้อกำหนดขึ้นเพื่อเป็นมาตฐานคุณภาพของงานเชื่อมและความเข้าใจที่ตรงกันในการสื่อสารทางภาษาวิศวกรรมการเชื่อม โดยมีรหัสหรือโค๊ดที่กำหนดไว้ดังนี้

2.1) JIS Z 3312 :2018 ข้อกำหนดมาตรฐานลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมของโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน (เหล็กกล้าละมุน) เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงและเหล็กกล้าสำหรับงานอุณหภูมิต่ำ ที่ใช้สำหรับขบวนการเชื่อมมิก/แม็ก (Solid wires for MAG and MIG welding of mild steel,high strength steel and low temperature service steel) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้



ข้อกำหนดตามมาตรฐาน JIS ก็ได้สร้างรหัสของตัวเลขและตัวอักษรเพื่อระบุถึงตัวตนของลวดเชื่อมแต่ละชนิด ซึ่งมีความหมายตามที่แสดงไว้ข้างต้น โดยชุดตัวเลขท้ายจะใช้ระบุถึงชนิดของแก๊สปกคลุม ชนิดของโลหะงานที่เชื่อม ดังแสดงในตารางที่ 7.31 และส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมดังแสดงในตารางที่ 7.32 ซึ่งมาตรฐานจะกำหนดไว้เป็นพื้นฐานของการเลือกชนิดของลวดเชื่อมให้เหมาะสมกับโลหะงานที่จะเชื่อม ที่รวมถึงการลือกใช้แก๊สปกคลุมที่ถูกต้อง แต่ในบางกรณีอาจมีเงื่อนไขของการเชื่อมที่ต้องการสมบัติพิเศษบางอย่างของเนื้อเชื่อม ซึ่งช่างเชื่อมหรือวิศวกรงานเชื่อมก็สามารถใช้ข้อกำหนดของมาตรฐานนี้เป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกใช้ลวดเชื่อมได้ หรือกรณีของแก๊สปกคลุมก็สามารถสร้างข้อตกลงจากผู้ผลิตให้ผลิตแก๊สปกคลุมชนิดพิเศษขึ้นได้ตามต้องการ

จากข้อกำหนดตามมาตรฐานลวดเชื่อมข้างต้นจะรองรับเฉพาะขบวนการเชื่อม MIG/MAG นั้นก็หมายถึงเป็นลวดเชื่อมแบบเส้นลวดม้วน (Filler wire) ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 7.27 และผู้ผลิตก็ยังมีข้อแนะนำถึงรายละเอียดด้านต่าง ๆ ของลวดเชื่อม เช่น การเทียบรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานต่าง ๆ ส่วงนผสมทางเคมี สมบัติทางกล กระแสไฟเชื่อม รวมถึงแก๊สปกคลุม ดังตัวอย่างลวดเชื่อมชนิดที่ใช้เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน (ละมุน) ความเค้นแรงดึง 490 N/mm^2 ลวดเชื่อม YGW11แสดงในรูปที่ 7.28

ตารางที่ 7.31 ชนิดลวดและการใช้งานของลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง สำหรับเชื่อมมิก/แม็ก ตามมาตรฐาน JIS Z 3312

ที่มา : JIS Z 3312:2018, 2018

ประเภทลวดเชื่อม	ชนิดแก๊สปกคลุม[a]	ชนิดของโลหะงานเชื่อม
YGW11 YGW12 YGW13 YGW14	คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ที่ระดับ 490 N/mm^2
YGW15 YGW16 YGW17	แก๊สผสมอาร์กอน 80% และคาร์บอนไดออกไซด์ 20% ($80Ar+20CO_2$)	เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ที่ระดับ 590 N/mm^2
YGW21 YGW22	คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ที่ระดับ 490 N/mm^2
YGW23 YGW24	แก๊สผสมอาร์กอน 80% และคาร์บอนไดออกไซด์ 20% ($80Ar+20CO_2$)	เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ที่ระดับ 590 N/mm^2

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.31

- a = กรณีที่มีการเลือกใช้แก๊สปกคลุมนอกไปจากนี้จะหมายถึงการตกลงกันของผู้ใช้และผู้ผลิต

Gas Metal Arc Welding

ZO-26

For mild steel and 490MPa tensil strength steel

Classifications

EN ISO 14341-A:2008	: G 46 2 C G0	AWS A5.18-05	: ER70S-G
	: G 46 2 M G0	KS D 7025	: YGW11
EN ISO 14341-B:2008	: G 49A 2 C G11	JIS Z 3312	: YGW11
	: G 49A 2 M G11		

Description

- For butt and fillet welding of ship-building, bridges, structural steel, steel buildings, machineries and vehicles
- Excellent defect resistant on high heat input
- Possible to acheive higher productivity due to low spatter and deep penetration
- Beautiful weld apperance on flat or horizontal welding position

Typical chemical composition of wire (%)

C	Si	Mn	P	S	Ti
0.06	0.80	1.53	0.014	0.010	0.18

Typical mechanical properties of all-weld metal

	Y.S (MPa)	T.S (MPa)	El. (%)	IV (J) -20℃	Remarks
AWS A5.18	min. 400	min. 480	min. 22		
EN ISO 14341-B	min. 390	490~670	min. 18	≥ 27	CO_2
Example	490	570	30	110	CO_2
	520	590	31	120	Mix

Operating data

Dia.(mm)		1.2	1.4
Current (Amp.)	Flat (PA/1G)	100 ~ 350	140 ~ 400
	Vertical (PF/3G)	70 ~ 200	100 ~ 250
	Overhead (PE/4G)	70 ~ 200	100 ~ 250

Polarity and Shielding gas

- DCEP (DC+)
- CO_2 : 100% CO_2
  Mix : Ar+20% CO_2 (15~25ℓ /min.)

Approvals

Shielding gas	ABS	BV	DNV	GL	LR	KR	NK
CO_2	3YSA	SA3YM	ⅢYMS	3YS	3YS H15	RSW53G	KSW53G

* Others : KS, JIS

160 KISWEL

รูปที่ 7.28 ข้อแนะนำลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน JIS Z 3312 ชนิด YGW11

ที่มา : KISWEL Welding Electrode, 2013

ตารางที่ 7.32 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง สำหรับเชื่อมมิก/แม็ก ตามมาตรฐาน JIS Z 3312

ที่มา : JIS Z 3312:2018, 2018

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)										
	C	Si	Mn	P	S	Cu[a]	Ni	Cr	Mo	Al	Ti+Zr
YGW11	0.15	0.55–1.10	1.4–1.9	0.03	0.03	0.5	–	–	–	0.1	0.3
YGW12	0.15	0.55–1.10	1.25–1.9	0.03	0.03	0.5	–	–	–	–	–
YGW13	0.15	0.55–1.10	1.3–1.9	0.03	0.03	0.5	–	–	–	0.1	0.3
YGW14	0.15	–	–	0.03	0.03	0.5	–	–	–	–	–
YGW15	0.15	0.40–1.00	1.0–1.6	0.03	0.03	0.5	–	–	–	0.1	0.3
YGW16	0.15	0.40–1.00	0.8–1.6	0.03	0.03	0.5	–	–	–	–	–
YGW17	0.15	–	–	0.03	0.03	0.5	–	–	–		–
YGW21	0.15	0.5–1.1	1.3–2.6	0.025	0.025	0.5	–	–	0.6	0.1	0.3
YGW22	0.15	–	–	0.025	0.025	0.5	–	–	–	–	–
YGW23	0.15	0.3–1.0	0.9–2.3	0.025	0.025	0.5	1.8	0.7	0.6	–	0.3
YGW24	0.15	–	–	0.025	0.025	0.5	–	–	–	–	–

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.32

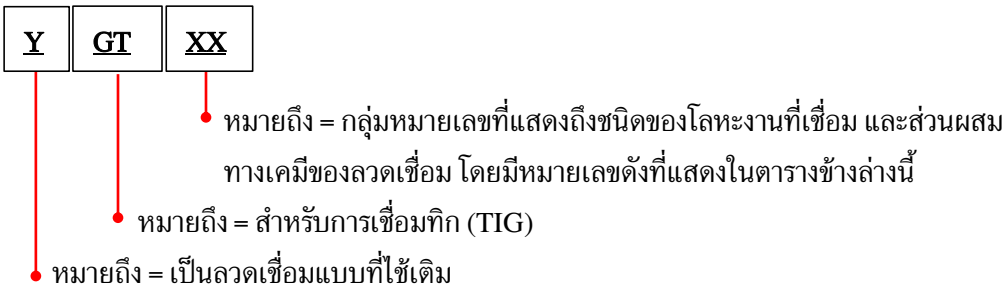
- a = โลหะทองแดงที่เคลือบลวดเชื่อมจะรวมอยู่ในปริมาณส่วนผสมนี้ด้วย



รูปที่ 7.27 ผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน JIS Z 3312 ชนิด YGW11

ที่มา : KISWEL Welding Electrode, 2013

2.2) JIS Z 3316:2017 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมของโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน (เหล็กกล้าละมุน) เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานอุณหภูมิต่ำ ที่ใช้สำหรับขบวนการเชื่อมทิก (Solid wires and rods for TIG welding of mild steel, high strength steel and low temperature service steel) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้



มาตรฐานลวดเชื่อม JIS Z 3316 นี้เป็นข้อกำหนดรหัสหรือโค๊ดที่ใช้ระบุถึงลวดเชื่อมแบบเส้นตันหรือแท่งตัน (Filler rod) ที่ใช้สำหรับขบวนการเชื่อม GTAW หรือ การเชื่อม TIG โดยกำหนดชุดตัวเลขท้ายเป็นตัวบ่งชี้ถึงชนิดของลวดเชื่อมที่เหมาะสมกับโลหะงานที่ต้องการเชื่อม ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7.33 และส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมแต่ละชนิด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7.34 โดยผู้ผลิตจะระบุรหัสหรือโค๊ดไว้ที่ปลายของเส้นลวดังแสดงตัวอย่างลักษณะรูปแบบของเส้นลวดในรูปที่ 7.29 พร้อมกับข้อนำแนะเพื่อการพิจารณาเลือกใช้ดังตัวอย่างลวดเชื่อม ชนิด YGT 50 ในรูปที่ 7.30

ตารางที่ 7.33 ชนิดและการใช้งานของลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง สำหรับเชื่อมทิก ตามมาตรฐาน JIS Z 3316

ที่มา : JIS Z 3316:2017, 2017

ประเภทลวดเชื่อม	ชนิดของโลหะงานเชื่อม
YGT 50	เหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน (เหล็กกล้าละมุน) และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง
YGT 60	
YGT 62	
YGT 70	
YGT 80	
YGT M	เหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าโมลิบดินัม และเหล็กกล้าโครเมียม–โมลิดินัม
YGT ML	
YGT 1 CM	
YGT 1 CML	
YGT 2 CM	
YGT 2 CML	
YGT 3 CM	
YGT 5 CM	

ตารางที่ 7.34 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงสำหรับเชื่อมทิก ตามมาตรฐาน JIS Z 3316

ที่มา : JIS Z 3316:2017, 2017

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)										
	C	Si	Mn	P	S	Cu[a]	Ni	Cr	Mo	Al	Ti+Zr
YGT 50	0.15	1.0	1.9	0.03	0.03	0.5	–	–	–	0.15	0.27
YGT 60	0.15	1.0	2.0	0.025	0.025	0.5	1.8	0.7	0.65	–	0.2
YGT 62	0.15	1.0	2.25	0.025	0.025	0.5	1.8	0.7	0.65	–	0.2
YGT 70	0.15	0.8	2.25	0.025	0.025	0.5	2.6	0.6	0.65	–	
YGT 80	0.15	0.8	2.25	0.025	0.025	0.5	3.8	0.6	0.9	–	
YGT M	0.05–0.15	0.8	2.0	0.025	0.025	0.4	–	–	0.4–0.65	–	
YGT ML	0.05–0.15	0.8	1.6	0.025	0.025	0.4	–	–	0.4–0.65	–	
YGT 1 CM	0.05–0.15	0.8	1.6	0.025	0.025	0.4	–	1–1.5	0.4–0.65	–	
YGT 1 CML	0.05	0.8	1.6	0.025	0.025	0.4	–	1–1.5	0.4–0.65	–	
YGT 2 CM	0.05–0.15	0.8	1.6	0.025	0.025	0.4	–	2–2.7	0.9–1.2	–	
YGT 2 CML	0.05	0.8	1.6	0.025	0.025	0.4	–	2–2.7	0.9–1.2	–	
YGT 3 CM	0.15	0.8	1.6	0.025	0.025	0.4	–	2.7–3.5	0.9–1.2	–	
YGT 5 CM	0.15	0.8	1.6	0.025	0.025	0.4	–	4–6	0.45–0.65	–	

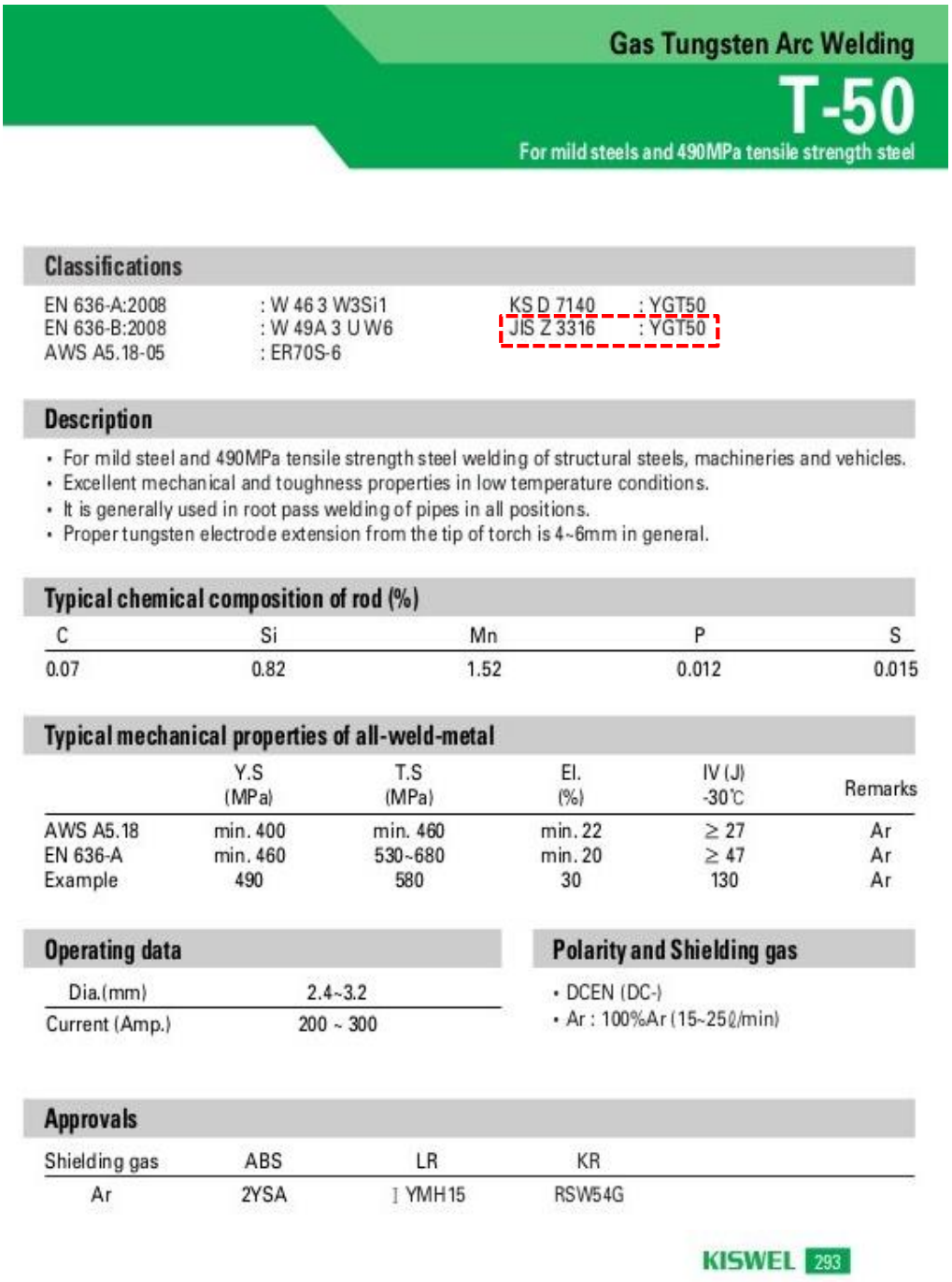
หมายเหตุ ของตารางที่ 7.34

- a = โลหะทองแดงที่เคลือบลวดเชื่อมจะรวมอยู่ในปริมาณส่วนผสมนี้ด้วย



รูปที่ 7.29 ข้อแนะนำลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน JIS Z 3316 ชนิด YGT50

ที่มา : KISWEL Welding Electrode, 2013



Gas Tungsten Arc Welding

T-50

For mild steels and 490MPa tensile strength steel

Classifications

EN 636-A:2008	: W 46 3 W3Si1	KS D 7140	: YGT50
EN 636-B:2008	: W 49A 3 U W6	JIS Z 3316	: YGT50
AWS A5.18-05	: ER70S-6		

Description

- For mild steel and 490MPa tensile strength steel welding of structural steels, machineries and vehicles.
- Excellent mechanical and toughness properties in low temperature conditions.
- It is generally used in root pass welding of pipes in all positions.
- Proper tungsten electrode extension from the tip of torch is 4~6mm in general.

Typical chemical composition of rod (%)

C	Si	Mn	P	S
0.07	0.82	1.52	0.012	0.015

Typical mechanical properties of all-weld-metal

	Y.S (MPa)	T.S (MPa)	El. (%)	IV (J) -30℃	Remarks
AWS A5.18	min. 400	min. 460	min. 22	≥ 27	Ar
EN 636-A	min. 460	530~680	min. 20	≥ 47	Ar
Example	490	580	30	130	Ar

Operating data

Dia.(mm)	2.4~3.2
Current (Amp.)	200 ~ 300

Polarity and Shielding gas

- DCEN (DC-)
- Ar : 100%Ar (15~25ℓ/min)

Approvals

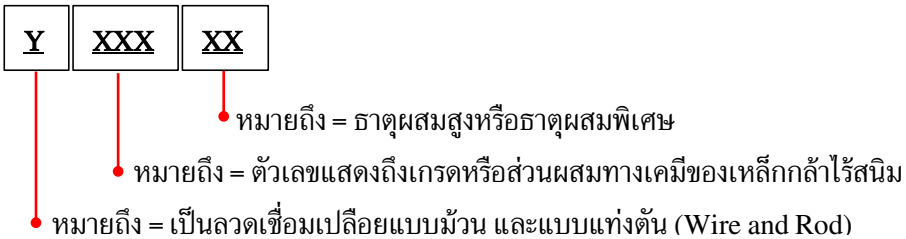
Shielding gas	ABS	LR	KR
Ar	2YSA	YMH15	RSW54G

KISWEL 293

รูปที่ 7.30 ข้อแนะนำลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน JIS Z 3316 ชนิด YGT50

ที่มา : KISWEL Welding Electrode, 2013

2.3) JIS Z 3321:2013 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมหรือลวดเชื่อมเปลือยของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel rods, wires and strip electrodes for welding) ที่ใช้เป็นลวดเชื่อมเติมสำหรับขบวนการเชื่อมทิก (GTAW) การเชื่อมมิก (GMAW) และการเชื่อมพลาสมา (PAW) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้



มาตรฐานลวดเชื่อมเปลือยของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน JIS 3321 ได้มีข้อกำหนดให้สามารถใช้ได้กับลวดเชื่อมทั้งแบบชนิดที่เป็นเส้นแท่งตัน (Rod) เส้นลวดม้วนตัน (Wire) และแบบแผ่นสติป ดังแสดงในรูปที่ 7.31ซึ่งแสดงเป็นตัวอย่างลวดเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดรหัสหรือโค๊ด Y 308 โดยมีอีกหลายชนิดพร้อมกับแสดงส่วนผสมทางเคมีของลวดชื่อมในตารางที่ 7.35 เป็นที่น่าสังเกตว่ามาตรฐาน JIS มีการกำหนดรหัสด้วยสี (Colour) บนลวดเชื่อม เช่น Y 312 กำหนดเป็นสีเขียว เป็นต้น ที่ซึ่งแตกต่างจากมาตรฐานอื่น ๆ และสีอื่น ๆ ตามชนิดของลวดเชื่อมดังแสดงในตารางที่ 7.35



(ก) ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดตรง Y308 **(ข)** ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดม้วน Y 308



(ค) ลวดเชื่อมแบบแผ่นสติป Y 308

รูปที่ 7.31 ตัวอย่างลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม JIS Z 3321 ชนิด Y 308

ที่มา : UNIMIG Welding Supplies, 2012

ตารางที่ 7.35 ชนิดและส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม ตามมาตรฐาน JIS Z 3321:2013 *ที่มา : JIS Z 3321:2013, 2013*

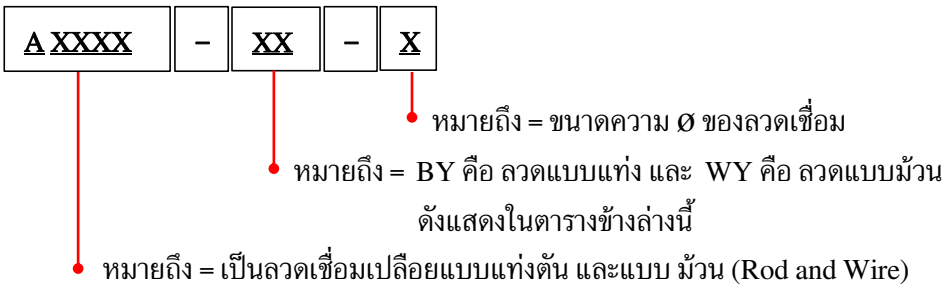
ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)[a]									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	อื่น ๆ	รหัสสี
Y 308[b]	0.08	0.65	1–2.5	0.03	0.03	9–11	19.5–22	–	–	เหลือง
Y 308 L[b]	0.03	0.65	1–2.5	0.03	0.03	9–11	19.5–22	–	–	แดง
Y 309[b]	0.12	0.65	1–2.5	0.03	0.03	12–14	23–25	–	–	ดำ
Y 309 L	0.03	0.65	1–2.5	0.03	0.03	12–14	23–25	–	–	เขียวอ่อน
Y 309 Mo	0.12	0.65	1–2.5	0.03	0.03	12–14	23–25	2–3	–	เงิน
Y 310	0.15	0.65	1–2.5	0.03	0.03	20–22.5	25–28	–	–	ทอง
Y 310 S	0.08	0.65	1–2.5	0.03	0.03	20–22.5	25–28	–	–	ชมพู
Y 312	0.15	0.65	1–2.5	0.03	0.03	8–10.5	28–32	–	–	เขียว
Y 16–8–2	0.1	0.65	1–2.5	0.03	0.03	7.5–9.5	14.5–16.5	1–2	–	ขาว
Y 316[b]	0.08	0.65	1–2.5	0.03	0.03	11–14	18.–20	2–3	–	ขาว
Y 316 L[b]	0.08	0.65	1–2.5	0.03	0.03	11–14	18–20	2–3	–	เขียว
Y 316 JIL	0.08	0.65	1–2.5	0.03	0.03	11–14	18–20	2–3	Cu 1–2.5	เทา
Y 317	0.08	0.65	1–2.5	0.03	0.03	13–15	18–20.5	3–4	–	น้ำตาลเข้ม
Y 317 L	0.03	0.65	1–2.5	0.03	0.03	13–15	18–20.5	3–4	–	น้ำตาลเข้ม
Y 321	0.08	0.65	1–2.5	0.03	0.03	9–10.5	18–20.5	–	Ti 9xC to 1.0	เขียวอ่อน
Y 347[b]	0.08	0.65	1–2.5	0.03	0.03	9–11	19–21.5	–	Nb 10xC to 1.0	น้ำเงิน
Y 347 L	0.03	0.65	1–2.5	0.03	0.03	9–11	19–21.5	–	Nb 10xC to 1.0	น้ำเงิน
Y 410	0.12	0.5	0.6	0.03	0.03	0.6	11.5–13.5	0.75	–	ม่วง
Y 430	0.1	0.5	0.6	0.03	0.03	0.6	13.5–17	–	–	น้ำตาลอ่อน

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.35

- a = ค่าที่แสดงค่าเดียว เป็นค่าที่สูงสุด
- b = ลวดเชื่อมที่สามารถใช้เป็นมาตรฐานซิลิกอนสูงได้ โดยซิลิกอนผสมได้สูงถึง 0.65–1.00%

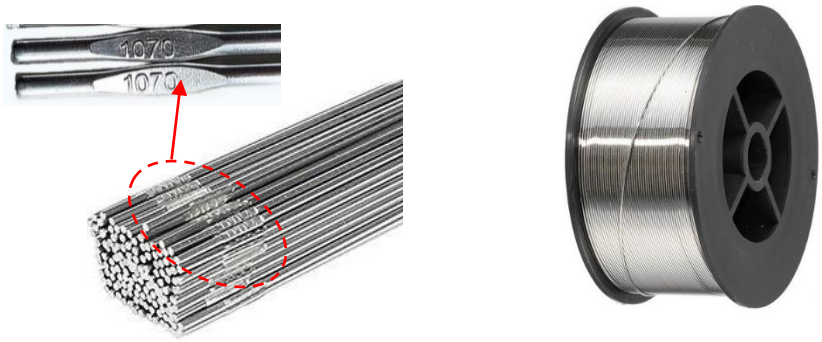
สำหรับลวดเชื่อมแบบแผ่นสติป (Strip electrode) จะผลิตออกมาใช้งานไม่มากชนิดเนื่องจากเป็นลวดเชื่อมที่ใช้กับขบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (SAW) ขบวนการเชื่อมอิเลคโทรสแลก (ESW) และขบวนการเชื่อมแบบไฮบริด (Hybrid) ซึ่งเหมาะกับงานขนาดใหญ่ต้องการเนื้อเชื่อม จะไม่ค่อยได้พบเห็นการใช้ลวดเชื่อมแบบแผ่นสติปกับงานเชื่อมทั่ว ๆ ไป โดยจะมีทั้งประเภทเหล็กกล้าไร้สนิม (Strip electrode stainless steel) และ เหล็กล้าผสมนิกเกิลสูง (Strip electrode nickel base alloys)

2.4) JIS Z 3232:2019 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมหรือลวดเชื่อมเปลือยของโลหะอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม (Aluminium and aluminium alloy welding rods and wires) ที่ใช้เป็นลวดเชื่อมเติมสำหรับขบวนการเชื่อมทิก (GTAW) การเชื่อมมิก (GMAW) และการเชื่อมพลาสมา (PAW) ซึ่งรองรับทั้งขบวนการเชื่อมด้วยมือช่างเชื่อมและขบวนการเชื่อมแบบอัตโนมัติและกึ่งอัตโนมัติ ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมที่มีส่วนที่ต่างกันระหว่าง ลวดเชื่อมแบบแท่งตัน (Rod/Bar electrode) ที่ระบุถึง ชนิดของลวดเชื่อม และขนาดความโตของแท่งลวดเชื่อม ลวดเชื่อมแบบแท่งนี้จะมีรหัสหรือโค๊ดสีเพิ่มเติมที่ใช้บอกชนิดของลวดเชื่อมแท่งตันดังแสดงในตารางข้างล่าง ส่วนลวดเชื่อมแบบเส้นม้วน (Wire electrode) จะระบุถึง ชนิดของลวดเชื่อม ขนาดความโตของเส้นลวดเชื่อม และน้ำหนักของลวดเชื่อม ลวดเชื่อมแบบม้วนจะไม่รหัสหรือโค๊ดสี



ลวดเชื่อมแบบแท่งตัน (Filler rod)		ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดม้วน (Filler wire)
A 1070–BY	(สีที่ปลายลวด = ดำ)	A 1070–WY
A 1100–BY	(สีที่ปลายลวด = แดง)	A 1100–WY
A 1200–BY	(สีที่ปลายลวด = น้ำตาล)	A 1200–WY
A 2319–BY	(สีที่ปลายลวด = ม่วง)	A 2319–WY
A 4043–BY	(สีที่ปลายลวด = ส้ม)	A 4043–WY
A 4047–BY	(สีที่ปลายลวด = ขาว)	A 4047–WY
A 5554–BY	(สีที่ปลายลวด = เหลือง)	A 5554–WY
A 5654–BY	(สีที่ปลายลวด = ชมพู)	A 5654–WY
A 5356–BY	(สีที่ปลายลวด = เหลืองเขียว)	A 5356–WY
A 5556–BY	(สีที่ปลายลวด = เขียว)	A 5556–WY
A 5183–BY	(สีที่ปลายลวด = น้ำเงิน)	A 5183–WY

ตัวอย่างเช่น รหัสลวดเชื่อม A 1070 BY–3.2 หมายถึง ลวดเชื่อมอลูมิเนียมบริสุทธิ์แบบแท่งตันขนาดเส้น Ø 3.2 มิลลิเมตร ดังแสดงลักษณะของลวดเชื่อมในรูปที่ 7.32 (ก) และตัวอย่างเช่น รหัสลวดเชื่อม A 4047 WY–2.4 หมายถึง ลวดเชื่อมอลูมิเนียมซิลิกอนที่เป็นแบบม้วน มีขนาดเส้น Ø 3.2 มิลลิเมตร ขนาดน้ำหนัก 1 กก. (2.5ปอนด์) ในรูปที่ 7.32 (ข) พร้อมสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมดังแสดงในตารางที่ 7.36



(ก) ลวดเชื่อมแท่งตัน A 1070 BY–3.2 **(ข)** ลวดเชื่อมเส้นม้วน A 4047 WY–2.4

รูปที่ 7.32 ตัวอย่างลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม JIS Z 3232

ที่มา : HARRIS Welding Supplies, 2012

ตารางที่ 7.36 สมบัติทางกลลวดเชื่อมแก๊สปกคลุมโลหะอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม ตาม มาตรฐาน JIS Z 3232:2019 *ที่มา : JIS Z 3232:2019, 2019*

ประเภทลวดเชื่อมชนิดแบบแท่งและแบบม้วน	สัญลักษณ์และชั้นการทดสอบโลหะงาน	ความแข็งแงดึงของนื้อเชื่อม kfg/mm^2 (N/mm^2)
A 1070–BY A 1070–WY	A 1070 P–O	5.5 (54)
A 1100–BY A 1100–WY	A 1100 P–O	7.5 (74)
A 1200–BY A 1200–WY	A 1200 P–O	7.5 (74)
A 2319–BY A 2319–WY	A 2014 P–O	25 (74)
A 4043–BY A 4043–WY	A 6061 P–O	17 (167)
A 4047–BY A 4047–WY	A 6061 P–O	17[b] (167)
A 5554–BY A 5554–WY	A 5454 P– O	22 (216)
A 5654–BY A 5654–WY	A 5254 P–O	21 (206)
A 5356–BY A 5356–WY	A 5083 P–O	27 (265)
A 5556–BY A 5556–WY	A 5083 P–O	28 (275)
A 5183–BY A 5183–WY	A 5083 P–O	28 (275)

7.3 มาตรฐานของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Standards code flux cored electrode)

ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ หรือเรียกอีกอย่างลวดเชื่อมแกนฟลักซ์ ซึ่งก็หมายถึง ลวดเชื่อมโลหะที่เป็นเส้นท่อกลวงแล้วบรรจุหรืออัดผงฟลักซ์ไว้ภายในท่อที่เรียกกันว่า “Flux cored” ลวดเชื่อมประเภทนี้อาจจะยังมีการใช้งานกันไม่แพร่หลาย ด้วยเพราะเป็นลวดเชื่อมที่พัฒนาขึ้น โดยเป็นการนำเอาข้อดีของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Cover electrode) กับลวดเชื่อมมิก (Filler electrode) มารวมกัน ซึ่งช่วยทำให้แนวเชื่อมมีความสมบูรณ์สวยงาม เพราะมีผงฟลักซ์อยู่ในท่อลวดทำหน้าที่ปกคลุมแนวเชื่อมได้ดี ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์นี้มีทั้งชนิดที่ไม่ต้องแก๊สปกคลุมจากถังภายนอก ที่เรียกกันว่า “Self Shielding Flux Core Wire” หรือ “Inner Shielding Flux Core Wire” และชนิดที่ต้องใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) หรือ ผสมกับแก๊สอาร์กอน CO_2 + Ar) ปกคลุมขณะเชื่อม ที่เรียกนิยมกันว่า “Gas Shielding Flux Cored Wire” หรือ“Outer Shielding Flux Cored Wire” ลวดเชื่อมแบบไส้ฟลักซ์นี้สามารถใช้กับขบวนการเชื่อม MIG/MAG ซึ่งเหมาะกับงานเชื่อมที่ต้องการคุณภาพของแนวเชื่อมที่สูง ดังแสดงตัวอย่างของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ในรูปที่ 7.33 ที่ผลิตออกมาจำหน่ายและใช้งานกัน มีหลายมาตรฐานที่รู้จักกันดี ได้แก่ มาตรฐาน AWS (มาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา) มาตรฐาน JIS (มาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น) มาตรฐาน EN ISO (มาตรฐานของกลุ่มประเทศยุโรป) ดังที่จะได้กล่าวในมาตรฐานต่าง ๆ และในแต่ละชนิดของโลหะลวดเชื่อม ดังต่อไปนี้



ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดเหล็กกล้าคาร์บอน ลวดเหล็กหล่อ

รูปที่ 7.33 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux cord wire)

ที่มา : NICETECH Welding electrode, 2014 และ Clarke Weld International, 2015

1. ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์มาตรฐาน AWS (Flux cord wire of American Welding Society)

ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์หรือแกนฟลักซ์ตามมาตรฐานของสมาคมการเชื่อมแห่งสหรัฐอเมริกา (AWS) ได้สร้างข้อกำหนดและรหัสหรือโค๊ดขึ้นเพื่อเป็นมาตฐานและความเข้าใจที่ตรงกันในการสื่อสารทางภาษาวิศวกรรมการเชื่อม มาตรฐาน AWS นี้เป็นที่ยอมรับกันทั่วโลก โดยเฉพาะประเทศไทยที่ใช้มาตรฐานนี้กันมาก โดยมีรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานที่กำหนดไว้แยกตามชนิดของโลหะเชื่อม เช่น ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้า เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กหล่อ และโลหะอลูมิเนียม ดังจะได้กล่าวต่อไปนี้

1.1) AWS A5.20/A5.20 M:2005 (R2015) ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์แก๊สปกคลุมของโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน (Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้

AWS A5.20/A5.20 หมายถึง ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน

M:2005(R2015) หมายถึง เป็นมาตรฐานของปี 2005 ปรับปรุงขึ้นใหม่ปี 2015



การแบ่งประเภทของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับลวดเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐาน AWS จะแบ่งได้เป็นชนิดต่าง ๆ ตามเงื่อนไขของท่าเชื่อม เงื่อนไขความสามารถในการใช้งาน รวมถึงการใช้หรือไม่ใช้แก๊สปกคลุม และสภาพการต่อขั้วเชื่อมกระแสไฟ ดังแสดงในตารางที่ 7.37 ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์จะไม่มีการกำหนดส่วนผสมทางเคมีของลวดที่จะเชื่อม ด้วยเพราะส่วนผสมทางเคมีที่จะได้ในเนื้อเชื่อมนั้นมาจากการผสมธาตุ ๆ ผสมไปกับผงฟลักซ์ที่บรรจุอยู่ภายในท่อลวดเชื่อม ซึ่งธาตุที่ผสมแต่ละตัวก็จะมีจุดประสงค์ที่แตกต่างกันไป ดังแสดงชนิดของธาตุที่ผสมพร้อมกับบทบาทหน้าที่ในตารางที่ 7.38 นอกจากนี้มาตรฐานยังระบุถึงสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ชนิดต่าง ๆ ทั้งความเค้นแรงดึง ความสามารถในการยืดตัว และความสามารถในการดูดซับแรงกระแทก ดังแสดงอยู่ในตารางที่ 7.39

ตารางที่ 7.37 ชนิดของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอน มาตรฐาน AWS A 5.20:2005

ที่มา : AWS A5.20/A5.20:2005(R2015), 2015

ตัวกำหนดใช้งาน	ประเภทลวดเชื่อม	ท่าเชื่อม[a,b]	แก๊สปกคลุม[c]	ขั้วเชื่อม[d]	การใช้งาน
1	E70T-1C	H,F	CO_2	DCEP	M
	E70T-1M	H,F	CO_2+75-80%Ar		M
	E71T-1C	H,F,VU,OH	CO_2		M
	E71T-1M	H,F,VU,OH	CO_2+75-80%Ar		M
2	E70T-2C	H,F	CO_2	DCEP	S
	E70T-2M	H,F	CO_2+75-80%Ar		S
	E71T-2C	H,F,VU,OH	CO_2		S
	E71T-2M	H,F,VU,OH	CO_2+75-80%Ar		S
3	E70T-3	H,F	None	DCEP	S
4	E70T-4	H,F	None	DCEP	M
5	E70T-5C	H,F	CO_2	DCEP	M
	E70T-5M	H,F	CO_2+75-80%Ar		M
	E71T-5C	H,F,VU,OH	CO_2	DCEP	M
	E71T-5M	H,F,VU,OH	CO_2+75-80%Ar	or DCEN	M
6	E70T-6	H,F	None	DCEP	M
7	E70T-7	H,F	None	DCEN	M
	E71T-7	H,F,VU,OH	None	DCEN	M
8	E70T-8	H,F	None	DCEN	M
	E71T-8	H,F,VU,OH	None	DCEN	M
9	E70T-9C	H,F	CO_2	DCEP	M
	E70T-9M	H,F	CO_2+75-80%Ar		M
	E71T-9C	H,F,VU,OH	CO_2		M
	E71T-9M	H,F,VU,OH	CO_2+75-80%Ar		M
10	E70T-10	H,F	None	DCEN	S
11	E70T-11	H,F	None	DCEN	M
	E71T-11	H,F,VU,OH	None	DCEN	M
12	E70T-12C	H,F	CO_2	DCEP	M
	E70T-12M	H,F	CO_2+75-80%Ar		M
	E71T-12C	H,F,VU,OH	CO_2		M
	E71T-12M	H,F,VU,OH	CO_2+75-80%Ar		M
13	E61T-13	H,F,VU,OH	None	DCEN	S
	E71T-13	H,F,VU,OH	None	DCEN	S
14	E71T-14	H,F,VU,OH	None	DCEN	S
G	E60T-G	H,F	Not Specified	Not Specified	M
	E70T-G	H,F	Not Specified	Not Specified	M
	E61T-G	H,F,VD,VU,OH	Not Specified	Not Specified	M
	E71T-G	H,F,VD,VU,OH	Not Specified	Not Specified	M
	E60T-GS	H,F	Not Specified	Not Specified	S
	E70T-GS	H,F	Not Specified	Not Specified	S
	E61T-GS	H,F,VD,VU,OH	Not Specified	Not Specified	S
	E71T-GS	H,F,VD,VU,OH	Not Specified	Not Specified	S

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.37

- a = ตำแหน่งท่าเชื่อม H คือ ท่าแนวนอน F คือ ท่าราบ OH คือ ท่าเหนือศรีษะ VU คือ ท่าตั้งเชื่อมขึ้น VD คือ ท่าตั้งเชื่อมลง
- b = ขนาดลวดเชื่อมที่เหมาะนอกเหนือจากท่าเชื่อมที่กำหนด จะเหมาะกับขนาดลวดเชื่อมที่เล็กกว่า 2.4 มม.
- c = สมบัติของเนื้อเชื่อมจากลวดที่ใช้แก๊สภายนอกจะแตกต่างกันกับลวดเชื่อมที่ใช้แก๊สภายในตัวลวดเอง
- d = DCEP คือ กระแสไฟตรงลวดเชื่อมต่อขั้วบวก DCEN คือ กระแสไฟตรงลวดเชื่อมต่อขั้วลบ
- e = "M" หมายถึง ใช้เชื่อมได้ทั้งแนวเดียวและแนวข้อน "S" หมายถึง ใช้เชื่อมได้แนวเดียวเท่านั้น

ตารางที่ 7.38 ธาตุต่าง ๆ ที่ผสมอยู่ในผงฟลักซ์เพื่อบรรจุภายในลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

ที่มา : LINCOLN Electric : Cored Wires Overview, 2013

ธาตุที่ผสม	สภาพที่ใช้งาน	จุดประสงค์การใช้ในการเชื่อม
อลูมิเนียม (Al)	ลักษณะเป็นผงโลหะ (Power)	เป็นตัว Deoxidize และ Denitrify
แคลเซียม (Ca)	กลุ่มแร่ เช่น Fluorspar (Caf_2) และ Limestone ($CaCo_3$)	ช่วยให้เกิดแก๊สปกคลุม และฟอร์มตัวเป็นสแลก
คาร์บอน (C)	เป็นธาตุผสมหรือทำเป็นผงโลหะ เช่น Ferromanganese	ช่วยให้เกิดความแข็งและความแข็งแรงสูงขึ้น
โครเมียม (Cr)	เป็นธาตุผสมหรือทำเป็นผงโลหะ (Metal power)	ช่วยให้เกิดความต้านทานการคืบตัว และเพิ่มความแข็งแรง พร้อมกับความต้านทานการกัดกร่อน
เหล็ก (Fe)	เป็นธาตุผสม (Ferroalloys) และ เป็นผงเหล็ก (Iron powder)	เป็นตัวเสริมให้เกิดอัตราการเพิ่มเนื้อเชื่อม โดยผสมกับนิกเกิลหรือโลหะนอกกลุ่มเหล็ก
แมงกานีส (Mn)	เป็นธาตุผสม เช่น Ferromanganese หรือ เป็นผงโลหะ	เป็นตัว Deoxidize ช่วยป้องกันการแตกร้อน (Hot crack) ผสมกับซัลเฟอร์ฟอร์มตัวเป็นสแลก
โมลิบดินัม (Mo)	เป็นธาตุผสม (Ferroalloy)	ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก เพื่อเพิ่มค่าความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) และยังให้ค่าความแข็งและความแข็งแรงที่สูงขึ้น
นิกเกิล (Ni)	เป็นผงโลหะ (Metal power)	เป็นโลหะผสมช่วยเพิ่มความแข็ง ความแข็งแรง ความเหนียว และทนทานการกัดกร่อน
โพแทสเซียม (K)	เป็นแร่ธาตุชนิดหนึ่งสีขาวร่วมเป็นฐานอยู่ใน Feldspars และ Silicates	ช่วยให้เกิดการอาร์กที่เสถียร และฟอร์มตัวเป็นสแลกได้ดี
ซิลิกอน (Si)	เป็นธาตุผสม เช่น Ferrosilicon หรือ Silicomangnes เป็นแร่ Silicates เช่น Feldspar	เป็นตัว Deoxidize และฟอร์มตัวเป็นสแลกได้ดี
โซเดียม (Na)	เป็นแร่ เช่น โซเดียม ร่วมเป็นฐานอยู่ใน Feldspars และ Silicate	ช่วยให้เกิดการอาร์กที่เสถียร และฟอร์มตัวเป็นสแลกได้ดี
ไทเทเนียม (Ti)	เป็นธาตผสม เช่น Ferrotitanium รวมตัวอยู่ในแร่ที่เรียกว่า Rutile	เป็นตัว Deoxidize และตัว Denitrify ฟอร์มตัวเป็นสแลก และช่วยให้คาร์บอนเสถียรในเหล็กกล้าไร้สนิมบางชนิด
เซอร์โคเนียม (Zr)	เป็น Oxide หรือเป็นผงโลหะ	เป็นตัว Deoxidize และตัว Denitrify ฟอร์มตัวเป็นสแลก
วาเนเดียม (V)	เป็น Oxide หรือเป็นผงโลหะ	ช่วยให้เกิดความแข็งแรงที่เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 7.39 สมบัติทางกลลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอน มาตรฐาน AWS A 5.20:2005

ที่มา : AWS A5.20/A5.20:2005(R2015), 2015

ประเภทลวดเชื่อม	ความเค้นแรงดึง (ksi)	ความเค้นครากต่ำสุด[a] (ksi)	การยืดตัวต่ำสุด[b] (%)	ต้านทานแรงกระแทก (V –notch)
E7XT–1C,–1M	70–95	58	22	20ft.lbf at 0°F
E7XT –2C[c],–2M[c]	70 min	Not Specified	Not Specified	Not Specified
E7XT–3	70 min	Not Specified	Not Specified	Not Specified
E7XT–4	70–95	58	22	Not Specified
E7XT–5C,–5M	70–95	58	22	20ft.lbf at 20°F
E7XT–6	70–95	58	22	20ft.lbf at 20°F
E7XT–7	70–95	58	22	Not Specified
E7XT–8	70–95	58	22	20ft.lbf at 20°F
E7XT–9C,–9M	70–95	58	22	20ft.lbf at 20°F
E7XT10[c]	70 min	Not Specified	Not Specified	Not Specified
E7XT11	70–95	58	20	Not Specified
E7XT12C,–12M	70–90	58	22	20ft.lbf at 20°F
E6XT–13[c]	60 min	Not Specified	Not Specified	Not Specified
E7XT–13[c]	70 min	Not Specified	Not Specified	Not Specified
E7XT–14[c]	70 min	Not Specified	Not Specified	Not Specified
E6XT–G	60–80	48	22	Not Specified
E7XT–G	70–95	58	22	Not Specified
E6XT–GS[c]	60 min	Not Specified	Not Specified	Not Specified
E7XT–Gs[c]	70 min	Not Specified	Not Specified	Not Specified

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.39

- a = ค่า Yield strength at 0.2% offset
- b = เป็นการทดสอบดึงชิ้นงานตามมาตรฐาน AWS B4.0
- c = ใช้สำหรับการเชื่อมแนวเดียวและการทดสอบความเค้นแรงดึงเท่านั้น

ข้อกำหนดตามมาตรฐาน AWS A5.20:2005 ของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์มีรายละเอียดที่มากกว่าที่กล่าวมาข้างต้น ด้วยเพราะบทบาทของผงฟลักซ์ที่บรรจุอยู่ภายในเป็นตัวกำหนดสมบัติของเนื้อเชื่อม และยังมีความแตกต่างของแต่ละผู้ผลิตลวดเชื่อม ดังนั้นผู้ที่ต้องการใช้งานลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์จะต้องทำความเข้าใจเพิ่มเติมถึงมาตรฐานและข้อแนะนำจากผู้ผลิตเป็นสำคัญ ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ปัจจุบันมีการผลิตออกมาใช้งานกันหลากหลาย ดังแสดงเป็นตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อม ชนิด E71T –GS (เหมะสำหรับใช้เชื่อมแนวเดียว) และ ชนิด E71T–11(เหมาะสำหรับใช้เชื่อมซ้อนแนว) ในรูปที่ 7.34 ซึ่งโดยปกติก็จะมีหลายขนาดของลวดให้เลือกใช้



ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ E17T−GS
ที่มา : VULCAN Consumables, 2017



ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ E17T−11
ที่มา : ONGEVITY Welder, 2016

รูปที่ 7.34 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ตามรหัสมาตรฐาน AWS A5.20:2005

1.2) AWS A5.22/A5.22 M:2012 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมที่รองรับกับขบวนการเชื่อม FCAW และ GTAW และ PAW (Specification for Stainless Steel Flux Cored and Metal Cored Welding Electrodes and Rods) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้

AWS A5.22/A5.22 หมายถึง ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม

M:2012 หมายถึง เป็นมาตรฐานที่เผยแพร่ปี 2012

E	XXX	T	X	−	X

- X หมายถึง = ระบุการใช้แก๊สจากภายนอกปกคลุม ดังแสดงในตารางข้างล่างนี้
- X หมายถึง = ตำแหน่งท่าเชื่อม เลข 0 คือ ท่าราบและท่าระดับ เลข 1 คือ ทุกท่าเชื่อม
- T หมายถึง = ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์
- XXX หมายถึง = ระบุส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมที่จะได้
- E หมายถึง = ลวดเชื่อม (E = ลวดม้วนสำหรับ FCAW, R = ลวดเส้นตรงสำหรับ GTAW)

ประเภทลวดเชื่อม	แก๊สปกคลุมภายนอก	สภาพขั้วเชื่อม	ขบวนการเชื่อม
EXXXTX−1	CO_2	DCEP	FCAW
EXXXTX−3	None (Self shielding)	DCEP	FCAW
EXXXTX−4	CO_2 + 75−80% Ar	DCEP	FCAW
EXXXTX−G	Not specified	Not specified	FCAW
RXXXT1−5	100% Ar	DCEN	GTAW
EXXXTX−G	Not specified	Not specified	FCAW
RXXXT1−G	Not specified	Not specified	GTAW

ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับใช้เชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน AWS A5.22:M2012 ได้สร้างข้อกำหนดเป็นรหัสหรือโค๊ดขึ้นโดยอาศัยองค์ประกอบร่วมกันของ แก๊สปกคลุม ท่าเชื่อม และส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงการแบ่งชนิดของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐานในตารางที่ 7.40 และสมบัติทางกลด้านการทดสอบแรงดึงดังแสดงในตารางที่ 7.41

ตารางที่ 7.40 ชนิดของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน AWS A 5.22:2005

ที่มา : AWS A5.22/A5.22:M2012, 2012

ส่วนผสมทางเคมี (wt%)[a,b]											
ประเภทลวดเชื่อม[c]	C	Cr	Ni	Mo	Cb(Nb) +Ta	Mn	Si	P	S	N	Cu
E307TX-X	0.13	18.0-20.5	9.0-10.5	0.5-1.5	-	3.30-4.75	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308TX-X	0.08	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308LTX-X	0.04	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308HTX-X	0.08	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308MoTX-X	0.08	18.0-21.0	9.0-11.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308LMoTX-X	0.04	18.0-21.0	9.0-12.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E309TX-X	0.10	22.0-25.0	12.0-14.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E309LCbTX-X	0.04	22.0-25.0	12.0-14.0	0.5	0.7-1.0	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E309LTX-X	0.04	22.0-25.0	12.0-14.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E309MoTX-X	0.12	21.0-25.0	12.0-16.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E309LMoTX-X	0.04	21.0-25.0	12.0-16.0	20.-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E309LNiMoTX-X	0.04	20.5-23.5	15.0-17.0	2.0-3.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E310TX-X	0.20	25.0-28.0	20.0-22.5	0.5	-	1.0-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E312TX-X	0.15	28.0-32.0	8.0-10.5	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E316TX-X	0.08	17.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E316LTX-X	0.04	17.0-20.0	11.0-14.0	3.0-4.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E317LTX-X	0.04	18.0-21.0	12.0-14.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E347TX-X	0.08	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	8xC min 1 max	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E3409TX-X[d]	0.10	10.5-13.5	0.60	0.5	-	0.80	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E410TX-X	0.12	11.0-13.5	0.60	0.4-0.7	-	1.2	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E410NiMoTX-X	0.06	11.0-12.5	4.0-5.0	0.5	-	1.0	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E410NiTiTX-X[d]	0.04	11.0-12.0	3.6-4.5	0.5	-	0.70	0.5	0.04	0.03	--	0.5
E430TX-X	0.10	15.0-18.0	0.60	0.65	-	1.2	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E502TX-X[e]	0.10	4.0-6.0	0.40	0.8-1.2	-	1.2	1.0	0.04	0.03	--	0.5

ตารางที่ 7.40 (ต่อ) ชนิดลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน AWS A 5.22:2005

ที่มา : AWS A5.22/A5.22:M2012, 2012

ส่วนผสมทางเคมี (wt%)											
ประเภทลวดเชื่อม	C	Cr	Ni	Mo	Cb(Nb) +Ta	Mn	Si	P	S	N	Cu
E505TX-X[e]	0.10	8.0-10.5	0.40	0.5-1.5	-	1.2	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E307T0-3	0.13	19.5-22.0	9.0-10.5	0.5	-	3.3-4.7	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308T0-3	0.08	19.5-22.0	9.0-11.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308LT0-3	0.03	19.5-22.0	9.0-11.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308HT0-3	0.08	19.5-22.0	9.0-11.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308MoT0-3	0.08	18.0-21.0	9.0-11.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308LMoT0-3	0.03	18.0-21.0	9.0-12.0	1.8-2.4	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E308HMoT0-3	0.12	19.0-21.5	9.0-10.7	0.5	-	12.25	0.9	0.04	0.03	--	0.5
E309T0-3	0.10	23.0-25.5	12.0-14.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E309LT0-3	0.03	23.0-25.5	12.0-14.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E309LCbT0-3	0.03	23.0-25.5	12.0-14.0	2.0-3.0	0.7-1.0	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E309MoT0-3	0.12	21.0-25.0	12.0-16.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E309LMoT0-3	0.04	21.0-25.0	12.0-16.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E310T0-3	0.20	25.0-28.0	20.0-22.5	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E312T0-3	0.15	28.0-32.0	8.0-10.5	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E316T0-3	0.08	18.0-20.5	11.0-14.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E316LT0-3	0.03	18.0-20.5	11.0-14.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E316LKT0-3	0.04	17.0-20.0	11.0-14.0	3.0-4.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E317LT0-3	0.03	18.5-21.0	13.0-15.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E347T0-3	0.08	19.0-21.5	9.0-11.0		8 x C min 1.0 max	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E490T0-3[d]	0.10	10.5-13.5	0.60	0.5	-	0.80	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E410T0-3	0.12	11.0-13.5	0.60	0.5	-	1.0	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E410NiMoT0-3	0.06	11.0-12.5	4.0-5.0	0.4-0.7	-	1.0	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E410NiTiT0-3[d]	0.04	11.0-12.0	3.6-4.5	0.5	-	0.70	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E430T0-3	0.10	15.0-18.0	0.60	0.5	-	1.0	1.0	0.04	0.03	--	0.5
E2209T0-X	0.04	21.0-24.0	7.5-10.0	2.5-4.0	-	0.5-2.0	1.0	0.04	0.03	0.2	0.5
E2553T0-X	0.04	24.0-27-0	8.5-10.5	2.9-3.0	-	0.5-1.5	1.0	0.04	0.03	0.2	2.5
R308LT1-5	0.03	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	-	0.5-2.5	1.2	0.04	0.03	-	0.5
R309LTI-5	0.03	22.0-25.0	12.0-14.0	0.5	-	0.5-2.5	1.2	0.04	0.03	-	0.5
R316LT1-5	0.03	17.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.2	0.04	0.03	-	0.5
R347T1-5	0.08	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	8 x C min 1.0 max	0.5-2.5	1.2	0.04	0.03-	-	0.5

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.40

- a = เป็นส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมจากกานำไปวิเคราะห์หาส่วนผสมทางเคมี
- b = ปริมาณส่วนผสมที่เป็นค่าเดียว จะเป็นค่าที่สูงที่สุด
- c = ตัวอักษร “X”ที่ตามหลังตัวอักษร “T” หมายถึงตำแหนางท่าเชื่อม 1 คือ เชื่อมได้ทุกท่า 0 ตือ เชื่อมท่าราบและท่าขนานนอน
- d = ไทเทเนียม 10 x C min., 1.5% Max.
- e = ใช้สำหรับการเชื่อมแนวเดียวและการทดสอบความเค้นแรงดึงเท่านั้น

ตารางที่ 7.41 สมบัติทางกลลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน AWS A 5.22*ที่มา : AWS A5.22/A5.22:M2012, 2012*

ประเภทลวดเชื่อม	ความเค้นแรงดึงต่ำสุด		เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ต่ำสุด (%)	การให้ความร้อนหลังเชื่อม (PWHT)
	ksi	MPa		
E307TX−X	85	590	30	None
E308TX−X	80	550	35	None
E308LTX−X	75	520	35	None
E308HTX−X	80	550	35	None
E308MoTX−X	80	550	35	None
E308LMoTX−X	75	520	35	None
E309TX−X	80	550	30	None
E309LCbTX−X	75	520	30	None
E309LTX−X	75	520	30	None
E309MoTX−X	80	550	25	None
E309LMoTX−X	75	520	25	None
E309LNiMoTX−X	75	520	25	None
E310TX−X	80	550	30	None
E312TX−X	95	660	22	None
E316TX−X	75	520	30	None
E316LTX−X	70	485	30	None
E317LTX−X	75	520	20	None
E347TX−X	75	520	30	None
E409TX−X	65	450	15	None
E410TX−X	75	520	20	732−760°C/ 1 ชม./Air cooled
E410NiMoTX−X	110	760	15	593−612°C/ 1 ชม./Air cooled
E410NiTiTX−X	110	760	15	593−612°C/ 1 ชม./Air cooled
E430TX−X	65	450	20	760−788°C/ 4 ชม./Furnace cooled

ตารางที่ 7.41 (ต่อ) สมบัติทางกลลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน AWS A 5.22

ที่มา : AWS A5.22/A5.22:M2012, 2012

ประเภทลวดเชื่อม	ความเค้นแรงดึงต่ำสุด		เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ต่ำสุด (%)	การให้ความร้อนหลังเชื่อม (PWHT)
	ksi	MPa		
E502TX−X	60	415	20	840−870°C/ 2 ชม./ Furnace cooled
E505TX−X	60	415	20	840−870°C/ 2 ชม./ Furnace cooled
E308HMoT0−3	80	550	30	None
E316LKT0−3	70	485	30	None
E2209TX−X	100	690	20	None
E2553TX−X	110	760	15	None
EXXXTX−G	Not Specified			
R308LT1−5	75	520	35	None
R309LT1−5	75	520	30	None
R316LT1−5	70	485	30	None
R347T1−5	75	520	30	None

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.41

- a = ตัวอักษร “X”ที่ตามหลังตัวอักษร “T” หมายถึงตำแหนางท่าเชื่อม 1 คือ เชื่อมได้ทุกท่า 0 ตือ เชื่อมท่าราบและท่าขนานนอน และตัวเลขที่ตามหลังตำแหน่งท่าเชื่อม –1, −3,−4 และ −5 หมายถึง แก๊สปกคลุมตามรหัสข้อกำหนดในตาราง

ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐาน AWS ที่ระบุในข้อกำหนดมีทั้งแบบที่เป็นม้วนและแบบที่เป็นเส้นตรง โดยแบบม้วนจะใช้ตัวอักษร “E” ส่วนแบบเส้นตรงจะใช้ตัวอักษร “R” ดังแสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมในรูปที่ 7.35



ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์แบบม้วน E 308LT1−1 ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์แบบเส้นตรง R308LT1−5

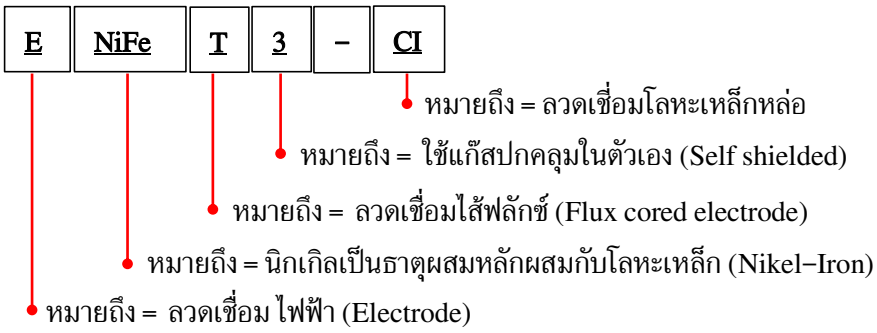
รูปที่ 7.35 ตัวอย่างลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์เหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน AWS A5.22:M2012

ที่มา : LINKWELD Welding Electrode, 2017

1.3) AWS A5.15/A5.15 :1990(R2016) เป็นมาตรฐานลวดเชื่อมประเภทที่ใช้สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อ (Specification for Welding Electrodes and Rods for Cast Iron) ข้อกำหนดของมาตรฐานนี้จะครอบคลุมทุกชนิดของลวดเชื่อมที่ใช้สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กหล่อของทุกขบวนการเชื่อม แต่หัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะลวดประเภทลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Electrode for flux cored arc welding) ที่ใช้ในการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อทุกชนิดและเป็นลวดเชื่อมที่รองรับกับขบวนการเชื่อมแบบ SMAW ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้

AWS A5.15/A5.15 หมายถึง ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กหล่อ

1990(R2016) หมายถึง ข้อกำหนดมาตรฐานปี 1990 ปรับปรุงปี 2016



ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กหล่อจะใช้แก๊สปกคุลมภายในตัวเอง (Self–shielded) แต่ก็สามารถใช้แก๊สปกคลุมจากภายนอกก็ได้ขึ้นอยู่กับคำแนะนำของผู้ผลิตลวดเชื่อม ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์เหล็กหล่อมีชนิดเดียวสามารถใช้เชื่อมได้กับเหล็กหล่อทุกชนิด ดังแสดงในตารางที่ 7.42 และตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อม ENiFeT3–CI ดังแสดงในรูปที่ 7.36

ตารางที่ 7.42 ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กหล่อ มาตรฐาน AWS A 5.15:R2016

ที่มา : AWS A5.15/A5.15:1990(R2016), 2016

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)										
	C	Mn	Si	P	S	Fe	Ni	Mo	Cu	Al	อื่น ๆ
ENiFeT3-CI	0.10	8.0-10.5	0.40	0.5-1.5	-	1.2	1.0	0.04	0.03	--	0.5



รูปที่ 7.36 ตัวอย่างลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กหล่อ ENiFeT3–CI

ที่มา : ESAB Welding Electrode, 2012

2. ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์มาตรฐาน JIS (Flux cord wire of Japanese Industrial Standards)

ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ หรือแกนฟลักซ์ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ของสมาคมมาตรฐานญี่ปุ่น (JSA : Japanese Standards Association) ได้สร้างข้อกำหนดและรหัสหรือโค๊ดขึ้นเพื่อเป็นมาตฐานทางด้านอุตสาหกรรมการเชื่อม มาตรฐาน JIS นี้เป็นที่ยอมรับและใช้กำหนดงานเชื่อมกันในประเทศไทย ในส่วนของหัวข้อนี้จะกล่าวถึงมาตรฐานของการเลือกใช้ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ของโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน กับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าไร้สนิม แยกตามชนิดของโลหะเชื่อม ดังจะได้กล่าวต่อไปนี้

2.1) JIS Z 3313:2009 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมชนิดลวดไส้ฟลักซ์ของโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานเย็น (Flux Cored Wires for Gas Shielded and Self−Shielded Metal Arc Welding of Mild Steel, High Strength Steel and Low Temperature Service Steel) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้

JIS Z 3313 หมายถึง ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน

2009 หมายถึง เป็นมาตรฐานของปี 2009

Y	FW	−	X	X	X	X

- X (ตำแหน่งที่ 7) = หมายถึง = ชนิดของฟลักซ์ปกคลุม (1)
- X (ตำแหน่งที่ 6) = หมายถึง = อุณหภูมิและพลังงานของการทดสอบแรงกระแทกของเนื้อเชื่อม (2)
- X (ตำแหน่งที่ 5) = หมายถึง = ค่าความเค้นแรงดึงต่ำสุดของเนื้อเชื่อม (3)
- X (ตำแหน่งที่ 4) = หมายถึง = ชนิดของแก๊สปกคลุม (4)
- FW = หมายถึง = ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานเย็น
- Y = หมายถึง = ลวดเชื่อมไฟฟ้า

(1) = R คือ ฟลักซ์รูไทล์, B คือ ฟลักซ์ด่าง, M คือ ฟลักซ์ที่โลหะผสมเป็นหลัก, G คือ ฟลักซ์อื่น ๆ

(2) = อุณหภูมิและพลังงานของการทดสอบแรงกระแทกของเนื้อเชื่อม ดังแสดงในตารางข้างล่างนี้

(3) = 43 คือ 420 N/mm^2, 50 คือ 490 N/mm^2 , 60 คือ 590 N/mm^2

(4) = C คือ แก๊ส CO_2, A คือ แก๊ส CO_2+Ar, S คือ ใช้แก๊สปกคลุมภายในตัวเอง (Self shielded)

รหัส	อุณหภูมิทดสอบ (°C)	พลังงานการทดสอบ (J)
O	0	27
D	0	47
E	−5	27
F	−5	47
2	−20	27
G	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด

ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานเย็น ตามมาตรฐาน JIS ได้สร้างข้อกำหนดรหัสหรือโค๊ดของชนิดลวดเชื่อมเป็นกลุ่มตามชนิดของแก๊สปกคลุม และความเหมาะสมของการนำไปใช้งาน ดังแสดงชนิดของลวดเชื่อมตามมาตรฐานที่กำหนดขึ้นดังแสดงในตารางที่ 7.43 และแสดงส่วนผสมทางเคมีในตารางที่ 7.44

ตารางที่ 7.43 ชนิดของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานเย็น มาตรฐาน JIS Z 3313:2009 *ที่มา : JIS Z 3313:2009, 2009*

ประเภทลวดเชื่อม	ชนิดแก๊สปกคลุม	ชนิดของโลหะเหล็กที่เชื่อม
YFW–C430X	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	เหล็กกล้าคาร์บอน
YFW–C500X	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	เหล็กกล้าคาร์บอน และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงระดับ 490N/mm^2
YFW–C50DX		
YFW–C502X		
YFW–C50GX		
YFW–C60EX	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงระดับ 590N/mm^2
YFW–C60FX		
YFW–C602X		
YFW–C60GX		
YFW–A430X	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) + แก๊สอาร์กอน (Ar)	เหล็กกล้าคาร์บอน
YFW–A500X	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) + แก๊สอาร์กอน (Ar)	เหล็กกล้าคาร์บอน และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงระดับ 490N/mm^2
YFW–A50DX		
YFW–A502X		
YFW–A50GX		
YFW–A60EX	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) + แก๊สอาร์กอน (Ar)	เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงระดับ 590N/mm^2
YFW–A60FX		
YFW–A602X		
YFW–A60GX		
YFW–S430X	ใช้แก๊สปกคลุมภายในตัวเอง (Self shielded)	เหล็กกล้าคาร์บอน
YFW–S500X	ใช้แก๊สปกคลุมภายในตัวเอง (Self shielded)	เหล็กกล้าคาร์บอน และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงระดับ 490N/mm^2
YFW–S50DX		
YFW–S502X		
YFW–S50GX		

ตารางที่ 7.44 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานเย็น มาตรฐาน JIS Z 3313:2009

ที่มา : JIS Z 3313:2009, 2009

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cu[a]	Ni	Mo	Al
YFW–C430X	0.2	0.09	1.5	0.03	0.04	0.5	–	–	–
YFW–C500X	0.2	0.09	2.0	0.03	0.04	0.5	–	–	–
YFW–C50DX	0.2	0.09	2.0	0.03	0.04	0.5	–	–	–
YFW–C502X	0.2	0.09	2.0	0.03	0.04	0.5	1.0	–	–
YFW–C50GX	–	–	–	0.03	0.04	–	–	–	–
YFW–C60EX	0.15	0.80	2.0	0.03	0.03	0.5	–	–	–
YFW–C60FX	0.15	0.80	2.0	0.03	0.03	0.5	0.2	0.65	–
YFW–C602X	0.15	0.80	2.0	0.03	0.03	0.5	0.2	0.65	–
YFW–C60GX	0.15	–	–	0.03	0.04	–	–	–	–
YFW–A430X	0.2	0.09	1.5	0.03	0.04	0.5	–	–	–
YFW–A500X	0.2	0.09	2.0	0.03	0.04	0.5	–	–	–
YFW–A50DX	0.2	0.09	2.0	0.03	0.04	0.5	–	–	–
YFW–A502X	0.2	0.09	2.0	0.03	0.04	0.5	1.0	–	–
YFW–A50GX	–	–	–	0.03	0.04	–	–	–	–
YFW–A60EX	0.15	0.80	2.0	0.03	0.03	0.5	–	–	–
YFW–A60FX	0.15	0.80	2.0	0.03	0.03	0.5	0.2	0.65	–
YFW–A602X	0.15	0.80	2.0	0.03	0.03	0.5	0.2	0.65	–
YFW–A60GX	–	–	–	0.03	0.04	–	–	–	–
YFW–S430X	0.2	0.50	1.2	0.03	0.04	–	0.2	–	2.0
YFW–S500X	0.2	0.90	2.0	0.03	0.04	–	2.0	–	2.0
YFW–S50DX	0.2	0.90	2.0	0.03	0.04	–	2.0	–	2.0
YFW–S502X	0.2	0.90	2.0	0.03	0.04	–	2.0	–	2.0
YFW–S50GX	–	–	–	0.03	0.04	–	–	–	–

หมายเหตุ ของตารางที่ 7.44

- a = ส่วนผสมนี้รวมปริมาณของทองแดงที่เคลือบผิวลวด

สมบัติทางกลของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานเย็น ของเนื้อเชื่อมที่ทดสอบด้วยแรงดึงและการทดสอบแรงกระแทกที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 7.45 และตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ YFW–C50DR ในรูปที่ 7.37

ตารางที่ 7.45 สมบัติทางกลของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง และเหล็กกล้าสำหรับงานเย็น มาตรฐาน JIS Z 3313:2009

ที่มา : JIS Z 3313:2009, 2009

ประเภทลวดเชื่อม	ความเค้นแรงดึงต่ำสุด (N/mm^2)	ความเค้นพิสูจน์ 0.2% (N/mm^2)	การยืดตัวต่ำสุด (%)	การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (V-notch)	
				อุณหภูมิทดสอบ (°C)	การดูดซับพลังงาน (J)
YFW-C430X	420	340	22	0	47
YFW-C500X	490	390	22	0	27
YFW-C50DX	490	–	–	0	47
YFW-C502X	490	390	22	−20	27
YFW-C50GX	490	–	–	–	–
YFW-C60EX	590	490	19	−5	27
YFW-C60FX	590	–	–	−5	47
YFW-C602X	590	490	19	−20	27
YFW-C60GX	590	–	–	–	–
YFW-A430X	420	340	22	0	27
YFW-A500X	490	390	22	0	27
YFW-A50DX	490	–	–	0	47
YFW-A502X	490	390	22	−20	27
YFW-A50GX	490	–	–	–	–
YFW-A60EX	590	490	19	−5	27
YFW-A60FX	590	–	–	−5	47
YFW-A602X	590	490	19	−20	27
YFW-A60GX	590	–	–	–	–
YFW-S430X	420	340	22	0	27
YFW-S500X	490	390	22	0	27
YFW-S50DX	490	390	22	0	47
YFW-S502X	490	–	–	−20	27
YFW-S50GX	490	–	–	–	–



รูปที่ 7.37 ตัวอย่างลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอน YFW–C50DR

ที่มา : YAWATA Welding Electrode, 2014

2.2) JIS Z 3323:2003 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับลวดเชื่อมชนิดลวดไส้ฟลักซ์ของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel Flux Cored Wires) ได้กำหนดรหัสหรือโค๊ดของมาตรฐานลวดเชื่อมออกมาดังนี้

JIS Z 3323 หมายถึง ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม

2003 หมายถึง เป็นมาตรฐานของปี 2003

Y	F	XXX	X

- X หมายถึง = ชนิดของฟลักซ์ปกคลุม ดังแสดงในตารางข้างล่างนี้
- XXX หมายถึง = ส่วนผสมทางเคมีเนื้อเชื่อม (เกรดของเหล็กกล้าไร้สนิม)
- F หมายถึง = ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม
- Y หมายถึง = ลวดเชื่อมไฟฟ้า

รหัส	ชนิดแก๊สปกคลุม	ชนิดกระแสไฟเชื่อม
C	แก๊ส 100%CO_2 และ แก๊ส Ar +CO_2 อย่างน้อย 20 %	ใช้กระแสไฟเชื่อม DCEP
S	ใช้แก๊สปกคลุมภายในตัวเอง (Self shielded)	ใช้กระแสไฟเชื่อมAC และ DCEP
G	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด

ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมมีผลิตออกมาใช้งานอ้างอิงตามเกรดหรือชนิดของเหล็กไร้สนิมที่เป็นโลหะหลักที่ใช้งานกันทั่ว ๆ ไป เช่น เกรด308 เกรด309 เกรด316 เกรด317 เกรด309L หรือ เกรด309LMo เป็นต้น ซึ่งโดยมาตรฐาน JIS ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ได้จัดแบ่งชนิดลวดเชื่อมออกเป็นกลุ่มตามชนิดของแก๊สปกคลุม คือ กลุ่มที่ต่อท้ายรหัสด้วยอักษรตัว C ตัว S และตัว G ดังแสดงในตารางที่ 7.46 พร้อมแสดงส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อมที่ควรจะได้ ซึ่งมาตรฐานลวดเชื่อมรหัสหรือโค๊ดนี้จะเป็นลวดเชื่อมแบบเส้นลวดที่รองรับการเชื่อม GMAW หรือ MIG/MAG ดังแสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลวดเชื่อมชนิด YF309LC พร้อมข้อแนะนำจากผู้ผลิตในรูปที่ 7.38 และ 7.39 ตามลำดับ

ตารางที่ 7.46 ชนิดของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน JIS Z 3323:2003

ที่มา : JIS Z 3323:2003, 2003

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	อื่น ๆ
YF308C	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	9.0–11.0	18.0–21.0	–	–
YF308G	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	9.0–11.0	18.0–21.0	–	–
YF308LC	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	9.0–12.0	18.0–21.0	–	–
YF308LG	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	9.0–12.0	18.0–21.0	–	–
YF309C	1.00	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	22.0–25.0	–	–
YF309G	1.00	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	22.0–25.0	–	–
YF309LC	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	22.0–25.0	–	–
YF309LG	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	22.0–25.0	–	–
YF309JC	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	25.0–28.0	–	–
YF309JG	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	25.0–28.0	–	–
YF309MoC	12.0	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	22.0–25.0	2.0–3.0	–
YF309MoG	12.0	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	22.0–25.0	2.0–3.0	–
YF309MoLC	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	22.0–25.0	2.0–3.0	–
YF309MoLG	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	22.0–25.0	2.0–3.0	–
YF316C	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	11.0–14.0	17.0–20.0	2.0–3.0	–
YF316G	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	11.0–14.0	17.0–20.0	2.0–3.0	–
YF316LC	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	11.0–14.0	17.0–20.0	2.0–3.0	–
YF316LG	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	11.0–14.0	17.0–20.0	2.0–3.0	–
YF316JILC	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	11.0–16.0	17.0–20.0	1.2–2.75	Cu1–2.5
YF316JILG	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	11.0–16.0	17.0–20.0	1.2–2.75	Cu1–2.5
YF317LC	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–16.0	18.0–21.0	3.0–4.0	–
YF317LG	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–16.0	18.0–21.0	3.0–4.0	–
YF347C	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	9.0–11.0	18.0–21.0	–	Nb8xC–1.0
YF347G	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	9.0–11.0	18.0–21.0	–	Nb8xC–1.0
YF410C	0.12	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	0.6	11.0–13.5	0.5	–
YF410G	0.12	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	0.6	11.0–13.5	0.5	–
YF430C	0.10	1.0	1.2	0.04	0.03	0.6	15.0–18.0	0.5	–
YF430G	0.10	1.0	1.2	0.04	0.03	0.6	15.0–18.0	0.5	–

ตารางที่ 7.46 (ต่อ) ชนิดลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน JIS Z 3323:2003

ที่มา : JIS Z 3323:2003, 2003

ประเภทลวดเชื่อม	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	อื่น ๆ
YF308S	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	9.0–11.0	19.5–22.0	–	–
YF308LS	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	9.0–12.0	19.5–22.0	–	–
YF309S	0.10	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	23.0–25.5	–	–
YF309LS	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	23.0–25.5	–	–
YF309JS	0.03	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	25.5–28.5	–	–
YF309MoS	0.12	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	22.0–25.0	2.0–3.0	–
YF309MoLS	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–14.0	22.0–25.0	2.0–3.0	–
YF316S	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	11.0–14.0	18.0–20.5	2.0–3.0	–
YF316LS	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	11.0–14.0	18.0–20.5	2.0–3.0	–
YF316JILS	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	11.0–16.0	18.0–20.5	1.2–2.75	Cu1–2.5
YF317LS	0.04	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	12.0–16.0	18.5–21.0	3.0–4.0	–
YF347S	0.08	1.0	0.5–2.5	0.04	0.03	9.0–11.0	19.0–21.5	–	Nb8x C–1.0
YF410S	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03	0.6	11.0–13.5	0.5	–
YF430S	0.10	1.0	1.0	0.04	0.03	0.6	15.0–18.0	0.5	–

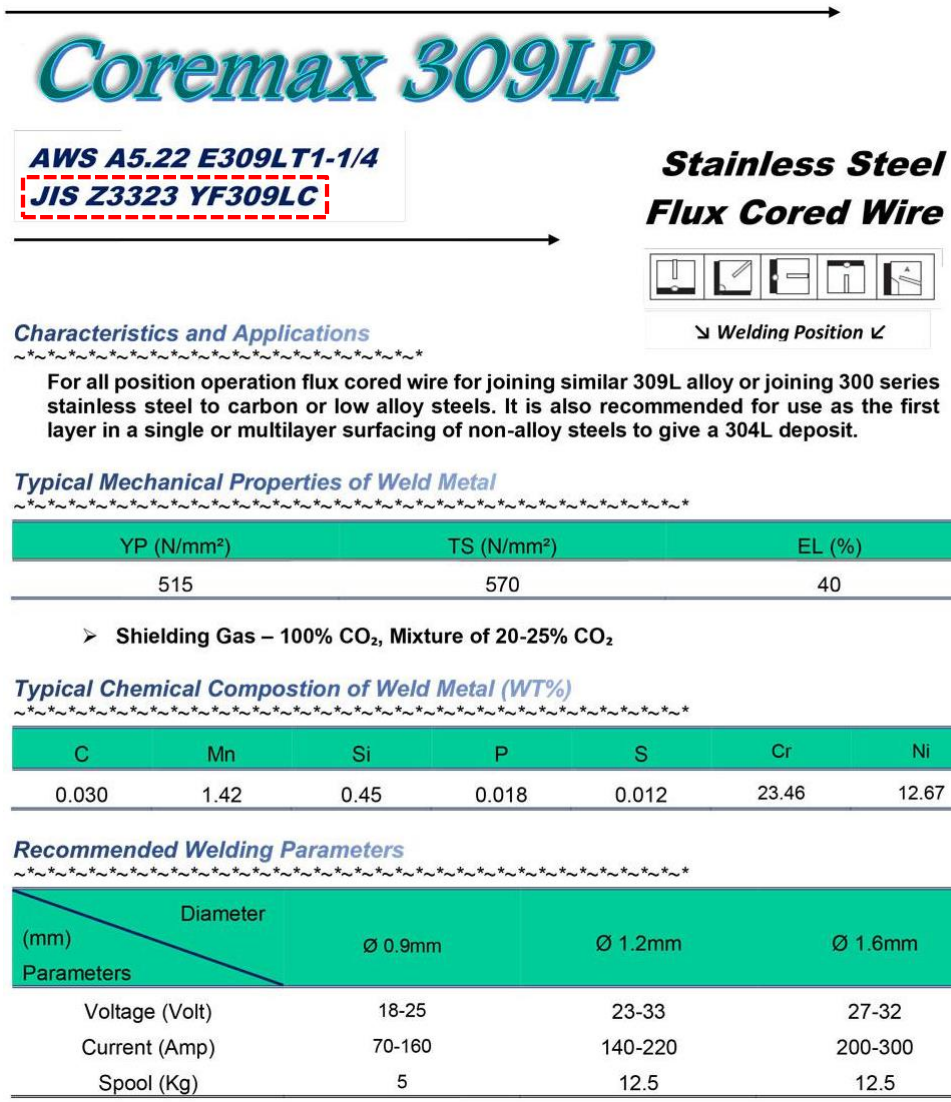
หมายเหตุ ของตารางที่ 7.46

- a = ค่าส่วนผสมที่แสดงค่าเดียวเป็นค่าที่สูงสุด



รูปที่ 7.38 ตัวอย่างลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าคาร์บอน YF309LC

ที่มา : YAWATA Welding Electrode, 2014



Coremax 309LP

AWS A5.22 E309LT1-1/4
JIS Z3323 YF309LC

Stainless Steel Flux Cored Wire

↘ Welding Position ↙

Characteristics and Applications

For all position operation flux cored wire for joining similar 309L alloy or joining 300 series stainless steel to carbon or low alloy steels. It is also recommended for use as the first layer in a single or multilayer surfacing of non-alloy steels to give a 304L deposit.

Typical Mechanical Properties of Weld Metal

YP (N/mm²)	TS (N/mm²)	EL (%)
515	570	40

➢ Shielding Gas – 100% CO_2, Mixture of 20-25% CO_2

Typical Chemical Compostion of Weld Metal (WT%)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
0.030	1.42	0.45	0.018	0.012	23.46	12.67

Recommended Welding Parameters

Diameter (mm) / Parameters	Ø 0.9mm	Ø 1.2mm	Ø 1.6mm
Voltage (Volt)	18-25	23-33	27-32
Current (Amp)	70-160	140-220	200-300
Spool (Kg)	5	12.5	12.5

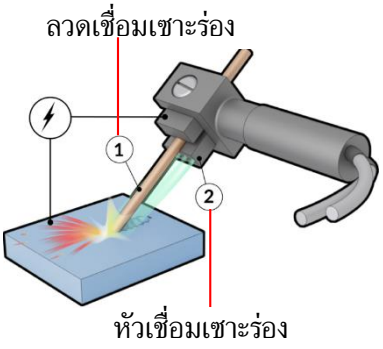
รูปที่ 7.39 ตัวอย่างคำแนะของผู้ผลิตลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม YF309LC

ที่มา : Leeden Powerweld Sdn Bhd, 2015

7.4 ลวดเชื่อมเซาะร่อง (Gouging electrode) การเชื่อมเซาะร่องหรือที่เรียกกันว่า “การเก๊าจ์” เป็นขบวนการตัดหรือการขจัดเนื้อโลหะออกด้วยการอาร์กของลวดเชื่อม ซึ่งลวดเชื่อมที่ใช้จะแตกต่างกับลวดเชื่อมทั่ว ๆ ไป โดยลวดเชื่อมประเภทนี้จะไม่ใช่เป็นการเพิ่มเนื้อโลหะแต่จะเป็นการอาร์กเพื่อเอาเนื้อโลหะออกไป จึงเรียกลวดเชื่อมประเภทนี้ว่า ลวดเชื่อมตัดหรือเซาะร่อง ซึ่งจะมีเครื่องเชื่อมเซาะร่อง (Gouging machine) โดยเฉพาะ หรือสามารถใช้กับเครื่องเชื่อมไฟฟ้าทั่วไปก็ได้ ดังแสดงหลักการเชื่อมเซาะร่องและเครื่องเชื่อมเซาะร่องในรูปที่ 7.40 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

ลวดเชื่อมเซาะร่องหรือลวดเซาะ เป็นลวดเชื่อมที่ผลิตจากการนำผงคาร์บอนมาอัดแน่นให้เป็นแท่ง โดยส่วนผสมของผงอัดจะประกอบไปด้วยสารต่าง ๆ ซึ่งแต่ละผู้ผลิตก็จะมีสูตรผสมที่เป็นเอกลักษณ์

ของตัวเอง ดังนั้นลวดเชื่อมเซาะร่องยังไม่มีการกำหนดมาตรฐานออกมาที่ชัดเจน จะกำหนดรหัสขึ้นตามความต้องการของผู้ผลิตเอง แต่พบว่าลักษณะทางกายภาพของลวดเชื่อมจะคล้ายกันหรือเหมือนกันก็ว่าได้ คือ ตัวของลวดเชื่อมจะถูกเคลือบด้วยโลหะทองแดงเพื่อต้องการให้นำกระแสไฟฟ้าได้ดี และช่วยในการป้องกันความชื้น





(ก) หลักการเชื่อมเซาะร่อง **(ข)** เครื่องเชื่อมเซาะร่อง (Gouging machine)

รูปที่ 7.40 หลักการเชื่อมเซาะร่องและเครื่องเชื่อมเซาะร่อง

ที่มา : Thematech, 2016

ลวดเชื่อมเซาะร่องมีทั้งแบบที่เป็นรูปร่างแท่งกลม (Rod gouging carbon air) และแบบรูปร่างแท่งแบน (Flat gouging carbon air) ดังแสดงในรูปที่ 7.41 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีหลายขนาดให้เลือกใช้ตามลักษณะความหนาของชิ้นงาน โดยแต่ละขนาดความหนาก็จะมีความยาวแต่ที่สัมพันธ์กัน คือขนาดที่โตขึ้นจะมีความยาวที่มากขึ้น เช่น ขนาด Ø คูณ ความยาว ได้แก่ 3.2 x 305 มม. 7.9 x 356 มม. หรือ 25.4 x 432 (ผู้ผลิต Arcair ESAB) ดังตัวอย่างแสดงขนาดลวดเชื่อมในรูปที่ 4.42 พร้อมตัวอย่างคำแนะจากผู้ผลิตในรูปที่ 4.43



(ก) ลวดเชื่อมเซาะร่องแบบแท่งกลม **(ข)** ลวดเชื่อมเซาะร่องแบบแท่งแบน

รูปที่ 7.41 ประเภทของเชื่อมเซาะร่องตามรูปทรงของเส้นลวด

ที่มา : ARCAIR ESAB, 2013



รูปที่ 7.42 ตัวอย่างของลวดเชื่อมเซาะร่องตามขนาดของเส้นลวด *ที่มา : ARCAIR ESAB, 2014*

GEMINI

ลวดเชื่อมสำหรับงานเชื่อมตัด เซาะร่อง

GEMINI CHAMFERTRODE

ลวดเชื่อมเจมินี่ CHAMFERTRODE เป็นลวดเชื่อมที่ออกแบบมาพิเศษสำหรับงานตัด เซาะร่องโดยไม่ต้องใช้ลมช่วย ในสารพอกหุ้มไม่มีธาตุคาร์บอน ทำให้เหมาะสำหรับงานเซาะร่องสเตนเลส เพราะคาร์บอนจะไม่ลงไปแทรกตัวในแนวเชื่อม ทำให้แนวเซาะร่องสะอาด ใช้ได้กับงานตัด เซาะร่องบนเหล็กเหนียว สเตนเลส อลูมิเนียม

ข้อแนะนำในการปรับตั้งกระแสไฟสำหรับงานตัดโลหะ

แผ่นวัสดุ	ความหนา (มม.)	ขนาดลวดเชื่อม (มม.)	กระแสไฟ (แอมแปร์)	ความเร็วในการตัด (ซ.ม./นาที)
เหล็กกล้าละมุน	12	2.6	130	7
เหล็กกล้าละมุน	12	3.2	190	10.5
เหล็กกล้าละมุน	20	4.0	280	8.5
เหล็กกล้าละมุน	25	5.0	350	8.5

ข้อแนะนำในการปรับตั้งกระแสไฟสำหรับงานเซาะร่อง

ความลึก (มม.)	ขนาดลวดเชื่อม (มม.)	กระแสไฟ (แอมแปร์)	ความเร็วในการเซาะ (ซ.ม./นาที)
3	2.6	150	26
3	3.2	200	36
3	4.0	280	39
3	5.0	350	49

กระแสไฟฟ้าที่ใช้เชื่อม

AC หรือ DC ±				
ขนาด /ความยาว (มม.)	2.6X300	3.2X350	4.0X350	5.0X350
กระแสไฟ ต่ำสุด/สูงสุด (แอมป์)	130-150	190-200	200-280	280-350

รูปที่ 7.43 ตัวอย่างของคำแนะจากผู้ผลิตในการใช้งานลวดเชื่อมเซาะร่องตามขนาดของเส้นลวดและปัจจัยการเชื่อม *ที่มา : GEMINI, 2012*

จากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่าลวดเชื่อมเชาะร่องยังไม่มีการกำหนดมาตรฐานที่เป็นทางการ ปัจจุบันจะเลือกใช้งานตามคำแนะนำของผู้ผลิตเป็นสำคัญ แต่สำหรับผู้ที่มีความเชี่ยวชาญหรือมีประสบการณ์ด้านการเชื่อมเชาะร่องก็อาจปรับเปลี่ยนปัจจัยการเชื่อมไปได้ตามความเหมาะสม โดยได้มีผู้เชี่ยวชาญได้ให้คำแนะนำไว้จากประสบการณ์ในการทำงาน สำหรับใช้กำหนดกระแสไฟเชื่อมเชาะร่องตามขนาดของลวดเชื่อมดังแสดงในตารางที่ 7.47

ตารางที่ 7.47 คำแนะนำปัจจัยการเลือกใช้ลวดเชื่อมเชาะร่อง

ที่มา : WEST WELD –Parameter Selection of Carbon Air Gouging Electrode, 2019

ประเภทของลวดเชื่อม	ขนาดของลวดเชื่อม (mm)	กระแสไฟเชื่อม (A)
แบบเส้นกลม (Rod)	3	150–180
	4	150–200
	5	150–250
	6	180–300
	7	200–350
	8	250–400
	9	350–450
	10	350–500
แบบเส้นแบน (Flat)	3 x 12	200–300
	4 x 12	200–400
	5 x 10	300–400
	5 x 12	350–450
	5 x 15	400–500
	5 x 18	450–550
	5 x 20	500–600

การกำหนดมาตรฐานของลวดเชื่อมก็เพื่อเป็นการสร้างความรู้และความเข้าใจถึงบทบาทหน้าที่และการเลือกใช้ลวดเชื่อมให้เหมาะสมและถูกต้อง พร้อมกับเป็นการกำหนดการสื่อสารด้านงานเชื่อมที่ตรงกันของการเทียบเคียงของแต่ละมาตรฐาน เพราะมาตรฐานของแต่ละประเทศที่เป็นเจ้าของมาตรฐานก็มักจะกำหนดมาตรฐานลวดเชื่อมตามมาตรฐานของตนเองเป็นหลัก ถึงแม้จะมีการแสดงการเทียบเคียงกับมาตรฐานอื่น ๆ ไว้บ้างแต่ไม่อาจครบถ้วนได้ทุกมาตรฐาน ดังนั้นข้อมูลที่นำมาแสดงในบทเรียนนี้ก็ไม่อาจนำมาแสดงได้ครบถ้วนทุกมาตรฐาน จะเน้นมาตรฐานที่เป็นที่นิยมหรือยอมรับกันในอุตสาหกรรมการเชื่อมในประเทศไทยเป็นสำคัญ อย่างไรก็ตามก็จะเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์สำหรับเป็นแนวทางในการเทียบเคียงหรือศึกษาเพิ่มเติมมาตรฐานลวดเชื่อมจากกแหล่งข้อมูลอื่น ๆ ต่อไป

ดัชนีคำศัพท์บทที่ 7

Acid cover flux – ฟลักซ์พอกหุ้มชนิดที่เป็นกรด

All position – ลวดเชื่อมที่สามารถเชื่อมได้ทุกตำแหน่งท่าเชื่อม

AWS. Standard electrode – มาตรฐานลวดของสมาคมการเชื่อมแห่งสหรัฐอเมริกา

Basic cover flux – ฟลักซ์พอกหุ้มชนิดที่เป็นด่าง

Cellulise cover flux – ฟลักซ์พอกหุ้มชนิดที่เป็นเคลลูโลส

Code – รหัสที่สร้างขึ้นตามข้อกำหนดของแต่ละมาตรฐาน

Colour code electrode – รหัสสีที่ใช้แบ่งชนิดลวดเชื่อมมาตรฐาน JIS 3321

Composite rod – ลวดเชื่อมเส้นตันแบบกำหนดส่วนผสมทางเคมี

Continuous wire feeding – การป้อนเติมลวดเชื่อมอย่างต่อเนื่อง

Core wire composition – ปริมาณธาตุผสมของแกนลวดโลหะ

Dissimilar cover electrode – ลวดสำหรับเชื่อมโลหะต่างชนิด

Electrode cast iron – ลวดเชื่อมสำหรับเชื่อมโลหะเหล็กหล่อ

Electrode classification – การแบ่งประเภทหรือชนิดของลวดเชื่อม

Electrode cover flux – ลวดเชื่อมโละที่มีสารฟลักซ์พอกหุ้ม

Electrode drying – การอบไล่ความชื้นออกจากลวดเชื่อม

Electrode drying oven – เตาอบลวดเชื่อมติดตั้งประจำตำแหน่ง

Electrode filler rod – ลวดโลหะเปลือยแบบแท่งเส้นตรง

Electrode filler wire – ลวดโลหะเปลือยแบบเส้นม้วน

Electrode strip – ลวดเชื่อมที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบน

Flat gouging carbon air – ลวดเชื่อมเซาะร่องแบบแท่งแบน

Flux core electrode – ลวดเชื่อมโลหะที่มีผงฟลักซ์อยู่ภายในท่อเส้นลวด

Gouging electrode – ลวดโลหะเชื่อมที่ผลิตออกมาสำหรับการตัดเซาะร่อง

Jetting action – เป็นพฤติกรรมที่แกนลวดหลอมเร็วกว่าฟลักซ์

JIS. Standard electrode – ลวดเชื่อมมาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศญี่ปุ่น

Military electrode – ลวดเชื่อมที่ใช้งานในวงการทหารกับงานเฉพาะทาง

Outer shielding flux core wire – ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ที่อาศัยแก๊สปกคลุมจากถังแก๊ส

Portable electrode drying oven – เตาอบลวดเชื่อมเฉพาะตัวบุคคลนำติดตัวไปเชื่อม

Power ferrous – ผงเหล็กออกไซด์ที่ผสมอยู่ในฟลักซ์ชนิดที่เป็นกรด

Rutile cover flux – ฟลักซ์พอกหุ้มชนิดที่เป็นรูไทล์

Self shielding flux core wire – ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ที่อาศัยแก๊สปกคลุมในตัวลวดเอง

Short circuit transfer – ลวดเชื่อมที่สามารถเชื่อมแบบถ่ายโอนลัดวงจร

Similar cover electrode – ลวดสำหรับเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน

Solid rod – ลวดเชื่อมเส้นตันแบบไม่กำหนดส่วนผสมทางเคมี

Stabilizes arc – หน้าที่ของฟลักซ์ที่ช่วยในการอาร์กมีความสม่ำเสมอตลอดขณะทำการเชื่อม

Standard filler electrode – มาตรฐานลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมด้วยแก๊สปกคลุม

Welding consumable – ลวดโลหะที่ใช้เติมลงในรอยเชื่อมที่สิ้นเปลือง

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 7

ข้อที่ 1. จงบอกหน้าที่หลักของลวดเชื่อม (Function of welding electode)

ข้อที่ 2. จงบอกประโยชน์ของการสร้างหรือกำหนดมาตรฐานของลวดเชื่อม

ข้อที่ 3. จงอธิบายความหมายของคำว่าลวดเชื่อมแบบ “Consumable”

ข้อที่ 4. จงอธิบายลักษณะและองค์ประกอบที่สำคัญของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Elecrode cover flux)

ข้อที่ 5. จงบอกถึงความแตกต่างของฟลักซ์แต่ละชนิดที่นำมาใช้พอกหุ้มแกนลวดโลหะ พร้อมบอกหน้าของฟลักซ์ที่พอกหุ้มมาโดยสังเขป

ข้อที่ 6. จงอธิบายลักษณะของลวดเชื่อมประเภทต่าง ๆ ดังนี้

- ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Covered electrode)
- ลวดเชื่อมเปลือย (Filler electrode)
- ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux core electrode)
- ลวดเชื่อมเซาะร่อง (Gouging ekectrode)

ข้อที่ 7. หน้าที่ของฟลักซ์ในการ Deoxidizer หมายถึงอะไร และใช้ธาตุใดผสมลงไปในผงฟลักซ์พอกหุ้ม

ข้อที่ 8. จงบอกเหตุผลของความจำเป็นที่ต้องทำการอบลวดเชื่อม และใช้อุปกรณ์อะไรในการอบ

ข้อที่ 9. จงแปลความหมายของลวดเชื่อมตามมาตรฐาน AWS A5.1/A5.1M:2012 ดังต่อไปนี้

- ลวดเชื่อม E3010 - ลวดเชื่อม E3013 - ลวดเชื่อม E3016

ข้อที่ 10. จงแปลความหมายของลวดเชื่อมตามมาตรฐาน AWS A5.15 /A5.15M:R2016 ดังต่อไปนี้

- ลวดเชื่อม ENi-CI - ลวดเชื่อม ENi-CI-A - ลวดเชื่อม ENiFeMn-CI

ข้อที่ 11. จงแปลความหมายของลวดเชื่อมตามมาตรฐาน JIS Z 3211-1991:R2008 ดังต่อไปนี้

- ลวดเชื่อม E4310 - ลวดเชื่อม E4316 - ลวดเชื่อม E4327

ข้อที่ 12. จงแปลความหมายของลวดเชื่อมตามมาตรฐาน JIS Z 3221-1991:R2013 ดังต่อไปนี้

- ลวดเชื่อม E308L - ลวดเชื่อม E309MoL - ลวดเชื่อม E309NbL

ข้อที่ 13. จงแปลความหมายของลวดเชื่อมตามมาตรฐาน ISO 2560:2012 ดังต่อไปนี้

- ลวดเชื่อม E425B42H5 - ลวดเชื่อม E4910-P1 - ลวดเชื่อม E5516-3M3

ข้อที่ 14. จงแปลความหมายของลวดเชื่อมตามมาตรฐาน ISO 2560:2012 ดังต่อไปนี้

- ลวดเชื่อม E425B42H5 - ลวดเชื่อม E4910-P1 - ลวดเชื่อม E5516-3M3

ข้อที่ 15. จงแปลความหมายของลวดเชื่อมตามมาตรฐาน AWS A.18/A5.18:2017 ดังต่อไปนี้

- ลวดเชื่อม ER70S-2 - ลวดเชื่อม ER70S-7 - ลวดเชื่อม ER70S-1B

ข้อที่ 16. จงแปลความหมายของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์มาตรฐาน AWS A.5.20/A5.20:2015 ดังต่อไปนี้

- ลวดเชื่อม E70T-1C - ลวดเชื่อม E71T-1M - ลวดเชื่อม E71T-12M
- ลวดเชื่อม E71T-12M - ลวดเชื่อม E70T-1C - ลวดเชื่อม E71T-5C

ข้อที่ 17. จงบอกส่วนที่เหมือนกันและส่วนที่แตกต่างกันของลวดเชื่อมคู่ที่แสดงในรูปนี้



(ก) ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อ 98%Ni **(ข)** ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กหล่อ 55%Ni

ที่มา : YAWATA Welding Electrode, 2015

ข้อที่ 18. จงบอกชื่อมาตรฐานและระบุชนิดของลวดเชื่อมตามรหัสลวดเชื่อมที่กำหนดให้ดังต่อไปนี้

– YF309LC	– YFW–A60EX	– E316LKT0–3	– E307TX–11
– A 4043–WY	– A 1070–BY	– YGT50	– YGW11
– ER308LSi	– FeC–GF	– ENiFe–G49	– E4327
– E9018M	– E7010–X	– E7016	– E316JIL

ข้อที่ 19. จงบอกคุณสมบัติและหน้าที่ของลวดเชื่อมเซาะร่อง (Gouging electrode) ดังแสดงในรูปมาโดยละเอียด พร้อมบอกเหตุผลของการเคลือบผิวลวดด้วยทองแดงมาพอเข้าใจ



(ก) ลวดเชื่อมเซาะร่องแบบแท่งกลม **(ข)** ลวดเชื่อมเซาะร่องแบบแท่งแบน

ที่มา : ARCAIR ESAB, 2013

บรรณานุกรมบทที่ 7

American Petroleum Institute (API), *Welding Processes, Inspection, and Metallurgy*. API Recommended Practice 577. Published by API, United States, 2010. 8th Edition, 2010.

American Petroleum Institute (API). *Welding Processes, Inspection, and Metallurgy*. API Recommended practice 577. 2nd Edition, December, 2013.

American Welding Society (AWS). AWS A2.4/A2.4:2007. *Standard Symbols for Welding, Brazing, and Nondestructive Examination*.Supersedes ANSI/AWS A2.4−98 6th Edition, March 23, 2007.

American Welding Society (AWS). AWS A5.10/A5.10:M2017. *Welding Consumables−Wire Electrodes, Wires and Rods for Welding of Aluminum and Aluminum Alloy− Classification.* 11th Edition, Supersedes AWS A5.10/M:2012. Approved by American National Standards Institute, November 22, 2016.

American Welding Society (AWS). AWS A5.15/A5.15:1990 (R2016). *Specification for Welding Electrodes and Rods for Cast Iron*. Approved by American National Standards Institute, May 5, 2016.

American Welding Society (AWS). AWS A5.18/A5.18M:2017. *Specification for Carbon Steel Electrode and Rods for Gas Shielding Arc Welding*. Approved by the American National Standards Institute. 7th Edition, 2017.

American Welding Society (AWS). AWS A5.20/A5.20:M2005(R2015). *Specification for Carbon steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding*. 2015 Edition, Supersedes ANSI/AWS A5.20−95. Approved by American National Standards Institute, July 22, 2015.

American Welding Society (AWS). AWS A5.22/A5.22:M2012. *Specification for Stainless Steel Flux Cored and Metal Cored Welding Electrodes and Rods*. 5th Edition, Supersedes AWS A5.22/A5.22M:2010. Approved by American National Standards Institute,

American Welding Society (AWS). AWS A5.9/A5.9M:2017. *Welding Consumables−Wire Electrodes, Strip Electrode, Wires and Rods for Arc Welding of Stainless and Heat Resisting Steels*. Approved by American National Standards Institute. 9th Edition, 2017.

American Welding Society (AWS). *Specification for Carbon Steel Electrode for Shielded Metal Arc Welding*. AWS A5.1/A5.1M : 2012, 14th Edition,USA : 2012.

American Welding Society (AWS). *Publications Catalog– Standard, Reference books*, Online Education, and More. Summer/Fall, 2017.

American Welding Society (AWS) A2.4:2007. *Standard Symbols for Welding, Brazing, and Nondestructive Examination*. Approved by the American National Standards Institute, by American Welding Society, Miami, United States, 2007.

American Welding Society, AWS A5.1/A5.1M:2012. *Specification for Carbon Steel Electrode for Shielded Metal Arc Welding*. Supersedes AWS A5.1/A5.1M:2004. Approved by the American National Standards Institute. 14th Edition, 2012.

American Welding Society, AWS A5.22/A5.22M:2010. *Specification for Stainless Steel Flux Cored and Metal Cored Welding Electrodes and Rods*. Supersedes AWS A5.22–95. Approved by the American National Standards Institute. 4th Edition, 2010.

Avesta Welding. *The Avesta Welding Manual–Practice and Products for Stainless Steel Welding*. Avesta Welding AB 2004, 2004.

David H. Phillips. *Welding Engineering– An Introduction*, 1st Edition, Published by John Wiley & Sons, Ltd., United Kingdom, 2016.

ESAB. *Repair and Maintenance Welding Handbook – Selection and Application Guide Esab Repair & Maintenance Consumables*. 2nd Edition, 2012.

ESAB. *DATABOOK–Welding Filler Metal*. USA, 2016.

ESAB. *Welding Handbook–Consumables for Manual and Automatic Welding*. 2014.

HOBART – *Filler Metals Full–Line Catalog* (Find You Solution Today). 12–2020.

Internation Standard ISO 18275:2018(E). *Welding Consumables–Covered Electrodes for Manual Metal Arc Welding of High–Strength Steels–Classification*. Third Edition, 08–2018.

Internation Standard: ISO 2560:2009(E). *Welding Consumables–Covered Electrodes for Manual Metal Arc Welding of Non–Alloy and File Grain Steels–Classification*. Third Edition, 15–10–2009.

International Organization for Standardization: ISO. ISO 1701:2015, *Welding Consumables–Covered Electrodes, Wire, Rods, and Tubular Cored Electrodes for Fusion Welding of Cast iron –Classification*. 3rd Edition, Number of pages 22, 2015.

International Organization for Standardization: ISO. ISO 2560:2020, *Welding Consumables–Covered Electrodes for Manual Metal Arc Welding of Non–Alloy and Fine Grain Steels–Classification*. 4th Edition, Number of pages 34, 2020.

International Organization for Standardization: ISO. ISO 3581:2016, *Welding Consumables–Covered Electrodes for Manual Metal Arc Welding of Stainless and Heat–Resisting Steels–Classification*. 3rd Edition, Number of pages 23, 2016.

Japanese Industrial Standard (JIS). JIS Z 3252:2001. *Covered Electrode, Solid Wire, Rods and Flux Cored Wires for Cast Iron (Foreign Standard)*. Published by Japanese Standard Association (JSA), 2001.

Japanese Industrial Standard (JIS). JIS Z 3313:2009. *Flux Cored Wires for Gas Shielded and Self–Shielded Metal Arc Welding of Mild Steel, High Strength Steel and Low Temperature Service Steel (Foreign Standard)*. Published by Japanese Standard Association (JSA), February 20, 2009.

Japanese Industrial Standard (JIS). JIS Z 3323:2003. *Stainless Steel Flux Cored Wires*. Published by Japanese Standard Association (JSA), January 01, 2003

Japanese Industrial Standards (JIS). JIS Z 3312:2018. *Solid wires for MAG and MIG welding of mild steel, high strength steel and low temperature service steel*. 9th Edition. Approved by Japanese Standards Association (JSA), October 22, 2018.

Japanese Industrial Standards (JIS). JIS Z 3316:2017. *Solid wires and rods for TIG welding of mild steel, high strength steel and low temperature service steel*. 2017 Edition. Approved by Japanese Standards Association (JSA), April 20, 2017.

Japanese Industrial Standards (JIS). JIS Z 3321:2013. *Stainless steel rods, wires and strip electrodes for welding*. 2013 Edition. Approved by Japanese Standards Association (JSA), March 21, 2013.

John Norrish. *Advanced Welding Processes–Technologies and Processes Control*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England. 2006.

Klas Weman. *Welding Processes Handbook*. 1st Edition, Published by Woodhead Publishing Ltd., Cambridge England, 2003.

KOBE STEEL, LTD (Kita–Shinagawa, Shinagawa–Ku). *The ABC's of Arc Welding and Inspection*. 4th Edition, Published by KOBE STEEL, LTD. Tokyo, Japan, 2011.

KOBELCO STEEL, LTD. *Arc Welding of Specific Steels and Cast Irons*, Published by KOBE STEEL, LTD, Kita–Shinagawa, Shinagawa–Ku, Tokyo, 2015.

KOBELCO. *Flux Cored Wires–For Easy and High Efficiency Welding in Every Field*. Published by Kobelco Welding of America INC. 2009.

KOBELCO. *Welding handbook-Welding Consumables and Processes*: Familiarc, Trustarc, Premiarc, 2011.

KOBELCO. *Welding Today-Kobelco Welding Consumables for Mild Steel and 490MPa HT Steel*. 2nd Special Edition, 2011.

Larry Jeffus and Lawrence Bower. *Welding: Skill, Processes and Practices for Entry-Level Welders*. 1st Edition. Delmar Cengage Learning. Cliftan Park, New York, UAS 2010.

Larry Jeffus. *Welding and Metal Fabrication*. DELMAR, Cengage Learning, 2012.

LINCOLN ELECTRIC. *Innershield Wire FCAW-S Welding*. Published by Lincoln Global Inc. Issue 03-2015.

LINCOLN ELECTRIC. *The Welding Experts: Welding Consumables Product Catalogue*. Issus 14, 2011.

NIPPON STEEL. *WELDREAM-Product Catalog*. Published by Nippon Steel Welding Engineering. 11th Edition. September, 2021.

R. Scott Funderburk. *Selecting Filler Metals: Matching Strength Criteria. Key Concepts in Welding Engineering*. Welding Innovation Vol.XVI, No.2, 1999.

Stanley Ness, Charles N. Sherlock, Patrick O. Moore and Paul Mclntire. *Non-Destructive Testing Handbook. Vol. 10-Non-Destructive Testing Overview*. 2nd Edition, Published by American Society for Nondestructive Testing (ASNT), 2001.

STOODY-An ESAB BRAND. *Nickel Based Flux Cored Wires for All Position Welding*. 03-11-2015.

TWI. *CSWIP 3.2-Senior Welding Inspector WIS10, Training and Examination Services*, Granta Park, Cambridge, UK, 2016.

บทที่ 8

ข้อบกพร่องงานเชื่อมและการป้องกัน

Welding Defects & Prevention





ที่มา : Bancroft Engneerinh–Welding Problems, 2013

จุดประสงค์การเรียนรู้ บทที่ 8 ข้อบกพร่องงานเชื่อมและการป้องกัน

- รู้และเข้าใจถึงความหมายและความสำคัญของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานเชื่อม
- รู้จักชนิดของข้อพกพร่องที่เกิดขึ้นในงานเชื่อม
- สามารถพิจารณาแยกแยะ และระบุประเภทหรือชนิดของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานเชื่อม
- อธิบายถึงสาเหตุของการเกิดข้อบกพร่อง และสามารถหาวิธีการป้องกันหรือลดข้อบกพร่องที่จะเกิดในงานเชื่อม
- อธิบายถึงกลไกการเกิดข้อบกพร่องชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในงานเชื่อม
- สามารถอธิบายหรือให้คำแนะนำถึงวิธีการตรวจสอบหาข้อบกพร่องของแนวเชื่อมเบื้องต้น
- ตระหนักและมีจิตใต้สำนึกให้ความสำคัญกับข้อบกพร่องในงานเชื่อมที่มีผลกระทบต่อสังคม
- มีจรรยาบรรณในการพิจารณาและตัดสินใจในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นแล้ว และยอมรับความคิดเห็นเมื่อต้องตัดสินใจร่วมกับเพื่อนร่วมงานหรือผู้อื่นที่เกี่ยวข้อง

"Defects" หมายถึง ข้อบกพร่อง หรืออาจเรียกว่า "ตำหนิ" ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เชื่อม
"Prevention" หมายถึง การป้องกันไม่ให้เกิดข้อบกพร่องขึ้นในชิ้นงานเชื่อม ในงานวิศวกรรมการเชื่อมทั้งสองอย่างนี้เป็นสิ่งที่เกิดควบคู่กัน วิศวกรงานเชื่อมหรือช่างเชื่อมจะต้องมีความรู้เป็นพื้นฐานถึงกลไกของการเกิดข้อบกพร่องและรู้ถึงวิธีการป้องกันสาเหตุที่ก่อให้เกิดข้อบกพร่องขึ้น จึงได้พยายามนำมาเขียนเรียบเรียงไว้ในบทนี้ ด้วยเล็งเห็นว่าถ้าช่างเชื่อมรู้ถึงสาเหตุและกลไกการเกิดของข้อบกพร่อง จะได้ป้องกันและลดโอกาสที่จะเกิดข้อบกพร่องได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นการเป้าหมายหลักของการเชื่อม เพราะเมื่อไม่มีข้อบกพร่องจะทำให้งานเชื่อมมีประสิทธิภาพสูง ช่วยลดขั้นตอนการแก้ไขข้อบกพร่อง ช่วยลดต้นทุนการผลิตชิ้นงาน และเพิ่มประสิทธิภาพของการประกอบงานเชื่อมได้สูง

อย่างไรก็ตาม เป็นที่ทราบกันดีว่าการควบคุมหรือป้องกันไม่ให้เกิดข้อบกพร่องใด ๆ ในขบวนการเชื่อมนั้นทำได้ยากมาก ด้วยเหตุเพราะตัวแปรหรือปัจจัยของการเชื่อมนั้นมีมากมาย จึงได้แต่คาดหวังว่าจะปฏิบัติการอย่างไรที่จะเป็นการลดหรือขัดขวางโอกาสที่จะนำไปสู่การเกิดข้อบกพร่องในแนวเชื่อมให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ หรือเท่าที่เป็นไปได้ จนเป็นที่มาของคำกล่าวกันเล่น ๆ ในของกลุ่มช่างเชื่อมที่ว่า " *ถ้าคุณหยุดหายใจได้ คุณก็หยุดข้อบกพร่องในการเชื่อมได้*" สิ่งที่ผู้เขียนสนับสนุนและคิดว่าคำกล่าวนี้เป็นจริงก็เพราะว่าประเภทและชนิดของข้อพกพร่องที่พบในงานเชื่อมนั้นมีมากจนอาจไม่สามารถควบคุมหรือป้องกันไม่ให้เกิดได้ทั้งหมดนั้นเอง สมาคมวิศวกรรมเครื่องกลแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society of Mechanical Engineering : ASME) ได้ทำการสังเคราะห์ข้อมูลต้นเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องมี ดังนี้ พบว่า 45% มาจากการปรับตั้งค่าของการเชื่อมไม่เหมาะสม 31% มาจากความผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงาน 10% มาจากการเลือกใช้เทคนิควิธีการไม่ถูกต้อง 9% มาจากการเลือกใช้ลวดเชื่อมไม่เหมาะสม และ 5% มาจากการเตรียมรอยต่อการเชื่อมไม่ดีพอ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสาเหตุของการเกิดข้อบกพร่องนั้นสามารถควบคุมได้ทั้งหมดขึ้นอยู่ว่าจะสามารถปฏิบัติได้ละเอียดสมบูรณ์แบบหรือไม่

เนื้อหาสาระของบทนี้ผู้เขียนใคร่ขอนำเสนอองค์ความรู้และความเข้าใจถึง ชนิด ประเภท ลักษณะรูปแบบ ขนาด รูปร่าง ความอันตราย กลไกการเกิด ตำแหน่งการเกิด และโอกาสของการเกิด ของข้อบกพร่องต่าง ๆ และพร้อมกับนำเสนอควบคู่ไปกับวิธีการ เทคนิค ยุทธวิธี เพื่อการป้องกันการเกิดข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางของวิศวกรงานเชื่อม ช่างเชื่อม หรือบุคคลที่สนใจนำไปใช้เพื่อสร้างแนวเชื่อมที่มีคุณภาพ โดยจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่าง ๆ ของข้อบกพร่องที่สำคัญและน่าสนใจ

ข้อบกพร่องจากการเชื่อม (Weld defects) เป็นผลที่เกิดขึ้นหลังจากที่โลหะผ่านขบวนการเชื่อมมาเรียบร้อยแล้ว โดยส่วนใหญ่พบว่าข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นมักเป็นลักษณะรูปแบบของความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuities) ของเนื้อโลหะที่เชื่อมกับการสูญเสียรูปทรงที่ถูกต้องไป (Changes of geometry) ข้อบกพร่องเหล่านี้ ได้แก่ รอยแตกร้าว (Cracks) โพรงอากาศ (Cavities) สารมลทินฝังใน (Inclusion) การหลอมละลายและการซึมลึกไม่สมบูรณ์ (Incomplete fusion and penetration) รูปทรงผิดรูปไม่ถูกต้อง (Incorrect shape) และข้อบกพร่องอื่น ๆ (Miscellaneous discontinuities) เป็นต้น ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าข้อบกพร่องแบบเนื้อโลหะไม่ต่อเนื่องของงานเชื่อม (Discontinuities) จะก่อให้เกิดความ

เสียหายมาก ซึ่งมีทั้งที่เห็นได้จากภายนอกและที่เกิดขึ้นอยู่ภายใน จึงต้องมีการตรวจสอบแนวเชื่อมโดยเฉพาะที่เกิดขึ้นภายในที่เรียกกันว่า การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing : NDT) ส่วนรูปทรงของแนวเชื่อมสามารถดูจากภายนอกและตรวจวัดขนาดและรูปทรงด้วยเครื่องมือวัด (Welding gauge) ในทางวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเชื่อม การที่ปฏิบัติการเชื่อมที่ไร้ซึ่งข้อบกพร่องนั้นอาจจะยากหรือมีต้นทุนการผลิตที่สูง จึงมีการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานการยอมรับข้อบกพร่องที่มีได้ขึ้น (Standard acceptance criteria) ซึ่งมีทั้งมาตรฐานของกลุ่มสหรัฐอเมริกา ASME Sec.VIII DIV.I หรือ AWS D1.1/D1.1M และ ของประเทศกลุ่มยุโรป (EN ISO 5817) หรือ EN ISO 10042 สำหรับการเชื่อมโลหะอลูมิเนียม หรือ API STD 1104 การเชื่อมท่อหรือมาตรฐานของประเทศไทย เช่น มาตรฐานการตรวจสอบรอยเชื่อมโครงเหล็กรูปพรรณด้วยวิธีแบบไม่ทำลาย มยผ. 1561–51 ถึง มยผ. 1565–51 เป็นต้น ซึ่งจะได้กล่าวถึงเกณฑ์ของการยอมรับข้อบกพร่องที่ยอมให้มีได้หรือปฏิเสธแนวเชื่อมในบทเรียนนี้ โดยจะกล่าวควบคู่ไปกับชนิดและการป้องกันข้อบกพร่องชนิดต่าง ๆ

ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับงานเชื่อมมีสาเหตุและที่มาของการเกิดที่หลากหลายปัจจัย หลากหลายรูปแบบ และหลากหลายชนิด จึงได้มีการศึกษาและรวบรวมข้อบกพร่องในรูปแบบต่าง ๆ ออกเป็นกลุ่ม จะพบว่าแบ่งออกให้เป็น 2 กลุ่มหลัก คือ กลุ่มของข้อบกพร่องภายนอก (External defects) ซึ่งหมายถึงข้อบกพร่องที่สามารถเห็นได้จากภายนอก หรือบางครั้งเรียกว่า ข้อบกพร่องผิวเปิด และ อีกกลุ่มคือ กลุ่มของข้อบกพร่องภายใน (Internal defects) ซึ่งหมายถึงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นอยู่ภายในเนื้อโลหะเชื่อมที่ไม่สามารถมองเห็นได้จากภายนอก โดยในแต่ละกลุ่มจะมีชนิดหรือรูปแบบของข้อบกพร่องที่หลากหลายมาก ดังแสดงเป็นตัวอย่างของการแบ่งกลุ่มของข้อบกพร่องใน**ตารางที่ 8.1**

ตารางที่ 8.1 การแบ่งกลุ่มตัวอย่างข้อบกพร่องภายนอกและภายในของแนวเชื่อม

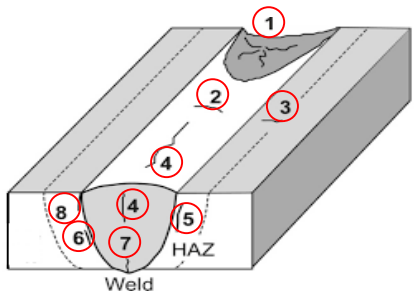
ที่มา : Welding defect–Definition, Type, Causes & Remedies , 2019

กลุ่มของข้อบกพร่อง (Group of welding defects)	
ข้อบกพร่องที่เกิดอยู่ภายนอก (External defects)	ข้อบกพร่องที่เกิดอยู่ภายใน (Internal defects)
● แตกกึ่งกลางบ่อหลอม (Crater crack)	● โพรงอากาศภายใน (Internal porosity)
● สะเก็ดเชื่อม (Spatters)	● รอยแตกภายใน (Internal cracks)
● รอยกัดแหว่ง (Undercut)	● สแลกฝังใน (Slag inclusion)
● รอยเชื่อมเกย (Overlap)	● การหลอมไม่สมบูรณ์ (Incomplete fusion)
● แนวเชื่อมบิดตัว (Distortion)	● รอยซึมลึกไม่สมบูรณ์ (Incomplete penetration)
● แนวซึมลึกมากเกิน (Excessive penetration)	● แก๊สฝังใน (Gas inclusion)
● รอยแยกชั้น (Lamination)	● รอยฉีกภายใน (Internal lamella tearing)

8.1 รอยแตกร้าวของงานเชื่อม (Weld cracking)

ข้อบกพร่องของแนวเชื่อมที่เป็นลักษณะของการแตกร้าวจัดได้ว่าเป็นข้อบกพร่องที่ร้ายแรงที่สุดและมักไม่ผ่านเกณฑ์การยอมรับในทุก ๆ มาตรฐานการตรวจสอบ โดยรอยแตกร้าวจะมีทั้งแบบที่ปรากฏ

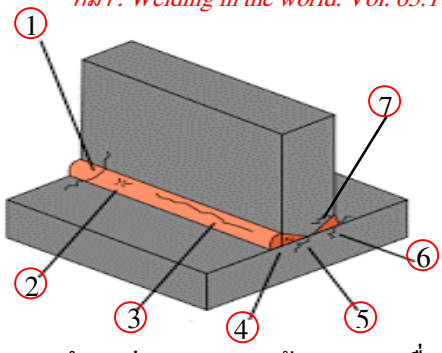
บนพื้นผิวสามารถมองเห็นได้ชัดเจนด้วยสายตา หรืออาจต้องใช้เครื่องมือเพิ่มกำลังขยายในการมองเห็น และแบบที่เกิดการแตกร้าวอยู่ภายในที่ไม่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งทั้งสองแบบสามารถเกิดได้ทั้งในตำแหน่งของแนวเชื่อม บริเวณกระทบร้อน และบริเวณของโลหะหลัก และยังพบว่าการออกแบบรอยต่อต่างกันจะมีผลต่อรูปแบบตำแหน่งของการแตกร้าวต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 8.1 (ก) และ (ข) ที่บ่งชี้ถึงโอกาสที่จะเกิดชนิดของรอยร้าว และตำแหน่งของรอยแตกร้าวของรอยเชื่อมที่ได้รับแรงเค้นเกินกำลังสูงสุดที่สามารถรับได้ ที่เป็นรอยเชื่อมแบบต่อชน (Butt weld) และรอยเชื่อมต่อมุม (Fillet weld) ตามลำดับ รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในงานเชื่อมสามารถเกิดขึ้นได้ในขณะชิ้นงานกำลังร้อนที่มักเรียกกันว่าการแตกขณะร้อน (Hot crack) ที่มักจะเกิดที่ระดับอุณหภูมิใกล้จะเสร็จสิ้นการแข็งตัวของบ่อหลอมละลาย และนอกจากนี้ยังสามารถเกิดขึ้นได้ในสภาวะที่แนวเชื่อมเย็นตัวสมบูรณ์ไปแล้ว ที่มักจะเกิดขึ้นหลังการเชื่อมงานเสร็จไปแล้ว หรือนำไปใช้งานแล้วเป็นเวลาอาจหลายวันหรืออาจหลายเดือน ที่มักเรียกการแตกร้าวนี้ว่า การแตกขณะเย็น หรือแตกแบบเย็น (Cold crack) ซึ่งในลักษณะของการแตกของทั้งสองกลุ่มนี้ สามารถแยกย่อยออกเป็นรูปแบบของรอยแตกร้าวได้อีกหลากหลายที่พิจารณาจากรูปแบบการเกิดและตำแหน่งของการเกิดรอยแตกร้าว ซึ่งจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดในหัวข้อต่อ ๆ ไป



1) การแตกร้าวปลายบ่อหลอม (Crater crack)
2) การแตกร้าวขวางแนวเชื่อม (Transverse weld crack)
3) การแตกร้าวขวางแนว HAZ (Transverse HAZ crack)
4) การแตกร้าวตามแนวเชื่อม (Longitudinal crack)
5) การแตกร้าวขณะเย็นของ HAZ (Cold HAZ crack)
6) การแตกร้าวที่ไม่หลอมละลาย (Lack of fusion crack)
7) การแตกร้าวแนวซึมลึก (Root crack)
8) การแตกร้าวที่ขอบแนวเชื่อม (Edge crack)

(ก) ตำแหน่งของการแตกร้าวบนแนวเชื่อมต่อชน (Butt weld)

ที่มา : Welding in the world. Vol. 63:1715–1732, 2019



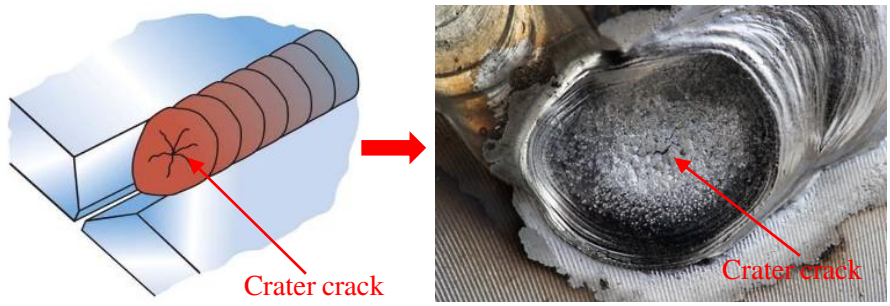
1) การแตกร้าวขวางแนวเชื่อม (Transverse weld crack)
2) การแตกร้าวกึ่งกลางบ่อหลอม (Crater crack)
3) การแตกร้าวตามแนวเชื่อม (Longitudinal crack)
4) การแตกร้าวในแนวเชื่อม (Fusion line crack)
5)การแตกร้าวแนวซึมลึก (Root crack)
6) การแตกร้าวที่ตีนแนวเชื่อม (Toe crack)
7) การแตกร้าวที่ HAZ (HAZ crack)

(ข) ตำแหน่งของการแตกร้าวบนแนวเชื่อมต่อมุม (Fillet weld)

ที่มา : Welding imperfections, 2011

รูปที่ 8.1 ตำแหน่งและรูปแบบของการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อมต่อชนและต่อมุม

1. รอยแตกร้าวปลายบ่อหลอม (Crater crack) หรือบางครั้งเรียกว่า รอยแตกกึ่งกลางบ่อหลอมละลาย ด้วยเหตุเพราะว่ารอยแตกจะเกิดขึ้นที่บ่อหลอมละลายของปลายทางสิ้นสุดแนวเชื่อม โดยจะเกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางของการหลอมเมื่อหยุดการอาร์กหรือหยุดการเติมเนื้อโลหะเชื่อมทันที ทำให้ที่บ่อหลอมของปลายแนวเชื่อมมีปริมาณเนื้อโลหะหลอมเหลวเพื่อเติมเต็มไม่มากเพียงพอ เมื่อเกิดการเย็นตัวบริเวณกึ่งกลางจะเย็นตัวที่ช้ากว่าบริเวณรอบ ๆ บ่อหลอม ซึ่งที่กึ่งกลางจำเป็นต้องมีปริมาณน้ำโลหะมากพอต่อการชดเชยเพื่อการเข็งตัว แต่กลับมีปริมาณที่น้อยเกินไป ทำให้เกิดการดึงน้ำโลหะขึ้นจนเกิดเป็นรอยยุบตัว (Shrink) ที่กึ่งกลาง พร้อมกับเกิดความเค้นขึ้นรอบทิศทางของบ่อหลอม เป็นเหตุให้เกิดรอยแตกเป็นรูปคล้ายดวงดาว (Star crack) หรือ แบบอื่น ๆ เช่นแบบตาข่าย (Network crack) ที่กึ่งกลางของบ่อหลอมละลายที่ปลายของแนวเชื่อม ลักษณะของรอยแตกร้าวจะเป็นรอยแตกแบบตื้น ๆ เท่านั้นไม่ลึกมาก และจัดอยู่ในประเภทของการแตกแบบร้อน ดังแสดงลักษณะของรอยแตกร้าวในรูปที่ 8.2 การแตกร้าวแบบนี้มีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นได้ง่ายกับการเชื่อมโลหะประภทที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวสูง เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนเนติก โดยรูปแบบการแตกจะเป็นแบบเปิดที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา หรือสามารถเลือกใช้การตรวจสอบด้วยวิธี VT



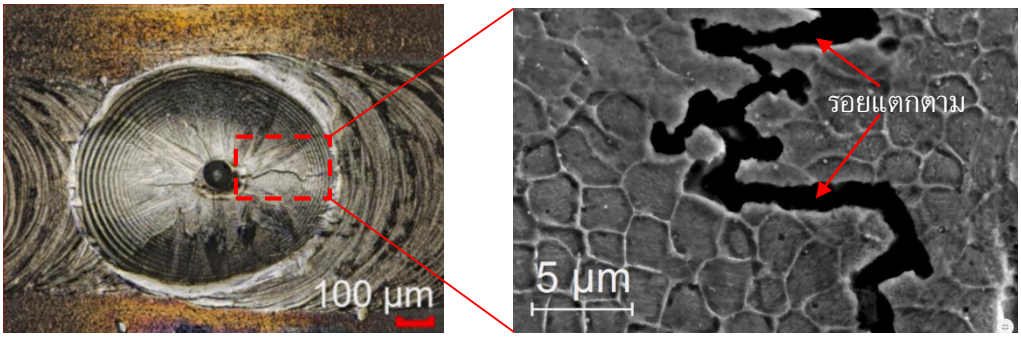
รูปที่ 8.2 รอยแตกร้าวที่บ่อหลอมละลายปลายแนวเชื่อม (Crater crack)

ที่มา : Shutterstock : Crater Crack Star Weld Joining, 2010

กลไกการแตกร้าวของ Crater crack เมื่อวิเคราะห์ในทางโลหะวิทยาพบว่ามักจะเป็นการแตกร้าวที่เกิดขึ้นตามขอบเกรน (Intergranular cracking) ซึ่งเป็นไปตามผลการทดลองวิจัยเชื่อมโลหะ Inconel 602 CA ด้วยขบวนเชื่อมเลเซอร์ ดังแสดงผลการทดลองของ Miha Kenda et al. (2021) ในรูปที่ 8.3 (ก) และ (ข) ที่แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งและรูปแบบของการแตก และขยายภาพรอยแตกให้เห็นถึงลักษณะกลไกของของแตกที่เกิดขึ้นตามบริเวณขอบของเกรน นอกจากนี้ในงานวิจัยยังอภิปรายเพิ่มเติมอีกว่ารูพรุน (Porosity) จะเป็นตัวส่งเสริมให้เกิดการแตกร้าวแบบ Crater ได้ง่ายมากยิ่งขึ้น ดังนั้น จึงเป็นแนวทางที่ต้องพิจารณาในการเลือกใช้แก๊สปกคลุมขณะเชื่อมชิ้นงานให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพเพื่อลดรูพรุนจากอากาศภายนอกจะได้ลดอัตราการแตกร้าวที่เกิดบนบ่อหลอมละลายได้

เมื่อพิจารณาจากกลไกการเกิดของการแตกร้าวก็จะพบว่าสาเหตุหลักเกิดจากการที่เนื้อโลหะหลอมเหลวไม่เติมเต็มให้มากเพียงพอ ซึ่งมักจะเกิดขึ้นกับการเชื่อมโลหะแบบไม่เติมลวดเชื่อม

(Autogenous welding) หรือการเชื่อมโลหะแผ่นบาง หรือการเชื่อมมุม (Fillet welding) เป็นต้น เพราะขบวนการเชื่อมเหล่านี้ควบคุมบ่อหลอมละลายตอนปลายแนวเชื่อมค่อนข้างยาก เนื่องด้วยเกิดความร้อนสะสมในบ่อหลอมละลายมาตลอดการเชื่อม



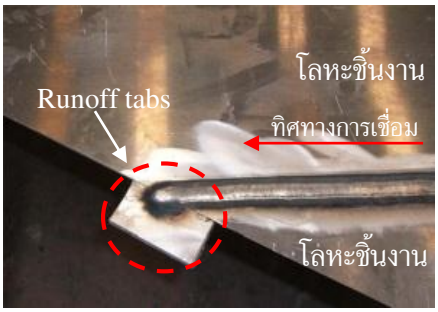
(ก) รอยแตกบ่อหลอม (Crater crack) **(ข)** ขยายรอยแตกร้าวด้วย SEM

รูปที่ 8.3 กลไกการแตกร้าวตามขอบเกรนของรอยแตกปลายบ่อหลอมละลาย (Crater crack)

ที่มา : Journal of Engineering failure Analysis, 128:105579, 2021

วิธีการป้องกันการเกิดการแตกร้าวที่กึ่งกลางของปลายบ่อหลอมละลาย กรณีที่เป็นการเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อม สามารถแก้ไขได้ง่ายด้วยการเดินวนเติมลวดเชื่อมไป–มาลงในบ่อหลอมละลายให้มากขึ้น เพื่อที่จะนำเนื้อโลหะไปชดเชยที่ต้องยุบตัวลง และทำให้บ่อหลอมนูนสูงขึ้น สำหรับกรณีของการเชื่อมโลหะที่มีความหนาและมีร่องบาก สามารถป้องกันการแตกร้าวแบบนี้ได้โดยการสร้างแผ่นโลหะรองรับเสริมที่ปลายของแนวเชื่อม ที่เรียกว่า Runoff tabs ดังแสดงในรูปที่ 8.4 (ก) และ (ข) อ้างอิงตาม Stavros Kairis (2012) เพื่อใช้เป็นตัวรองรับจุดสิ้นสุดของการเชื่อมที่อยู่นอกเหนือไปจากแนวเชื่อมที่ต้องการ วิธีการนี้ถือว่ามีประสิทธิภาพสูงมากในการป้องกันหรือการขจัดข้อบกพร่องในลักษณะนี้ โดยเฉพาะการเชื่อมงานโครงสร้างโลหะหรือท่อที่มีขนาดใหญ่ ๆ นอกจากนี้ยังมีเทคนิคการเชื่อมที่สามารถใช้ป้องกันการเกิดรอยแตกร้าวแบบนี้ได้อีกด้วย โดยอาศัยวิธีการควบคุมปัจจัยการเชื่อม เช่น

- การลดระยะอาร์กให้ชิดกับบ่อหลอมละลายเมื่อถึงจุดสิ้นสุดการเชื่อม เพราะระยะอาร์กชิดจะช่วยลดขนาดของบ่อหลอมละลายลง และลดการยุบหรือหดตัวที่รุนแรง ลดแรงเค้นดึงของเนื้อโลหะ จะช่วยลดหรือขจัดโอกาสของการที่จะเกิดการแตกร้าวแบบ Crater crack ได้เป็นอย่างดี
- การปรับมุมของหัวเชื่อมเพื่อลดขนาดบ่อหลอมลายและเพิ่มความนูนของน้ำโลหะหลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 8.5 (ก) เป็นมุมของหัวเชื่อมที่ทำการเชื่อมปกติตลอดการเชื่อมซึ่งเป็นเทคนิคแบบดัน (Push technique) แต่เมื่อจะสิ้นสุดหรือปลายของแนวเชื่อมให้ทำการปรับมุมของหัวเชื่อมเป็นเทคนิคแบบดึง (Pull technique) ดังรูป (ข) เพื่อทำการปรับลดขนาดของบ่อหลอมละลายให้เล็กลง ช่วยป้องกันการเกิดการแตกร้าวแบบ Crater ได้
- เทคนิคการเลือกขนาดของลวดเชื่อมที่เหมาะสม เพราะถ้าลวดเชื่อมเล็กมากจะส่งผลต่อปริมาณน้ำโลหะที่เพียงพอต่อการแข็งตัวของบ่อหลอมละลาย

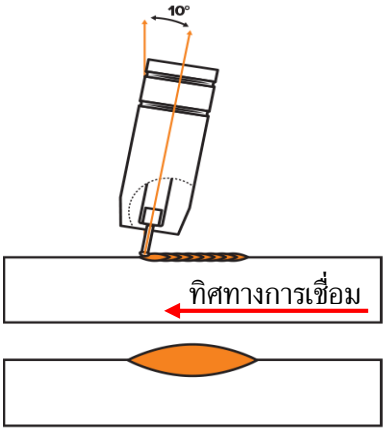


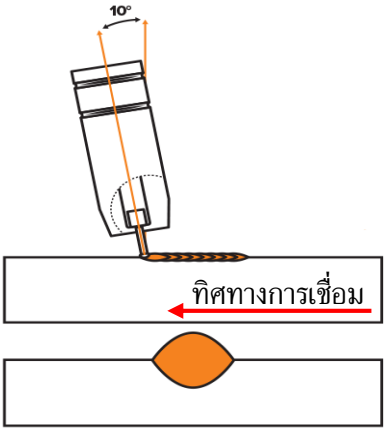


(ก) การสร้าง Runoff tab โลหะแผ่นบาง *ที่มา : Aluminum alloys MIG Welding, 2012*

(ข) การสร้าง Runoff tab โลหะแผ่นหนา *ที่มา : AWS Syracuse section, 2012*

รูปที่ 8.4 วิธีป้องกันการแตกร้าวที่ปลายบ่อหลอม (Crater crack) ด้วยการสร้าง Runoff tabs





(ก) มุมหัวเชื่อมขณะทำการเชื่อม

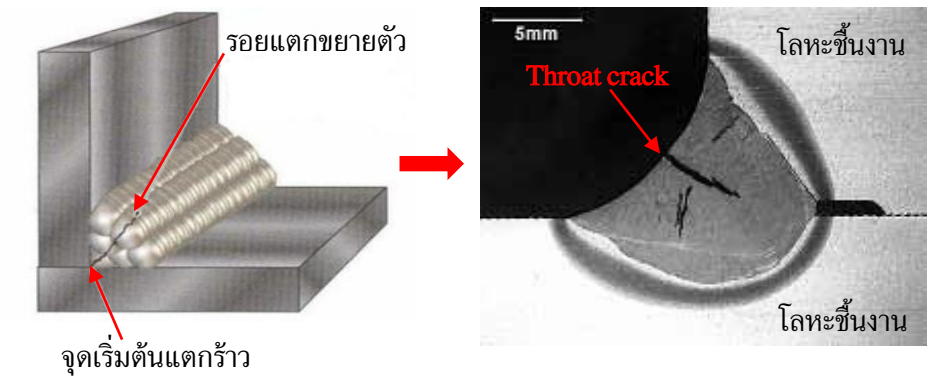
(ข) ปรับมุมหัวเชื่อมขณะสิ้นสุดรอยเชื่อม

รูปที่ 8.5 เทคนิคการปรับมุมของหัวเชื่อมเพื่อลดการแตกร้าวที่บ่อหลอม (Crater crack)

ที่มา : Unimig – The Ultimate Guide to MIG Welding, 2021

2. รอยแตกร้าวกึ่งกลางตามแนวเชื่อม (Throat crack) เป็นรอยแตกร้าวแบบเปิดผิวที่สามารถมองเห็นได้ โดยเกิดเป็นรอยแตกที่กึ่งกลาง (Throat) ของขนาดความกว้างของแนวเชื่อม และมักเป็นรอยแตกที่ไปในทิศทางเดียวกับแนวเชื่อม (Longitudinal crack) ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งการแตกขณะร้อนและการแตกขณะเย็นตัว ส่วนใหญ่จะพบในการแตกแบบร้อนมากกว่า โดยมักเริ่มต้นแตกที่รากของแนวเชื่อม (Root welding) จากนั้นจะลุกลามหรือแตกขยายออกไปสู่ผิวหน้าที่บริเวณกึ่งกลางของแนวเชื่อม มีข้อสังเกตสำหรับกรณีที่เชื่อมโลหะงานที่มีความหนามากที่ต้องทำการเชื่อมหลายแนว (Multi pass weld) พบว่าแนวแรกของการเชื่อมหรือแนวซึมลึก (Root pass weld) การเกิดแตกได้ง่าย และต้องทำการขจัดรอยแตกออกไปก่อนที่จะเชื่อมแนวถัดไป ถ้าไม่กำจัดออกหรือกำจัดออกไม่หมดจะเกิดการแตกแบบต่อเนื่องออกมาเรื่อย ๆ จนมาปรากฏเป็นรอยแตกร้าวขึ้นที่บริเวณผิวของแนวเชื่อมแนวสุดท้ายเมื่อ

เชื่อมเสร็จ ดังแสดงลักษณะของรอยแตกในรูปที่ 8.6 การแตกร้าวที่จุดกึ่งกลางตามแนวยาวของรอยเชื่อมนี้สาเหตุมาจากกระแสไฟเริ่มต้นเชื่อมต่ำเกินไป หรือมาจากการเลือกใช้ชนิดและขนาดของลวดเชื่อมไม่เหมาะสม นอกจากนี้ต้นเหตุของความชื้นหรือไฮโดรเจนขณะเริ่มเชื่อมมีมากเกินไป เป็นเหตุให้ไม่สามารถควบคุมหรือป้องกันแก๊สไฮโดรเจนที่เข้ามาปะปนอยู่ในแนวเชื่อม จนเกิดเนื้อเชื่อมที่เปราะจากไฮโดรเจน อ้างอิงจากบทความของ Phi Evans (2012)



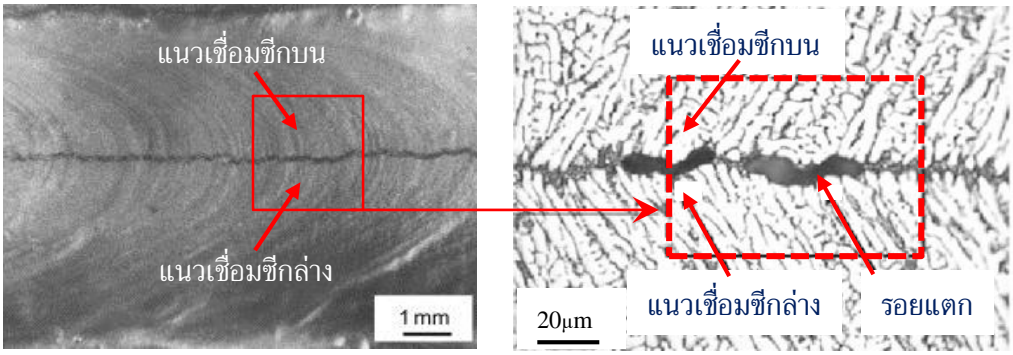
รูปที่ 8.6 รอยแตกร้าวกึ่งกลางตามยาวของแนวเชื่อม (Throat crack)

ที่มา : Weld Discontinuities, 2010

วิธีการป้องกันการเกิดที่ไม่เกิดการแตกร้าวแบบนี้ ประการแรก เป็นเรื่องของการเลือกใช้ชนิดและขนาดของลวดเชื่อมให้เหมาะสม เช่น การเลือกใช้ลวดเชื่อมที่สมบัติด้านความเหนียวสูง และประการที่สอง แนะนำให้ทำการให้ความร้อนโลหะชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม (Pre–heat) เพื่อช่วยขจัดความชื้นขจัดแก๊สไฮโดรเจน และยังช่วยเพิ่มระดับอุณหภูมิพื้นฐานให้กับการอาร์กเริ่มต้นเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มกระแสอาร์กให้สูงขึ้น ขณะเดียวกันการเพิ่มกระแสอาร์กเริ่มต้นเป็นอีกแนวทางที่สามารถนำมาใช้ลดปัญหาการแตกร้าวในลักษณะนี้ได้ นอกจากที่กล่าวมาแล้วนั้นยังมีวิธีการออกแบบรอยต่อที่เหมาะสมให้มีพื้นที่มากเพียงพอสำหรับการรองรับเพื่อให้น้ำโลหะที่เติมสามารถเย็นตัวได้โดยไม่เกิดความเค้นที่มากเกินไป (Stress concentration) จนเป็นเหตุให้เกิดการแตกร้าวที่กึ่งกลางของแนวเชื่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของการเชื่มโลหะต่างชนิดที่มีจุดหลอมเหลวต่างกัน ทำให้เกิดอัตราการระบายความร้อนเพื่อการเย็นตัวที่ต่างกัน จะส่งผลให้เกิดแรงเค้นดึงขึ้นจากการหดตัวของน้ำโลหะขณะเย็นตัว ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ได้ด้วยการใช้การอุ่นชิ้นงานช่วยในการทำให้จุดหลอมเหลวเท่ากันหรือใกล้เคียง

การตรวจสอบรอยร้าวกึ่งกลางตามแนวเชื่อมนี้ สามารถตรวจสอบได้ง่ายเพราะเป็นรอยแตกภายนอกที่รอยแตกเป็นผิวเปิดสามารถมองเห็นได้ด้วยสายตา จึงนิยมที่จะเลือกใช้วิธีการตรวจสอบได้ทั้งแบบตรวสอบด้วยสายตา (Visual Testing : VT) หรือแบบที่ใช้น้ำยาแทรกซึม (Penetrant Testing : PT) และการวิเคราะห์รอยแตกค่อนข้างง่ายไม่ซับซ้อน ด้วยเหตุเพราะลักษณะรูปแบบของรอยแตกจะเกิดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแนวเชื่อม และแตกเป็นแนวเส้นที่ยาวและค่อนข้างเป็นเส้นตรงตามยาวของ

แนวเชื่อมจะไม่ขยายออกมาในทิศทางแนวขวาง ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 8.7 ที่เป็นลักษณะของรอยแตกในการเชื่อมโลหะอลูมิเนียม – 3% ซิลิกอน



รูปที่ 8.7 ตัวอย่างลักษณะรอยแตกร้าวกึ่งกลางตามยาวของแนวเชื่อม (Throat crack)

ที่มา : Integrated mechanical metallurgical approach to modeling, 2005

3. รอยแตกร้าวใต้แนวเชื่อม (Underbead crack) รอยแตกร้าวชนิดนี้จะเกิดขึ้นที่บริเวณข้าง ๆ ของแนวเชื่อม โดยเฉพาะด้านล่างของแนวเชื่อมที่เป็นพื้นที่บริเวณกระทบร้อน ดังแสดงตำแหน่งของการเกิดในรูปที่ 8.8 ซึ่งโดยปกติรอยแตกร้าวเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะไม่ขยายตัวขึ้นไปสู่ผิวหน้าด้านบนของชิ้นงานเชื่อม ลักษณะของรอยแตกมีโอกาสเป็นได้ทั้งแบบแตกตามยาว (Longitudinal) และแตกตามขวาง (Transverse) ซึ่งขึ้นอยู่กับทิศทางของแรงเค้นในแนวเชื่อมเป็นสำคัญ อ้างอิงจากบทความของ Phi Evans (2012)

การแตกร้าวใต้แนวเชื่อมนี้จัดอยู่ในกลุ่มของการแตกเย็น (Cold cracks) ซึ่งเกิดการแตกเมื่อการเชื่อมสิ้นสุดไปแล้ว หรือนำงานเชื่อมไปประกอบใช้งานเรียบร้อยแล้ว โดยพบว่าสาเหตุหลักมาจากอิทธิพลของแก๊สไฮโดรเจนที่ละลายเข้ามาขณะเชื่อมอาจมาจากลวดเชื่อมหรือมาจากโลหะที่นำมาเชื่อม ซึ่งขณะเย็นตัวแก๊สไฮโดรเจนจะแพร่ออกไปตามทิศทางของการระบายความร้อน แต่ระบายออกไปไม่สุด ทางจะไปหยุดอยู่ที่บริเวณกระทบร้อน ซึ่งเป็นบริเวณของการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ที่มีสมบัติพื้นฐานที่มีความยืดหยุ่นต่ำ มีความแข็งสูง และมีความเปราะสูง ดังนั้น เมื่อเวลาผ่านไปหลังการเชื่อม จะเกิดการรวมตัวของแก๊สไฮโดรเจนขึ้นเพียงเล็กน้อยส่งผลให้เกิดการแตกขึ้นได้ง่าย รอยแตกที่เกิดขึ้นเป็นเส้นตรงแต่จะไม่ขยายตัว นอกจากนี้ ยังมีสาเหตุมาจากการหดตัวที่ไม่เท่ากันระหว่างการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายและเนื้อโลหะงานที่เชื่อม ก่อให้เกิดแรงเค้นขึ้นภายในและในขณะเดียวกันก็มีเฟสโครงมาร์เทนไซต์เกิดขึ้นจากการเย็นตัวเร็วที่บริเวณกระทบร้อน เมื่อแนวเชื่อมรับภาระโหลดเข้ามามากขึ้น ความเค้นรวมเพิ่มขึ้นจึงเกิดการแตกร้าวและมักเกิดการแตกที่บริเวณ HAZ ดังแสดงตัวอย่างผลจากการวิจัยทดลองเชื่อมโลหะนิกเกิลผสมเกรด 617 ที่ตรวจพบรอยแตกร้าวที่บริเวณกระทบร้อนใต้แนวเชื่อมแบบต่อชนในรูปที่ 8.9

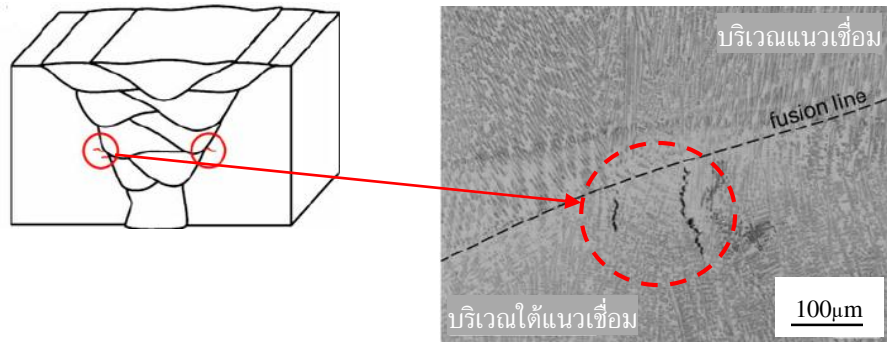
วิธีการป้องกันการแตกร้าวแบบนี้ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ประเด็นสำคัญจะเป็นการลดหรือป้องกันแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปรวมตัวในแนวเชื่อม เพราะเป็นตัวการสำคัญที่ส่งเสริมให้เกิดการแตกร้าว เช่น การเลือกลวดเชื่อมที่ปริมาณไฮโดรเจนผสมต่ำ หรือต้องทำการอบลวดเชื่อมไล่ความชื้น หรือหลีกเลี่ยงสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูงมากเกินไป ซึ่งรวมไปถึงวิธีการต่าง ๆ ที่สามารถขจัดแก๊สไฮโดรเจนออกไปได้ เช่น การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม (Pre-heating) หรือการให้ความร้อนแก่แนวเชื่อมหลังทำการเชื่อมเสร็จทันที (Post-heating) เพื่อที่จะไล่แก๊สไฮโดรเจนที่ติดมาอยู่ในแนวเชื่อมแล้วให้หนีออกไปอ้างอิงจากผลการวิจัยของ Carolin Fink & Manuela Zinke (2013)

การตรวจสอบรอยแตกร้าวที่เกิดใต้แนวเชื่อมนี้ส่วนใหญ่จะเป็นแบบรอยแตกภายใน (Internal crack) ไม่เกิดที่ผิวจึงไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาได้ อาจมีบ้างกรณีที่เกิดแตกที่ริมของของชิ้นงานที่เริ่มต้นหรือสิ้นสุดของการเชื่อม วิธีการตรวจสอบเพื่อหารอยร้าวในลักษณะนี้ต้องใช้วิธีการของ UT หรือ RT แนวเชื่อมที่เกิดใต้แนวเชื่อมนี้จะตรวจสอบค่อนข้างยาก เพราะรอยแตกมักอยู่ติดกับแนวหลอมละลายของการเชื่อม (Fusion line) และเป็นลักษณะรอยแตกแบบสั้น ๆ เล็ก ๆ ยากต่อการตรวจพบและต้องใช้ความเชี่ยวชาญในการวิเคราะห์ ดังนั้น ต้องใช้ทักษะของผู้ตรวจสอบที่มีความชำนาญสูง



รูปที่ 8.8 ตำแหน่งและลักษณะของรอยแตกร้าวชนิดที่แตกใต้แนวเชื่อม (Underbead crack)

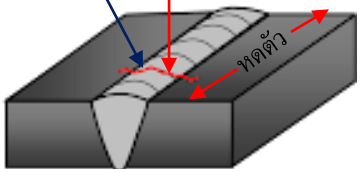
ที่มา : The most common welding defects : Causes and Remedies, 2014



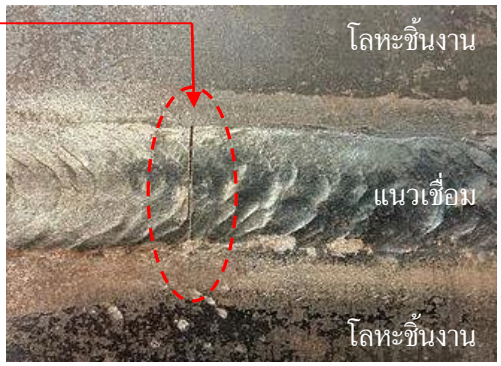
รูปที่ 8.9 การตรวจพบรอยแตกร้าวของการเชื่อมโลหะนิกเกิลผสม 617 ที่ตำแหน่งใต้แนวเชื่อม

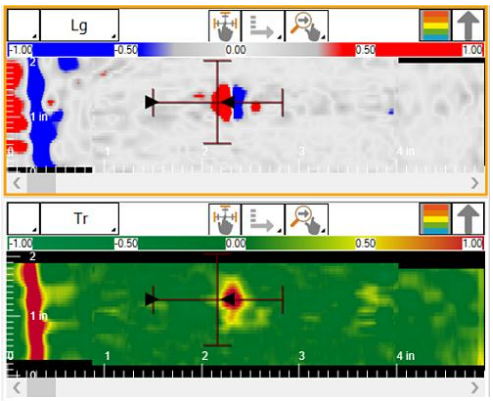
ที่มา : IIW-Journal of Weld World. Vol. 57:323-333, 2013

4. การแตกร้าวขวางแนวเชื่อม (Transverse weld crack) เป็นลักษณะของรอยแตกร้าวที่จัดอยู่ในกลุ่มของข้อบกพร่องที่เกิดอยู่ภายนอก (External defects) ผิวของรอยแตกสามารถมองเห็นได้ด้วยสายตาเหมือนกับรอยแตกที่ผิวอื่น ๆ แต่แตกต่างกันที่เป็นรอยแตกที่เกิดในแนวทิศทางขวางหรือตั้งฉากกับแนวเชื่อม และถ้าเกิดการขยายตัวรอยแตกเพิ่มขึ้นโดยจะลุกลามเข้าในโลหะหลัก (Base metal) ของทั้งสองข้าง การแตกร้าวตามขวางแนวเชื่อมนี้จัดเป็นการแตกเย็น (Cold crack) เพราะมักเกิดขึ้นเมื่อนำแนวเชื่อมไปใช้งานหรือรับภาระโหลดแล้วเกิดการแตกร้าวขึ้น สาเหตุหลักเกิดจากความเค้น ดึงอันเนื่องมาจากการหดตัวของบ่อหลอมละลายขณะเย็นตัวในทิศทางตามแนวยาวของโลหะชิ้นงานที่กระทำต่อแนวเชื่อม เมื่อความเค้นที่ค้างอยู่ผสมกับภาระโหลดที่เพิ่มขึ้น และร่วมด้วยสมบัติของแนวเชื่อมที่มีความเหนียวต่ำ ความเปราะสูง ปัจจัยร่วมเหล่านี้เป็นชนวนเหตุของการแตกร้าวในแนวทิศทางตามขวางกับแนวเชื่อม โดยมีงานวิจัยหลายกรณีศึกษาอภิปรายสรุปว่ามีอิทธิพลของปริมาณแก๊สไฮโดรเจนภายในเนื้อเชื่อมร่วมด้วย ดังในรูปที่ 8.10 ที่แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดรอยแตกร้าว และตัวอย่างรอยแตกที่พบในการเชื่อมจริง ที่มีการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยวิธีกระแสไหลวน (Eddy Current Testing : ET)



ที่มา : Welding Technology and Automotive : Crack, 2011





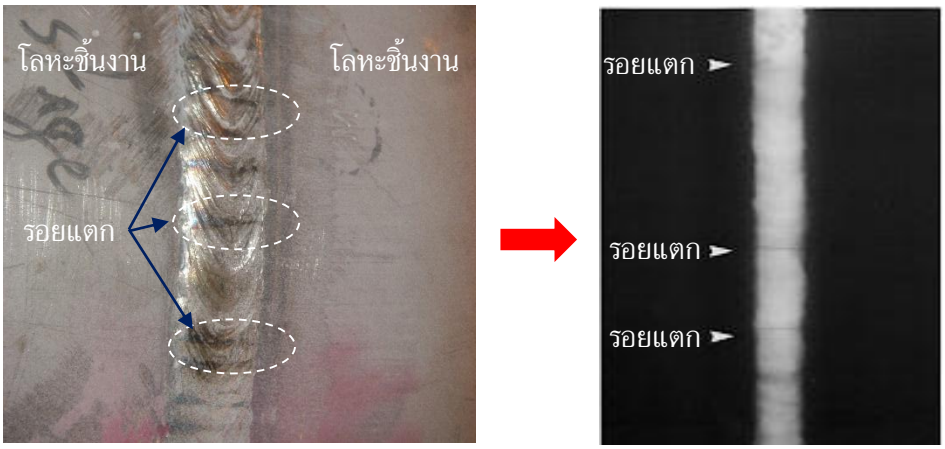
ผลการทดสอบโดยวิธีกระแสไหลวน (ET)

ที่มา : Eddyfi Technology, 2010

รูปที่ 8.10 ตำแหน่ง ลักษณะรอยแตก และการตรวจสอบรอยแตกร้าวแบบขวางแนวเชื่อม

วิธีการป้องกันการแตกร้าวในแนวทิศทางขวางแนวเชื่อม ประเด็นสำคัญจะเน้นวิธีการลดแรงเค้นดึงตามแนวยาว (ขนานแนวเชื่อม) ให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ซึ่งได้มีการเสนอแนะไว้ว่าสามารถทำได้โดยการเลือกปัจจัยการเชื่อมให้เหมาะสมโดยเฉพาะประเด็นการเลือกขนาดลวดเชื่อมที่เล็กเกินไป เลือกลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมทางเคมีที่ก่อให้เกิดการหดตัวสูง (Welding shrinkage) ผลที่ตามมาคือเกิดอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วมาก (Rapid cooling) จะเกิดความเค้นดึงที่มากภายในเนื้อเชื่อม นอกจากนี้ยังมีปัจจัยของกระแสไฟเชื่อมที่ควรต้องสูงมากเพียงพอที่จะใช้กับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมที่มีขนาดโต ๆ เพื่อที่สร้างขนาดแนวเชื่อมสุดท้ายให้มีน้ำโลหะมากพอต่อการชดเชยในหดตัวของน้ำโลหะในบ่อหลอม หรืออาจมีการอุ่นชิ้นงานโลหะก่อนเชื่อม ซึ่งช่วยในการไล่แก๊สไฮโดรเจนบริเวณผิวชิ้นงาน การเลือกกรรมวิธีการเชื่อมและออกแบบรอยต่อที่สามารถลดการสร้างแรงเค้นดึงเป็นอีกทางเลือกที่สามารถนำมาใช้ป้องกันการแตกร้าวแบบขวางแนวเชื่อมได้

วิธีการตรวจสอบสามารถเลือกใช้ได้กับการทดสอบผิวรอยแตกแบบเปิดทั้งหมด เช่น VT หรือ PT หรือ MT และยุ่งยากในการตรวจสอบและวิเคราะห์ผล ด้วยเหตุเพราะรอยแตกร้าวค่อนข้างใหญ่เป็นเส้นตรง และทิศทางตั้งฉากกับแนวเชื่อม อย่างไรก็ตามโอกาสที่จะเกิดการแตกร้าวภายในสามารถเกิดขึ้นได้แต่ค่อนข้างน้อย เพราะกลไกการหดตัวจะสร้างความเค้นแรงดึงที่ผิว ซึ่งเย็นตัวช้าสุดมากกว่าบริเวณแนวลึกของแนวเชื่อม ดังนั้น เมื่อแรงเค้นดึงด้านแนวลึกมีน้อยมักไม่เกิดการแตกแบบแนวขวาง แต่ถ้ากรณีที่มีความประสงค์ตรวจสอบการแตกร้าวแนวขวางภายในเนื้อแนวเชื่อมด้านลึก จะต้องเลือกใช้วิธีการทดสอบแบบ RT หรือ UT ดังตัวอย่างชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมที่เกิดการแตกร้าวแบบขวางแนวเชื่อม และฟิล์มเอ็กซ์เรย์จากการทดสอบแบบ RT แสดงในรูปที่ 8.11 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

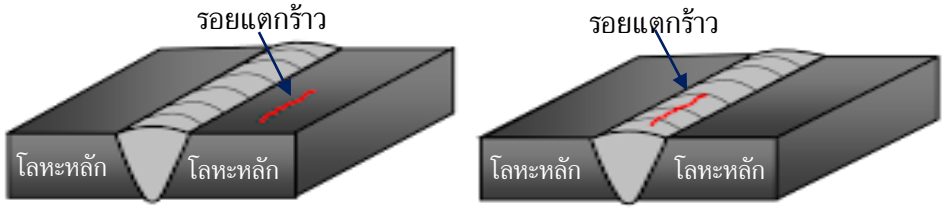


(ก) ชิ้นงานแนวเชื่อมที่ต้องการตรวจสอบแบบ RT (ข) ฟิล์มเอ็กซ์เรย์จากการทดสอบ

รูปที่ 8.11 การตรวจพบรอยแตกร้าวของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยการทดสอบแบบ RT

ที่มา : Allusion of Transverse Crackinh, 2010

5. การแตกร้าวตามยาวแนวเชื่อม (Longitudinal weld crack) เป็นการแตกร้าวที่มีลักษณะของรอยแตกเป็นไปในทิศทางเดียวกันแนวเชื่อมหรือขนานไปกับแนวเชื่อม ซึ่งเป็นรอยแตกที่จัดอยู่ในประเภทข้อบกพร่องภายนอกเพราะส่วนใหญ่สามารถเห็นรอยแตกได้จากภายนอก รอยแตกร้าวแบบนี้สามารถพบเห็นได้ 2 ลักษณะ คือ ลักษณะของรอยแตกที่เกิดขึ้นบริเวณเนื้อโลหะหลักที่นำมาเชื่อม (Longitudinal parent metal crack) และลักษณะของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบนบริเวณแนวเชื่อม (Longitudinal weld metal crack) อ้างอิงตาม Lincoln Electric Weld Cracking (2015) ดังแสดงใน รูปที่ 8.12 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) การแตกร้าวแนวยาวบนโลหะหลัก **(ข)** การแตกร้าวแนวยาวบนแนวเชื่อม

รูปที่ 8.12 ตำแหน่งและลักษณะของรอยแตกร้าวแบบตามยาวแนวเชื่อม

ที่มา : Welding Technology and Automotive : Crack, 2011

● การแตกร้าวตามแนวยาวที่เกิดขึ้นบริเวณเนื้อโลหะหลักที่นำมาเชื่อม (Longitudinal parent metal crack) ส่วนใหญ่เกิดที่บริเวณกระทบร้อนที่เกิดจากการอิทธิพลของเชื่อม (HAZ) หรือบริเวณรอยต่อของบริเวณกระทบร้อน (HAZ) กับบริเวณไม่กระทบร้อน (Non–HAZ) โดยสาเหตุที่สำคัญเกิดจากผลของความเค้นในการหดและขยายตัวของเนื้อโลหะเมื่อทำการเชื่อม โดยเฉพาะการที่เกิดมีโครงสร้างโลหะที่มีความแข็งสูงขึ้นเนื่องจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของบริเวณกระทบร้อน ซึ่งมีสมบัติทางกลที่แตกต่างกันกับบริเวณไม่กระทบร้อน (โครงสร้างเดิมของโลหะเชื่อม) และมีความสามารถทนแรงเค้นดึงจากการหดตัวไม่เท่ากันจึงเกิดการแตกร้าวขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นที่น่าสังเกตว่าลักษณะของรอยแตกจะเป็นแนวเส้นตรงยาวขนานไปกับแนวเชื่อม และขนานกับแนวของ HAZ ซึ่งรอยแตกมักพบที่ตำแหน่งของรอยต่อระหว่างของโซนโครงสร้างใหม่กับโครงสร้างเดิม ดังแสดงลักษณะของรอยแตกร้าวในรูปที่ 8.13 (ก) การแตกร้าวตามแนวยาวบนโลหะหลักที่เชื่อมนี้ บางครั้งพบว่าเกิดจากข้อบกพร่องจากการรีดขึ้นรูปของโลหะ (Rolling forming) ที่เกิดจากสารมิลทินโดนรีดฝังทับอยู่ภายใน หรือบางครั้งเกิดจากการที่เลือกวางทิศทางของการรีดโลหะที่ขนานกับทิศทางการเชื่อม ซึ่งตั้งฉากกับแรงเค้นดึงขณะหดตัว ดังแสดงทิศทางของเกรนที่เกิดจากการรีดขึ้นรูปของเนื้อโลหะที่นำมาทำการเชื่อมในทิศทางตามแนวยาว (Longitudinal grain direction) และทิศทางในแนวขวาง (Transverse grain direction) ในรูปที่ 8.14 ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งเสริมให้เกิดการแตกร้าวทั้งสิ้นจึงต้องทำการป้องกัน

วิธีการป้องกันรอยแตกร้าวในลักษณะนี้ไม่ซับซ้อนเน้นการลดแรงเค้นที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของความร้อนจากการเชื่อมด้วยวิธีการอุ่นโลหะหลักก่อนทำการเชื่อม (Pre–heat base metal) หรือ วิธีการ

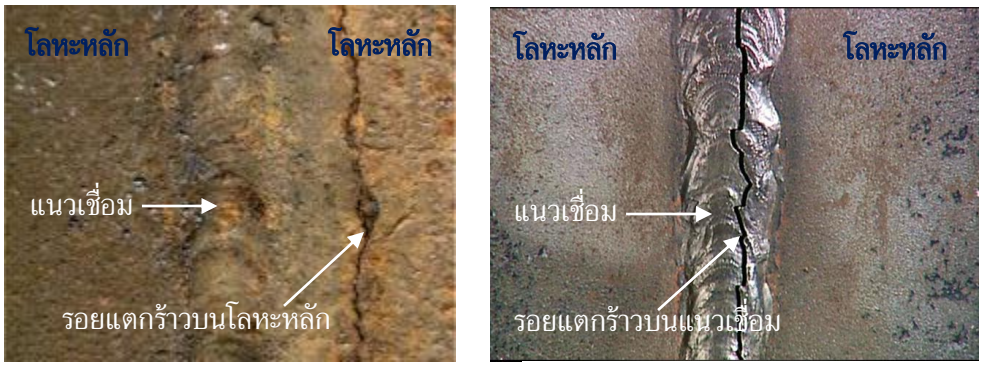
ปรับให้อัตราการเย็นตัวเป็นไปอย่างช้า ๆ เพื่อต้องการให้โลหะหลักได้ระบายความร้อนออกไปอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งอัตราการเย็นตัวที่ช้านี้จะช่วยลดการเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่มีความแข็งสูง (Martensite structure) ที่เกิดบริเวณกระทบร้อนลง และจะลดโครงสร้างที่มีความแข็งนี้ได้มากสำหรับการเชื่อมเหล็กที่มีปริมาณของธาตุคาร์บอนต่ำ และนอกจากนี้ยังสามารถใช้วิธีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสร็จทันที (Post–heat base metal) เพื่อสร้างความสม่ำเสมอของความเค้นภายในเนื้อโลหะเชื่อม สำหรับการตรวจสอบเนื้อเกรนโลหะจากทิศทางของการรีดขึ้นรูปที่ไม่ให้มีทิศทางไปในแนวเดียวกันกับแนวเชื่อมหรือขนานกับแนวเชื่อม จะช่วยลดอัตราการเกิดการแตกร้าวในลักษณะนี้ที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับอิทธิพลของความร้อนจากการเชื่อมได้เป็นอย่างดี

วิธีการตรวจสอบรอยร้าวจะต้องใช้มากกว่าหนึ่งวิธี ด้วยเหตุเพราะรอยแตกร้าวมีทั้งส่วนที่เป็นแบบเปิดผิวที่สามารถมองเห็นได้ด้วยสายตาและส่วนที่ลึกลงไปในเนื้อโลหะ ดังนั้น จึงต้องมีทั้งวิธีการตรวจสอบแบบ VT หรือ PT หรือ MT ที่ร่วม กับ UT หรือ RT สำหรับการวิเคราะห์ผลค่อนข้างแม่นยำ เนื่องจากการประมวลผลของหลายวิธีการตรวจสอบร่วมกัน และแนวโน้มของรูปแบบการแตกจะเป็นแนวเส้นตรงยาว อ้างอิงข้อมูลจาก TWI Lid WIS 5 (2003)

- การแตกร้าวตามแนวยาวที่เกิดขึ้นบริเวณบนแนวเชื่อม (Longitudinal weld metal crack) ลักษณะรูปแบบหรือทิศทางของรอยแตกจะเหมือนกับการแตกที่บริเวณโลหะหลัก ต่างกันที่รอยแตกนี้จะแตกบนเนื้อโลหะแนวเชื่อม (Fusion zone) เป็นแนวยาวไปในทิศทางเดียวกันกับแนวเชื่อม ซึ่งบนตำแหน่งของแนวเชื่อมนี้อาจเกิดที่แนวกึ่งกลางของแนวเชื่อม (Center line) หรือเอียงไปข้างหนึ่งข้างใดก็ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยชี้นำในการเกิดแรงเค้นดึง การแตกร้าวแบบนี้เกิดจากความเค้นดึงจากการหดตัวของน้ำโลหะเหลวขณะแข็งตัวเป็นปัจจัยสำคัญ ดังแสดงลักษณะของรอยแตกในรูปที่ 8.13 (ข) โดยส่วนใหญ่กรณีเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน (Similar welding) ความเค้นดึงทั้งสองข้างของโลหะหลักเท่ากันการแตกร้าวจึงเกิดที่กึ่งกลางของแนวเชื่อม ส่วนจุดเริ่มต้นของรอยร้าวเริ่มจากด้านผิวบนแล้วลุกลามไปข้างล่าง หรือเริ่มต้นจากข้างล่างแล้วลุกลามขึ้นมาด้านบนนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ เช่น จากการวิจัยทดลองเชื่อมแนวแรกที่ตำแหน่งราก (Root pass) ด้วยลวดเชื่อมขนาดเล็ก ๆ พบว่าเมื่อเชื่อมทับแนวถัดมาหลาย ๆ แนว (Multi pass) เกิดการแตกร้าวที่แนวแรกแล้วรอยแตกจะขยายตัวขึ้นมาสู่ผิวแนวเชื่อมด้านบน ซึ่งผลการตรวจสอบได้ข้อสรุปว่าเกิดจากแนวเชื่อมแรกมีขนาดเล็กมากเกินไป ความร้อนจากการเชื่อมของแนวถัดมาเกิดแรงดึงหดตัวมากขึ้น เนื้อเชื่อมที่น้อยไม่สามารถรับแรงต้านได้จึงเกิดการแตกร้าวขึ้นด้านล่าง รูปแบบกลไกของการเกิดรอยแตกร้าวแบบนี้จะเรียกกันว่า “Full centerline”

สำหรับกรณีที่เชื่อมโลหะต่างชนิดกัน (Dissimilar welding) มีโอกาสที่อาจจะไม่เกิดตรงกึ่งกลางของแนวเชื่อม ขึ้นอยู่กับว่าด้านใดของโลหะหลักจะต้านแรงเค้นดึงของการหดตัวได้มากกว่ากัน ซึ่งมีปัจจัยทางด้านโลหะวิทยางานเชื่อม เช่น ชนิดของโลหะเชื่อม การแข็งตัว ส่วนผสมทางเคมี ขนาดความหนา การระบายความร้อน และการออกแบบรอยต่อ เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างผลการวิจัยทดลองเชื่อมโลหะอลูมิเนียมผสมต่างเกรดกัน ระหว่าง AL7075 ที่เหมาะกับงานโครงสร้างเครื่องบิน กับ

AL6061 ที่ออกแบบมาสำหรับงานยานยนต์ โดยใช้ลวดเชื่อมต่างชนิดกัน พบว่าเกิดการแตกร้าวขึ้น ซึ่งไม่เกิดตรงกึ่งกลาง แต่เกิดในพื้นที่ฝั่งของโลหะอลูมิเนียมเกรด AL6061 ดังแสดงในรูปที่ 8.15



(ก) การแตกร้าวแนวยาวบนโลหะหลัก **(ข)** การแตกร้าวแนวยาวบนแนวเชื่อม

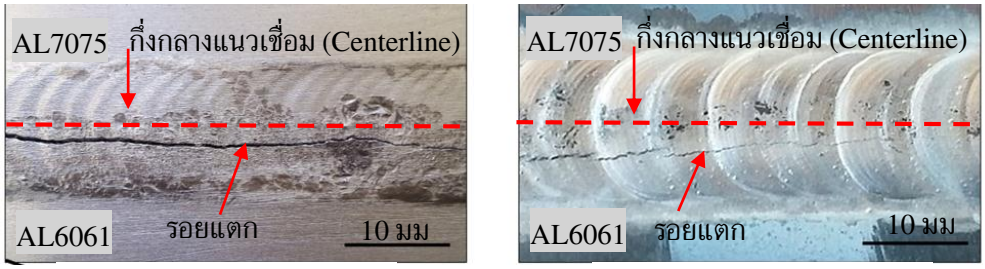
รูปที่ 8.13 ตัวอย่างชิ้นงานเชื่อมที่เกิดการแตกร้าวแบบตามยาวบนโลหะหลัก และบนแนวเชื่อม

ที่มา : Welding Answers : Why welds crack, 2009



รูปที่ 8.14 แสดงทิศทางของเนื้อเกรนที่เกิดขึ้นตามทิศทางของการรีดขึ้นรูป

ที่มา : Matt Kerster in Metals : Metal grain direction, 2012



(ก) เชื่อมด้วยลวด AA7075 **(ข)** เชื่อมด้วยลวด ER5356

รูปที่ 8.15 รอยแตกงานเชื่อมโลหะอลูมิเนียมผสม 7075 ด้วยลวดเชื่อมต่างชนิดกัน

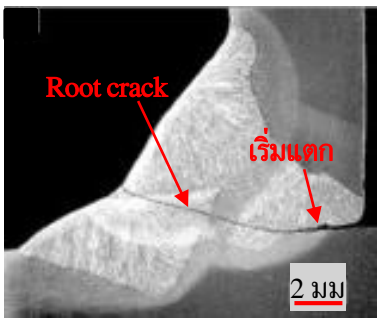
ที่มา : Nature Communications Vol. 10.1038 : S41467–018–07989–y, 2019

สำหรับการป้องกันการแตกร้าวในแนวยาวตรงกึ่งกลางแนวเชื่อมนี้ ประเด็นสำคัญคือการหาวิธีการที่จะลดหรือขจัดแรงเค้นดึงที่เกิดจากการหดตัวให้หายไป หรือยอมให้มีน้อยที่สุดซึ่งมีเทคนิคที่

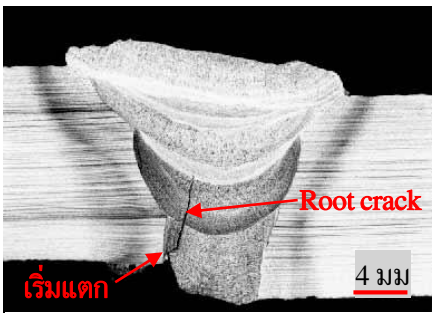
หลากหลายที่สามารถทำได้ เช่น การอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมเพื่อลดช่องว่างความแตกต่างของอุณหภูมิที่โลหะหลักและที่บ่อหลอมละลาย ส่วนในกรณีที่เชื่อมโลหะต่างชนิดจะต้องหาวิธีการที่จะทำให้โลหะทั้งคู่มีอัตราการเย็นตัวที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด เช่น การเอียงหัวเชื่อมเพื่อให้บ่อหลอมละลายสมดุลทั้งสองข้าง เมื่อเย็นตัวจะสมดุลแรงเค้นในแนวเชื่อม หรือการสร้างอุปกรณ์เสริม เช่น ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบแก๊สหล่อเย็น เพื่อควบคุมอัตราการระบายความร้อนกรณีที่เชื่อมโลหะต่างชนิดที่มีสมบัติการเป็นตัวนำความร้อนที่ต่างกัน เป็นต้น สำหรับการแตกร้าวที่แนวราก (Root) จะต้องเลือกใช้ลวดที่มีขนาดโตมากพอที่จะมีเนื้อเชื่อมรองรับการเชื่อมแนวถัดไปได้ นอกจากที่กล่าวมายังมีปัจจัยของการเชื่อมซึ่งถือว่าสำคัญที่ต้องกำหนดให้ถูกต้องทั้ง กระแสไฟเชื่อม ความเร็วเชื่อม ระยะอาร์ก แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม ลวดเชื่อมและปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น สำหรับวิธีการตรวจสอบรอยแตกร้าวบนแนวเชื่อมที่มีลักษณะของรอยแตกที่เป็นเส้นตรงตามแนวยาว จะตรวจและวิเคราะห์ได้ไม่ยาก โดยเฉพาะกรณีที่เป็นรอยแตกแบบผิวเปิดออกสู่ภายนอกสามารถเลือกใช้ได้หลายวิธี ทั้ง VT PT และ MT เป็นต้น

6. การแตกร้าวที่รากและขอบแนวเชื่อม (Root and toe crack) การแตกร้าวของทั้งสองลักษณะนี้เกิดขึ้นที่บริเวณด้านล่างหรือด้านใต้ของรอยเชื่อม โดยมีกลไกของการเกิดที่เหมือนกัน คือ จุดเริ่มต้นของรอยร้าวจะอยู่ที่ตำแหน่งขอบรอยต่อระหว่างแนวเชื่อม (Weld metal) กับโลหะหลัก (Base metal) ซึ่งการแตกร้าวที่รากและที่ขอบหรือตีนของแนวเชื่อมนี้สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งการเชื่อมต่อแบบต่อชน (Butt joint) และแบบต่อมุม (Fillet joint) และมักเกิดกับแนวเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมเสร็จสิ้นมาแล้วหลายชั่วโมงหรือหลายวัน ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของการแตกร้าวแบบเย็น (Cold crack) โดยจะได้กล่าวในรายละเอียดของการแตกร้าวทั้งสองลักษณะดังต่อไป

- การแตกร้าวที่รากของแนวเชื่อม (Root crack) เป็นการแตกร้าวที่สามารถพบได้ทั้งการเชื่อมที่ออกแบบรอยต่อแบบต่อมุมและแบบต่อชน ดังแสดงในรูปที่ 8.16 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยส่วนใหญ่ที่พบมักจะเป็นการแตกที่เกิดขึ้นหลังจากที่เชื่อมชิ้นงานเสร็จสิ้นแล้วเป็นเวลานาน บางรอยแตกใช้เวลา



(ก) รอยแตกแบบต่อมุม (Fillet joint)

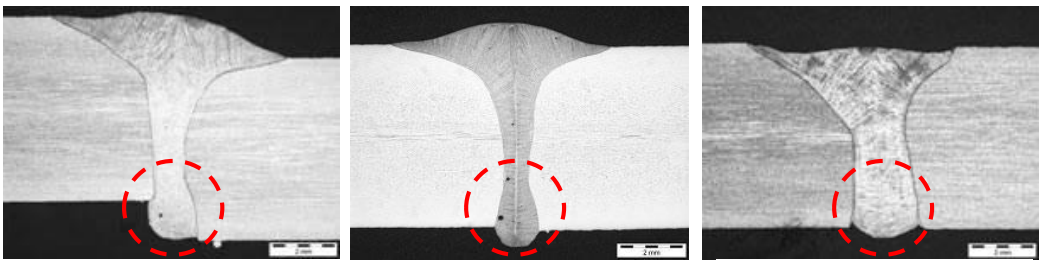


(ข) รอยแตกแบบต่อชน (Butt joint)

รูปที่ 8.16 รอยแตกร้าวที่รากแนวเชื่อมของการเชื่อมแบบต่อมุมกับการเชื่อมแบบต่อชน

ที่มา : ALTAIR –Weld Structures, 2011

หลายสัปดาห์หรือหลายเดือน จึงจัดอยู่ในกลุ่มของการแตกแบบเย็น แต่อาจมีบ้างในบางครั้งที่อาจพบรอยแตกลักษณะนี้ที่เกิดการแตกขณะที่ชิ้นงานกำลังเย็นตัวที่เรียกว่า “การแตกร้อน” ที่เกิดจากความผิดพลาดของการออกแบบรอยต่อเป็นสำคัญ เช่น การออกแบบรอยต่อที่เกิดการเยื้องศูนย์ของรอยต่อ (Misalignment) แล้วเกิดการบิดตัวอย่างรุนแรง หรือเกิดจากส่วนของแนวซึมลึกที่เกินออกไปมากจนเกิดซอกมุมแหลมขึ้น (Excess penetration) หรือเกิดจากแนวเชื่อมรากซึมลึกไม่สมบูรณ์ (Incomplete root penetration) ดังแสดงในรูปที่ 8.17 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ เป็นต้น อย่างไรก็ตามกลไกการแตกร้าวที่รากของแนวเชื่อมนี้จะคล้ายกันหรือเหมือนกันก็ว่าได้ กล่าวคือ เริ่มต้นแตกที่ขอบหรือมุมด้านล่างของรอยต่อซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความเค้นสูงสุด (Stress concentration) หรือที่เข้าใจกันง่าย ๆ ว่าเป็นบริเวณที่มีมุมแหลม ๆ หรือซอกเล็ก ๆ นั้นเอง จากนั้นแตกรอยร้าวก็ลุกลามเข้าไปในเนื้อเชื่อมจนเกิดความแตกหักในที่สุด (Fracture)



(ก) รอยต่อเยื้องศูนย์ (ข) รอยซึมลึกมากเกินไป (ค) รอยซึมลึกไม่สมบูรณ์

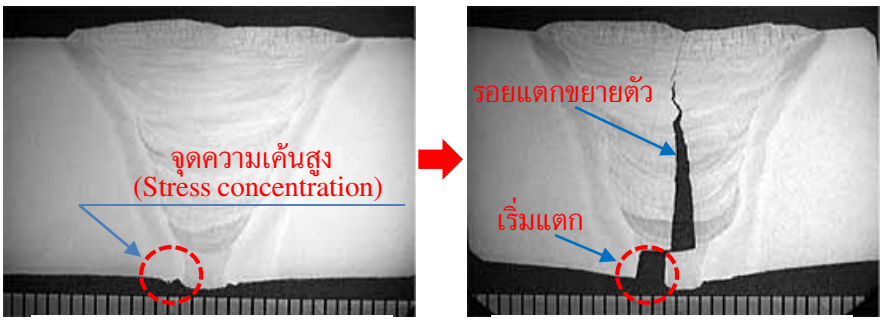
รูปที่ 8.17 ลักษณะของรอยต่อที่มีความไวต่อการเริ่มต้นแตกร้าวที่รากแนวเชื่อม

ที่มา : TWI–Increasing the tolerance to Fit–Up gap, 2012

การแตกร้าวที่รากของแนวเชื่อมส่วนใหญ่เป็นรูปแบบของการแตกร้าวขณะชิ้นงานเย็น หรือแตกแบบเย็น (Cold crack) ซึ่งจากการศึกษารวบรวมผลของทดลองวิจัยพบว่า เกิดจากเหตุร่วมของ 3 ประการหลักที่สำคัญ ประการแรก เกิดจากความบกพร่องของการออกแบบรอยต่อและแนวเชื่อม ประการที่สอง เกิดจากภาระโหลดที่ได้รับ และประการที่สาม เกิดจากอิทธิของแก๊สไฮโดรเจนที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อเชื่อมซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญมาก ด้วยเพราะแก๊สไฮโดรเจนจะแพร่ซึมเข้ามารวมตัวกันจนเกิดเป็นแรงดันแก๊สภายใน ผนวกกับอีกสองประการที่กล่าวมาทำให้เริ่มเกิดการแตกร้าวขึ้นและแตกหักเสียหาย ดังแสดงตัวอย่างการเกิดและขยายตัวของรอยแตกที่ลุกลามเข้าสู่เนื้อเชื่อมในการเชื่อมเหล็กกล้าผสมสูง (High alloy steel) หลังจากการนำไปรับภาระโหลดมา โดยเปรียบเทียบกับแนวเชื่อมก่อนและหลังการนำไปใช้งานจนเกิดความเสียหาย ในรูปที่ 8.18 (ก) และ (ข)

การควบคุมปัจจัยหรือเลือกใช้เทคนิคการเชื่อมที่เหมาะสมจะช่วยลดการแตกร้าวที่เกิดที่แนวรากได้เป็นอย่างดี ด้วยเพราะตัวการที่ทำให้เริ่มเกิดรอยร้าวมาจากความไม่สมบูรณ์ของการเชื่อม ดังนั้นถ้าสามารถควบคุมการเชื่อมให้ได้แนวเชื่อมที่สมบูรณ์จะลดหรือขจัดปัญหาการแตกร้าวได้ ซึ่งปัจจัยหรือ

เทคนิคการเชื่อมที่สืบค้นและรวบรวมได้พอจะสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 8.2 หรือเทคนิคการลดความไม่สมบูรณ์ของแนวรากด้วยวิธีการใช้แผ่นรองหลัง (Backing strip/Backing bar) ก่อนการเชื่อม



(ก) รอยเชื่อมก่อนนำไปใช้งาน (ข) รอยเชื่อมหลังการนำไปใช้

รูปที่ 8.18 การเกิดและการขยายตัวของการแตกร้าวที่รากแนวเชื่อม

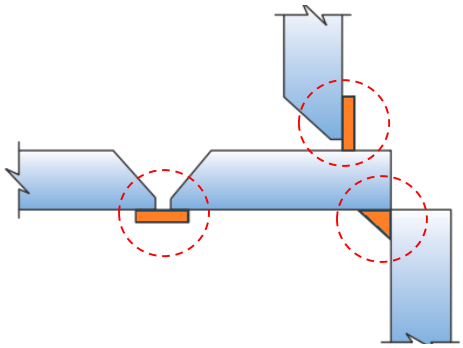
ที่มา : TWI–Strain and sulfide stress cracking in pipeline girth welds, 2005

ตารางที่ 8.2 ปัจจัยหรือเทคนิคการป้องกันการแตกร้าวที่รากของแนวเชื่อม (Root weld)

ที่มา : KOBELCO–Cold cracks in weld metal, 2008

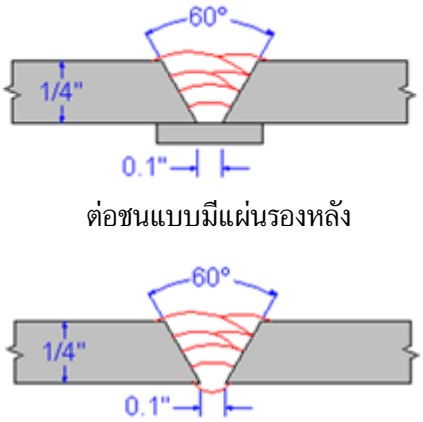
ปัจจัยหรือเทคนิคการเชื่อม	จุดประสงค์
● การอุ่นโลหะชิ้นงานก่อนเชื่อม (Pre–heat of base metals)	เพื่อให้อัตราเย็นตัวที่ช้า ช่วยลดแรงเค้นจากการหดตัวขณะแนวเชื่อมเย็นตัว
● รักษาอุณหภูมิระหว่างแนวเชื่อม (Inter–pass temperature of welding)	เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้แตกต่างกันน้อย ช่วยรักษาสมดุลแรงเค้นที่เกิดขึ้นภายใน
● การอุ่นแนวเชื่อมหลังการเชื่อม (Post–heat of weld metal)	เพื่อให้แก๊สไฮโดรเจนแพร่ออกจากเนื้อเชื่อมและคลายความเครียดของแนวเชื่อม
● เลือกใช้ขบวนการเชื่อมที่ลดไฮโดรเจนได้ดี (Selected welding process)	เลือกใช้ TIG แทน MMAW ที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันแก๊สได้ดีกว่า
● เลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีไฮโดรเจนต่ำหรือต้องผ่านการอบ (Selected of consumable)	เพื่อลดปริมาณไฮโดรเจนที่จะเข้าไปรวมอยู่ในแนวเชื่อม ซึ่งเข้าไปตัวอยู่โดยตรงในเนื้อเชื่อม
● เลือกใช้แก๊สปกคลุมที่มีความชื้นต่ำ (Selected of shielding gases)	เพื่อขจัดหรือลดโอกาสที่แก๊สไฮโดรเจนจะเข้าไปรวมตัวกับน้ำโลหะขณะแข็งตัว
● ออกแบบรอยต่อที่ลดมุมแหลมหรือซอกเล็ก ๆ (Design of weld joint)	เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดจุดรวมความเค้นสะสมที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งของรอยเชื่อม
● เลือกใช้วิธีทางความร้อนเพื่อลดความเค้นตกค้าง (Heat treatment weld metal)	เพื่อใช้ความร้อนไปช่วยลดหรือขจัดความเค้นที่ตกค้างในโครงสร้างของเนื้อเชื่อม

ซึ่งจะได้แนวซึมลึกที่ไม่เกิดจุดบกพร่องที่เป็นมุมแหลมอันจะก่อให้เกิดความเค้นสูง ดังแสดงตัวอย่างการออกแบบแผ่นรองหลังของการเชื่อมในแบบรอยต่อต่าง ๆ ในรูปที่ 8.19 (ก) และรูป (ข) แสดงตัวอย่างเปรียบเทียบด้านราก (Root) ของการออกแบบต่อชนที่ใช้กับไม่ใช้แผ่นรองหลัง



(ก) การออกแบบรอยต่อใช้แผ่นรองหลัง

ที่มา : AMARINE – Backing in welding, 2015



ต่อชนแบบมีแผ่นรองหลัง

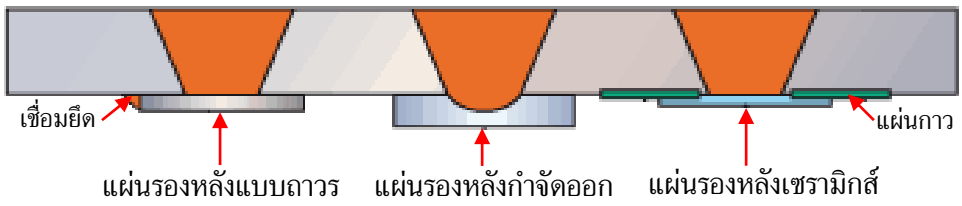
ต่อชนแบบไม่ใช้แผ่นรองหลัง

(ข) เปรียบเทียบการใช้แผ่นรองหลัง

ที่มา : Upfront welding inspection considerations, 2010

รูปที่ 8.19 การใช้เทคนิคแผ่นรองหลังเพื่อลดความไม่สมบูรณ์ด้านรากของแนวเชื่อม

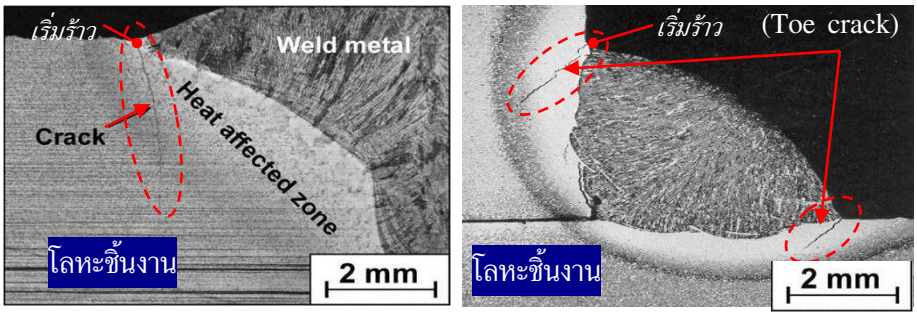
เทคนิคการใช่แผ่นรองหลังที่นิยมใช้กันมีสามแบบ ดังแสดงในรูปที่ 8.20 แบบแรกจะเป็นแผ่นรองหลังแบบถาวรที่หลอมละลายกลายเป็นแนวเชื่อมไม่มีการกำจัดออก จะนิยมใช้วัสดุชนิดเดียวกันกับงานที่เชื่อม แบบที่สองจะเป็นแผ่นรองหลังกำจัดออก จะนิยมใช้กับการเชื่อมงานที่หนาต้องการแนวซึมลึกที่มาก แบบนี้จะใช้วัสดุรองหลังที่หนาเพื่อรองรับน้ำโลหะของบ่อหลอมละลายและแผ่นรองก็เกิดการหลอมละลายบางส่วน โดยหลังจากเชื่อมเสร็จจะต้องมีการกำจัดออกจากแนวเชื่อม ส่วนแบบที่สามเป็นแบบกำจัดออกเช่นกันแต่แผ่นรองไม่เกิดการหลอมละลาย โดยจะใช้วัสดุชนิดเซรามิกส์ที่ไม่หลอมละลายติดกับแนวเชื่อม (Non–melting) การใช้แผ่นรองหลังทั้งสามแบบนี้มีประโยชน์มากสำหรับการเชื่อมโลหะที่มีความหนาและมีร่องบากที่กว้างมาก และขจัดปัญหาความไม่สมบูรณ์ของแนวเชื่อมด้านรากได้ค่อนข้างดี โดยเฉพาะการลดความเค้นที่เป็นต้นเหตุหลักของการแตกร้าวที่ด้านรากของแนวเชื่อม



รูปที่ 8.20 ชนิดของการเลือกใช้แผ่นรองหลังการเชื่อม (Backing strip)

ที่มา : AMARINE – Backing in welding, 2015

● การแตกร้าวที่ขอบของแนวเชื่อม (Toe crack) เป็นรอยแตกร้าวที่เกิดบริเวณด้านหน้าของแนวเชื่อม (Face side) มีโอกาสเกิดขึ้นได้เสมอของการเชื่อมต่อทั้งแบบต่อชน (Butt joint) และแบบต่อมุม (Fillet joint) ดังแสดงลักษณะของรอยแตกของทั้งสองแบบของการต่อ ในรูปที่ 8.21(ก) และ (ข) ตามลำดับ แต่ส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นกับการเชื่อมแบบต่อมุมมากกว่า รูปแบบของรอยแตกจะเป็นแบบข้อบกพร่องภายนอกที่สามารถสังเกตหรือมองเห็นด้วยสายตาหรือแว่นขยาย และเกิดที่ตำแหน่งขอบของรอยเชื่อมที่เป็นรอยต่อระหว่างเนื้อโลหะเชื่อมกับเนื้อโลหะหลัก ซึ่งมักเป็นอาณาบริเวณของผลกระทบร้อน (HAZ) รอยแตกร้าวจะเริ่มต้นที่ผิวภายนอกจากนั้นก็ลุกลามเข้าไปข้างในเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่องจนกว่าจะเกิดการแตกหักในที่สุด อ้างอิงจากข้อมูลการวิเคราะห์ของ Sandeep Anand (2017)



(ก) รอยแตกขอบของรอยต่อชน (Butt joint) (ข) รอยแตกขอบของรอยต่อมุม (Fillet joint)

รูปที่ 8.21 รอยแตกร้าวที่ขอบของแนวเชื่อม (Toe crack)

ที่มา : AMARINE – Backing in welding, 2015

การแตกหักที่ขอบของรอยเชื่อมนี้เกิดขึ้นได้ง่ายกับการเชื่อมต่อแบบที่ต่อเป็นตัว T โดยรอยแตกจะเกิดที่ขอบของแนวเชื่อม ซึ่งบางครั้งอาจเรียกว่า “ตีนของรอยเชื่อม (Toe weld)” สาเหตุสำคัญของการแตกเกิดจากความอ่อนแอของโครงสร้างที่บริเวณกระทบร้อน ที่เมื่อมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมาสะสมอยู่บริเวณส่วนของก้อนเกรนที่มีขนาดใหญ่ (Grain coarsened) ร่วมกับความเค้นดึงที่ตกค้างอยู่ภายในจากการเย็นตัว โดยพบว่ารอยแตกลักษณะนี้มีโอกาสที่จะเกิดขึ้นที่ขอบข้างเดียว (Single toe crack) หรืออาจเกิดขึ้นทั้งสองข้างของขอบรอยเชื่อม โดยขึ้นอยู่กับทิศทางของแรงเค้นและภาระโหลดที่ได้รับจากการใช้งาน ดังแสดงผลการวิจัยทดสอบหาโอกาสของการเกิดรอยแตกร้าวด้วยวิธี Fatigue bending test โดยพบว่ารอยแตกร้าวที่ขอบนี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้แตกต่างกัน เมื่อทิศทางของการรับแรงที่กระทำแตกต่างกัน ดังแสดงเปรียบเทียบผลการทดสอบ ในรูปที่ 8.22 โดยรูป (ก) เป็นแนวเชื่อมที่สมบูรณ์หลังการเชื่อมเสร็จสิ้นจะปราศจากรอยแตกร้าว รูป (ข) ผลการทดสอบที่เกิดการแตกร้าวเพียงด้านเดียว และ รูป (ค) เป็นผลการทดสอบที่เกิดการแตกร้าวทั้งสองด้านของขอบแนวเชื่อม สำหรับสาเหตุอื่น ๆ ที่ร่วมด้วยจะเหมือนกับกลไกการแตกร้าวที่รากของแนวเชื่อม (Root crack) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

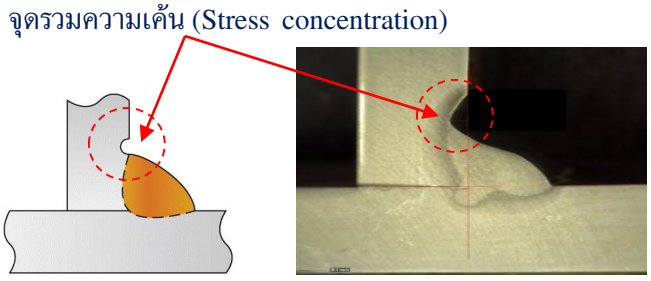
การควบคุมความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมบริเวณขอบผิวด้านบนมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพราะเป็นตำแหน่งเริ่มต้นของการเกิดรอยร้าว ซึ่งถ้าผิวหน้ารอยเชื่อม (Face weld) เกิดมีขอบหรือมีมุมแหลม ๆ ที่เป็นจุดสะสมความเค้น (Stress concentration) ก็จะส่งเสริมให้เกิดการเริ่มแตกร้าวได้ง่าย ดังแสดงใน รูปที่ 8.23 ที่เป็นข้อบกพร่องที่จะต้องไม่เกิดขึ้น หรือถ้าเกิดขึ้นแล้วก็ต้องซ่อมแซมให้หายไป ดังนั้น การสร้างแนวเชื่อมที่มีความสม่ำเสมอของผิวหน้าหรือปราศจากข้อบกพร่องใด ๆ ก็เป็นลดโอกาสของการแตกร้าวที่ตำแหน่งขอบของแนวเชื่อมนี้ได้ ซึ่งอ้างอิงผลการทดลองของ Minhaj M. Alam et al. (2009)



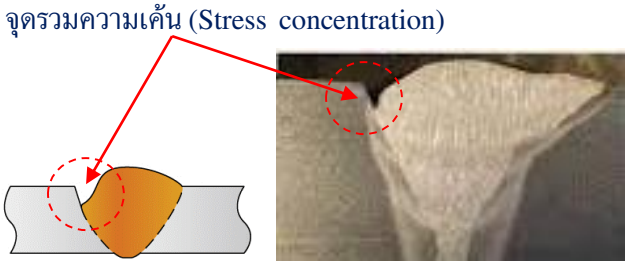
(ก) รอยเชื่อมสมบูรณ์ (ข) รอยเชื่อมแตกข้างเดียว (ค) รอยเชื่อมแตกสองข้าง

รูปที่ 8.22 แสดงลักษณะของการเกิดรอยแตกร้าวที่ขอบของแนวเชื่อม (Toe crack)

ที่มา : Journal of Materials Science, ID 43268653, 2009



(ก) ข้อบกพร่องที่ขอบรอยเชื่อมต่อมุม

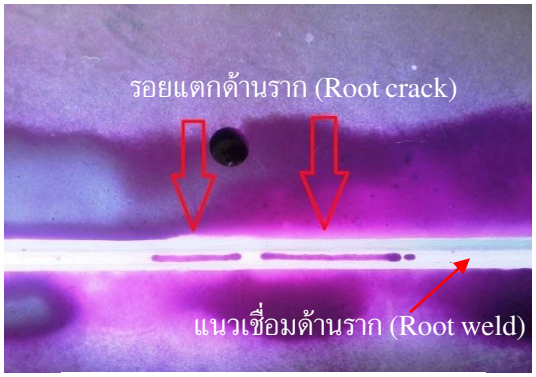


(ข) ข้อบกพร่องที่ขอบรอยเชื่อมต่อชน

รูปที่ 8.23 ข้อบกพร่องบนผิวหน้าแนวเชื่อมที่เป็นจุดรวมความเค้นสูง และเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกร้าวที่ขอบของแนวเชื่อม (Toe crack)

ที่มา : Automated Welding Basics, 2011

การตรวจสอบรอยแตกร้าวของแนวเชื่อม สำหรับรอยแตกร้าวที่เกิดบริเวณราก (Root crack) และรอยแตกร้าวที่เกิดบริเวณขอบ (Toe crack) ของแนวเชื่อมนั้นจะมีวิธีการตรวจสอบที่เหมือนกัน เพราะมีรูปแบบของการแตกที่คล้ายกันมากเพียงอยู่ในตำแหน่งที่เกิดต่างกัน โดยมีลักษณะของรอยแตกเป็นแบบผิวเปิด (External crack) ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยสายตาหรืออาจใช้เครื่องมือช่วยขยายกรณีที่รอยแตกมีขนาดเล็กสามารถเลือกใช้วิธีการตรวจสอบแบบ VT หรือ PT หรือ MT เพื่อตรวจสอบในแนวยาวของรอยแตก ส่วนในแนวลึกเข้าในเนื้อเชื่อมไม่ว่าจะเป็นรอยแตกที่รากหรือที่ขอบจะต้องใช้วิธีการตรวจสอบแบบ UT หรือ RT เข้ามาพิจารณาผลร่วมกัน ดังแสดงเป็นตัวอย่างของการตรวจสอบด้วยวิธี PT ของรอยแตกที่เกิดบริเวณด้านรากและเกิดที่บริเวณขอบด้านบนของแนวเชื่อม ในรูปที่ 8.24 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) รอยแตกร้าวที่ด้านรากแนวเชื่อม
ที่มา : Welding & NDT, 2017

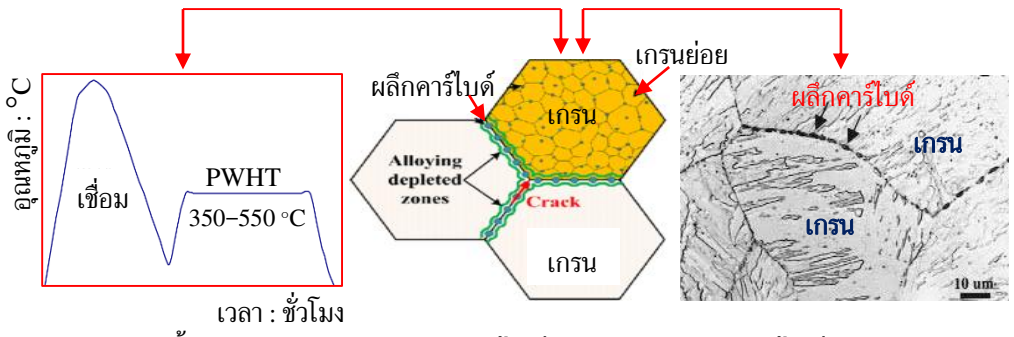


(ข) รอยแตกร้าวที่ขอบแนวเชื่อม
ที่มา : Qnet-Dye Penetrant Testing, 2013

รูปที่ 8.24 ตัวอย่างการตรวจสอบรอยแตกที่ด้านรากและบริเวณที่ขอบแนวเชื่อมด้วยวิธี PT

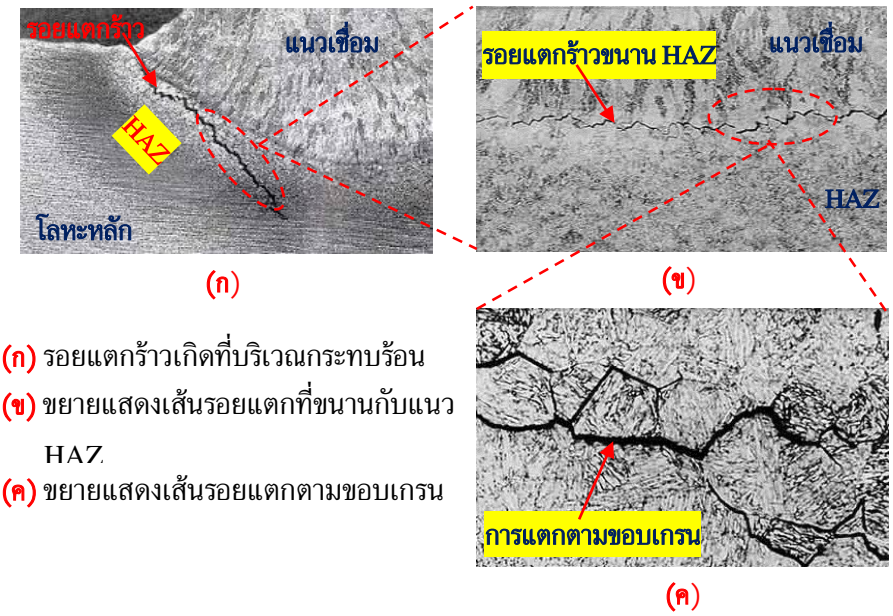
7. การแตกร้าวเมื่อได้รับความร้อนซ้ำ (Reheat crack) เป็นการแตกร้าวที่เกิดจากการที่แนวเชื่อมได้รับอิทธิพลของความร้อนอีกครั้งหลังการเชื่อมเสร็จสิ้น เช่น จากการอุ่นชิ้นงานหลังการเชื่อม (Post weld heat treatment : PWHT) หรือการอบคลายความเครียด (Stress relief annealing) ของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก หรือวิธีการทางความร้อนอื่น ๆ ที่นำความร้อนไปกระทำต่อแนวเชื่อมหลังการเชื่อม เป็นต้น การแตกร้าวในลักษณะนี้จะเกิดกับการเชื่อมโลหะกลุ่มของเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (HSLA) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของธาตุ โครเมียม โมลิบดินัม วานาเดียม และนิโอเบียม ซึ่งธาตุเหล่านี้เป็นตัวส่งเสริมให้เกิดรอยร้าว กล่าวคือ เมื่อทำการเชื่อมโลหะผสมที่มีธาตุดังกล่าวผสมอยู่เสร็จสิ้นแล้วทำการให้ความร้อนหลังการเชื่อม (Reheating) ซึ่งปกติจะอยู่ที่อุณหภูมิระหว่าง 350 ถึง 550 °C ซึ่งที่ระดับอุณหภูมินี้จะเกิดการตกผลึกของธาตุผสมดังกล่าว (Precipitation) ตามบริเวณขอบเกรนและจะเกิดได้มากเมื่อเกรนมีขนาดที่หยาบหรือเกรนโต (Coarse

grained) ผลึกตามขอบเกรนจะเป็นผลึกของคาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูง จึงก่อให้เกิดรอยแตกร้าวได้ง่าย ดังแสดงกลไกการตกผลึกตามขอบเกรนในรูปที่ 8.25 ซึ่งขบวนนี้จะเกิดขึ้นที่บริเวณผลกระทบร้อน และอาจเกิดกับการเชื่อมเสริมผิวหน้า (Cladding weld) เป็นสำคัญ จากรูปโดยลำดับกลไกของการเกิดจะเริ่มที่การนำชิ้นงานหลังการเชื่อมเสร็จไปทำการให้ความร้อน (PWHT) ซึ่งเป็นการให้ความร้อนซ้ำ ผลของความร้อนทำให้ธาตุผสมเกิดการตกผลึกเป็นคาร์ไบด์ตามขอบเกรน และเกิดได้ง่ายและปริมาณมากที่ก้อนเกรนขนาดใหญ่ ๆ โดยเฉพาะตำแหน่งที่บริเวณกระทบร้อน (HAZ) ด้วยผลึกของคาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูงมีความเหนียวต่ำ ทำให้สมบัติที่ตำแหน่งขอบเกรนด้านทานการรับแรงได้น้อยลง ดังนั้น เมื่อแนวเชื่อมมีแรงมากระทำที่ไม่ต้องมากเกินจะเกิดการแตกร้าวทันที และในรูปที่ 8.26 แสดงถึงตัวอย่าง



รูปที่ 8.25 การให้ความร้อนซ้ำและเกิดการตกผลึกของคาร์ไบด์ตามขอบเกรน

ที่มา : Journal of Materials Engineering and Performance, Vol.23 : 1231–1239, 2014



(ก) รอยแตกร้าวเกิดที่บริเวณกระทบร้อน

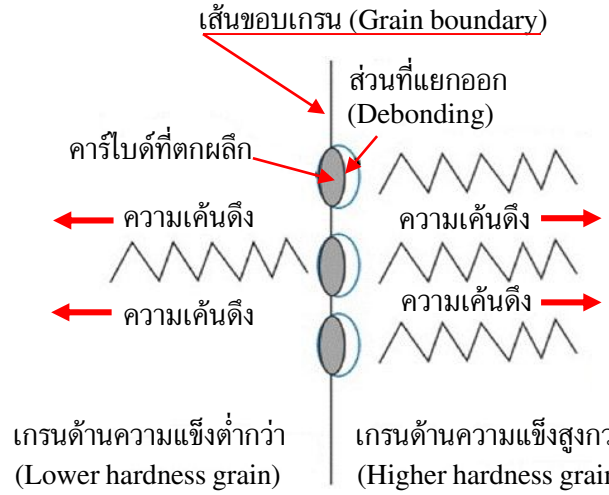
(ข) ขยายแสดงเส้นรอยแตกที่ขนานกับแนว HAZ

(ค) ขยายแสดงเส้นรอยแตกตามขอบเกรน

รูปที่ 8.26 ตำแหน่งการเกิดและกลไกของการแตกร้าวตามขอบเกรนจากการให้ความร้อนซ้ำ

ที่มา :TWI–Defects/Imperfections in welds –Reheat cracking, Vol.23 : 1231–1239, 2011

ของการเกิดการแตกร้าวจากการให้ความร้อนซ้ำของชิ้นงานแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก พบว่าการแตกร้าวจะเริ่มเกิดที่ขอบด้านหน้าของแนวเชื่อม (Face weld) ตรงบริเวณเส้นหลอมละลาย (Fusion line) จากนั้นลุกลามเข้ามาภายใน ดังรูป (ก) โดยเป็นที่น่าสังเกตว่ารอยแตกจะร้าวมาในทิศทางที่ขนานกับบริเวณของผลกระทบร้อนดังรูป (ข) ซึ่งมีลักษณะของการแตกเป็นแบบซิกแซกไปตามขอบของก้อนเกรน (Grand boundary) จะเรียกรูปแบบของการแตกร้าวนี้ว่า “การแตกตามขอบเกรน (Intergranular crack)” ดังแสดงในรูป (ค) ที่เป็นผลกระทบมาจากอิทธิพลของคาร์ไบด์ที่มีพฤติกรรมชอบตกผลึกอยู่ตามขอบเกรนจากการอุ่นชิ้นงานหลังการเชื่อม (PWHT) ที่เรียกกลไกการเกิดการแตกร้าวแบบนี้ว่า “การแตกจากการให้ความร้อนซ้ำ (Reheat crack)” ซึ่งจากคำอธิบายถึงขบวนการของการเกิดรอยแตกร้าวที่เกิดจากการให้ความร้อนซ้ำนั้น สามารถที่จะเขียนเป็นแผนภาพกลไกของการแตกตร้าวตามขอบเกรนได้ดังแสดงในรูปที่ 8.27



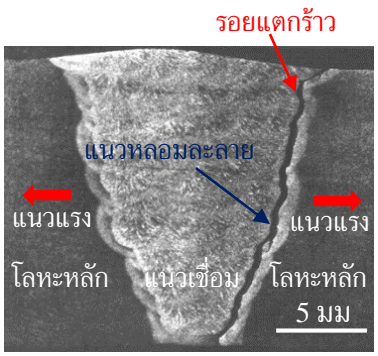
รูปที่ 8.27 กลไกของการแตกร้าวตามขอบเกรนจากการให้ความร้อนซ้ำบนแนวเชื่อม (Mechanism of reheat cracking)
ที่มา : Korean Journal Metals and Materials, Vol.56, No.8 : 580–588, 2018

รูปแบบการแตกร้าวในลักษณะนี้จะสามารถพบได้บ่อยในปัญหาของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก (ซีรีย์ 300) ทั้งหมด อาจรวมไปถึงกลุ่มของดูเพล็กซ์ (Duplex stainless steels) ด้วย เหตุเพราะโลหะเหล็กกล้าผสมกลุ่มนี้มีโครงสร้างพื้นเป็นเฟสออสเทนไนต์ (Austenite matrix) เมื่อนำไปเชื่อม ความร้อนที่ข้าง ๆ บ่อหลอมละลายที่มีความร้อนสูง เมื่อเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะเกิดเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ หรือเบนไนต์โดยอัตโนมัติ ซึ่งมีความแข็งสูงเกิดที่บริเวณกระทบร้อน เป็นปัญหาของสมบัติทางกลและประจวบเหมาะกับที่โดยพื้นฐานเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีสมบัติด้านความเหนียวจากการคืบตัวที่อุณหภูมิสูงได้ไม่ดี (Creep ductility) จึงต้องนำไปผ่านขบวนการทางความร้อนเพื่อต้องการสลายความแข็งของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ให้ลดลงลง ที่เรียกว่า “Solution annealing process” แต่พบว่าเกิดผลกระทบข้างเคียงที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการแตกร้าว จากการให้ความร้อนซ้ำได้ ซึ่งเป็นปัญหาที่ช่างเชื่อมต้องระมัดระวังและต้องควบคุมขบวนการทางความร้อนอย่างดี

การป้องกันและการตรวจสอบรอยแตกร้าว สำหรับแนวทางการป้องกันประการแรก ถ้าช่างเชื่อมสามารถเลือกได้วัสดุเชื่อมได้ จะต้องทำการเลือกวัสดุโลหะที่มีส่วนผสมของธาตุที่มีความไวต่อการตกผลึกเป็นคาร์ไบด์ตามขอบเกรนให้ผสมอยู่น้อยที่สุดจำพวก Cr Mo V และ Nb เป็นต้น ประเด็นถัดมาจะเป็นเรื่องของการควบคุมปัจจัยการเชื่อมให้ได้แนวเชื่อมที่สมบูรณ์ ไม่ให้เกิดข้อบกพร่องที่เป็นจุดความเค้นสูงสุดขึ้นโดยเฉพาะที่ขอบของแนวเชื่อมด้านบน (Toe weld) และในระดับโครงสร้างจุลภาคจะต้องควบคุมความร้อนในการเชื่อม (Heat input) ที่จะไปช่วยลดโอกาสที่ทำให้เกิดเกรนขนาดใหญ่ขนาดที่บริเวณของ HAZ และประเด็นที่มีผลโดยตรงคือ วิธีการให้ความร้อนซ้ำ (PWHT) โดยใช้เทคนิคการป้อนความร้อนที่ระดับของอุณหภูมิต่ำ ๆ และ ช้า ๆ ในช่วงตอนแรก (First step) จากนั้นค่อยเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว (Second step) เพื่อเจตนาหลีกเลี่ยงช่วงอุณหภูมิวิกฤติที่จะเกิดกับวัสดุ (ยอมให้เกิดได้น้อยที่สุด) จากนั้นจะต้องรักษาระดับของอุณหภูมิความร้อนให้ลดต่ำลงอย่างสม่ำเสมอจนถึงอุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตาม ในขณะที่แช่ไว้ที่อุณหภูมิสูงนั้นก็ต้องรักษาระดับของอุณหภูมิสูงสุดไว้ให้คงที่ ซึ่งต้องไม่สูงมากเกินไปที่จะไปส่งเสริมให้เกิดการแพร่ของคาร์ไบด์ไปตกผลึกยังขอบเกรนได้ง่ายขึ้น สำหรับการตรวจสอบรอยแตกร้าวค่อนข้างทำได้ง่าย เพราะเป็นรอยแตกร้าวแบบผิวเปิด และมีตำแหน่งกับทิศทางการแตกร้าวที่ชัดเจนไม่ซับซ้อน ส่วนใหญ่สามารถมองเห็นจากสายตาหรือเครื่องมือที่เพิ่มกำลังขยาย ส่วนระดับของความลึกของรอยแตกเข้าไปในเนื้อเชื่อมต้องใช้วิธีการตรวจสอบวิธีในแนวลึก ซึ่งในทางปฏิบัติจำเป็นต้องใช้วิธีการตรวจสอบหลายวิธีร่วมกัน ได้แก่ วิธีการตรวจสอบแบบ VT, PT, MT ร่วมกับ UT และ RT เป็นต้น

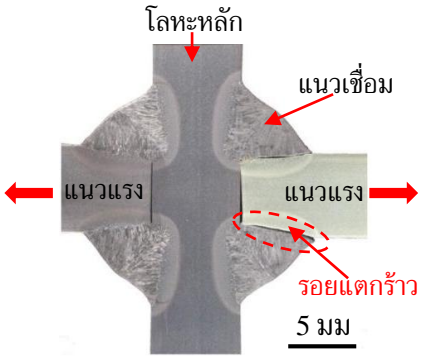
8. การแตกร้าวแนวหลอมละลาย (Fusion line crack)/(Weld interface crack) เป็นลักษณะรูปแบบของการแตกร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณแนวรอยต่อระหว่างส่วนที่หลอมละลาย (Weld pool) กับส่วนที่ไม่หลอมละลาย (Base metal) หรือที่เรียกบริเวณนี้ว่า “Interface zone” รอยแตกร้าวจะแตกเป็นเส้นตรงไปตามแนวเส้นของการหลอมละลายแนวเชื่อม รอยแตกร้าวสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งแบบเปิดที่สามารถเห็นได้จากภายนอก หรือรอยแตกที่เกิดอยู่ภายใน ดังแสดงตัวอย่างของรอยแตกร้าวในรูปที่ 8.28 (ก) แสดงถึงรอยแตกร้าวที่เกิดในกรณีการเชื่อมแบบต่อชน และ รูป (ข) เป็นรอยแตกร้าวที่เกิดในกรณีการเชื่อมแบบมุม ต้นเหตุของการแตกร้าวในลักษณะนี้เกิดจากความอ่อนแอของโครงสร้างของแนวเชื่อมที่แตกต่างกันที่อยู่ติดกัน กล่าวคือ เป็นความแตกต่างของโครงสร้างที่เกิดขึ้นใหม่ในบ่อหลอมละลายของแนวเชื่อมกับโครงสร้างเดิมของโลหะหลัก ซึ่งเห็นได้ชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 8.29 ที่เป็นแนวเส้นยาวขนานไปตามแนวเชื่อม ดังนั้น เมื่อโครงสร้างมีความแตกต่างกันจะส่งผลต่อความสามารถของสมบัติทางกล โดยเฉพาะด้านความเค้นดึงหรือความเค้นดัดจะแตกต่างกันไปด้วย เมื่อรับภาระโหลดโครงสร้างเกิดการยืดตัวได้ไม่เท่ากันจึงเกิดการฉีกของรอยต่อที่แนวหลอมละลาย จนเกิดเป็นรอยแตกร้าวขึ้น การแตกร้าวในลักษณะนี้จะพบเจอได้มากกับกรณีเป็นการเชื่อมโลหะต่างชนิด (Dissimilar welding) เพราะนอกจากจุดอ่อนแอของแนวหลอมละลายที่เป็นปกติแล้ว การใช้วัสดุโลหะต่างชนิดจะยังสร้างความแตกต่างของโครงสร้างที่แนวหลอมละลายของทั้งสองด้านของแนวหลอมละลายที่แตกต่างกัน

อีกด้วย ดังตัวอย่างการความแตกต่างของแนวเส้นหลอมละลายในการทดลองวิจัยเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก เกรดซีรีย์ 200 (204Cu) กับเกรดซีรีย์ 300 (304) ดังแสดงในรูปที่ 8.29 พบว่าแนวหลอมละลายด้านโลหะ 304 จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรนที่โตมากกว่าด้านโลหะ 204Cu จึงทำให้โอกาสที่จะเกิดการแตกร้าวแนวหลอมละลายมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าการแตกร้าวที่แนวหลอมละลายนี้ยังมักเกิดขึ้นกับการเชื่อมโลหะเพื่อเสริมผิวหน้า (Buttering welding) ดังแสดงในรูปที่ 8.30 โดยจะแตกร้าวด้านที่ติดกับโลหะหลัก ซึ่งสาเหตุก็เกิดจากพฤติกรรมของการเชื่อมโลหะต่างชนิดดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งมีระดับของค่าความเค้นดึง (Stress tension) ที่เข้ามาร่วมด้วย เนื่องจากโดยทั่วไปการเชื่อมโลหะต่างชนิดแนวเชื่อมก็จะมีอัตราการหดตัวจากการแข็งตัวที่ไม่เท่ากัน หรือบางครั้งการแตกร้าวในลักษณะนี้ก็สามารถพบเห็นได้จากกรณีการเชื่อมโลหะที่ต่างขนาดความหนา หรือความแตกต่างในการออกแบบเตรียมรอยบากหน้างาน เป็นต้น



(ก) รอยแตกร้าวแนวหลอมละลายแบบต่อชน

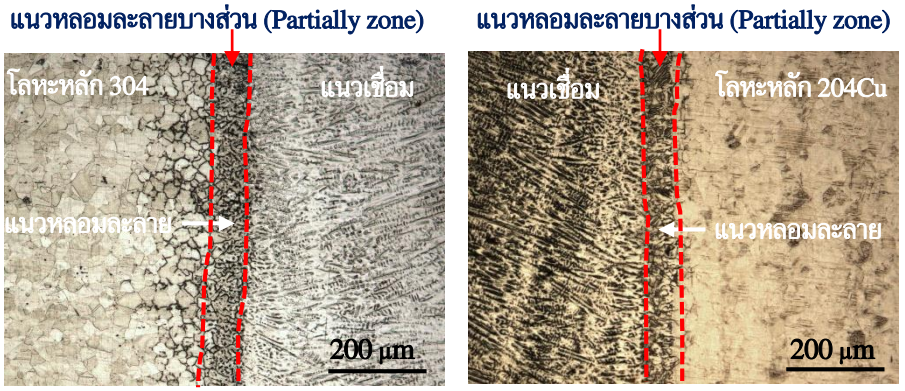
ที่มา : ECCC Creep Conference. 21–23, 2009



(ข) รอยแตกร้าวแนวหลอมละลายแบบต่อมุม

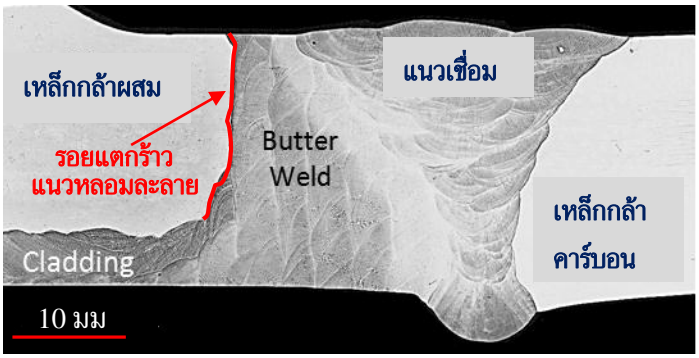
ที่มา : Welding in the world. 62:985, 2018

รูปที่ 8.28 ลักษณะของรอยแตกร้าวที่เกิดบริเวณของแนวหลอมละลาย (Fusion line crack)



รูปที่ 8.29 ลักษณะของแนวเส้นหลอมละลาย (Fusion line) / Interface zone

ที่มา : Wichan Chuaiphan and et.al., JMR&T Vol. 9(3) : 5174–5183, 2020

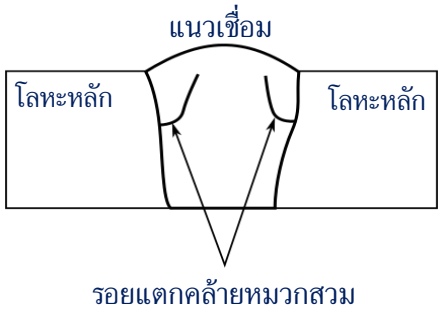


รูปที่ 8.30 ลักษณะของการแตกร้าวตามแนวเส้นหลอมละลายของการเชื่อมเสริมผิวหน้า (Buttering)
ที่มา : M.F. Dodge and H.B. Dong. Proceeding conference, ASME 31st ,2012

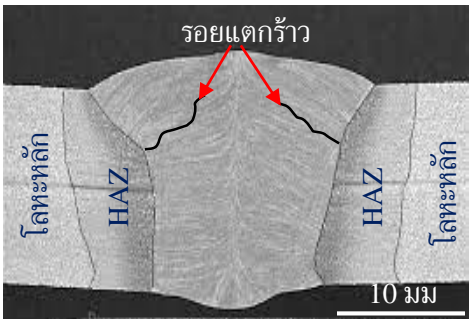
นอกจากรอยแตกร้าวตามแนวหลอมละลายที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น พบว่ายังมีการแตกร้าวในลักษณะที่คล้าย ๆ กันที่ก่อให้เกิดความเสียของแนวเชื่อม คือ การแตกร้าวที่เริ่มแตกที่บริเวณกึ่งกลางของแนวหลอมละลายแล้วลุกลามไปในทิศทางขึ้นสู่ผิวด้านบน ซึ่งรูปทรงของรอยแตกมีลักษณะคล้ายกับหมวกสวมหัวจึงเรียกรอยแตกร้าวแบบนี้ว่า “Hat cracking” หรือบางครั้งมีการเรียกรอยแตกร้าวแบบนี้ว่า “Mushroom cracking” ด้วยเพราะบางคนมองว่ามันคล้ายกับดอกเห็ด ดังแสดงรูปทรงของรอยแตกบนชิ้นงานชื่อมในรูปที่ 8.31 รอยแตกร้าวแบบนี้สาเหตุเกิดจากความผิดพลาดของการตั้งค่าปัจจัยการเชื่อมที่กำหนดให้มีค่าโวลท์ที่สูงมากเกินไป และร่วมกับการความเร็วในการเชื่อมที่ช้าเกินไป กล่าวคือ การเชื่อมที่มีอาร์กโวลท์สูงมากจะทำให้บ่อหลอมละลายที่ผิวบนกว้างมาก น้ำโลหะที่หลอมละลายจะเป็นวงกว้างแต่ไม่ลึก และถ้าเลือกใช้ความเร็วเชื่อมที่ช้าจะเกิดบ่อหลอมลึกมากขึ้น เมื่อปัจจัยทั้งสองเกิดขึ้นพร้อมกันจะทำให้ขนาดของบ่อหลอมละลายทั้งด้านบน (Face) และด้านล่าง (Root) มีขนาดใกล้เคียงกัน แต่ด้วยน้ำโลหะในบ่อหลอมด้านผิวบนระบายความร้อนได้เร็วกว่าด้านล่าง จึงแข็งตัวก่อนและอัตราการเย็นตัวก็เร็วกว่าด้านล่าง พฤติกรรมดังกล่าวจะส่งผลทำให้เกิดแรงเค้นดึงที่มีทิศทางไปสู่ด้านผิวบน รอยแตกร้าวจึงลุกลามไปสู่ด้านผิวบนของแนวเชื่อม (Face side weld) ส่วนเหตุผลที่จุดเริ่มต้นของรอยร้าวที่แนวหลอมละลายเกิดที่บริเวณกึ่งกลาง (ค่อนไปทางด้านบน) ของความลึกแนวเชื่อม เหตุเพราะบริเวณกึ่งกลางดังกล่าวเป็นจุดแยกของทิศทางการระบายความร้อนขณะเย็นตัว กล่าวคือ บ่อหลอมครึ่งด้านบนความร้อนจะระบายออกไปในทิศทางด้านผิวบน ส่วนครึ่งล่างของบ่อหลอมความร้อนจะระบายไปในทิศทางด้านล่าง ซึ่งทิศทางของการระบายความร้อนก็จะเป็นทิศทางของการเกิดแรงเค้นดึงจากการแข็งตัว นอกจากนี้ อิทธิพลของธาตุผสมที่มีความไวต่อการแตกร้าว (Crack susceptibility) ผสมอยู่มาก ได้แก่ ซัลเฟอร์ (S) ฟอสฟอรัส (P) ซิลิกอน (Si) และแมงกานีส (Mn) การแตกร้าวในลักษณะนี้จัดเป็นการแตกร้าวขณะร้อน (Hot crack) และมักจะพบในขบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (SAW) โดยเฉพาะการเชื่อมโลหะที่ความหนามาก ๆ เช่น ท่อขนาดใหญ่ หรือแผ่นเหล็กถังความดันที่หนามาก ๆ เป็นต้น

การป้องกันและการตรวจสอบรอยแตกร้าวแนวหลอมละลายหรือแนวรอยต่อขอบเชื่อมสามารถป้องกันได้ไม่ยุ่งยากนัก เพราะปัจจัยส่งเสริมการแตกร้าวมีเพียงปัจจัยการเชื่อมเป็นสำคัญ โดยทำการ

ปรับตั้งค่าอาร์กโวลท์ (Arc voltage) ให้สัมพันธ์กับความเร็วในการเชื่อม (Welding speed) และเลือกวัสดุโลหะที่นำมาเชื่อมมีส่วนผสมของธาตุที่มีความไวต่อการแตกร้าวต่ำ ๆ ซึ่งรวมไปถึงปัจจัยในการออกแบบรอยต่อแนวเชื่อมที่ลดความเค้นดึงลงให้มาก ๆ เช่น ออกแบบรอยต่อแบบรอยบาก 2 ด้าน (Double V groove) หรือแบบรอยต่อใด ๆ ที่รักษาสมดุลแรงเค้นดึงได้ทั้งบริเวณผิวด้านบน (Face side weld) และบริเวณด้านล่างได้ (Root side weld) เป็นต้น การแตกร้าวตามแนวเส้นขอบเขตการหลอมละลายนี้สามารถเกิดได้ทั้งชนิดแตกแบบผิวเปิด (External crack) และ ชนิดแตกแบบผิวปิด (Internal crack) กรณีผิวรอยแตกเปิดสามารถพิจารณาได้จากภายนอกด้วยสายตา หรือใช้วิธีการตรวจสอบแบบ PT หรือ MT ร่วมด้วย แต่กรณีที่เกิดการแตกร้าวอยู่ภายในเป็นแบบผิวปิด โดยเฉพาะการแตกร้าวแบบ HAT จำเป็นที่จะต้องใช้วิธีการตรวจสอบแบบ RT หรือ UT ส่วนการวิเคราะห์รอยแตกร้าวไม่ยากเพราะตำแหน่งของการเกิดรอยแตกจะอยู่ตามแนวเส้นของการหลอมละลายจากการเชื่อม



(ก) รูปแบบการแตกร้าวแบบรูปทรงหมวก



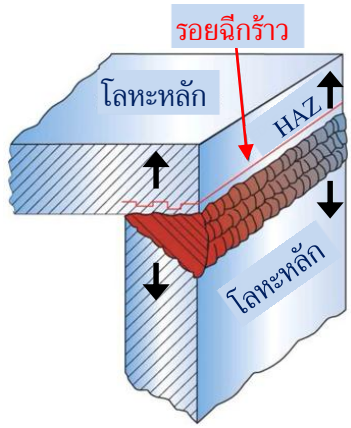
(ข) ตัวอย่างการแตกร้าวแบบรูปทรงหมวก

รูปที่ 8.31 ลักษณะและตัวอย่างการแตกร้าวแนวหลอมละลายแบบรูปทรงหมวก (HAT)

ที่มา : Journal of Marine Engineering & Technology, No. A18:2056–8487, 2010

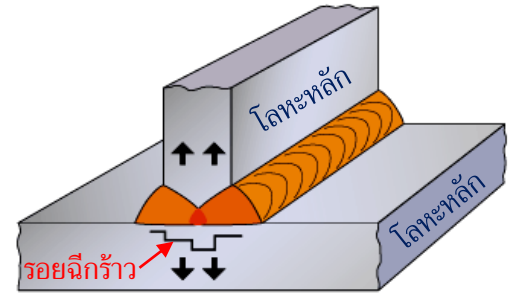
9. การฉีกร้าวของแนวเชื่อม (Lamellar tearing) เป็นรูปแบบความเสียหายของงานเชื่อมที่มีลักษณะเป็นแบบการฉีกขาด (Tearing) ของเนื้อโลหะข้าง ๆ แนวเชื่อม ซึ่งจะแตกต่างไปจากการแตกร้าวแบบอื่น ๆ ทั้งสาเหตุของการเกิดและตำแหน่งของการเกิด โดยจะพบบรอยฉีกเกิดในแนวส่วนหนา (Short transvers section : ST) ของแผ่นโลหะหลักที่นำมาเชื่อมและก็จะเกิดที่ขอบของบริเวณกระทบร้อนด้านที่ติดกับแนวเชื่อม ลักษณะรูปแบบของการฉีกจะมีทิศทางการฉีกไปในทิศเดียวกันกับทิศทางการรีดขึ้นรูปของโลหะ (Rolling direction) โดยรอยฉีกร้าวจะเป็นแนวตรงที่มีลักษณะเป็นขั้น ๆ ขึ้น–ลงไปตามเนื้อโลหะที่มีข้อบกพร่องจากการรีดทับสารมลทินจำพวกสารประกอบซัลไฟด์ (FeMnS) สารประกอบออกไซด์ ($FeAl_2O_3$) และสารประกอบซิลิเกต ($FeSiO_4$) ซึ่งรอยฉีกร้าวจะตั้งฉากกับทิศทางของแรงเค้นดึงที่สามารถเกิดขึ้นได้กับการเชื่อมต่อทุกรูปแบบที่ทิศทางของการเชื่อมเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการรีดของเนื้อโลหะ (ซึ่งมีรูปแบบคล้าย ๆ กับทิศทางเสี้ยนของเนื้อไม้) ดังแสดงลักษณะและตำแหน่งของการฉีกร้าวในการเชื่อมแบบต่อชน (Butt weld) และการเชื่อมแบบต่อมุมตัวที

(T–joint) ในรูปที่ 8.32 (ก) และ (ข) ตามลำดับ แต่จากประสบการณ์ด้านงานเชื่อมของผู้เขียนที่และจากการค้นคว้าจากงานวิจัยพบว่า เรามักเจอรอยฉีกร้าวแบบนี้ในการเชื่อมแบบต่อมุม (Fillet welding) เป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะการเชื่อมงานที่มีความหนามาก ๆ จะมีความไวต่อการเกิดรอยฉีกแบบนี้มากขึ้น ดังตัวอย่างรูปแบบจำลองตำแหน่งและทิศทางของแรงเค้นที่มีต่อการฉีกร้าวที่สามารถเกิดขึ้นได้ในการเชื่อมต่อในรูปแบบต่าง ๆ ในรูปที่ 8.33 รอยฉีกร้าวมีโอกาสที่จะฉีกเป็นช่วง ๆ แล้วหยุด (สิ้นสุดแนวบกพร่อง) หรือติดต่อกันเป็นแนวยาวขนานไปตามแนวเชื่อม (แนวบกพร่องยาวต่อเนื่อง)



(ก) รอยฉีกร้าวของการเชื่อมแบบต่อชน

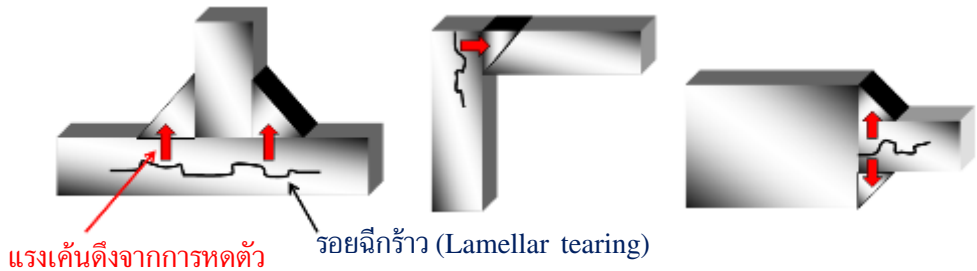
ที่มา : Materials Welding–Lamellar tearing, 2018



(ข) รอยฉีกร้าวของการเชื่อมแบบต่อมุม

ที่มา : TWI –Defects : Lamellar Tearing, 2015

รูปที่ 8.32 ลักษณะและตำแหน่งของการฉีกร้าวในการเชื่อมแบบต่อชนและแบบต่อมุม

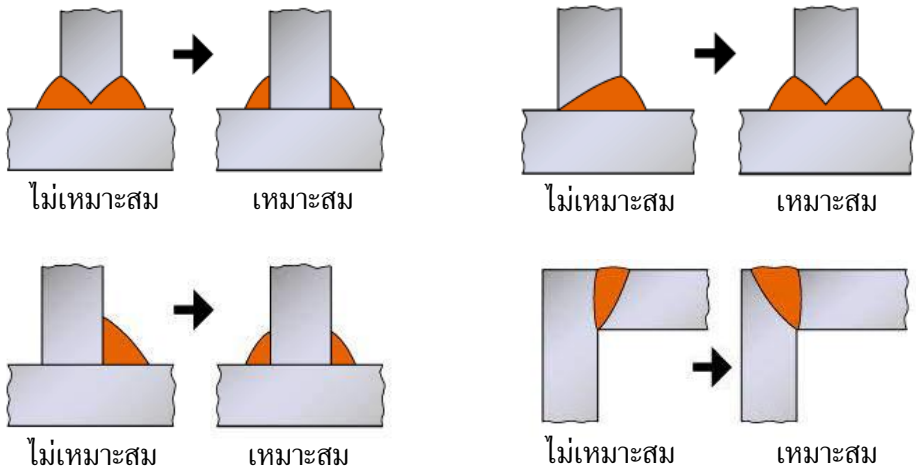


รูปที่ 8.33 รูปแบบจำลองตำแหน่งรอยเชื่อมและทิศทางของแรงเค้นกับการฉีกร้าว

ที่มา : AMARINE–What is lamellar tearing, 2011

สาเหตุหลักของการฉีกร้าวมาจาก 2 ปัจจัยหลัก คือ ปัจจัยความไม่สมบูรณ์ของเนื้อโลหะหลักที่นำมาเชื่อม (Laminated inclusion) โดยผ่านการรีดขึ้นรูปที่เกิดการบีบอัดสารมลทินฝังติดอยู่ภายในที่เป็นระนาบเดียวกับเนื้อโลหะกับปัจจัยของการออกแบบรอยเชื่อม (Welding design) ที่ส่งผลทำให้เกิดความเค้นดึงที่รุนแรงอันเนื่องจากพฤติกรรมจากการหดตัวของแนวเชื่อม ซึ่งปัจจัยที่สำคัญทั้งสองที่กล่าวมาสามารถแก้ไขได้ไม่ยุ่งยากนัก โดยเตรียมการตรวจสอบหาความบกพร่องของเนื้อโลหะที่เป็นแบบ

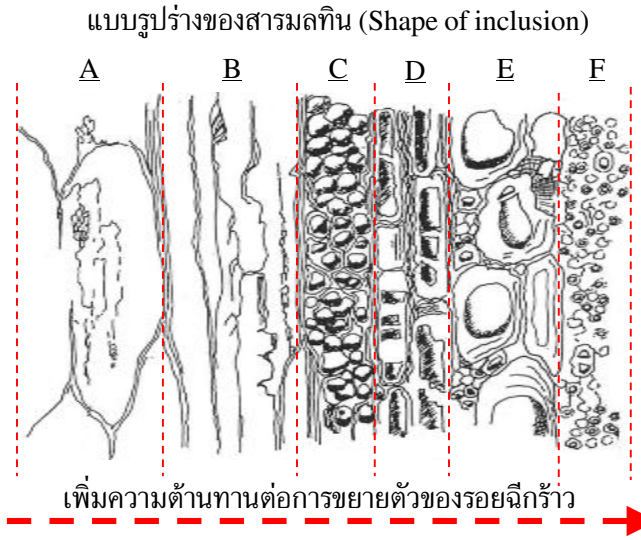
แผ่นระนาบ (Laminated) ของสารมลทินตรงตำแหน่งด้านใต้ของบริเวณที่จะเชื่อมต่อและรวมถึงบริเวณใกล้ ๆ ว่ามีสารมลทินดังกล่าวฝังตัวอยู่หรือไม่ และพยายามออกแบบรอยต่อที่ไม่ให้เกิดแรงเค้นดึงในแนวที่ตั้งฉากกับทิศทางของแนวรีด ที่เหมาะสมต้องให้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับแนวของการรีด ซึ่งรวมไปถึงการกำหนดตำแหน่งของรอยเชื่อมต่อที่จะต้องสามารถช่วยลดอัตราการฉีกร้าวได้เมื่อรับแรงกระทำ ดังแสดงยกตัวอย่างเปรียบเทียบการออกแบบกำหนดตำแหน่งรอยเชื่อมที่เหมาะสมกับที่ไม่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 8.34 ซึ่งช่างเชื่อมหรือวิศวกรงานเชื่อมสามารถกำหนดให้เหมาะสมได้



รูปที่ 8.34 ตัวอย่างการออกแบบตำแหน่งรอยเชื่อมต่อที่เหมาะสมเพื่อลดการฉีกร้าว

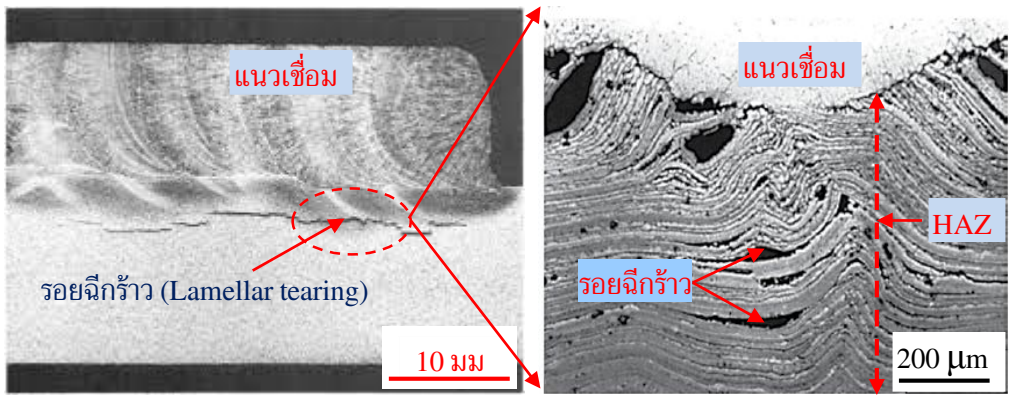
ที่มา : TWI–Defects lamellar tearing, 2012

ลักษณะรูปร่างของสารมลทินที่โดนบีบอัดจากการรีดขึ้นรูปที่อยู่ภายในเนื้อของโลหะที่นำมาเชื่อมนั้นจะมีรูปร่างที่แตกต่างกันจากความต่างชนิดของสารประกอบตั้งต้นก่อนการรีด โดยการจัดเรียงตัวตามแนวรีดที่ต่างกันมีผลต่อระดับความต้านทานการเกิดและการขยายตัวของรอยฉีกร้าว ดังแสดงในรูปที่ 8.35 จะพบว่าสารมลทินที่มีรูปร่างเป็นเส้นแบนยาวจะต้านทานการเกิดและการขยายตัวของรอยฉีกร้าวได้น้อยกว่ารูปร่างแบบทรงก้อนกลม ด้วยเพราะก้อนกลมจะลดมุมที่แหลมที่มีจุดรวมของความเค้นสูง จึงต้านทานได้มากกว่า (High resistance to crack propagation) ดังนั้น กรณีที่มีการตรวจพบสารมลทินสามารถพิจารณาตัดสินใจความเหมาะสมได้จากลักษณะรูปร่างของสารมลทินได้ แต่อย่างไรก็ตาม การที่ไม่มีข้อบกพร่องใด ๆ ถือเป็นเรื่องที่ดีที่สุด เพราะถ้าไม่มีการตรวจสอบโลหะหลักก่อนที่จะนำมาเชื่อมประกอบก็จะพบกับปัญหาเกิดการฉีกร้าวเกิดขึ้น ซึ่งเป็นความเสียหายที่แก้ไขยุ่งยากมาก ดังแสดงลักษณะของรอยฉีกร้าวของชิ้นงานเชื่อมในงานวิจัยที่แสดงให้เห็นถึงรอยฉีกตามแนวเส้นของการรีดและแรงเค้นดึงที่มีทิศทางตั้งฉากกับรอยฉีกที่เกิดจากอิทธิพลของการหดตัวขณะเย็นตัวของแนวเชื่อม ในรูปที่ 8.36



รูปที่ 8.35 ลักษณะรูปร่างของสารมลทินที่โดนรีดฝังตัวติดอยู่ในเนื้อโลหะ

ที่มา : The Journal of Industrial Technology, Vol.3, No.1, 2007



รูปที่ 8.36 ตัวอย่างรอยฉีกร้าวแนวเชื่อมและลักษณะของทิศทางการฉีกตามแนวรีด

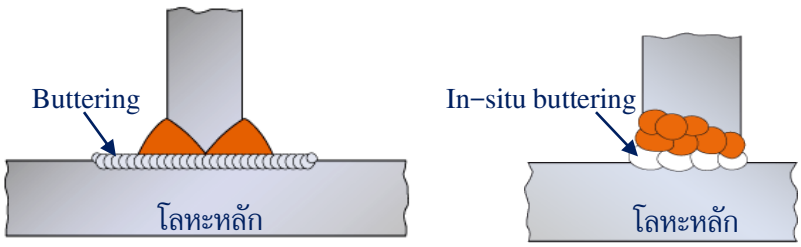
ที่มา : Journal of Marine Engineering & Technology, No. A18 : 2056-8487, 2010

การป้องกันหรือลดความเสี่ยงของการเกิดรอยฉีกร้าว (Lamellar tearing) ในงานเชื่อมนี้สามารถทำได้บนพื้นฐานปัจจัยด้านต่าง ๆ ดังนี้

- เลือกวัสดุโลหะหลัก (Base metal) ที่นำมาทำการเชื่อมต้องไม่มีสารมลทินฝังตัวอยู่ในเนื้อโลหะในรูปแบบของระนาบแบนราบ (Laminated)
- การออกแบบรอยต่อ (Joint design) มีบทบาทโดยตรงที่ช่วยลดระดับค่าความเค้นและช่วยเบี่ยงเบนทิศทางของแรงเค้นดึงในแนวหนาของชิ้นงาน โดยถ้าสามารถเลือกแนวทิศทางรีดของโลหะให้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของแรงเค้นดึงจากการหดตัวของแนวแนวเชื่อมได้ จะเป็นการช่วยเพิ่มแรงต้านทานการฉีกร้าวได้เป็นอย่างดี

● การลดขนาดแนวเชื่อมให้เล็ก (Weld size) ปกติการฉีกร้าวมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นกับรอยเชื่อมที่มีขนาดใหญ่ เพราะมีพื้นที่หดตัวมากขึ้นโดยเฉพาะรอยเชื่อมแบบต่อมุม (Fillet weld) หรือต่อชนที่มีความยาวของรอยต่อมากกว่า 20 มิลลิเมตร ดังนั้น การกำหนดขนาดรอยเชื่อมที่มีขนาดเล็กจะลดความเสี่ยงของการฉีกร้าวได้ดีกว่า นอกจากการลดขนาดของแนวเชื่อมแล้วนั้น ยังสามารถเลือกตำแหน่งที่จะเชื่อมที่ไม่ให้เกิดแรงดึงในแนวหนาของงาน

● การเชื่อมรองพื้น (Buttering weld) เป็นการสร้างพื้นผิวบนโลหะหลักที่ใต้ตำแหน่งรอยเชื่อมด้วยวัสดุโลหะที่มีความเหนียวสูงให้มีพื้นที่กว้างมากขึ้น เพื่อทำหน้าที่ช่วยกระจายความเค้นที่ดึงจากการหดตัวของแนวเชื่อมจะช่วยลดความเสี่ยงของความเค้นสูงแล้วเกิดการฉีกร้าว หรืออาจใช้วิธีการเชื่อมด้วยลวดที่มีความแข็งแรงต่ำซึ่งมีความเหนียวเป็นแนวแรก (In–situ buttering) เพื่อให้ทำหน้าที่รับแรงเค้นแทนก็จะสามารถลดอัตราเสี่ยงของการฉีกร้าวได้ ดังแสดงลักษณะของวิธีการทำในรูปที่ 8.37 วิธีการเหล่านี้ต้องคำนวณให้แน่ใจว่าวัสดุโลหะที่นำมารองพื้นต้องมีค่าความแข็งแรงมากเพียงพอต่อการนำไปใช้รับภาระโหลดของงาน

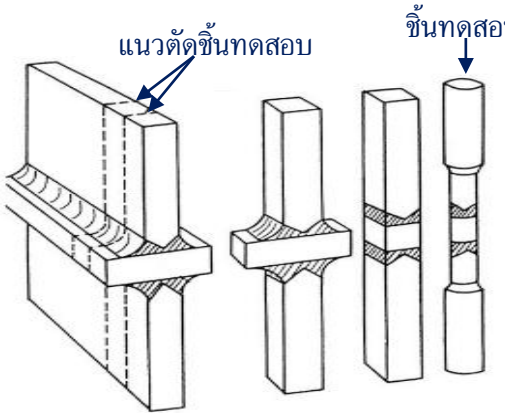


การเชื่อมรองพื้นลงบนโลหะหลัก　　การเชื่อมแนวแรกด้วยวัสดุเหนียว

รูปที่ 8.37 วิธีการป้องกันการฉีกร้าวด้วยการเชื่อมวัสดุโลหะอื่นรับความเค้นแทนโลหะหลัก

ที่มา : TWI–Defects : Lamellar tearing, 2012

การตรวจสอบรอยฉีกร้าวมีทั้งแบบที่เกิดเป็นรอยร้าวสามารถมองเห็นและตรวจสอบได้ด้วยสายตาได้ เพราะมักเป็นแนวยาวและเป็นแบบขั้น ๆ ขึ้น–ลงสังเกตเห็นได้ง่ายและเป็นรอยฉีกอยู่ภายในใต้พื้นที่ของรอยเชื่อม รอยแตกภายในจะต้องใช้วิธีการตรวจสอบแบบ RT หรือ UT การวิเคราะห์ผลอาจยุ่งยากพอสมควร เนื่องจากต้องแยกให้ชัดเจนระหว่างภาพรอยที่ฉีกร้าว (Tearing) กับภาพของสารมลทินที่ยังไม่ฉีกร้าว (Non–tearing) ซึ่งอาจต้องใช้ผลการตรวจสอบวิธีอื่นร่วมตัดสินใจ แต่อย่างไรก็ตามตำแหน่งของรอยฉีกร้าวก็สามารถคาดเดาได้ ด้วยเพราะรอยฉีกขาดจะเกิดขึ้นที่บริเวณกระทบร้อนและจะขยายตัวไปในแนวที่ขนานไปกับแนวเชื่อม ซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการหดตัวของบ่อหลอมละลาย ส่วนการตรวจสอบประสิทธิภาพทางกลของความสามารถต้านทานการเกิดแนวเชื่อมฉีกร้าว ภายใต้แรงเค้นดึงได้มีการกำหนดเป็นรูปแบบและกฎเกณฑ์การเตรียมชิ้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 8.38 โดยถ้าชิ้นทดสอบไม่เกิดการฉีกขาดที่ตำแหน่งบริเวณใต้แนวเชื่อม แสดงว่าเป็นที่ยอมรับและผ่านการทดสอบที่คงทนต่อความไวในการฉีกร้าว (Lamellar tearing sensitivity)



รูปที่ 8.38 วิธีการตรวจสอบประสิทธิภาพทางกลของความสามารถต้านทานการเกิดรอยฉีกร้าวของแนวเชื่อม
ที่มา : The Journal of Industrial Technology, Vol.3, No.1, 2007

- การอุ่นให้ความร้อนโลหะชิ้นงานทั้งก่อนและหลังการเชื่อม (Pre−heating and Post−heating) ถึงแม้ว่าแก๊สไฮโดรเจนในแนวเชื่อมจะมีผลกระทบน้อยต่อการแตกแบบฉีกร้าว แต่ถ้ามีอยู่ในปริมาณที่มากเกินไปจะกลายเป็นตัวช่วยส่งเสริมที่จะทำให้เกิดการฉีกร้าวได้ง่าย ได้เร็วและรุนแรงมากขึ้น เพราะไฮโดรเจนทำให้เหล็กแข็งและเปราะแนวเชื่อมจะรับแรงเค้นได้ต่ำลงและเป็นชนวนของการขยายรอยฉีกได้ง่ายและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ดังนั้น การให้ความร้อนเพื่อการขจัดแก๊สไฮโดรเจนก็เป็นช่องทางที่สามารถลดความเสี่ยงที่จะเกิดรอยฉีกร้าวได้

8.2 ข้อบกพร่องโพรงอากาศงานเชื่อม (Cavities in weld)

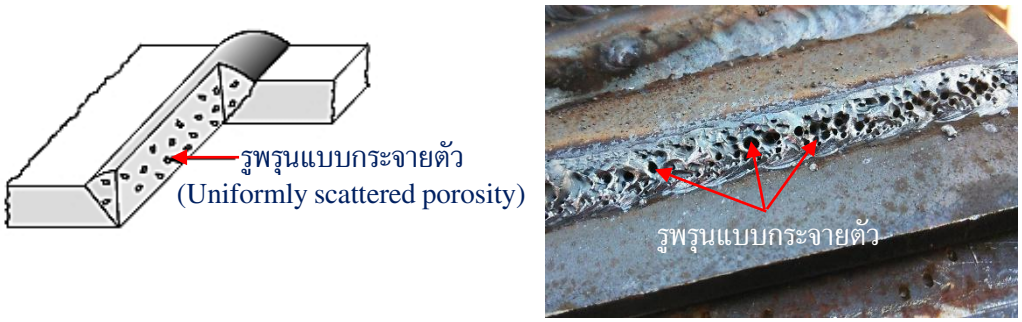
ข้อบกพร่องแบบที่เป็นลักษณะของโพรงอากาศนี้จะเป็นความไม่ต่อเนื่องของเนื้อเชื่อมอีกชนิดหนึ่ง (Discontinuities) ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ง่ายมากถ้าไม่มีการควบคุมการเชื่อมให้สมบูรณ์ โดยรูปแบบของข้อบกพร่องจะมีลักษณะเป็นรูหรือหลุมกลม ๆ ที่สามารถเกิดได้ทั้งที่ผิวภายนอกและภายในแนวเชื่อม จากการศึกษาค้นคว้าพบว่า กลไกการเกิดโพรงอากาศในแนวเชื่อมนั้นเกิดจากสองสาเหตุหลัก คือ เกิดจากฟองอากาศในขบวนการเชื่อมที่ไม่สามารถระบายออกมาสู่ภายนอกได้ทันในขณะที่น้ำโลหะเย็นตัวอย่างรวดเร็ว หรือเกิดจากฟองอากาศจากสภาพแวดล้อมภายนอกที่ถูกดึงเข้ารวมตัวกันในบ่อหลอมละลายขณะเย็นตัว ซึ่งลักษณะของโพรงอากาศที่เกิดจะเป็นแบบรูพรุน (Porosity) กับแบบโพรงหนอน (Wormholes) การที่จะเกิดเป็นโพรงอากาศแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะและอัตราความเร็วในการเคลื่อนที่ของแก๊ส ส่วนอีกสาเหตุนั้นเกิดจากพฤติกรรมของการหดตัว (Shrinkage) ของน้ำโลหะในบ่อหลอมละลาย โดยกลไกการหดตัวทำให้เกิดแรงเค้นดึงขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามทำให้เกิดเป็นลักษณะของช่องว่างที่เรียกว่า “ช่องว่างจากการหดตัว (Shrinkage voids)” จากสาเหตุของการเกิดข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศที่กล่าวมานั้น จะเห็นได้ว่าป้องกันไม่ให้เกิดนั้นทำได้ยากมาก ดั้งนั้น ในทางปฏิบัติจึงยอมรับให้เกิดฟองอากาศในแนวเชื่อมได้ในปริมาณจำกัด (Number) ขนาดที่จำกัด (Size) และแนวทิศทางของแรงกระทำ (Stress direction) ที่มีระดับเป็นเกณฑ์มาตรฐาน หรืออาจจะเป็นเกณฑ์ข้อตกลงกันตามลักษณะของเชื่อมบางประเภทที่ยอมรับกันได้ ด้วยเหตุที่ว่าข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศ

นั้นจะมีความเสี่ยงต่อความเสียหายของแนวเชื่อมน้อยกว่าข้อบกพร่องแบบรอยแตกร้าว (Cracking) เพราะโพรงหรือฟองอากาศมักมีรูปทรงที่โค้งมน (Rounded shape) ทำให้มีความเข้มข้นของความเค้นต่ำกว่ารอยแตกร้าวอย่างมีนัยสำคัญ

โดยเป็นที่ทราบกันดีในหมู่ของช่างหรือวิศวกรงานเชื่อมว่า องค์ประกอบของขบวนการเชื่อม มีหลากหลายปัจจัยที่ต้องทำการควบคุมเพื่อป้องกันต่อการเกิดข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศ ทำให้เกิดข้อบกพร่องในลักษณะแบบนี้ที่คล้าย ๆ กัน แต่ไม่เหมือนกันพอจะแยกได้ดังนี้

1. รูพรุน (Porosity) เป็นข้อบกพร่องที่เกิดจากฟองอากาศที่ไม่สามารถระบายออกมาสู่ภายนอกได้ทันเวลาในขณะที่เย็นตัวเลยตกค้างอยู่ที่แนวเชื่อม ซึ่งบ้างก็เกิดอยู่บริเวณส่วนด้านบนผิวของแนวเชื่อม บ้างก็ฝังตัวอยู่ลึกภายในเนื้อเชื่อม โดยส่วนใหญ่ฟองอากาศที่เป็นข้อบกพร่องนี้จะเกิดจากแก๊สจำพวก ไนโตรเจน (N_2) ออกซิเจน (O_2) และ ไฮโดรเจน (H_2) เป็นสำคัญ ซึ่งแก๊สเหล่านี้อาจมาจากสภาพความชื้นสถานที่เชื่อม ความชื้นจากลวดเชื่อม ชิ้นงานเชื่อม ฟลักซ์เชื่อม รวมไปถึงสภาพพื้นผิวโลหะชิ้นงานที่มีสารเคลือบหรือสารปนเปื้อนที่กำจัดออกไม่หมด ด้วยความหลากหลายของแหล่งที่มาทำให้การควบคุมป้องกันอาจไม่สมบูรณ์ จึงมักเกิดรูพรุนในแนวเชื่อมได้ง่ายและพบเจออยู่เสมอ ๆ และพบว่าฟองอากาศหรือรูพรุนมีความหลากหลายรูปแบบและรูปทรง ได้แก่

● รูพรุนแบบกระจายตัว (Uniformly scattered porosity) เป็นรูพรุนที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อมแบบกระจัดกระจายไปทั่วทั้งภายในเนื้อและผิวของแนวเชื่อม ไม่มีทิศทางที่แน่นอน ขนาดและรูปร่างของฟองอากาศจะเหมือนกัน สาเหตุหลักมาจากองค์ประกอบของการเชื่อม ได้แก่ เกิดจากเทคนิคการเชื่อมหรือการเลือกวัสดุเชื่อม ลวดเชื่อมและแก๊สปกคลุมแนวเชื่อมไม่ถูกต้อง รวมถึงอาจเกิดจากการเตรียมรอยต่อเชื่อมไม่ถูกต้อง ซึ่งสาเหตุดังกล่าวจะส่งผลต่อการหลอมละลายและอัตราการแข็งตัวของน้ำโลหะที่ทำให้การเคลื่อนที่ออกของแก๊สได้ไม่ทันจึงเกิดการกักตัวไว้ภายในเนื้อเชื่อม ดังแสดงลักษณะรูปแบบของรูพรุนแบบกระจายตัวในแนวเชื่อมในรูปที่ 8.39



รูปที่ 8.39 ลักษณะรูปแบบการเกิดรูพรุนแบบกระจายตัวในแนวเชื่อม

ที่มา : MECHANIC WIZ–Causes Porosity in Welding (Solution & Prevention), 2020

แนวทางการป้องกันหรือขจัดรูพรุนแบบที่กระจายตัวอยู่ทั่วไปสามารถทำได้โดยกำจัดแหล่งที่มาของแก๊สจากปัจจัยการเชื่อม เช่น การเลือกลวดเชื่อมที่ช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

เลือกฟลักซ์ไม่มีความชื้น (Dry flux) และควบคุมการไหลของแก๊สปกคลุมไม่ให้สูงมากเกินไป (High shielding gas flow) เป็นต้น ส่วนเทคนิคการเชื่อมต้องเหลีกเลี่ยงความปั่นป่วนของบ่อหลอมละลาย (Weld pool turbulence) นอกจากนี้ ต้องทำความสะอาดผิวชิ้นงานโลหะที่จะเชื่อมจากสารปนเปื้อนและสารเคลือบต่าง ๆ พร้อมกับการทำให้ผิวชิ้นงานแห้งสนิทก่อนทำการเชื่อม

สำหรับการตรวจสอบหารูพรุนในแนวเชื่อมในกรณีที่เกิดบริเวณผิวสามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธี VT ส่วนรูพรุนภายในของเนื้อเชื่อมสามารถเลือกใช้วิธีการตรวจสอบแบบ RT หรือ UT ตามความเหมาะสมของลักษณะงานเชื่อม โดยนำผลการตรวจสอบมาพิจารณาผ่านเกณฑ์การยอมรับหรือปฏิเสธด้วยมาตรฐานของการตรวจสอบ ซึ่งมีหลายมาตรฐานที่นิยมใช้กัน เช่น ASME Section VIII Div. 1: ASME B31.3 หรือมาตรฐานของ American Welding Society : AWS D1.1 หรือกรณีสำหรับงานปิโตรเลียมเป็นมาตรฐานของ American Petroleum Institute (API 1104) เป็นต้น

● รูพรุนแบบรวมเป็นกลุ่ม (Cluster porosity) เป็นรูพรุนที่มีลักษณะของรูปทรงปกติเหมือนกับรูพรุนทั่ว ๆ ไปแต่จะเกิดอยู่กันเป็นกลุ่ม ๆ ไม่กระจายตัวซึ่งแต่ละกลุ่มก้อนอาจมีขนาดที่แตกต่างต่างกันไป พบมากกับขบวนการเชื่อมแบบ MMAW สาเหตุหลักมักเกิดจากอิทธิพลของความชื้นที่สะสมอยู่ในฟลักซ์ที่เคลือบแท่งอิเลคโทรด เมื่อทำการเชื่อมความร้อนทำให้ความชื้นกลายเป็นแก๊สและก็โดนกักติดอยู่ในเนื้อเชื่อมขณะแข็งตัว โดยทั่วไปมักเกิดกับแนวเชื่อมช่วงเริ่มต้นเชื่อม ด้วยเพราะความชื้นยังสูงและจะเกิดได้ง่ายกับการเชื่อมแนวแรก (Root pass) รวมถึงบริเวณช่วงรอยต่อของลวดเชื่อมแบบลวดเชื่อมไฟฟ้า ดังแสดงลักษณะการเกิดของรูพรุนบนแนวเชื่อมในรูปที่ 8.40



รูปที่ 8.40 ลักษณะรูปแบบการเกิดรูพรุนแบบรวมตัวเป็นกลุ่มในแนวเชื่อม

ที่มา : Arc Helments – Porosity in Welding, 2012

การป้องกันการเกิดรูพรุนแบบเป็นกลุ่มมุ่งเน้นในการขจัดความชื้นของลวดเชื่อมเป็นสำคัญ หรือกรณีขบวนการเชื่อมที่ใช้ผงฟลักซ์ต้องแห้งปราศจากความชื้น ส่วนกรณีฟลักซ์หุ้มลวดหรือไส้ฟลักซ์ต้องผ่านการอบไล่ความชื้นก่อนนำไปเชื่อม รวมถึงต้องระมัดระวังระดับอุณหภูมิของลวดเชื่อมที่ต้องใช้ขณะต่อลวดอุณภูมิของลวดต้องสม่ำเสมอ และถ้าสามารถควบคุมอัตราการเย็นตัวไม่ได้เร็วเกินไป ให้มีเวลามากพอสำหรับการหนีออกมาของแก๊สก็จะเป็นข้อดีในการกำจัดหรือลดปริมาณแก๊สที่จะติดอยู่ใน

แนวเชื่อมได้ สำหรับการตรวจสอบหาข้อพกพร่องรูพรุนแบบนี้จะใช้วิธีการแบบไม่ทำลาย (NDT) ที่เหมือน ๆ กัน โดยมีข้อแนะนำเชิงปฏิบัติการจากมาตรฐานการตรวจสอบที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งมีเกณฑ์การยอมรับและปฏิเสธที่เป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน

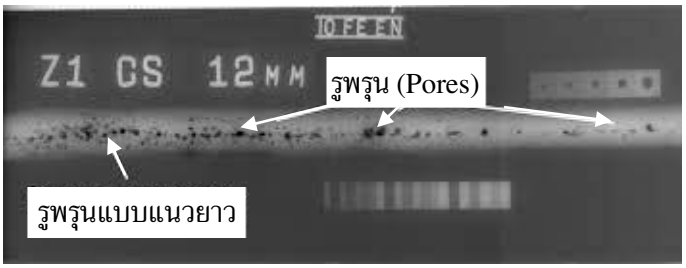
● รูพรุนแบบเป็นแนวยาว (Linear porosity) ลักษณะของรูพรุนแบบนี้จะเกิดในรูปแบบที่เป็นฟองอากาศเรียงเป็นเส้นตรงยาวต่อเนื่องกันไป ขนาดและรูปทรงแต่ละฟองอากาศจะใกล้เคียงกันมาก เป็นข้อบกพร่องรูพรุนที่มักเกิดที่บริเวณด้านผิวของแนวเชื่อมและจะเกิดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแนวเชื่อม (Center of weld) ที่ซึ่งเป็นจุดแข็งตัวของบ่อหลอมละลายหลังที่สุด สารมลทินหรือสารประกอบต่าง ๆ จะถูกผลักออกมารวมตัวอยู่จุดนี้ แก๊สที่เกิดขึ้นในขบวนการเชื่อมก็ถูกผลักออกมาเช่นกันและจะทยอยระบายออกสู่ภายนอก ถ้าแก๊สในการเชื่อมมากเกินไปบางส่วนหนีออกมาได้ไม่ทันจึงถูกกักไว้ในเนื้อเชื่อมในสภาพที่เป็นฟองอากาศที่เรียงรายไปตามเส้นกึ่งกลางของบ่อหลอมละลาย ดังแสดงรูปแบบและลักษณะของการปรากฏฟองอากาศที่เป็นเส้นตรง (Linear) ในรูปที่ 8.41 นอกจากที่กล่าวมาแล้วนั้นมีข้อสังเกตว่าในกรณีที่มีการเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน (Dissimilar welding) โดยเฉพาะวัสดุโลหะที่มีอุณหภูมิจุดการเป็นของแข็งที่ต่างกัน (Eutectoid reaction temperature) ตำแหน่งของการเกิดรูพรุนนี้จะไม่อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของแนวเชื่อม แต่ขยับไปทางที่โลหะหลักมีจุดแข็งตัวที่ช้ากว่า เหตุผลเพราะฟองอากาศถูกรีดออกไปได้ไม่หมดจะไปสะสมอยู่ที่ตำแหน่งเย็นตัวช้าสุดเกิดเป็นรูพรุนเป็นแนวยาวตามเส้นจุดสุดท้ายของการแข็งตัว (Solidification line)



รูปที่ 8.41 ลักษณะรูปแบบการเกิดรูพรุนแบบเป็นแนวยาวในแนวเชื่อม
ที่มา : Global Welding Technology–Common imperfections in welding, 2018

จากที่ได้กล่าวถึงกลไกของการเกิดรูพรุนที่เป็นลักษณะแนวยาวในข้างต้น จะเห็นได้ว่าปัจจัยสำคัญคือ ความสกปรก หรือปริมาณสารมลทิน หรือปริมาณแก๊สในบ่อหลอมละลายที่มากเกินไปทำให้ขบวนการแข็งตัวไม่สมบูรณ์ ดังนั้น การป้องกันจึงไม่สลับซับซ้อนหรือยุ่งยากเพียงแต่ต้องควบคุมความสะอาดของขบวนการเชื่อม โดยเฉพาะความสะอาดที่ตำแหน่งของรอยต่อจากการเตรียมชิ้นงาน ส่วนปัจจัยการเชื่อมต้องด้านอื่น ๆ เช่น ต้องปราศจากความชื้น และควาชื้นที่ต้องระมัดระวังเป็นพิเศษเป็นความชื้นที่ติดมากับฟลักซ์ลวดเชื่อมและแก๊สปกคลุมแนวเชื่อม

การตรวจสอบหารูพรุนแบบแนวยาวนี้จะสามารถตรวจพบได้ด้วยวิธีการตรวจสอบด้วยวิธี VT หรือ PT หรือ MT ในกรณีที่เกิดเป็นฟองอากาศหรือรูพรุนอยู่ที่บริเวณผิวโพรงเปิดสู่ภายนอก แต่ในกรณีที่เกิดอยู่ภายในเนื้อเชื่อมที่ลึกหรือผิวปิดต้องใช้เทคนิคการตรวจสอบแบบวิธี UT หรือ RT โดยเฉพาะการตรวจสอบแบวิธี RT มีข้อดีที่สามารถเห็นภาพรวมของตำแหน่งการเกิดรูพรุนได้ชัดเจนทั้งขนาดและตำแหน่ง ดังนั้น ถ้าเชื่อมชิ้นงานที่ต้องการความปลอดภัยสูง ๆ เช่น ถังความดันต่าง ๆ (Pressure vessel tank) มักนิยมและเป็นที่ยอมรับกัน ดังแสดงตัวอย่างภาพฟิล์มเอกซ์เรย์ของการตรวจสอบรูพรุนแบบแนวยาวในรูปที่ 8.42 จะเห็นได้ชัดเจนของการพบฟองอากาศที่เรียงตัวเป็นแนวยาวไปตามกึ่งกลางของแนวเชื่อม



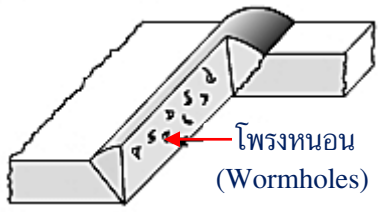
รูปที่ 8.42 ภาพถ่ายของฟิล์มเอกซ์เรย์รูพรุนแบบแนวยาวในแนวเชื่อม

ที่มา : Journal of MDPI – Materials, Vol.13, 5535, 2020

2. โพรงหนอน (Wormholes) เป็นลักษณะของฟองกาศที่มีรูปทรงเหมือนตัวหนอนที่ยาวอยู่ในแนวเชื่อม ซึ่งถ้าเป็นรูแบบที่ลึกเข้าไปในเนื้อเชื่อมโดยที่รูมีขนาดเล็ก ๆ จะเรียกว่า “Pits porosity” แต่ถ้ารูมีขนาดที่โตขึ้นเหมือนเป็นรูท่อจะเรียกว่า “Piping porosity” ส่วนรูพรุนที่มีลักษณะเป็นแนวยาวขนานไปตามแนวเชื่อมจะเรียกว่า “โพรงอากาศแบบยาว (Elongated pores)” รูพรุนหรือโพรงอากาศเหล่านี้มักพบในขบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW) หรือขบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (SAW) และยังพบในขบวนการเชื่อมแบบอิเลคโทรสแลก (ESW) ซึ่งรูปแบบของรูพรุนอาจแตกต่างกันตามชนิดของรอยต่อ ดังแสดงรูปแบบและลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นทั้งรอยต่อแบบต่อชน (Butt weld) และรอยต่อแบบต่อมุม (Fillet weld) ในรูปที่ 8.43 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

สาเหตุหลักของการเกิดข้อบกพร่องแบบโพรงหนอนนั้นเกิดจากปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้นในขบวนการเชื่อมมีจำนวนที่มาก เมื่อแนวเชื่อมเย็นตัวถึงแม้จะหนีออกมาได้แต่ยังเหลือในปริมาณที่มากจึงเกิดความต่อเนื่องของฟองอากาศที่ติด ๆ กันเป็นแนวยาว (Elongated pores) หรือเป็นกลุ่ม ๆ บางครั้งเหมือนรูปก้างปลา (Worm holes) ซึ่งแก๊สที่เกิดขึ้นมาจากความชื้นหรือความไม่สะอาดของพื้นผิวชิ้นงานโลหะเชื่อม (Base metals) ที่อาจเป็นจำพวกสารเคลือบผิวต่าง ๆ ทั้งน้ำมันจาระบี สีเคลือบ สารโลหะสังกะสีหรือดีบุกเคลือบผิว เป็นต้น ส่วนปัจจัยการเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อการเกิดแก๊สมากจะเป็นความชื้นจากฟลักซ์ปกคลุม ระยะอาร์ก ระยะหัวห่างของหัวเชื่อมกับท่อส่งแก๊สไม่เหมาะสม ซึ่งรวมไปถึงการออกแบบรอยต่อที่มีช่องว่างให้แก๊สไปรวมตัวกัน

สำหรับการป้องการการเกิดต้องอาศัยการขจัดแหล่งที่มาของการเกิดแก๊สเป็นประเด็นสำคัญ รวมถึงการออกแบบรอยต่อและกำหนดปัจจัยการเชื่อมให้ถูกต้องเหมาะสม ปัญหาการเกิดโพรงหนอนจะหายไป ส่วนวิธีการตรวจสอบหาข้อบกพร่องสามารถตรวจพบได้ง่ายด้วยเหตุเพราะเป็นข้อบกพร่องที่เป็นฟองอากาศที่เป็นโพรงค่อนข้างมีขนาดใหญ่ กรณีเกิดขึ้นที่ผิวงานเชื่อมก็สามารถมองเห็นได้ด้วยตา สำหรับกรณีที่เกิดเป็นแนวโพรงยาวขนานไปกับแนวเชื่อมจำเป็นที่จะต้องใช้วิธีการตรวจสอบแบบ RT หรือ UT หรือ MT ตามความเหมาะสมของแต่ละชนิดรอยต่อแนวเชื่อม



รูปที่ 8.43 ลักษณะรูปแบบของการเกิดรูพรุนแบบโพรงหนอนในแนวเชื่อม
ที่มา : CSWIP 3.1– Weld defects, 2012



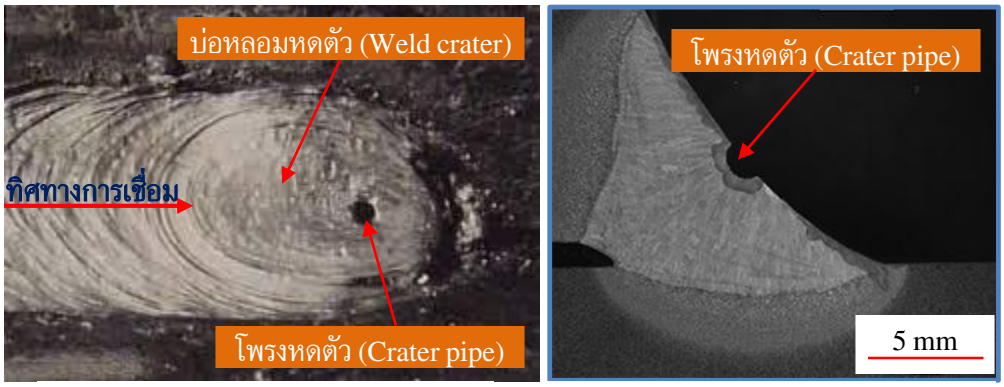
(ก) โพรงหนอนของการเชื่อมแบบต่อชน



(ข) โพรงหนอนของการเชื่อมแบบต่อมุม

3. ช่องว่างจากการหดตัว (Shrinkage voids) หรือปล่องอากาศจากการหดตัว (Shrinkage crater) เป็นข้อบกพร่องที่มีลักษณะรูปแบบของรูอากาศกลวงที่เกิดขึ้นบริเวณบ่อหลอมละลายเมื่อสิ้นสุดการเชื่อม (End of welding) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของบ่อหลอม (จุดที่เย็นตัวหลังสุด) บางครั้งก็จะเรียกว่า “จุดบกพร่องที่จุดหยุดลวด (Stop filler)” จัดเป็นกลุ่มข้อบกพร่องชนิดโพรงอากาศที่ไม่ได้เกิดจากอิทธิพลของอากาศหรือแก๊สใด ๆ แต่เป็นผลมาจากพฤติกรรมของการหดตัวของโลหะในขณะที่แข็งตัวจากการเชื่อม ด้วยเหตุผลเพราะว่าที่ปลายสุดของการเชื่อมในบ่อหลอมละลายมีปริมาณของน้ำโลหะไม่มากพอที่จะชดเชยให้กับการหดตัวของ ทำให้กึ่งกลางบ่อหลอมที่เย็นหลังสุดเกิดเป็นช่องว่าง (Voids) ที่มีลักษณะเป็นโพรงรูกลวงขึ้น จนบางครั้งเรียกว่า Crater pipe ที่พบเจอส่วนใหญ่มีรูเดียวขนาดค่อนข้างใหญ่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 8.44 (ก) และ (ข) จากการสืบค้นได้

พบข้อมูลเพิ่มเติมว่า ที่มาของการเรียกว่า Crater pipe นั้น คำว่า Pipe เจตนาจะหมายถึงรูอากาศที่กึ่งกลางจะมีลักษณะคล้ายกับอุปกรณ์สูบยาเส้นที่เรียกว่า Pipe



(ก) โพรงหดตัวแนวเชื่อม (มุมด้านบน) **(ข)** โพรงหดตัวแนวเชื่อม (มุมด้านข้าง)

รูปที่ 8.44 ลักษณะรูปแบบของโพรงหดตัวของน้ำโลหะที่ปลายสิ้นสุดแนวเชื่อม

ที่มา : CSWIP 3.1– Weld defects, 2012

สาเหตุของการเกิดพบว่าถึงแม้จะมีลักษณะของข้อบกพร่องเป็นประเภทโพรงอากาศก็ตาม แต่กลไกของการเกิดไม่เกี่ยวกับฟองอากาศ แต่จะเป็นเหตุของการหดตัวของน้ำโลหะของบ่อหลอมละลายเป็นสำคัญ ดังแสดงตัวอย่างของลักษณะรูปทรงของรอยหดตัวที่ปลายสิ้นสุดแนวเชื่อมของความต่างในแบบรอยต่อ ในรูปที่ 8.45 ซึ่งจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้มากในกรณีที่เชื่อมโลหะด้วยขบวนการเชื่อมแบบไม่เติมลวด (Autogenous welding) ด้วยเพราะเป็นการเชื่อมที่ไม่มีเนื้อโลหะมาช่วยเติมเต็มที่จุดสิ้นสุดการเชื่อม ซึ่งที่จุดนี้ต้องใช้เนื้อโลหะที่มากเพียงพอต่อการชดเชยการหดตัว ส่วนการเชื่อมแบบเติมลวดต้องเติมเนื้อเชื่อมให้มากเกินพอที่ช่วยชดเชยการหดตัว อาจใช้เทคนิคของการเชื่อมเข้ามาช่วย เช่น การสร้างแผ่นรองรับให้จุดสิ้นสุดการเชื่อมอยู่นอกชิ้นงานเชื่อมที่เรียกกันว่า “Runoff tab” หรืออาจใช้เทคนิคการควบคุมการเติมลวดให้มากขึ้น เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการเกิดโพรงจากการหดตัวของ ได้แก่ อัตราการเย็นตัวที่เร็วเกินไป การเชื่อมโลหะต่างชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากของเหลวไปเป็นของแข็งต่างกัน ซึ่งปัจจัยของการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งเป็นกลไกสาเหตุหลักของการเกิดข้อบกพร่องในลักษณะนี้

ดังนั้น แนวทางป้องกันจึงไม่ซับซ้อน ถ้าเข้าใจต้นเหตุก็สามารถลดปัจจัยที่เสี่ยงในการเกิดข้อบกพร่องลงได้ ซึ่งก็จะช่วยขจัดข้อบกพร่องได้ โดยเป็นเทคนิคของการเชื่อมเป็นสำคัญที่ต้องอาศัยความชำนาญของช่างเชื่อม รวมไปถึงเทคนิคการกำหนดปัจจัยการเชื่อมให้เหมาะสม ได้แก่ การปรับตั้งกระแสไฟเชื่อม ระยะอาร์ก มุมลวดเชื่อม และความเร็วในการเชื่อม ที่ต้องใช้เทคนิคปรับเมื่อถึงจุดสิ้นสุดของแนวที่จะเชื่อม ตัวอย่างเช่น การเชื่อมทิก (TIG) มักพบข้อบกพร่องในลักษณะนี้ค่อนข้างมากเพราะเป็นขบวนการเชื่อมที่นิยมเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม และเป็นขบวนการเชื่อมที่ใช้พลังงานความร้อน

ป้อนเข้าต่ำ (Low heat input) ดังนั้นการใช้เทคนิคปรับลดกระแสไฟเชื่อมแบบจากสูงไปต่ำ (Slope out) จนกว่าการอาร์กจะดับลง จะช่วยแก้ปัญหาได้ดี



การหดตัวปลายต่อชน การหดตัวปลายต่อเกย การหดตัวปลายต่อมุม

รูปที่ 8.45 ตัวอย่างลักษณะรูปแบบโพรงหดตัวของรอยต่อต่างแบบที่ปลายสิ้นสุดแนวเชื่อม

ที่มา : Crater crack of weld joint, 2017

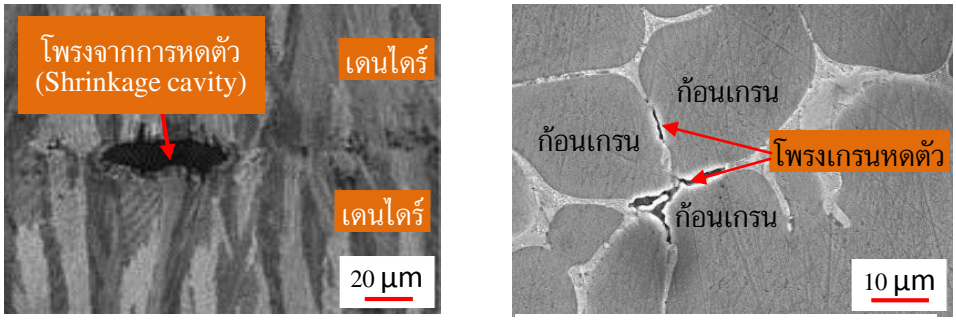
การตรวจสอบหาข้อบกพร่องสามารถระบุตำแหน่งที่ต้องการตรวจสอบได้แน่นอนที่ตรงบริเวณปลายสุดของการเชื่อมหรือที่เรียกว่า “จุดหยุดลวด” ซึ่งมีรูปแบบที่เป็นรูหรือโพรงที่สามารถเห็นได้ด้วยสายตา (VT) แต่ในบางกรณีที่อาจเกิดมีช่องว่างหรือรูที่มีขนาดเล็ก ๆ สามารถใช้วิธีการตรวจสอบด้วยวิธี PT หรือ MT สำหรับกรณีที่ต้องการตรวจสอบในแนวลึกของข้อบกพร่องสามารถเลือกใช้วิธีตรวจสอบแบบ RT หรือ UT ได้ การวิเคราะห์ประเมินผลของการตรวจสอบค่อนข้างง่ายเพราะเป็นข้อบกพร่องที่มีรูปแบบที่แน่นอนตายตัว คือเป็นโพรงอากาศแนวตรงลึกเข้าไปในแนวเชื่อม

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องที่เกิดจากการหดตัวของบ่อหลอมละลาย (Weld shrinkage) พบว่าลักษณะของการเกิดรูหรือโพรงจากการหดตัวนี้มีลักษณะที่คล้ายกัน ๆ ที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับฟองอากาศ ซึ่งเกิดขึ้นในระดับจุลภาค (Microstructure voids) ได้แก่

- การหดตัวจากโครงสร้างเดนไดร์ (Interdendritic microshrinkage) เป็นข้อบกพร่องที่มีลักษณะเป็นช่องอากาศเล็กที่เกิดขึ้นจากการหดตัวของน้ำโลหะในระดับจุลภาคที่บริเวณของการแข็งตัวเป็นโครงสร้างเดนไดร์ โดยจะมีรูปแบบที่เป็นแนวยาวไปตามช่องรอยต่อของเดนไดร์ในแต่ละแท่ง ตามกลไกของการเกิดเฟสของโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 8.46 (ก) สาเหตุหลักของการเกิดข้อพกพร่องในลักษณะนี้เกิดจากอัตราการเย็นตัวที่ไม่สมดุลกันในแต่ละโซนของการแข็งตัว (เนื่องจากปัจจัยของการระบายความความร้อนที่ต่างกัน) และเกิดจากการที่บ่อหลอมละลายแต่ละโซนมีส่วนผสมทางเคมีที่ไม่สมดุลกัน ทำให้เกิดการเฟสของแข็งในของเหลวที่ไม่สมดุลกัน เกิดแรงเค้นดึงระหว่างขอบของก้อนเดนไดร์ (Stress dendrite) เป็นเหตุให้เกิดเป็นรอยแยกขึ้นและเป็นที่รวมของอากาศที่ติดค้างอยู่ภายในเนื้อเชื่อม จึงเสมือนว่าเป็นข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศ ข้อบกพร่องระดับจุลภาคนี้จะต้องใช้กล้องที่มีกำลังขยายสูง ๆ ถึงจะสามารถมองเห็นได้ โดยปกติงานเชื่อมทั่ว ๆ ไปที่ไม่ใช่งานที่มีความเสี่ยงสูงหรืองานที่ต้องการประสิทธิภาพแนวเชื่อมสูง ข้อบกพร่องลักษณะนี้จะไม่มี

ผลกระทบต่อคุณภาพของแนวเชื่อม เนื่องจากเป็นความไม่ต่อเนื่องที่เล็กน้อย และที่สำคัญตรวจสอบหายากมาก

● การหดตัวที่ผ่านขอบเกรน (Transgranular microshrinkage) เป็นข้อบกพร่องระดับจุลภาคที่ต้องใช้กล้องที่มีกำลังขยายสูง ๆ มาตรวจหา ซึ่งจะเกิดที่รอยต่อของระหว่างก้อนเกรน โดยเป็นแนวยาวไปตามขอบเกรน สาเหตุหลักเกิดจากการหดตัวของก้อนเกรนของแต่ละก้อนที่เป็นเนื้อเดียวกันเข้าหากัน ปล่อยให้สารประกอบหรือสารมลทินอื่น ๆ ไปรวมตัวกันตามขอบเกรน ซึ่งสารประกอบที่ขอบเกรนมีการหดตัวที่ไม่เท่ากันจึงเกิดเป็นรอยแยกหรือช่องว่างเล็กขึ้นที่ขอบของเกรน ดังแสดงในรูปที่ 8.46 (ข)



(ก) การหดตัวจากโครงสร้างเดนไดร์ **(ข)** การหดตัวที่ผ่านขอบเกรน

รูปที่ 8.46 ตัวอย่างลักษณะรูปแบบโพรงหดตัวในเนื้อเชื่อมระดับจุลภาค (Microshrinkage)

ที่มา : Journal of Mechanical Engineering. Vol. 67, No. 2, 2017

การป้องกันข้อบกพร่องจากการหดตัวระดับจุลภาคเหล่านี้ต้องทำความเข้าใจบริบททางด้านโลหะวิทยางานเชื่อม (Welding metallurgy) ของโลหะที่นำมาเชื่อมโดยเฉพาะส่วนผสมทางเคมีต่อการเกิดเฟสของแข็ง เช่น การเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ (Delta–ferrite) ในการเชื่อมเหล็กไร้สนิมออสเทนนิติก ดังแสดงในรูปที่ 8.47 หรือการเชื่อมโลหะต่างชนิดที่มีอุณหภูมิการเป็นของแข็งต่างกัน จะเป็นต้นเหตุหลักของการเกิดโพรงอากาศจากการหดตัวขณะแข็งตัว รวมไปถึงอัตราการเย็นตัวที่เร็วเกินไป ถ้าสามารถควบคุมปัจจัยส่งเสริมเหล่านี้ก็สามารถลด หรือขจัดข้อบกพร่องจากการหดตัวในลักษณะนี้ได้

สำหรับการตรวจสอบหาข้อบกพร่องจากการหดตัวระดับจุลภาคนี้จะต้องใช้ขบวนการทางด้านห้องปฏิบัติการโลหะวิทยา (Metallographic) ที่ต้องเตรียมผิวชิ้นงานสำหรับกล้องจุลทรรศน์เพื่อเพิ่มกำลังขยายจึงจะสามารถเห็นข้อบกพร่องได้ การวิเคราะห์ผลก็ต้องใช้ความชำนาญที่ต้องแยกแยะระหว่างเฟสโครงสร้างอื่น ๆ ที่เกิดร่วมด้วย ปัจจุบันได้มีการพัฒนานำโปรแกรมวิเคราะห์ทำนายถึงเชิงพฤติกรรมของวัสดุ (Finite element analysis : FEA) เพื่อที่จะทราบได้ว่ามีโอกาศที่จะเกิดโพรงอากาศหรือไม่หรือจะเกิดที่บริเวณใดของเนื้อเชื่อม อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติของงานวิศวกรรมงานเชื่อมจะไม่ให้ความสำคัญกับข้อบกพร่องแบบนี้มากนัก ด้วยเพราะเป็นข้อบกพร่องระดับจุลภาคเล็ก ๆ ที่ส่งผลต่อ

ความเสียหายของการเชื่อมได้น้อยเมื่อเทียบกับข้อบกพร่องอื่น ๆ อีกหลากหลายในระดับมหาภาค (Macro defected) ที่เกิดขึ้นได้จากปฏิบัติการเชื่อม



รูปที่ 8.47 การหดตัวจากการเกิดของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในโครงสร้างเดนไดร์ของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก *ที่มา : Welding Journal, Vol. 97, 2018*

8.3 ข้อบกพร่องมีสารแปลกปลอมฝังในงานเชื่อม (Inclusion in weld)

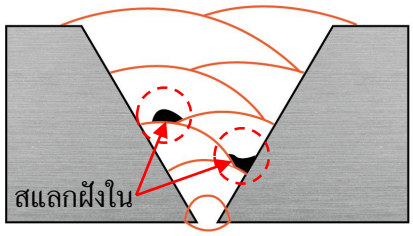
ข้อบกพร่องแบบที่เป็นลักษณะของการเกิดมีสสารที่เป็นของแข็งฝังตัวติดอยู่ในแนวเชื่อม ซึ่งไม่เป็นที่พึงประสงค์ของการเชื่อม ทำให้เนื้อเชื่อมเกิดเป็นข้อบกพร่องขึ้น โดยรูปแบบของสิ่งแปลกปลอมที่ฝังตัวอยู่ภายในเนื้อเชื่อมมีทั้งที่ฝังตัวเป็นลักษณะแบบเส้น (Line inclusions) และที่ฝังตัวเป็นลักษณะแบบกลม (Rounded inclusions) โดยทั้งสองแบบอาจฝังตัวอยู่กันเป็นกลุ่มก้อน (Cumulative) หรืออาจอยู่แบบอิสระโดดเดี่ยว (Isolated) โดยรูปแบบและลักษณะของการเกิดสิ่งแปลกปลอมที่ฝังตัวในแนวเชื่อมนั้นสามารถเกิดได้จากบทบาทของพวกสแลกจากฟลักซ์ของการเชื่อม (Slag) ออกไซด์ระหว่างการเชื่อม (Oxide) และเศษโลหะที่ไม่หลอมละลาย (Metallic) ดังจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดของแต่ละชนิดของสารแปลกปลอมที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อเชื่อมดังต่อไปนี้ อ้างอิงข้อมูลจาก Annette O'Brien (2017)

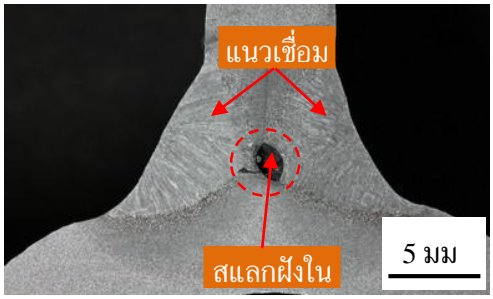
1. ข้อบกพร่องแบบสแลกฝังใน (Slag inclusion defect) เป็นข้อบกพร่องที่เกิดจากสารของแข็งแปลกปลอมที่ไม่ใช่โลหะที่เรียกว่า "สแลก" เกิดการฝังตัวอยู่ในเนื้อเชื่อม ซึ่งสแลกเกิดจากฟลักซ์ที่นำมาใช้ปกคลุมบ่อหลอมละลายทั้งที่เป็นผงฟลักซ์จากขบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (SAW) ผงฟลักซ์จากลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ของการเชื่อมมิก/แมก (GMAW) หรือฟลักซ์ที่หุ้มลวดเชื่อมของการเชื่อมไฟฟ้า (MMAW) ฟลักซ์ของขบวนการเชื่อมเหล่านี้เมื่อได้รับความร้อนจะหลอมละลายร่วมอยู่กับน้ำโลหะ และด้วยสมบัติที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าโลหะจึงลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำโลหะ ขณะที่แนวเชื่อมแข็งตัวจะกลายเป็นสแลกที่ผิวแนวเชื่อม ถ้าช่างเชื่อมควบคุมการเชื่อมได้ไม่ดี หรือเกิดความผิดพลาดในการเชื่อมทำให้ฟลักซ์ที่หลอมเหลวลอยขึ้นไม่ทันโดนกักตัวติดอยู่ภายใน เมื่อเย็นตัวกลายเป็นสแลกของแข็งติดอยู่ในเนื้อเชื่อมที่เรียกว่า "สแลกฝังใน" ดังแสดงตัวอย่างของสแลกฝังตัวอยู่ในแนวเชื่อมในรูปที่ 8.48

สาเหตุที่ก่อให้เกิดข้อบกพร่องแบบสแลกฝังในนี้ตัวการสำคัญคือ ฟลักซ์ ที่อาจเกิดการหลอมตัวของผงฟลักซ์ไม่สมบูรณ์ หรือที่หลอมสมบูรณ์แต่ลอยตัวไม่ทัน หรือเกิดจากการเชื่อมซ้อนทับกันหลายแนว (Multi pass) ที่ทำความสะอาดแต่ละแนวไม่ดีพอหรือเกิดจากการออกแบบรอยต่อที่กำจัดสแลก

ออกได้ยาก เป็นต้น นอกจากที่เกิดจากฟลักซ์ที่กล่าวมาแล้วนั้น ยังสามารถเกิดได้จากการที่ผิวโลหะงานเชื่อมมีคราบสนิมหรือสารปนเปื้อนต่าง ๆ หรือเศษโลหะ เมื่อเชื่อมทับลงไปก็จะทำให้กลายเป็นสารแปลกปลอมฝังตัวอยู่ในเนื้อเชื่อมได้เช่นกัน ในส่วนของปัจจัยการเชื่อมที่ส่งเสริมให้เกิดสแลกฝังในได้แก่ การเชื่อมที่ด้วยกระแสไฟต่ำเกินไป ความเร็วในการเดินลวดสูงเกินไป ลวดเชื่อมมีขนาดเล็กเกินไป และร่องบากรอยต่อที่แคบเกินไป ซึ่งกล่าวไว้ในWelding Defects ของ F. Yusof et al. (2014)

การป้องกันและการตรวจสอบข้อบกพร่องในลักษณะนี้สามารถทำได้ไม่ยากนัก วิธีการป้องกันหลักสำคัญอยู่ที่พยายามให้สแลกมีเวลามากพอในการลอยตัวขึ้นสู่ผิวด้านบนของน้ำโลหะเหลว ด้วยการกำหนดปัจจัยการเชื่อมให้เหมาะสม เลือกฟลักซ์ที่ถูกต้อง รวมไปถึงการออกแบบรอยต่อให้สะดวกในการกำจัดสแลกได้ และทำความสะอาดชิ้นงานโลหะเชื่อม สำหรับการตรวจสอบหาข้อบกพร่องจำเป็นต้องใช้วิธีที่สามารถตรวจสอบภายในเนื้อโลหะได้ เช่น วิธีการแบบ RT หรือ UT เพราะส่วนใหญ่เป็นการฝังตัวอยู่ภายใน (Internal defect) ดังตัวอย่างชิ้นงานที่พบข้อบกพร่องบนแผ่นฟิล์มเอกซเรย์ที่มีสแลกฝังในของแนวเชื่อมในรูปที่ 8.49 ถ้ากรณีฝังอยู่ที่ผิวก็สามารถตรวจสอบได้ด้วยสายตา พบว่าตำแหน่งของการฝังตัวจะขนานไปกับขอบของแนวเชื่อม ลักษณะเป็นรูปทรงยาวโค้งมนและเป็นไปในทิศทางเดียวกับการเชื่อม





(ก) สแลกฝังในแบบปิดผิว (Internal defect)

รูปที่ 8.48 ลักษณะตัวอย่างของงานเชื่อมที่มีข้อบกพร่องแบบสแลกฝังในของแนวเชื่อม (ก) แบบปิดผิว และ (ข) แบบเปิดผิว

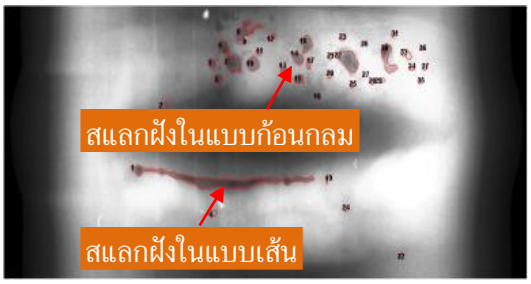
ที่มา : Welding Tips and Tricks, 2019



(ข) สแลกฝังในแบบเปิดผิว (External defect)

อย่างไรก็ตามการตรวจสอบพบข้อบกพร่องที่มีสแลกฝังในเนื้อเชื่อม ก็ยังไม่สามารถสรุปได้ทันทีว่าไม่ผ่านคุณภาพ จะต้องนำผลไปตรวจเทียบกับมาตรฐานเกณฑ์การยอมรับให้มีได้ เพราะเนื่องจากเป็นข้อบกพร่องที่มีความเสี่ยงที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับข้อบกพร่องแบบรอยแตก (Cracks)

เช่น เกณฑ์ยอมรับคุณภาพรอยเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์ของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม มาตรฐาน มอก. 2722–2559 ของประเทศไทย หรือเกณฑ์ตามมาตรฐานของกลุ่มประเทศยุโรป BS EN ISO 5817 : 2017 มีเกณฑ์การยอมรับ 3 ระดับคุณภาพ หรือ เกณฑ์ตามมาตรฐานการยอมรับของ American Welding Society : AWS B1.11:2000 เป็นต้น

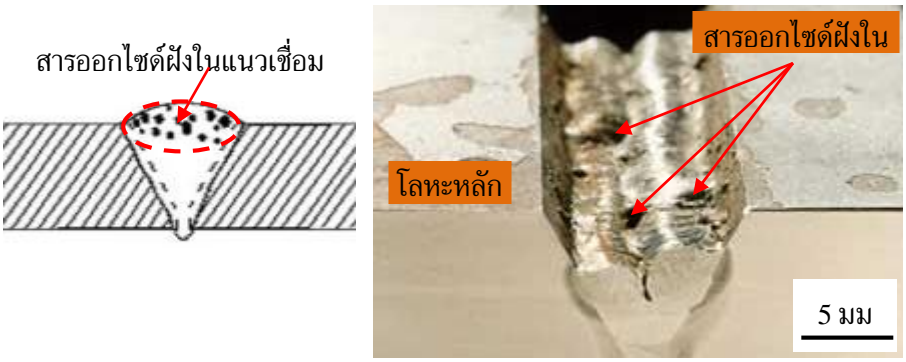


รูปที่ 8.49 ตัวอย่างชิ้นงานการเชื่อมท่อที่พบข้อบกพร่องแบบสแลกฝังในของแนวเชื่อมที่ทดสอบด้วยวิธี RT
ที่มา : Journal of NDT&E International, Vol. 86 (7–13), 2017

2. ข้อบกพร่องแบบสารออกไซด์ฝังใน (Oxide inclusion defect) จัดอยู่ในประเภทของข้อบกพร่องที่คล้าย ๆ กับแบบสแลกฝังในแต่จะต่างกันที่ต้นเหตุที่มาของสารแปลกปลอมของแข็ง (Non–metallic particle) โดยข้อบกพร่องนี้จะเกิดจากสารประกอบออกไซด์ที่ปะปน หรือเคลือบอยู่บนพื้นผิวโลหะงานที่นำมาเชื่อม (Base metals) และที่ผิวลวดเชื่อม (Filler metals) เช่น สารประกอบโครเมียมออกไซด์ (CrO_2) ที่เคลือบอยู่ที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม หรือสารประกอบอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่เคลือบอยู่ที่ผิวของโลหะอลูมิเนียม หรือที่เคลือบอยู่ที่ผิวไทเทเนียม (TiO_2) หรือที่ผิวโลหะชนิดอื่น ๆ ที่มีเคลือบผิวเพื่อปกป้องการกัดกร่อน (โลหะเคลือบสังกะสี เคลือบดีบุก และเคลือบโครเมียม) ซึ่งรวมไปถึงสีทาเคลือบผิวโลหะด้วย เป็นต้น สารประกอบออกไซด์บนพื้นผิวเหล่านี้เมื่อทำการเชื่อมทับลงไปมักจะไม่หลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกับบ่อหลอม แต่จะปะปนอยู่ภายในน้ำโลหะที่เหลว และด้วยเหตุที่ค่าความหนาแน่นที่มักต่ำกว่าน้ำโลหะเหลวจึงค่อย ๆ ลอยตัวขึ้นมาอยู่ที่ผิวบนของบ่อหลอมเป็นเหมือนขี้ตะกรันที่รูล้นของงานหล่อโลหะ เมื่อน้ำโลหะเย็นตัวสารประกอบเหล่านี้ก็จะโดนฝังติดอยู่บริเวณด้านผิวบนของแนวเชื่อม ซึ่งจะเรียกสสารของแข็งที่ฝังติดอยู่นี้ว่า “สารออกไซด์ฝังใน” ดังแสดงลักษณะของข้อบกพร่องแบบนี้ในรูปที่ 8.50 โดยอ้างอิงข้อมูลจาก CSWIP 3.1 (2009)

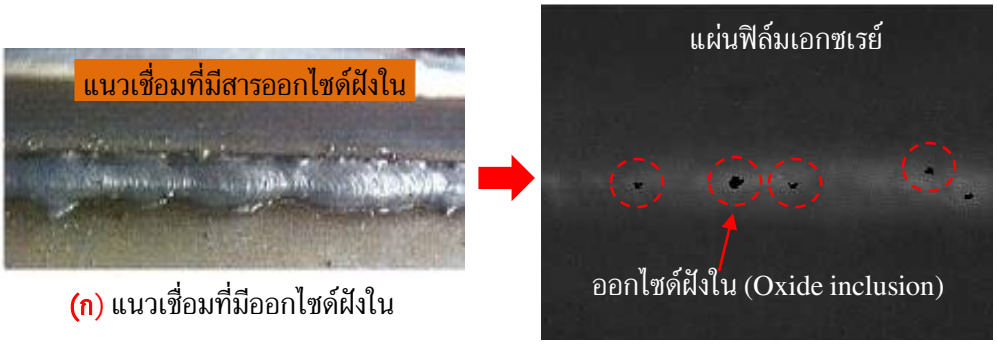
การป้องกันไม่ให้เกิดสารประกอบของแข็งที่เป็นจำพวกออกไซด์ต่าง ๆ ฝังติดอยู่ในเนื้อเชื่อมจนกลายเป็นข้อบกพร่องที่ไม่พึงประสงค์นั้น วิธีการที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ การทำความสะอาดเพื่อขจัดออกไซด์เคลือบผิวต่าง ๆ ให้หมดไปบนผิวโลหะชิ้นงานที่จะนำมาทำการเชื่อม ซึ่งอาจจะใช้เทคนิคทางกล เช่น การขัด การขูด หรือการเจียรนัย หรืออาจใช้เทคนิคทางเคมี ที่อาศัยสารเคมีไปกำจัดเพื่อทำความสะอาด ซึ่งเมื่อไม่มีสารออกไซด์ที่เป็นต้นเหตุของปัญหา การป้องกันการเกิดสารออกไซด์ฝังในเนื้อเชื่อมก็จะประสบความสำเร็จ

การตรวจสอบหาข้อบกพร่องมักจะนิยมใช้วิธีการแบบ RT กับ UT เพราะความหลากหลายของรูปทรงออกไซด์ (Irregular oxide shape) ซึ่งต่างจากรูปทรงของโพรงอากาศ (Regular oxide shape) จึงต้องใช้ภาพบนแผ่นฟิล์มมาวิเคราะห์เปรียบเทียบ ซึ่งโดยปกติสมบัติของสารประกอบออกไซด์จะมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าเนื้อโลหะรอบ ๆ ดังนั้น จะปรากฏเห็นเป็นความไม่ต่อเนื่องที่มีรูปทรงหลากหลายและสีที่เข้ม (Dark) บนแผ่นฟิล์มภาพอย่างชัดเจน ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 8.51



รูปที่ 8.50 ลักษณะของข้อบกพร่องแบบสารออกไซด์ฝังตัวในของแนวเชื่อม

ที่มา : TWI–Defects / Imperfections in welds, 2016



(ก) แนวเชื่อมที่มีออกไซด์ฝังใน

(ข) แผ่นฟิล์มตรวจสอบแบบ RT

รูปที่ 8.51 ตัวอย่างชิ้นงานเชื่อมและแผ่นฟิล์มตรวจสอบที่มีสารออกไซด์ฝังตัวในแนวเชื่อม

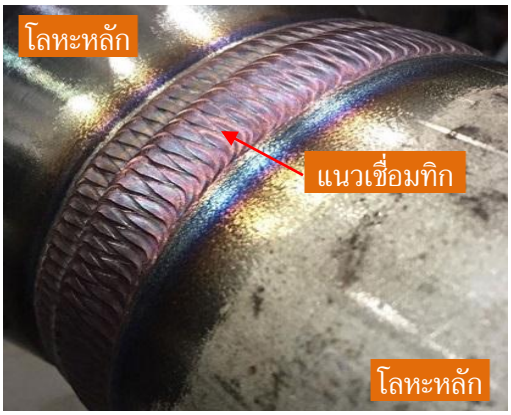
ที่มา : Defects observed in radiographic testing, 2013

3. ข้อบกพร่องแบบสารโลหะฝังใน (Metallic inclusion defect) เป็นข้อบกพร่องแบบชนิดที่มีสิ่งแปลกปลอมฝังตัวอยู่ในเนื้อเชื่อมอีกชนิดหนึ่ง โดยสิ่งแปลกปลอมดังกล่าวจะเป็นจำพวกของโลหะ (Metallic) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นโลหะชนิดที่มีจุดหลอมเหลวสูง เช่น ทังสเตน ทองแดง หรือ โลหะอื่น ๆ โดยโลหะเหล่านี้จะหลุดเข้าไปปะปนอยู่ในบ่อหลอมละลายในรูปของเศษหรือก้อนเล็ก ๆ (Particles) เมื่อน้ำโลหะของบ่อหลอมละลายเย็นตัวลงก็เกิดเป็นของแข็งที่แปลกปลอมฝังตัวอยู่ในเนื้อเชื่อมที่เรียกว่า “ข้อบกพร่องสารโลหะฝังใน” จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า สารโลหะที่เป็นปัญหาและพบเจอ

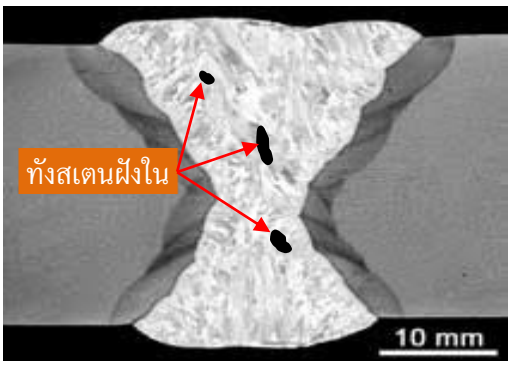
กันบ่อย ๆ มักเกิดจากโลหะทังสเตนที่ใช้เป็นแท่งอิเลคโทรด (Non–Consumable) เพื่อทำการอาร์กของขบวนการเชื่อมทิก (GTAW) ขบวนการเชื่อมพลาสมา (PAW) โดยปกติขณะที่อาร์กปลายของลวดทังสเตนจะจ่ออยู่เหนือชิ้นงานที่มีระยะห่างเท่ากับระยะอาร์กของการเชื่อม (Arc length) ซึ่งต้องควบคุมให้ระยะห่างเท่า ๆ กันไปตลอดการเชื่อม แต่ถ้าการควบคุมได้ไม่เที่ยงตรงเกิดการกดปลายลวดทังสเตนให้จุ่มลงไปในบ่อหลอมละลาย ปลายของลวดที่แหลมและเล็กจะขาดหลุดเข้าไปในน้ำโลหะเหลว เมื่อน้ำเหล็กแข็งตัวเศษโลหะทั้งสเตนก็จะเป็นสิ่งแปลกปลอมฝังตัวอยู่ในเนื้อเชื่อม (Metallic inclusion) นอกจากนี้ ยังสามารถเกิดจากปัจจัยอื่น ๆ ได้อีก เช่น เกิดจากการอาร์กเชื่อมด้วยกระแสไฟที่สูงมากเกินไป หรือการกำหนดป้อนพลังงานความร้อนมากเกินไป (High heat input) หรือการใช้แก๊สปกคลุมที่มีออกซิเจนผสมอยู่มาก โดยปัจจัยเหล่านี้จะเป็นตัวเพิ่มปริมาณความร้อนที่ทำให้ลวดทังสเตนหลอมละลาย และสุดท้ายจะฝังตัวเป็นของแข็งอยู่ภายในแนวเชื่อมทั้งสิ้น ดังรูปที่ 8.52 แสดงลักษณะของการอาร์กเชื่อมด้วยลวดทังสเตนกับชิ้นงาน (รูป ก) กับแนวเชื่อมที่ใช้การอาร์กด้วยลวดทังสเตน (รูป ข) และลักษณะรูปแบบของสารโลหะทังสเตนที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อเชื่อม (รูป ค)



(ก) การอาร์กของลวดทังสเตน
ที่มา : American Torch Tip, 2021



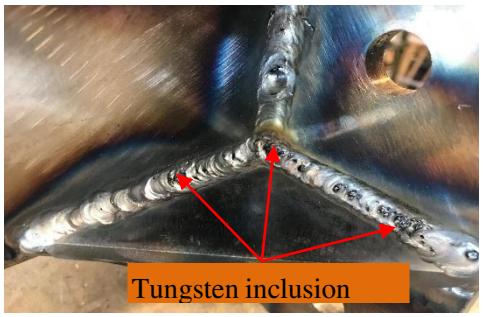
(ข) แนวเชื่อมที่มีโลหะทังสเตนฝังใน
ที่มา : Weld by scott raabe, 2015



(ค) ลักษณะของโลหะทังสเตนฝังใน
ที่มา : NDT&Condition Monitoring, 2012

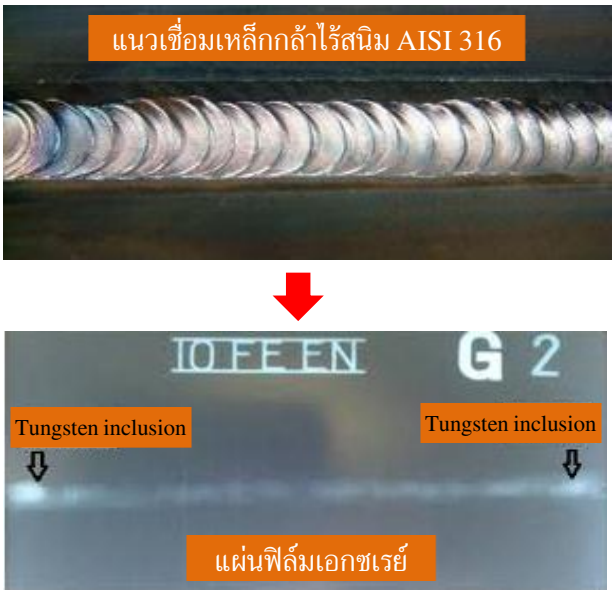
รูปที่ 8.52 ลักษณะการเกิดและรูปแบบของสารโลหะทังสเตนจากการอาร์กที่เกิดการฝังตัวในแนวเชื่อม

การป้องกันและการตรวจสอบ สำหรับการป้องกันไม่ยุ่งยากสามารถทำได้ เพราะต้นเหตุของสารแปลกปลอมมาจากลวดทังสเตนที่นำมาใช้อาร์กเชื่อม ได้รับความร้อนมากเกินไปจนเกิดการหลอมละลายปะปนเข้ามา แก้ไขด้วยการลดความร้อนลงหรือไม่ลดความร้อนแต่ใช้วิธีเพิ่มขนาดของลวดทังสเตนให้โตขึ้น หรืออาจใช้วิธีการเลือกชนิดของลวดทังสเตนแบบผสมที่มีจุดหลอมเหลวที่สูงขึ้น ใช้เป็น Thoriated tungsten หรือ Zirconium tungsten และเทคนิคหรือความชำนาญของช่างเชื่อมที่ช่วยในการรักษาหรือการควบคุมระยะอาร์กให้คงที่และเหมาะสมเพื่อไม่ให้เกิดการจุ่มปลายลวดทังสเตนลงในบ่อหลอมละลาย ส่วนการตรวจสอบหาข้อบกพร่องที่เกิดจากโลหะทังเตนฝังใน สามารถใช้วิธีแบบ VT กรณีที่เกิดบริเวณผิวบนแนวเชื่อมเพราะเป็นข้อบกพร่องที่เด่นชัดมาก ดังแสดงในรูปที่ 8.53



รูปที่ 8.53 การตรวจสอบหาข้อบกพร่องโลหะทังสเตนฝังในแนวเชื่อมที่เกิดบริเวณผิวด้วยวิธีแบบ VT
ที่มา : TIG welding problem, 2019

สำหรับกรณีที่เกิดการฝังตัวอยู่ลึกภายในจะเป็นต้องใช้วิธีแบบ RT ที่อาศัยพิจารณาจากภาพถ่าย เพราะรูปร่างของทังสเตนฝังในมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน และแยกตัวเกิดตามจุดต่าง ๆ ไม่แน่อน ดังตัวอย่างแผ่นฟิล์มตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยวิธีแบบ RT ของงานวิจัยในการเชื่อมการต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316 ด้วยขบวนการเชื่อมทิก สามารถเห็นทังสเตนฝังในเป็นสีขาวสว่าง ในรูปที่ 8.54



รูปที่ 8.54 การตรวจสอบหาข้อบกพร่องโลหะทังสเตนฝังในแนวเชื่อมด้วยวิธีแบบ RT
ที่มา : Key Engineering Materials, Vol. 833, 2020

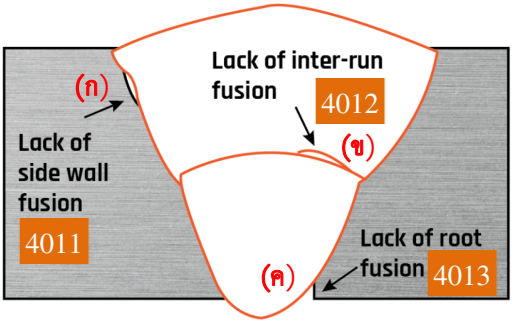
8.4 การหลอมละลายและหลอมลึกไม่สมบูรณ์ในแนวเชื่อม (Lack of fusion and penetration in weld)

การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding process) ที่ดีจะเกิดขึ้นบนขบวนการหลอมละลายของโลหะงานที่เชื่อมและลวดเชื่อมที่สมบูรณ์แบบ เพราะถ้าเกิดมีการหลอมละลายที่ไม่สมบูรณ์จะส่งผลทำให้แนวเชื่อมเกิดเป็นข้อบกพร่องขึ้น ซึ่งข้อบกพร่องที่เกิดจากสาเหตุนี้จะมีอยู่สองลักษณะ คือ การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Lack of fusion หรือ Incomplete fusion) กับการหลอมลึกไม่สมบูรณ์ (Lack of penetration หรือ Incomplete penetration) โดยจะได้กล่าวในรายละเอียดของข้อบกพร่องทั้งสองดังต่อไปนี้ โดยอ้างอิงขอมูลพื้นฐานจาก AROTEC Inspection Partner Co. (2021)

1. การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Lack of fusion) เป็นข้อบกพร่องที่พบเจอกันค่อนข้างบ่อยในการเชื่อมแบบหลอมละลายทุกขบวนการเชื่อมทั้งการเชื่อมแบบเติมลวดและไม่เติมลวด โดยเป็นข้อบกพร่องที่มีลักษณะไม่เกิดการหลอมละลายในบางจุดหรือบางตำแหน่งของแนวเชื่อม (Non-melting) ซึ่งประเด็นเกิดจากการให้ความร้อนเชื่อมแล้วโลหะชิ้นงานไม่หลอมละลาย มาจากสาเหตุที่หลากหลาย ได้แก่ ความร้อนเชื่อมที่ป้อนเข้าต่ำเกินไป การออกแบบรอยต่อไม่ถูกต้อง การควบคุมหัวเชื่อมไม่ถูกต้อง (ส่ายหัวเชื่อม) มุมหัวเชื่อมไม่ถูกต้องโดยเฉพาะการเชื่อมโลหะต่างชนิดที่จุดหลอมละลายต่างกัน เป็นต้น โดยปกติตำแหน่งของข้อบกพร่องที่เกิดโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 6520-1 และมาตรฐานของไทย ISO/TS 17845 ได้ระบุตำแหน่งของการเกิดข้อบกพร่องแบบหลอมละลายไม่สมบูรณ์ไว้ ดังแสดงในรูปที่ 8.55 มี 3 ตำแหน่ง ดังนี้

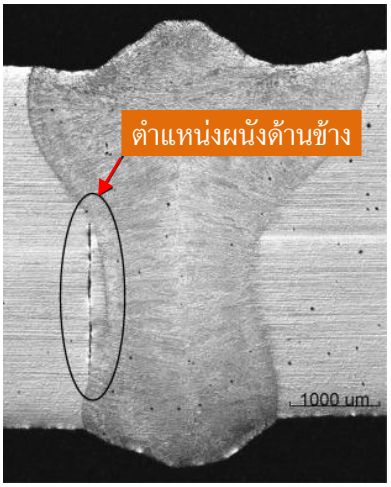
- การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ที่ผนังด้านข้าง (รหัสอ้างอิง 4011) ตำแหน่งนี้เกิดจากการไม่หลอมละลายของผิวหน้าหรือผนังของรอยต่อโลหะชิ้นงานเชื่อม มักเกิดจากการสายหัวเชื่อมหรือการควบคุมหัวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ กระแสไฟเชื่อมต่ำเกินไป มุมหัวเชื่อมไม่ถูกต้องทำให้น้ำโลหะไหลไปก่อนการอาร์กและอาจเกิดจากผิวชิ้นงานมีออกไซด์ปะปน ดังแสดงตัวอย่างข้อบกพร่องในรูปที่ 8.55 (ก)
- การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ระหว่างแนวเชื่อม (รหัสอ้างอิง 4012) ความไม่สมบูรณ์ลักษณะนี้จะเกิดกับการเชื่อมโลหะที่หนา ที่มีการเดินลวดเชื่อมมากกว่าหนึ่งแนว (Multi pass welding) ตำแหน่งนี้จะเกิดที่บริเวณชั้นรอยต่อระหว่างแนวถัดไป สาเหตุหลักมาจากการใช้กระแสไฟเชื่อมต่ำเกินไป หรือความเร็วเชื่อมสูงเกินไป หรือใช้เทคนิคการเชื่อมไม่ถูกต้อง เช่น ในกรณีเชื่อมแนวรากกับเชื่อมทับหน้าใช้ขบวนการเชื่อมต่างกันหรือลวดเชื่อมต่างกัน (เชื่อมแนวรากด้วยขบวนการ TIG เชื่อมทับหน้าด้วยขบวนการ MIG) และนอกจากนี้ยังมีสาเหตุจากการทำความสะอาดแนวเชื่อมแรกไม่สมบูรณ์มีสแลกตกค้างปิดกั้นการอาร์ก เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 8.55 (ข)
- การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ที่แนวราก (รหัสอ้างอิง 4013) ตำแหน่งนี้เกิดขึ้นที่ด้านราก (Root) ของแนวเชื่อม ที่เกิดการไม่หลอมละลายของโลหะหลักที่รอยบากหน้างานด้านล่าง สาเหตุเกิดจากหลายส่วนร่วมกัน ได้แก่ การเตรียมระยะห่างของช่องราก (Root gap) แคบหรือกว้างเกินไป ลวดเชื่อมเล็กหรือใหญ่เกินไปหรือมุมลวดไม่ถูกต้อง ความสัมพันธ์ของกระแสไฟกับความเร็วในการเชื่อมไม่เหมาะสม

รวมถึงการถ่ายโอนน้ำโลหะของการเชื่อม MIG/MAG เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างข้อบกพร่องในรูปที่ 8.55 (ค)



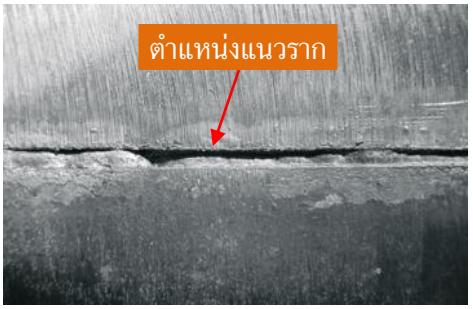
รูปที่ 8.55 การเกิดข้อบกพร่องแบบการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ในตำแหน่งต่าง ๆ ของแนวเชื่อม

ที่มา : Technoweld, Common Welding Defects, 2019



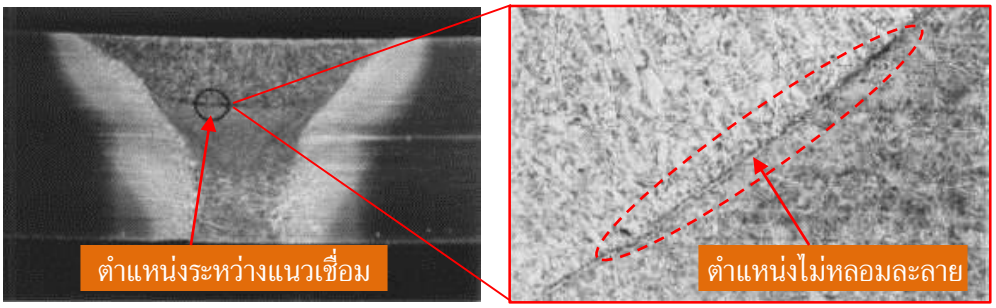
(ก) การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ที่ผนังด้านข้าง

ที่มา : Journal of Optics and Laser Tehnology, Vol. 90 : 107–116, 2017



(ค) การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ที่แนวราก

ที่มา : BOC –Lack of fusion, 2011



(ข) การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ระหว่างแนวเชื่อม

ที่มา : Gabriel RIHAR. Lack of fusion in welded joints, 2000

การป้องกันการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ทั้งสามตำแหน่งที่กล่าวถึงข้างต้นนั้น ทำได้ไม่ยากมากนัก พบว่ามีสองส่วนที่ต้องควบคุมให้ถูกต้องและเที่ยงตรง คือ ส่วนที่ 1. การเตรียมรอยต่อของโลหะชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 8.56 (ก) กล่าวคือ ต้องออกแบบรอยต่อให้สามารถวางมุมหัวเชื่อมได้ถูกต้อง โดยเฉพาะการเชื่อมโลหะต่างชนิดที่มีจุดหลอมละลายต่างกัน (ที่ต้องบังคับบ่อหลอมละลายด้วยมุมลวดเชื่อมให้เอียงไปทางโลหะที่มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่สูงกว่า) ต้องสร้างระยะห่างของช่องรากให้เหมาะสม ผิวชิ้นงานต้องสะอาด รวมถึงการเชื่อมแทค (Tack welding) ชิ้นงานต้องสมดุลและแนวเชื่อมต้องตรง (Alignment) ดังแสดงในรูปที่ 8.56 (ข) กับส่วนที่ 2. การกำหนดปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสม โดยเฉพาะความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงาน (Heat input) หรือการเลือกขบวนการเชื่อม ขนาดลวดเชื่อม แก๊สปกคลุมแนวเชื่อมที่เหมาะสม รวมไปถึงความเร็วในการเชื่อม และที่สำคัญที่สุด คือช่างเชื่อมต้องมีทักษะในการควบคุมหัวเชื่อมไม่ว่าเป็นทักษะการส่ายลวดเชื่อม ทักษะการควบคุมระยะอาร์ก โดยเฉพาะการเชื่อมโลหะที่หนาต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 8.56 (ค) อย่างไรก็ตามให้ระลึกอยู่เสมอว่าความร้อนจากการอาร์กจะเป็นตัวการสำคัญที่จะทำให้เกิดข้อบกพร่องแบบหลอมละลายไม่สมบูรณ์ จึงต้องคอยควบคุมเป็นตัวหลักในการเชื่อม



(ก) การเตรียมบากรอยต่อโลหะงานที่จะเชื่อม



(ข) การเชื่อมแทครอยต่อโลหะงานที่จะเชื่อม

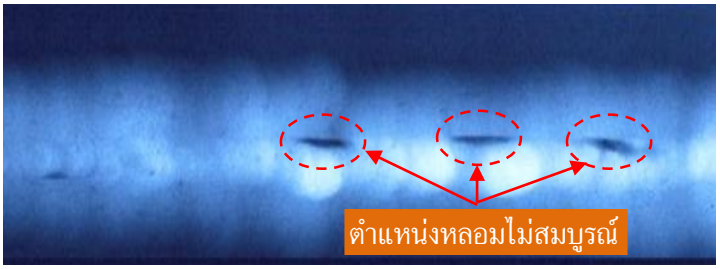


(ค) การเตรียมต่อโลหะงานที่หนาต่างกัน

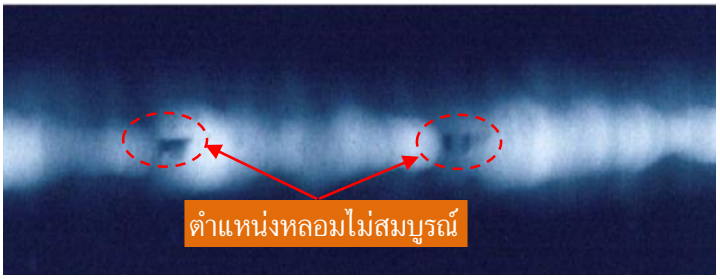
รูปที่ 8.56 การเตรียมงานที่ดีเพื่อป้องกันการเกิดข้อบกพร่องแบบการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ในตำแหน่งต่าง ๆ ของแนวเชื่อม

ที่มา : Tack welding–General Technical knowledge, 2018

การตรวจสอบหาข้อบกพร่องของความไม่สมบูรณ์ของการหลอมละลายนั้น ในกรณีที่เกิดบริเวณผิวด้านบนเป็นแบบผิวเปิดสามารถตรวจสอบด้วยสายตา (VT) หรือใช้วิธีแบบ PT และ MT แต่สำหรับกรณีที่ต้องการตรวจหาในตำแหน่งที่เกิดอยู่ภายในแนวเชื่อมต้องใช้วิธีแบบ RT หรือ UT การวิเคราะห์ผลค่อนข้างง่ายเพราะลักษณะรูปทรงจะเป็นเส้นและมีตำแหน่งของการเกิดที่คาดเดาได้ ดังแสดงในรูปที่ 8.57 แสดงตัวอย่างแผ่นฟิล์มจากวิธีการตรวจสอบแบบ RT ซึ่งจะเห็นข้อบกพร่องที่ไม่หลอมละลายเป็นเส้นตรงสีดำ



(ก) ตำแหน่งการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ที่ผนังด้านข้าง



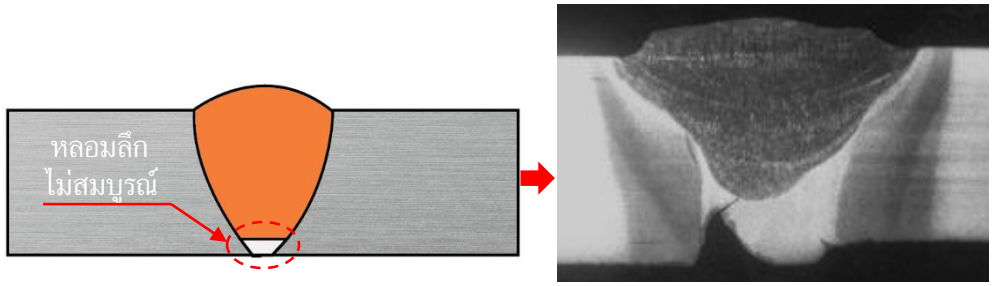
(ข) ตำแหน่งการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ที่แนวราก

รูปที่ 8.57 แผ่นฟิล์มตรวจสอบหาข้อบกพร่องของการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ของแนวเชื่อม *ที่มา : Image processing for radiographic filme of weld inspection, 2011*

2. การหลอมลึกไม่สมบูรณ์ (Lack of penetration) เป็นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับการเชื่อมต่อโลหะสองชิ้นเข้าด้วยกัน รูปแบบของข้อบกพร่องเป็นลักษณะแนวเชื่อมที่เนื้อโลหะหลอมละลายจากการอาร์กไม่มากเพียงพอต่อขนาดของแนวเชื่อมที่ต้องการหรือที่ระบุไว้ (การหลอมลึกที่ได้น้อยกว่าการหลอมลึกที่ระบุ) โดยมักพบได้จากลักษณะของรอยต่อชนบากหน้างานแบบด้านเดียว (Signgle V joint) และแบบบากหน้างานสองด้าน (Double V joint) และรวมไปถึงรอยต่อแบบมุม (fillet joint) ดังรายละเอียดของแต่ละรูปแบบรอยต่อ ดังนี้

- การหลอมลึกไม่สมบูรณ์ของลักษณะรอยต่อชนบากหน้างานแบบด้านเดียว (Signgle V joint) ข้อบกพร่องลักษณะแบบนี้เกิดขึ้นค่อนข้างมาก เพราะเป็นการบากหน้างานด้านเดียวซึ่งร่องตัว V ที่ลึกจะมีอุปสรรคในการสร้างบ่อหลอมละลายให้มากพอที่จะทะลุไปหลอมอีกด้านได้ โดยเฉพาะโลหะงานที่มีความหนามาก ๆ และมีขีดจำกัดหรือบังคับให้สามารถบากร่องได้ด้านเดียว จึงมักเกิดการหลอมไม่สมบูรณ์ขึ้นที่ตำแหน่งบริเวณด้านรากของรอยต่อ (Root gap) ทำให้ขอบของรอยต่อไม่เกิดการหลอม

ละลาย และไม่เกิดเนื้อเชื่อมที่จะโผล่ออกมาเป็นส่วนของแนวซึมลึก ซึ่งบางครั้งเรียกข้อบกพร่องนี้ว่า “การหลอมลึกไม่สมบูรณ์แนวราก (Incomplete root penetration)” ดังแสดงในรูปที่ 8.58

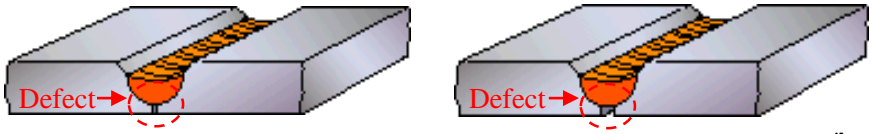


(ก) รูปแบบของการหลอมลึกไม่สมบูรณ์ที่ราก *ที่มา : Australian Welding Institute, 2015*

(ข) ตัวอย่างการหลอมลึกไม่สมบูรณ์ที่ราก *ที่มา : UT of butt weld joint by TOFD Technique*

รูปที่ 8.58 การหลอมลึกไม่สมบูรณ์ของลักษณะรอยต่อชนบากหน้างานแบบด้านเดียว

สาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดข้อบกพร่องลักษณะนี้มาจากการสร้างระยะของราก (Root gap) ไม่เหมาะสมที่อาจกว้างเกินไปหรือแคบมากเกินไป และการเลือกปริมาณกระแสไฟเชื่อมที่ไม่สัมพันธ์กันกับช่องว่างที่สร้างไว้ รวมไปถึงความสัมพันธ์ของการเลือกขนาดของลวดเชื่อม เช่น ช่องรากแคบใช้ลวดเชื่อมใหญ่กระแสต่ำ หรือช่องรากกว้างเลือกใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็ก เป็นต้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 8.59 (ก) แสดงลักษณะของการซึมลึกที่ไม่สมบูรณ์จากการกำหนดช่องรากที่แคบเกินไป ส่วน รูป (ข) แสดงถึงลักษณะของช่องรากที่กว้างเกินไป อย่างไรก็ตามช่างเชื่อมสามารถแก้ปัญหาเฉพาะหน้าได้ด้วยการปรับเปลี่ยนขนาดของลวดเชื่อมและกระแสไฟเชื่อม รวมถึงค่าความร้อนรวมที่ป้อนสู่การอาร์ก (Heat input) เช่น ช่องรากแคบมากปรับขนาดลวดเชื่อมลง เพิ่มกระแสไฟเชื่อม เดินลวดช้าลง หรือกรณีช่องรากกว้างมากสามารถปรับขนาดลวดเชื่อมให้โตขึ้น เดินลวดช้าลง เป็นต้น



(ก) สร้างช่องราก (Root) แคบเกินไป

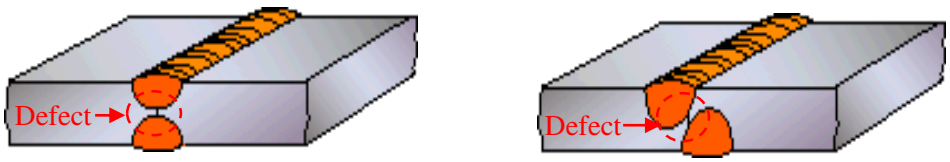
(ข) สร้างช่องราก (Root) กว้างเกินไป

รูปที่ 8.59 ลักษณะของการเตรียมช่องราก (Root) ที่ผิดผลาดของรอยต่อชนบากงานด้านเดียว
ที่มา : TWI–Weld Defects/Imperfection–Incomplete root and Fusion Penetration, 2013

- การหลอมลึกไม่สมบูรณ์ของลักษณะรอยต่อชนบากหน้างานแบบสองด้าน (Double V joint) มักจะเกิดกับการเชื่อมโลหะที่มีความหนามาก ๆ โดยทำการบากหน้างานทั้งสองด้านเพื่อลดความเสี่ยงจากการบากงานด้านเดียว แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีแนวโน้มที่จะเกิดการหลอมละลายที่ไม่สมบูรณ์ขึ้นที่จุดรอยต่อของรากตัว V ทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูปที่ 8.60 (ก) ซึ่งสาเหตุที่ส่งเสริมให้เกิดข้อบกพร่อง

ลักษณะนี้มาจากการเตรียมรอยบากไม่ถูกต้อง ที่ลวดเชื่อมเข้าไปอาร์กได้ไม่ถึง หรือใช้ขนาดลวดเชื่อมไม่เหมาะสมมีขนาดที่โตเกินไปกับช่องรากที่เล็ก ๆ พบว่า ในบางสถานการณ์ช่องรากถูกกำหนดไว้ในขีดจำกัดที่ปรับแก้ไม่ได้ ช่างเชื่อมสามารถเลือกใช้ขนาดลวดเชื่อมในขนาดต่าง ๆ ตามความเหมาะสม เช่น ขั้นตอนการเชื่อมแนวรากใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็ก (Root pass) แถวทับหน้าใช้ลวดที่มีขนาดที่โตขึ้น หรือปัจจุบันที่นิยมใช้แก้ปัญหากัน คือใช้ขบวนการเชื่อมทิก (TIG) ทำการเชื่อมแนวแรก เพราะการอาร์กเกิดจากลวดทังสเตน (Non–Consumable) ที่ควบคุมการหลอมละลายให้ทะลุขอบด้านล่างได้ จากนั้นเชื่อมทับหน้าในแนวถัดไปด้วยขบวนการเชื่อมมิก (MIG) หรือขบวนการเชื่อมไฟฟ้าลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (MMAW) จะช่วยลดปัญหาการเกิดข้อบกพร่องจากการไม่หลอมในแนวลึกได้ อย่างไรก็ตาม ทักษะความชำนาญของช่างเชื่อมต้องสูงมากเพียงพอในการควบคุมบ่อหลอมละลายด้านราก เพราะอาจก่อให้เกิดข้อบพร่องชนิดรอยกัดแหว่งของแนวราก (Undercut) หรือแนวเชื่อมรากโผล่ออกมากเกินไป (Excess penetration) หรืออาจเกิดความไม่สมบูรณ์ของรูปร่างแนวเชื่อม (Imperfect shape) เป็นต้น

นอกจากที่กล่าวมายังพบปัญหาที่เกิดจากการที่ต้องเชื่อมงานที่มีรอยบากที่เยื้องกัน (Misplaced welds) ดังแสดงในรูปที่ 8.60 (ข) เป็นปัญหาที่แก้ไขยากต้องใช้ทักษะการเอียงมุมลวดเชื่อมเพื่อสร้างบ่อหลอมละลายให้ไปอยู่ในตำแหน่งของช่องรากที่ไม่ตรงกัน และอาจใช้เทคนิคการเชื่อมทิกที่สร้างและควบคุมบ่อหลอมได้ดีเชื่อมแนวรากให้สมบูรณ์ก่อนแล้วต่อด้วยขบวนการเชื่อมเติมลวดชนิดอื่น ๆ จากการสืบค้นงานวิจัยได้มีการนำเทคนิคการเชื่อมแบบไฮบริด (Hybrids) มาแก้ปัญหานี้ มีทั้งคู่ของ TIG + MIG/MAG หรือ TIG + MMAW หรือ LAW + MIG/MAG หรือ PAW + MIG/MAG เป็นต้น โดยที่นำเอาจุดเด่นของแต่ละวิธีมาใช้ โดยเฉพาะการเชื่อมแนวรากจะใช้วิธีการเชื่อมที่อาร์กแบบไม่เติมลวด (Non–Consumable) และยังพบว่าเทคนิคการเชื่อมแบบไฮบริดนี้ยังนิยมใช้กับการเชื่อมต่อโลหะที่ต่างชนิดกัน (Dissimilar welding) เพราะการเชื่อมแนวรากของโลหะที่ต่างชนิดกันจะมีความยุ่งยากมากขึ้น เพราะพฤติกรรมการหลอมละลายจะแตกต่างกัน เช่น มีจุดหลอมเหลวต่างกัน มีส่วนผสมทางเคมีต่างกัน รวมถึงความหนาของโลหะงานที่นำมาเชื่อมต่างกัน ดังนั้น ช่างเชื่อมต้องพิจารณาให้รอบคอบทุก ๆ ปัจจัยที่จะช่วยในการลดความเสี่ยงของการเกิดข้อบกพร่องแบบการหลอมลึกไม่สมบูรณ์ของการเชื่อม

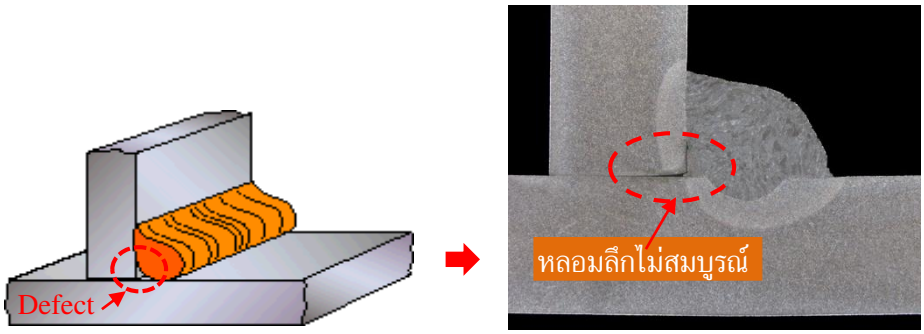


(ก) หลอมลึกไม่สมบูรณ์แบบบากสองด้าน (ข) หลอมลึกไม่สมบูรณ์แบบรอยบากเยื้อง

รูปที่ 8.60 การหลอมลึกไม่สมบูรณ์ของรอยต่อชนบากหน้างานสองด้าน (Double V joint)

ที่มา : TWI–Weld Defects/Imperfection–Incomplete root and Fusion Penetration, 2013

● การหลอมลึกไม่สมบูรณ์ของลักษณะรอยต่อมุม (Fillet joint) จัดอยู่ในข้อบกพร่องที่ค่อนข้างพบเจอได้บ่อยมากของการเชื่อมแบบต่อมุม โดยเป็นลักษณะของเชื่อมที่บ่อหลอมละลายไม่ได้หลอมทะลุเข้าไปยังบริเวณมุมลึกสุดรอยต่อ ดังแสดงรูปแบบของข้อบกพร่องในรูปที่ 8.61 (ก) และชิ้นงานจริงที่เกิดข้อบกพร่องในรูปที่ 8.61 (ข) สาเหตุหลักเกิดจากความสัมพันธ์ของกระแสไฟเชื่อมกับความเร็วในการเชื่อม เช่น กระแสไฟเชื่อมสูงแต่ความเร็วเชื่อมช้า จะทำให้น้ำโลหะเหลวจากลวดเชื่อมไหลไปก่อนล่วงหน้าไปทับทางเดินแนวเชื่อม มักเกิดกับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (MMAW) โดยฟลักซ์ที่หลอมละลายจะเป็นฉนวนไหลไปกั้นการอาร์กทำให้ไม่เกิดการหลอมลละลายในมุมอับ (ส่วนใหญ่เป็นมุมฉาก) นอกจากนี้ยังมีจะเกี่ยวข้องกับมุมเอียงและระยะอาร์กของลวดเชื่อมด้วยเป็นสำคัญ เพราะจะมีผลต่อการสร้างบ่อหลอมละลาย และทิศทางการไหลของน้ำลวดเหลว ซึ่งในทางปฏิบัติปัจจัยเหล่านี้ช่างเชื่อมต้องกำหนดและควบคุมปัจจัยในการเชื่อมให้ถูกต้องและเหมาะสม

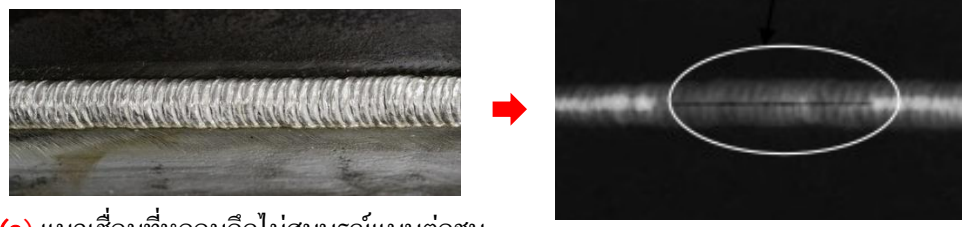


(ก) รูปแบบของการหลอมลึกไม่สมบูรณ์ที่มุม **(ข)** การหลอมลึกไม่สมบูรณ์รอยต่อมุม

รูปที่ 8.61 การหลอมลึกไม่สมบูรณ์ของรอยต่อมุม (Fillet joint)

ที่มา : KEMPPI–MIG/MAG Welding Defects, 2021

การตรวจสอบหาข้อบกพร่องของการหลอมลึกไม่สมบูรณ์สามารถใช้วิธีการทดสอบได้ทุกวิธีแบบไม่ทำลาย (NDT) ขึ้นอยู่กับลักษณะของความไม่สมบูรณ์ กล่าวคือ กรณีที่เป็นข้อบกพร่องแนวเชื่อมรากไม่สมบูรณ์สามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธีแบบ VT เพราะเป็นลักษณะของข้อบกพร่องเปิดผิวพิจารณาดูได้จากด้านรากของรอยต่อ ถ้าเป็นงานที่พลิกดูไม่ได้จะนิยมใช้วิธีแบบ RT หรือ UT เช่น การเชื่อมปิดถังความดันหรือการเชื่อมท่อ เป็นต้น ส่วนกรณีของความไม่สมบูรณ์ที่ต่อแบบเชื่อมสองด้าน (Double V) และการเชื่อมต่อมุม ข้อบกพร่องจะเกิดขึ้นภายในแนวเชื่อมที่ไม่สามารถที่จะมองเห็นได้ จำเป็นต้องใช้วิธีแบบ MT หรือ UT หรือ RT ดังแสดงตัวอย่างของการตรวจสอบแบบวิธี RT ที่เห็นส่วนที่ไม่หลอมลึกบนแผ่นฟิล์มเอกซ์เรย์ในรูปที่ 8.62 ลักษณะของข้อบกพร่องจะพบเห็นเป็นเส้นตรงยาวต่อเนื่อง จึงสามารถวิเคราะห์ผลได้ค่อนข้างแม่นยำ และเป็นข้อบกพร่องที่มีขนาดที่ใหญ่ หรือบางครั้งอาจจะมีลักษณะเป็นช่วง ๆ สั้น ๆ ในบางตำแหน่งที่เกิดการไม่หลอมละลาย แต่จะเป็นลักษณะคล้าย ๆ กัน คือมีทิศทางไปในแนวเดียวกันซึ่งขนานไปกับแนวรอยต่อชิ้นงาน



(ก) แนวเชื่อมที่หลอมลึกไม่สมบูรณ์แบบต่อชน

(ข) ฟิล์มเอกซเรย์

รูปที่ 8.62 ตัวอย่างการตรวจสอบหาการหลอมลึกไม่สมบูรณ์ด้วยวิธีแบบ RT

ที่มา : EURASIP Journal on Advance in Signal Processing,1687–6180, 2012

8.5 ความไม่สมบูรณ์ของรูปร่างและมิติแนวเชื่อม (Imperfect shape)

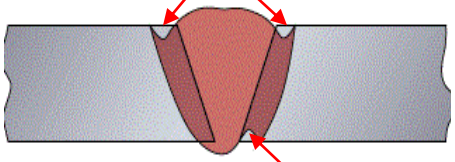
ข้อบกพร่องลักษณะนี้เป็นประเภทที่เกิดกับรูปร่างภายนอกของแนวเชื่อมที่ไม่เป็นไปตามรูปทรงที่ควรจะเป็น ซึ่งเป็นข้อบกพร่องที่สามารถเห็นได้จากภายนอกชัดเจน บางครั้งข้อบกพร่องประเภทนี้จะส่งผลต่อความสวยงานและความเรียบร้อยของแนวเชื่อมด้วย ยิ่งโดยเฉพาะลักษณะงานที่เน้นความสวยงาม หรือเน้นความเรียบร้อยของโครงสร้างเชื่อมต่อ ข้อบกพร่องของรูปร่างแนวเชื่อมนี้แก้ไขซ่อมแซมได้ไม่ยาก ด้วยเพราะปรากฏให้เห็นชัดเจนอยู่ภายนอกที่สามารถขจัดออกแล้วทำการเชื่อมซ่อมแซมได้ โดยส่วนใหญ่มีผลกระทบกับสมบัติทางกลเป็นสำคัญ และรวมถึงปัญหาที่อาจเกิดกับการที่ต้องนำชิ้นงานไปประกอบร่วมกับชิ้นส่วนอื่น ๆ เป็นต้น ข้อบกพร่องในลักษณะนี้มีหลากหลายรูปแบบโดยจะได้กล่าวถึงในรูปแบบที่มีโอกาสเกิดขึ้นและพบเจออยู่บ่อย ๆ ดังต่อไปนี้

1. รอยกัดแหว่ง (Undercut) เป็นความไม่สมบูรณ์ของแนวเชื่อมที่เกิดในลักษณะที่เป็นร่องบริเวณขอบของโลหะหลักที่นำมาเชื่อม รูปแบบของร่องจะเป็นรอยแหว่งของบ่อหลอมละลายเหมือนโดนกัด จึงเรียกว่า “รอยดัดแหว่ง” โดยส่งผลทำให้ความหนาของโลหะหลักลดลงซึ่งจะสูญเสียความแข็งแรงของโครงสร้างแนวเชื่อม ข้อบกพร่องลักษณะนี้จะเกิดกับการเชื่อมต่อชน (Butt joint) กับการเชื่อมมุม (Fillet joint) รอยกัดแหว่งที่กล่าวถึงมีตำแหน่งที่จะเกิดได้สองบริเวณ คือ

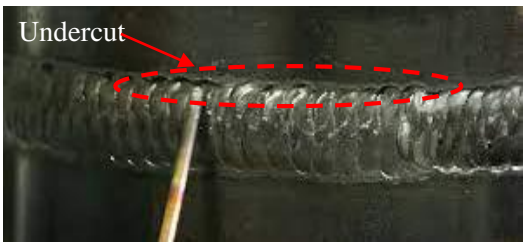
- รอยกัดแหว่งบริเวณภายนอก (External undercut) หรือบางครั้งเรียกว่า Crown undercut เป็นรอยกัดแหว่งที่เกิดขึ้นที่บริเวณด้านหน้าของแนวเชื่อม (Face weld) ดังแสดงในรูปที่ 8.63 (ก) ซึ่งมีโอกาสเกิดได้ทั้งสองข้างของขอบแนวเชื่อม
- รอยกัดแหว่งบริเวณภายใน (Internal undercut) หรือบางครั้งเรียกว่า Root undercut เป็นความไม่สมบูรณ์ที่เกิดด้านรากหรือด้านในของการเชื่อมต่อ ซึ่งเกิดที่ด้านภายในท่อ ภายในถังหรือภายในโครงสร้างที่เชื่อมในรูปทรงต่าง ๆ โดยเป็นลักษณะที่กัดแหว่งของโลหะหลักที่ช่องราก (Root weld) ดังแสดงในรูปที่ 8.63 (ข)

สาเหตุที่ทำให้เกิดรอยกัดแหว่งมาจากหลายปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ การเชื่อมที่กระแสไฟเชื่อมสูงเกินไป ตั้งระยะอาร์กมากเกินไป กำหนดตำแหน่งที่เชื่อมที่ไม่เหมาะสม การเลือกขนาดลวดเชื่อมและ

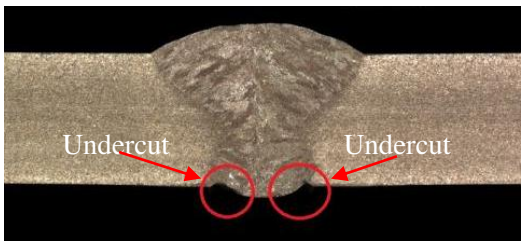
เลือกแก๊สปกคลุมไม่ถูกต้อง และที่เป็นปัญหามากที่สุดคือ ทักษะการควบคุมหัวเชื่อมรวมถึงการส่ายลวดเชื่อมของช่างเชื่อมไม่ดีพอหรือไม่สม่ำเสมอ (กรณีที่เชื่อมด้วยแขนกล (Automatic welding)ปัญหานี้เกิดน้อย) ด้วยปัจจัยที่หลากหลายดังกล่าวทำให้เกิดรอยกัดแหว่งที่เป็นทั้งแบบแนวยาวต่อเนื่องตลอดแนวเชื่อม (Continuous undercut) และเป็นแบบกัดแหว่งเว้นระยะ (Intermittent undercut) ที่มีระยะสั้น ๆ เป็นช่วง ๆ ในแนวตรงเดียวกัน รวมถึงรอยกัดแหว่งที่เกิดระหว่างแนวเชื่อมของการเชื่อมทับกันหลายแนว ที่เรียกกันว่า “รอยกัดแหว่งระหว่างเที่ยวเชื่อม (Interpass undercut หรือ Inter–run undercut)” จะเกิดกับการเชื่อมโลหะที่มีความหนามาก ๆ ที่ต้องเชื่อมหลายเที่ยวหรือหลายแนว ซึ่งจะเกิดรอยกัดแหว่างระหว่างขอบของแนวเชื่อมแต่ละแนว



ที่มา : Arc Helmets, 2011



(ก) แนวเชื่อมที่เกิดรอยกัดแหว่งด้านนอก
ที่มา : Arc Helmets, 2000

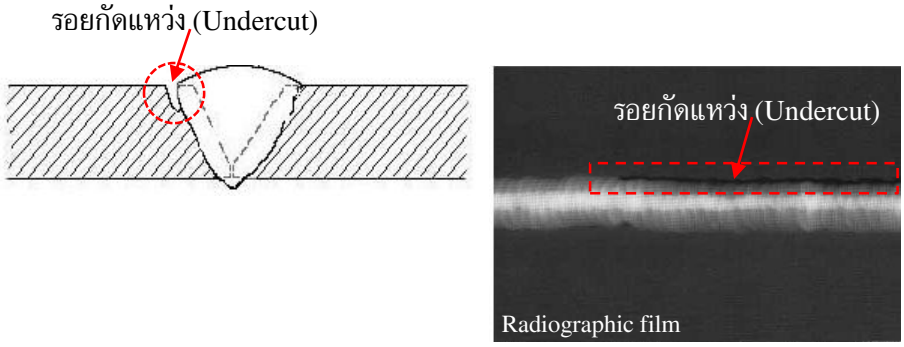


(ข) แนวเชื่อมที่เกิดรอยกัดแหว่งด้านใน
ที่มา : The main welding defects, 2014

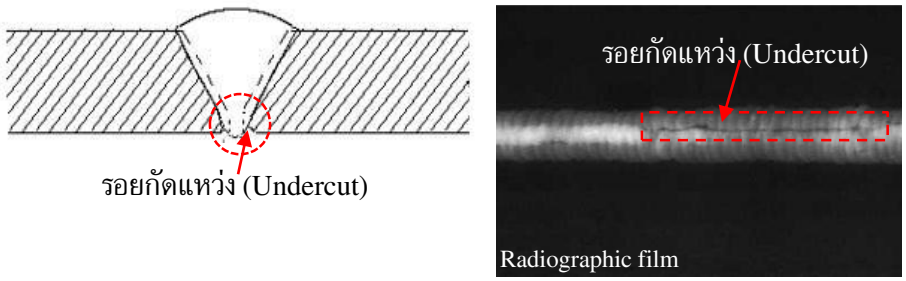
รูปที่ 8.63 ความไม่สมบูรณ์ของแนวเชื่อมจากการกัดแหว่ง (Undercut)

รอยกัดแหว่งถือเป็นข้อบกพร่องที่มีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม กล่าวคือลักษณะของรอยกัดแหว่งจะเป็นร่องหรือซอกที่เป็นมุมแหลม ซึ่งเป็นที่รวมของความเค้นสูง (Stress comtration) แนวเชื่อมเกิดการแตกร้าวได้ง่าย ดังนั้น ต้องตรวจสอบและซ่อมแซมเมื่อแนวเชื่อมเกิดรอยกัดแหว่ง โดยปกติรอยกัดแหว่งจะมีขนาดใหญ่มองเห็นได้ชัดเจนด้วยสายตาสามารถใช้วิธีการตรวจสอบแบบวิธี VT ยกเว้นในกรณีที่เกิดกับด้านภายในของแนวเชื่อมราก ไม่สามารถเข้าไปตรวจดูได้จึงต้องใช้วิธีการตรวจสอบแบบวิธี RT ที่ดูได้จากแผ่นฟิล์มเอกซเรย์ ดังแสดงในรูปที่ 8.64 การวิเคราะห์ไม่ยากเพราะรอยกัดแหว่งจะเห็นเส้นตรงที่อาจต่อเนื่องหรือเว้นเป็นระยะ แต่จะเป็นไปในแนวทิศทางเดียวกัน

ซึ่งคาดเดาหรือพยากรณ์ได้ง่าย ส่วนขนาดของรอยกัดแหว่งจะแตกต่างกันตามความรุนแรงของการกัดแหว่งที่เกิดขึ้น ซึ่งโดยปกติรอยกัดแหว่งจะแตกต่างกันตามชนิดขบวนการเชื่อม กล่าวคือ ขบวนการเชื่อมที่ใช้กระแสในการอาร์กที่รุนแรงมีโอกาสเกิดรอยกัดแหว่งที่ใหญ่ และโดยเฉพาะการที่ต้องส่ายหัวเชื่อมที่เป็นวงกว้าง ๆ



(ก) ฟิล์มเอกซเรย์แนวเชื่อมที่เกิดรอยกัดแหว่งด้านนอก (Face weld)



(ข) ฟิล์มเอกซเรย์แนวเชื่อมที่เกิดรอยกัดแหว่งด้านใน (Root weld)

รูปที่ 8.64 การตรวจสอบความไม่สมบูรณ์ของแนวเชื่อมจากการกัดแหว่งด้วยวิธี RT

ที่มา : Radiograph Interpretation Discontinuties Weld, 2012

การป้องกันและการซ่อมแซมแนวเชื่อมที่เกิดรอยกัดแหว่ง สำหรับการป้องกันไม่ซับซ้อนมากนัก เพียงปรับปัจจัยการเชื่อมและองค์ประกอบที่ต้องพิจารณาเลือกใช้ในการเชื่อมให้ถูกต้องเหมาะสมดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง ส่วนประเด็นของการซ่อมแซมหรือแก้ไขไม่ยุ่งยากสำหรับรอยกัดแหว่งด้านภายนอก ที่สามารถใช้เครื่องมือขจัดขอบรอยแหว่งออกไปให้มุมแหลมกลายเป็นมุมโค้งมน (การเจียรนัย) หรือต้องการเชื่อมเสริมแนวเชื่อมเพิ่มก็สามารถทำได้ แต่สำหรับรอยกัดแหว่งด้านภายในที่เป็นแนวเชื่อมรากของท่อหรือถังภาชนะความดัน ที่ไม่สามารถเข้าไปกำจัดได้นั้น จำเป็นต้องทำการตัดแนวเชื่อมทิ้งไปแล้วทำการเชื่อมใหม่ แต่อย่างไรก็ตาม ต้องพิจารณาร่วมกับเกณฑ์มาตรฐานการยอมรับให้มีได้ตามลักษณะของงาน และการกำจัดรอยกัดแหว่งต้องไม่ทำให้ความหนาของโลหะหลักลดลงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับ ซึ่งเกณฑ์มาตรฐานการยอมรับสามารถดูได้จากแต่ละมาตรฐานที่ยอมรับกัน ได้แก่ AWS D1.1/D1.1M:2015 หรือ BS EN ISO 5817 เป็นต้น

2. โลหะเชื่อมเกิดส่วนเกินผิวหน้าและราก (Excess face weld and root weld) เป็นข้อบกพร่องที่เป็นความผิดปกติของรูปร่างแนวเชื่อมไปจากที่ต้องการหรือออกแบบไว้ โดยเป็นลักษณะของการที่เติมเนื้อลวดเชื่อมเข้ามากเกินไปจนเกิดเป็นรอยนูนขึ้น ซึ่งในกรณีออกแบบรอยเชื่อมต่อชนมีโอกาสที่จะเกิดเนื้อเชื่อมส่วนเกินได้ทั้งด้านหน้าและด้านรากของแนวเชื่อมแบบต่อชน กับส่วนเกินในด้านหน้าของการเชื่อมต่อมุม ดังจะได้อธิบายถึงรายละเอียดเพิ่มเติมของแต่รูปแบบของข้อบกพร่องต่อไปนี้

- ส่วนเกินของด้านหน้าผิวแนวเชื่อม (Excess face weld) ในบางครั้งจะเรียกว่า Excess weld reinforcement มีรูปแบบที่แนวเชื่อมสูงกว่าพื้นผิวของโลหะหลักมากเกินไป ดังแสดงในรูปที่ 8.64 (ก) ระดับความสูงของแนวเชื่อมที่ต้องการโดยปกติจะเสมอเท่ากับผิวของโลหะหลัก แต่ยอมให้สูงขึ้นได้ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับซึ่งจะถูกกำหนดไว้ในคู่มือมาตรฐาน ปัญหาของข้อบกพร่องในลักษณะนี้จะทำให้โครงสร้างเนื้อเชื่อมหนาขึ้นและแข็งแรงมากกว่าโลหะหลัก ซึ่งจะก่อให้เกิดความเค้นสูง (Stress concentration) ที่ขอบของแนวเชื่อมที่ต่อกับโลหะหลัก นอกจากนี้ยังเป็นอุปสรรคของการประกอบเข้ากับชิ้นส่วนอื่นของงานโครงสร้าง และสิ้นเปลืองลวดเชื่อมเพิ่มต้นทุนการเชื่อม รวมถึงความไม่สวยงามของแนวเชื่อม ส่วนใหญ่เกิดจากข้อผิดพลาดของการกำหนดปัจจัยการเชื่อม เช่น การเลือกลวดเชื่อมที่มีขนาดโตมากเกินไป ความเร็วเชื่อมช้าเกินไป หรือการเชื่อมจำนวนแนวเชื่อมมากเกินไป รวมถึงการบากเตรียมหน้างานที่กว้างมากเกินไปที่ต้องเติมลวดเชื่อมมากขึ้น

การตรวจสอบข้อบกพร่องชนิดนี้ใช้วิธีตรวจสอบด้วยสายตา (VT) เพราะจะปรากฏชัดเจนบนแนวเชื่อม โดยมีเครื่องมือที่เป็นเกจวัดขนาดความสูงของแนวเชื่อมประกอบการตรวจสอบ ซึ่งมีความหลากหลายของเกจวัด ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 8.66 สำหรับแก้ไขหรือซ่อมแซมเมื่อตรวจพบเจอทำสามารถทำได้ไม่ยากนิยมใช้วิธีกำจัดออกด้วยการเจียระไนเนื้อเชื่อมส่วนเกินออกไป

- ส่วนเกินของด้านแนวเชื่อมราก (Excess root weld) รูปแบบของข้อบกพร่องคล้ายกับแนวผิวหน้าแต่เกิดในตำแหน่งของแนวรากหรือแนวซึมลึกของด้านในแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 8.65 (ข) ส่วนใหญ่เกิดจากการเชื่อมที่กระแสไปเชื่อมสูงเกินไปน้ำโลหะทะลุออกไปมาก หรือการสร้างระยะของรากกว้างเกินไป โดยปกติแนวเชื่อมซึมลึกที่สมบูรณ์จะโผล่ออกมาในระดับเดียวกับโลหะหลัก และยอมให้เกินออกมาได้เล็กน้อยตามเกณฑ์มาตรฐานการยอมรับ ที่ต้องไม่มากจนเกินไปที่จะต้องใช้เครื่องมือเกจวัดขนาดแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 8.66

การตรวจสอบหาข้อบกพร่องทำได้ง่ายด้วยการพิจารณาดูจากสายตาก็เพียงพอโดยมีเกจวัดความเที่ยงตรง กรณีที่พบเจอก็ทำการแก้ไขซ่อมแซมด้วยการกำจัดออกด้วยการเจียระไน สำหรับกรณีที่แนวรากอยู่ภายในท่อหรือถังภาชนะที่แคบไม่สามารถเข้าไปตรวจวัดได้จะต้องใช้วิธีแบบ RT ถ้าพบขนาดของแนวเชื่อมรากส่วนเกินที่ไม่สามารถยอมรับได้ก็ต้องทำการเชื่อมใหม่ ดังนั้น การเชื่อมแนวรากในงานลักษณะดังกล่าวนี้ ต้องพิถีพิถันกับการเชื่อมเพื่อลดความเสี่ยงที่จะต้องแก้ไขเมื่อแนวเชื่อมโดนปฏิเสธที่จะยอมรับได้

● ส่วนเกินด้านหน้าของแนวเชื่อมมุม (Excess fillet weld) ข้อบกพร่องในลักษณะนี้เกิดที่แนวผิวหน้าบนแนวเชื่อม ที่มีเนื้อเชื่อมนูนขึ้นมามากกว่าที่กำหนดไว้ของการเชื่อมต่อมุม (Fillet joint) ที่รู้จักกันดีในการเชื่อมต่อแบบตัว T ซึ่งบางครั้งเรียกข้อบกพร่องแบบนี้ว่า “ความนูนส่วนเกิน (Excessive convexity)” ดังแสดงรูปแบบของส่วนนูนในรูปที่ 8.65 (ค) ส่วนนูนเกินของเนื้อเชื่อมแบบต่อมุมมีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายของแนวเชื่อมมากกว่าส่วนเกินของการต่อแบบต่อชน ด้วยเหตุเพราะความนูนของแนวเชื่อมในลักษณะนี้สร้างมุมหรือซอกมุมแหลมขึ้นระหว่างแนวเชื่อมส่วนเกินกับโลหะหลัก ตามมาตรฐานของ AWS D1.1 ตั้งเกณฑ์การยอมรับความนูนไว้ดังแสดงในตารางที่ 8.3 และยังมีมาตรฐานอื่น ๆ ที่มีเกณฑ์ที่คล้ายกันจะมีบางส่วนที่แตกต่างกันที่สามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการตรวจสอบการยอมรับได้ ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ระบุมาตรฐานที่ยอมรับตามข้อตกลง

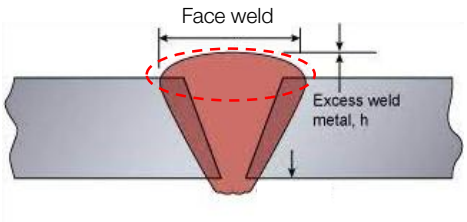
ตารางที่ 8.3 มาตรฐานเกณฑ์การยอมรับส่วนนูนเกินของการเชื่อมต่อมุม (Fillet joint)

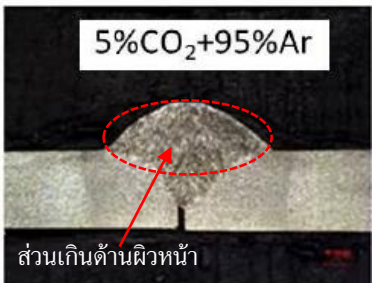
ที่มา : AWS D1.1–Structure welding code steel, 17th Edition, 2000

มาตรฐาน AWS D1.1: 2000 Structure Welding Code Steel	
ความกว้างของแนวเชื่อมต่อมุม (Fillet weld)	ส่วนนูนเกินสูงสุด (Maximum convexity)
ความกว้าง (W) $\leq$ 8 มม.	ยอมรับได้ที่ 2 มม.
ความกว้าง (W) $<$ 8 ถึง (W) $<$ 25 มม.	ยอมรับได้ที่ 3 มม.
ความกว้าง (W) $\geq$ 8 มม.	ยอมรับได้ที่ 5 มม.

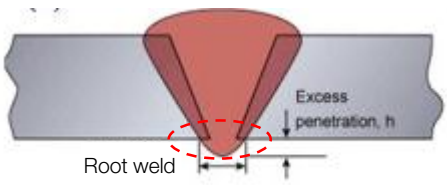
สาเหตุของการเกิดแนวเชื่อมที่นูนมากเกินไปจะเกิดจากทักษะของช่างเชื่อมผสมกับการกำหนดปัจจัยการเชื่อมที่ไม่ถูกต้อง เช่น กระแสไฟเชื่อมต่ำแต่เติมลวดมากและความเร็วเชื่อมต่ำ อย่างไรก็ตามซึ่งเป็นปกติของการเชื่อมต่อมุมแบบตัว T ช่างเชื่อมจะควบคุมบ่อหลอมละลายให้เกิดความสมมาตรกัน (Symmetrical) ของทั้งสองด้านของโลหะหลักค่อนข้างยากเพราะแนวด้านล่างมีแรงดึงดูดของโลกดึงน้ำโลหะไหลเอียงลงมา เมื่อต้องเติมเนื้อเชื่อมไปเสริมด้านบนก็สุ่มเสี่ยงที่จะทำให้แนวเชื่อมนูนขึ้นมากกว่าที่ควรจะเป็น แต่ปัญหานี้จะเกิดขึ้นน้อยมากกรณีที่เชื่อมด้วยแขนกล (Automatic welding) ที่อาศัยการเอียงหัวเชื่อมช่วย เป็นต้น จากการค้นคว้างานวิจัยในการเชื่อมต่อมุม พบว่าปัญหาการนูนของแนวเชื่อมมากเกินไปจะเกิดกับการเชื่อมโลหะต่างชนิดที่มีความสามารถในการเชื่อมแตกต่างกัน ทำให้ต้องควบคุมการเติมลวดที่ระมัดระวัง โดยเฉพาะโลหะที่มีจุดหลอมเหลวที่ต่างกันจะเกิดการกองนูนของแนวเชื่อมบนโลหะหลักที่หลอมยากกว่า ซึ่งต้องอาศัยทักษะการควบคุมหัวเชื่อมที่ชำนาญและเที่ยงตรง เป็นที่ทราบกันดีว่าการออกแบบการเชื่อมต่อมุม ต้องคำนึงถึงสามข้อกำหนดที่จะเกิดบนแนวเชื่อมตามมาตรฐานของ BS EN ISO 2553 คือ ค่า a = ความหนาของแนว (Throat thickness) และ z = ความยาวขา (Leg length) ส่วน s ระยะหลอมลึก (Deep penetration throat thickness) ดังแสดงในรูปที่ 8.67 ที่รองรับกับการออกแบบรอยต่อแบบเชื่อมมุม ทั้งแบบ T –joint แบบ Lap joint และแบบ Corner joint

การตรวจสอบหาข้อบกพร่องส่วนเกินที่นูนขึ้นสามารถพิจารณาได้ด้วยสายตา (VT) เพราะเป็นข้อบกพร่องภายนอกที่ผิวชิ้นงาน โดยใช้เครื่องมือเกจวัดขนาดแนวเชื่อมมาช่วยในการตรวจสอบและตัดสินใจ ดังแสดงในรูปที่ 8.66 ส่วนการแก้ไขซ่อมแซมสามารถใช้วิธีการกำจัดส่วนนูนเกินออกไปด้วยวิธีการเจียระไนออก แต่ต้องระมัดระวังที่จะสร้างตำหนิบนโลหะหลักที่อาจเกิดเป็นปัญหาการไม่ยอมรับด้านอื่น ๆ ของแนวเชื่อมเพิ่มเติม โดยเฉพาะการเชื่อมมุมที่เป็นแบบต่อตัว T–joint กับแบบ Lab –joint ส่วนแบบ Corner–joint แก้ไขได้ง่ายที่สุดเพราะแนวเชื่อมอยู่ที่มุมภายนอกที่มีพื้นที่มากพอในการทำงานแก้ไขซ่อมแซม



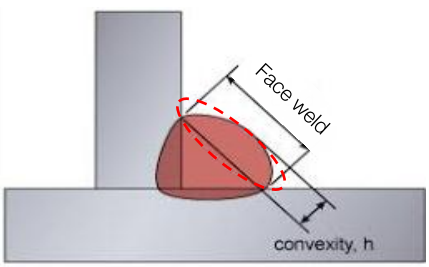


(ก) แนวเชื่อมส่วนเกินด้านผิวหน้า (Exess face weld)





(ข) แนวเชื่อมส่วนเกินด้านแนวราก (Exess root weld)





(ค) แนวเชื่อมส่วนนูนเกินของการต่อมุม (Excess convexity weld)

รูปที่ 8.65 ข้อบกพร่องของโลหะแนวเชื่อมส่วนเกินที่ด้านผิวหน้าและด้านราก

ที่มา : TWI–The causes and acceptance of shape imperfections, part 2, 2012



ที่มา : SUMO auge tool, 2011

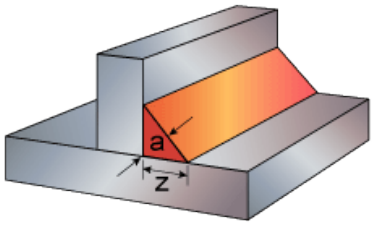


ที่มา : INSICE auge tool, 2000

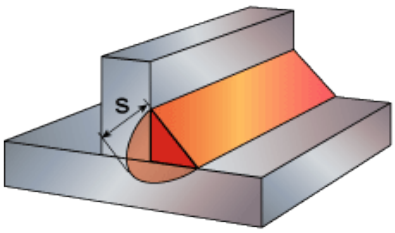


ที่มา : FUJI auge tool, 2009

รูปที่ 8.66 รูปแบบที่หลากหลายของเกจวัดขนาดแนวเชื่อม (Weding gauge)



(ก) แนวเชื่อมมุมสมมาตร
(Mitre fillet weld)



(ข) แนวเชื่อมมุมซึมลึก
(Deep penetration fillet weld)

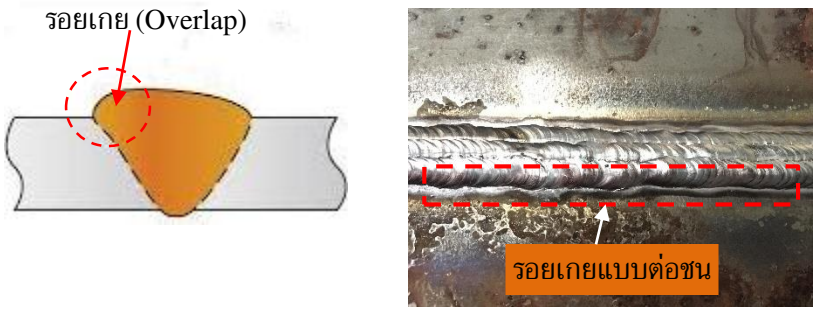
รูปที่ 8.67 การออกแบบรอยต่อเชื่อมมุมที่ต้องพิจารณา (อ้างอิง BS EN ISO 2553)

ที่มา : Standards of BS EN ISO 2553– Welding and allied processes, 2019

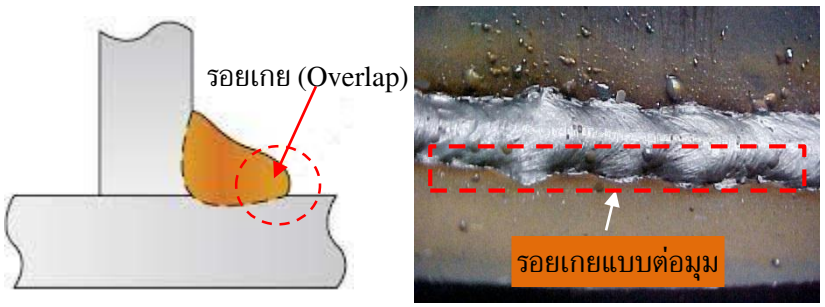
3. รอยเกย (Overlap) เป็นข้อบกพร่องเชิงรูปทรงของการเชื่อมที่เป็นลักษณะของการที่น้ำโลหะเหลวจากการอาร์กไหลตัวเลยไปบนผิวหน้าของโลหะชิ้นงานหรือโลหะหลักโดยที่ไม่มีการหลอมละลายติดกัน (ล้นไปทับ) ข้อบกพร่องในลักษณะนี้สามารถเกิดได้กับการเชื่อมต่อทั้งแบบต่อชนและแบบต่อมุม ดังแสดงในรูปที่ 8.68 และทั้งแนวเชื่อมรากและแนวเชื่อมด้านผิวหน้า เป็นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นภายนอกสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนด้วยสายตา โดยส่วนของเนื้อโลหะที่ล้นหรือเกยออกมาทับกับบริเวณโลหะที่ไม่เกิดการหลอมละลายจะทำให้การหลอมละลายที่ขอบรอยต่อด้านในใต้รอยเกยไม่สมบูรณ์ ประสิทธิภาพของแนวเชื่อมลดลง เป็นแหล่งสะสมความเค้น ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม นอกจากนี้ ยังจะเกิดปัญหาการกัดกร่อนภายในซอกแคบ ๆ ในที่อับ (Crevice corrosion) ภายใต้รอยเกย ซึ่งเป็นอันตรายเพราะไม่สามารถมองเห็นได้จากการตรวจสอบโดยทั่ว ๆ ไป ดังแสดงตัวอย่างของการเกิดการกัดกร่อนในรูปที่ 8.69

สาเหตุหลักของการเกิดข้อบกพร่องมาจากเทคนิคหรือทักษะของช่างเชื่อมที่ไม่ดี ซึ่งรวมไปถึงการเลือกขบวนการเชื่อม การเลือกลวดเชื่อม มุมการเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม สำหรับการเชื่อมต่อแบบตัว T หรือเชื่อมมุมมักพบข้อบกพร่องในลักษณะนี้บ่อยมาก นอกจากปัจจัยการเชื่อมที่เลือกแล้ว

การไหลของน้ำโลหะขณะอาร์กลงมายังขอบด้านล่างเร็วและปริมาณมากจนล้นไปทับผิวโลหะหลักที่ยังไม่หลอม ด้วยเหตุของแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitation) ดังแสดงในรูปที่ 8.70 การแก้ปัญหาต้องอาศัยทักษะการควบคุมมุมของหัวเชื่อมเพื่อชะลอการไหลลงของน้ำโลหะ สำหรับการเชื่อมแบบต่อชนจะเกิดข้อบกพร่องแบบนี้ในกรณีที่มีการเชื่อมโลหะในท่าเชื่อมขนานนอน เนื่องจากโอกาสที่น้ำโลหะเชื่อมจะไหลลงมาทับกับขอบโลหะชิ้นงานชิ้นล่างเกิดขึ้นได้ง่าย ส่วนการเชื่อมในท่าราบมักเกิดกับการเชื่อมโลหะที่มีความหนามากจำเป็นต้องเชื่อมหลายแนว พบว่าแนวสุดท้ายมักทับแนวจนล้นออกไปนอกรอยต่อกลายเป็นรอยเกยขึ้น อย่างไรก็ตาม จากการศึกษารวบรวมการวิเคราะห์ของข้อบกพร่องรอยเกย พบว่าปัญหาส่วนใหญ่เกิดจากการป้อนลวดเชื่อมเข้าสู่บ่อหลอมละลายที่มากเกินไป ยิ่งเชื่อมด้วยความเร็วเชื่อมต่ำจะยิ่งเพิ่มปริมาณเนื้อโลหะจากลวดเชื่อมจนล้นออกนอกบ่อหลอมละลาย โดยแนวทางแก้ไขที่มีผลโดยตรง คือ ลดกระแสไฟเชื่อม เลือกใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็กลง ใช้เทคนิคการเชื่อมที่ถูกต้องและเหมาะสม โดยเฉพาะการปรับมุมเอียงของลวดเชื่อมที่จะช่วยในการประคองน้ำโลหะให้ไหลไปในตำแหน่งที่เหมาะสม ซึ่งอาจต้องใช้ช่างเชื่อมที่ต้องมีความชำนาญมากเพียงพอ ที่สามารถใช้ดุลพินิจในการแก้ปัญหาเฉพาะหน้า เช่น กรณีการเชื่อมต่อที่โลหะมีความหนาต่างกัน จะเลือกลวดเชื่อมอิงความหนาอย่างไร ซึ่งอาจไม่ได้ระบุไว้อย่างชัดเจนใน WPS (Welding procedure specification) เป็นต้น



(ก) รอยเกยแนวเชื่อมแบบต่อชน (Overlap butt weld)



(ข) รอยเกยแนวเชื่อมแบบต่อมุม (Overlap fillet weld)

รูปที่ 8.68 ข้อบกพร่องแนวเชื่อมชนิดรอยเกย

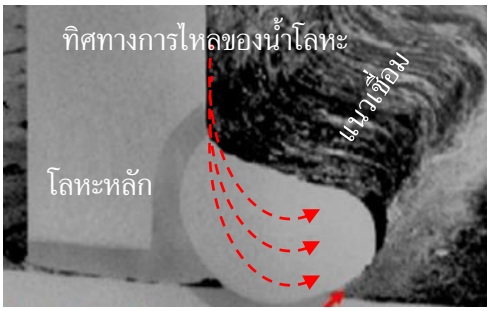
ที่มา : Macro Defects in Steel, 2017

การตรวจสอบหาข้อบกพร่องแบบรอยเกย จะค่อนข้างง่ายเพราะเป็นความไม่สมบูรณ์ของรูปทรงภายนอกที่สามารถพิจารณาดูได้จากสายตาหรือวิธีแบบ VT และตำแหน่งที่เกิดก็เฉพาะที่ขอบของรอยต่อทั้งแนวรากด้านในและแนวผิวด้านหน้า และถ้ามีการตรวจพบก็สามารถแก้ไขหรือซ่อมแซมได้ด้วยการกำจัดออกด้วยการเจียระไน และถ้าเหลือเนื้อโลหะเชื่อมน้อยเกินที่จะยอมรับได้ก็สามารถเชื่อมแนวเพิ่มได้ตามความเหมาะสม อย่างไรก็ตาม ขณะทำการแก้ไขซ่อมแซมก็ต้องปฏิบัติการด้วยความระมัดระวังแนวเชื่อมบริเวณอื่น ๆ ข้างเคียง ที่อาจไปกระทบจนก่อให้เกิดเป็นปัญหาข้อบกพร่องใหม่ขึ้นได้



รูปที่ 8.69 การกัดกร่อนแบบ Crevice ที่เกิดจากข้อบกพร่องรอยเกยของแนวเชื่อม

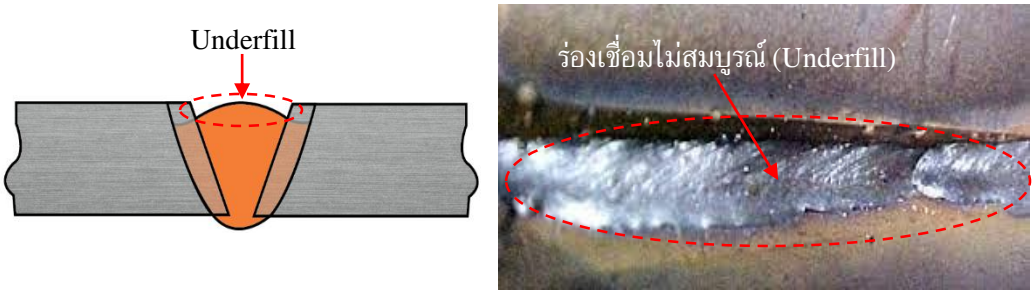
ที่มา : Thesis –Universiti Teknologi PETRNAS, 2016



รูปที่ 8.70 รอยเกยที่เกิดจากอิทธิพลน้ำโลหะถูกดึงให้ไหลลงเร็วด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก

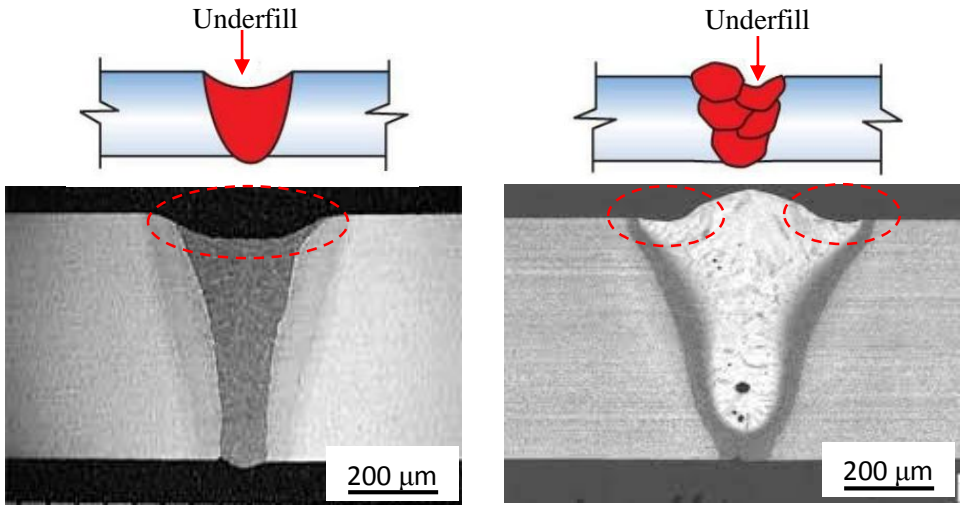
ที่มา : Weld defects fillet weld, 2012

4. การเติมร่องเชื่อมไม่สมบูรณ์ (Incompletely filled groove หรือ Underfill) เป็นอีกชนิดหนึ่งของข้อบกพร่องด้านมิติรูปทรงของแนวเชื่อม โดยเป็นลักษณะของการที่ช่างเชื่อมไม่เติมเนื้อเชื่อมให้เต็มพื้นที่ของร่องรอยบาก ลักษณะรูปแบบของข้อบกพร่องดังแสดงในรูปที่ 8.71 เมื่อพิจารณาจากรูปแบบของข้อบกพร่องพบว่าคล้าย ๆ กับข้อบกพร่องแบบรอยกัดแหว่ง ต่างกันที่รอยกัดแหว่งจะเกิดบนผิวโลหะชิ้นงานแต่ Underfill เกิดในร่องระหว่างรอยต่อ ซึ่งโดยมาตรฐานของการตรวจสอบข้อบกพร่องแนวเชื่อม การเติมร่องเชื่อมไม่สมบูรณ์นี้หมายถึงทั้งที่เกิดในแนวราก (Root weld) และแนวผิวหน้า (Face weld) ที่เกิดจากการเติมเนื้อเชื่อมไม่เต็มพื้นที่ แต่พบว่าในทางปฏิบัติมักพบเห็นกันบ่อย ๆ ที่เกิดในตำแหน่งของแนวเชื่อมผิวหน้า ซึ่งมีโอกาสเกิดได้ทั้งการเชื่อมแบบแนวเดียว (Single pass) และแบบหลายแนว (Multipass) ดังแสดงเป็นตัวอย่างของข้อบกพร่องในรูปที่ 8.72 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 8.71 ลักษณะของการเกิดข้อบกพร่องที่เติมเนื้อเชื่อมไม่สมบูรณ์ (Underfill)

ที่มา : AWI– Weld imperfections that lead to poor geometric shape, 2019

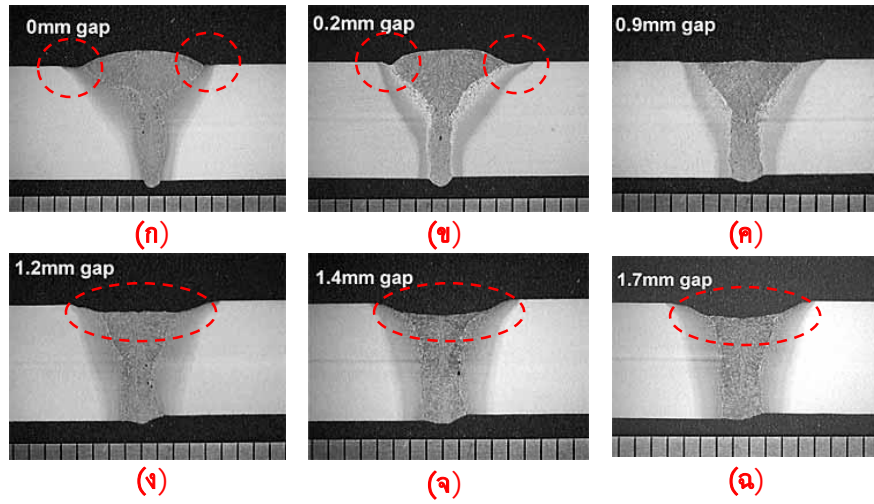


(ก) การเชื่อมแบบแนวเดียว (Single pass) **(ข)** การเชื่อมแบบหลายแนว (Pultipass)

รูปที่ 8.72 ลักษณะข้อบกพร่องที่เติมเนื้อเชื่อมไม่สมบูรณ์ที่ผิวหน้า (Underfill face weld)

ที่มา : Laser Application in Materials Processing, 2010

สาเหตุของเกิดข้อบกพร่องที่ทำการเติมเนื้อในร่องเชื่อมไม่สมบูรณ์จะมาจากความผิดพลาดของสองส่วนประกอบหลัก คือ ส่วนของการออกแบบแนวเชื่อมที่กำหนดระยะของร่องบากไม่สัมพันธ์กันกับการเลือกขนาดลวดเชื่อมซึ่งต้องเกี่ยวพันกันกับจำนวนของรอบของการเชื่อมจนเต็มช่องร่องบาก จากงานวิจัยทดลองเชื่อมเหล็กกล้าผสมแมงกานีสสูง ด้วยขบวนการเชื่อมแบบไฮบริด Laser–MAG Welding ผลการทดลองพบว่าระยะห่างของรอยต่อมีผลการเกิด Underfill ดังแสดงภาพผลการทดลองในรูปที่ 8.73 โดยกรณีที่ระยะรอยต่อแคบ รูป (ก)–(ข) จะเกิด Underfill ที่บริเวณขอบแนวเชื่อมทั้งสองข้าง และถ้ากว้างมากขึ้นจะเกิดรอยว้าวลึกที่กึ่งกลางของแนวรูป (ง)–(ฉ) และถ้ากำหนดระยะที่เหมาะสมจะไม่เกิดข้อบกพร่องดัง รูป (ค) ดังนั้น จึงต้องออกแบบระยะของร่องเชื่อมให้เหมาะสมก็สามารถขจัดปัญหาการเติมเนื้อเชื่อมในร่องแนวเชื่อมไม่สมบูรณ์ในลักษณะนี้ได้



รูปที่ 8.73 อิทธิพลของระยะรอยต่อที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องที่เติมเนื้อเชื่อมไม่สมบูรณ์ที่ผิวหน้า

ที่มา : Steve Shi, Laser and hybrid laser MAG welding of thick section C–Mn steel, 2005

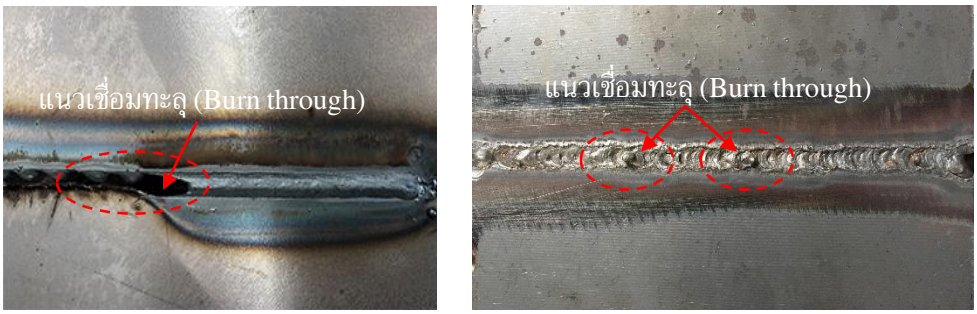
อีกส่วนที่มีอิทธิพลต่อการเกิดข้อบกพร่อง Underfill คือ ปัจจัยการเชื่อม โดยเฉพาะความสัมพันธ์ที่เหมาะสมของกระแสไฟเชื่อม ขนาดลวดเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม รวมถึงเทคนิคการส่ายของลวดเชื่อม ปกติในการเติมเต็มเนื้อโลหะในร่องรอยต่อที่ต้องเชื่อมหลาย ๆ รอบในการออกแบบรอยต่อได้มีการคำนวณเนื้อลวดเชื่อมที่เพียงพอต่อการเชื่อมเต็มแนวด้วยหลักการพื้นที่ว่างทางคณิตศาสตร์ แต่ในทางปฏิบัติพบว่าเนื้อเชื่อมไม่เพียงเกิด Underfill ขึ้น ปัญหานี้เกิดจากการมองข้ามพฤติกรรมทางโลหะวิทยาของน้ำโลหะที่มีการหดตัวเมื่อเย็นตัวลง (Solidification of metal) ซึ่งจำเป็นต้องมีการเพื่อน้ำโลหะให้มีส่วนเกินไว้เพื่อการยุบตัวลงหลังการเชื่อมเสร็จ จะได้เนื้อโลหะเพียงพอในการเติมลงในร่องรอยต่อได้อย่างสมบูรณ์ สำหรับการตรวจสอบและการแก้ไขซ่อมแซมถือว่าไม่เป็นอุปสรรคในทางปฏิบัติการ ด้วยเหตุเพราะเป็นข้อบกพร่องที่เกิดภายนอกสังเกตเห็นได้ชัด และสามารถเพิ่มเติมเนื้อเชื่อมจนเต็มร่องรอยต่ออย่างสมบูรณ์ได้ เพียงแต่เป็นการเพิ่มขั้นตอนการทำงาน เพิ่มค่าใช้จ่ายและใช้เวลาในการปฏิบัติที่มากขึ้นโดยไม่จำเป็น

5. แนวเชื่อมทะลุ (Burn through) เป็นข้อบกพร่องที่มีความรุนแรงที่ไม่สามารถยอมให้เกิดขึ้นได้ โดยเป็นลักษณะของการหลอมละลายจนโลหะหลักทะลุเป็นรู ซึ่งจะเกิดขึ้นได้กับการเชื่อมแนวรากและการเชื่อมแนวผิวหน้าที่จุดสิ้นสุดแนวเชื่อม ส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นกับขบวนการเชื่อมท่อหรือเชื่อมโลหะแผ่นบาง ดังแสดงลักษณะของข้อบกพร่องในรูปที่ 8.74 จากการวิเคราะห์ถึงสาเหตุพบว่าเกิดจากการเชื่อมที่ป้อนพลังงานความร้อนเข้าแนวเชื่อมมากเกินไป (High heat input) โดยมาจากการใช้กระแสไฟเชื่อมที่สูงเกินไป นอกจากนี้ จะเป็นความผิดพลาดของการกำหนดระยะห่างของรอยต่อที่กว้างมากเกินไป และที่มีอิทธิพลมากที่สุดคือความชำนาญของช่างเชื่อมในการควบคุมหัวเชื่อม หรือถ้าเป็นการเชื่อมด้วยหุ่นยนต์แขนกลจะต้องตั้งระยะอาร์กให้ถูกต้อง ข้อบกพร่องในลักษณะนี้นอกจากจะทะลุ

เกิดเป็นรูแล้วยังเป็นลักษณะของการหย่อนหรือยุบตัวของบ่อหลอมละลายจนเป็นหลุมลึก ซึ่งบางครั้งเรียกข้อบกพร่องนี้ว่า “การหย่อน (Sagging)” มักเกิดที่ตำแหน่งของจุดสิ้นสุดการเชื่อมหรือจุดรอยต่อของการเชื่อมแนวต่อแนว ดังแสดงในรูปที่ 8.75

การป้องกันการเกิดรอยเชื่อมทะลุทำได้ไม่ยากและไม่ซับซ้อน เพียงเพิ่มความละเอียดของขบวนการเชื่อม ได้แก่ การตรวจเช็ค WPS และองค์ประกอบอื่น ๆ ให้ถูกต้อง โดยเฉพาะปริมาณความร้อนที่ใช้ในการอาร์กหลอมต้องไม่มากจนเกินไป หรือความเร็วเชื่อมต้องไม่ช้าเกินไปจะทำให้เกิดความร้อนสะสมจนเป็นเหตุให้ผิวผนังด้านในท่อหรือด้านล่างเกิดการหลอมละลาย และด้วยมีแรงโน้มถ่วงร่วมด้วยทำให้โลหะเหลวไหลลงด้านล่างที่เร็วขึ้น ส่งผลทำให้เกิดรอยหย่อนหรือทะลุได้

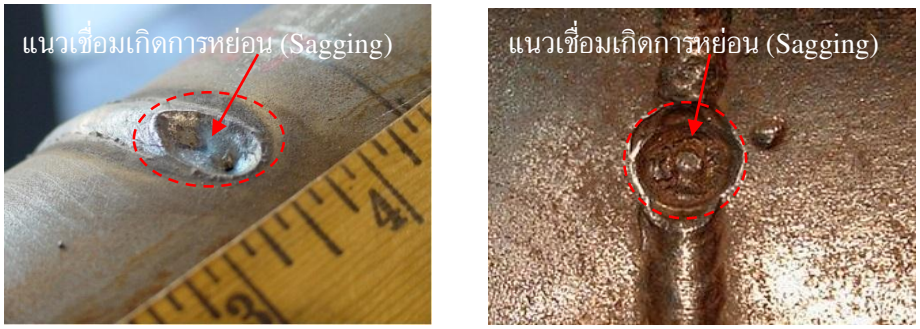
สำหรับการตรวจสอบและแก้ไขซ่อมแซมสามารถทำได้ค่อนข้างง่าย เพราะเป็นข้อบกพร่องภายนอกที่มีขนาดใหญ่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ส่วนการแก้ไขซ่อมแซมสามารถทำการตกแต่งรอยต่อให้สะอาดและอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ จากนั้นก็ทำการเชื่อมเติมเนื้อเชื่อมให้เต็มรอยที่ทะลุหรือหย่อนตัว ซึ่งจะต้องระมัดระวังแนวเชื่อมซึมลึกที่ต้องไม่มากจนเกินเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานข้อบกพร่องแนวเชื่อม



(ก) ข้อบกพร่องบนแนวเชื่อมผิวหน้า (ข) ข้อบกพร่องบนแนวเชื่อมด้านราก

รูปที่ 8.74 ข้อบกพร่องแนวเชื่อมทะลุ (Burn through)

ที่มา : Buen through in thin plate welding, 2012



(ก) การหย่อนตัวเชื่อมโลหะท่อ (ข) การหย่อนตัวเชื่อมโลหะแผ่นหนา

ที่มา : Pipeline Pitting and Repair, 2021 *ที่มา : Welder LAB, 2020*

รูปที่ 8.75 ข้อบกพร่องแบบทะลุของแนวเชื่อมที่เกิดจากการหย่อนตัว (Sagging)

ในกรณีของการเชื่อมโลหะที่เป็นท่อ หรือถังภาชนะความดันที่ไม่สามารถเข้าไปทำการตรวจสอบภายในได้ด้วยสายตาได้ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 8.76 (ก) จำเป็นต้องใช้วิธีการตรวจสอบด้วยวิธีแบบ UT หรือ RT ดังแสดงตัวอย่างของการตรวจสอบแบบ RT บนชิ้นงานจำลองข้อบกพร่อง ในรูปที่ 8.76 (ข) ที่สามารถเห็นข้อบกพร่องที่รอยทะลุเป็นจุดค่อนข้างเด่นชัด ด้วยเพราะเป็นรอยบบกพร่องที่มีขนาดใหญ่ และถ้าพบข้อบกพร่องมีขนาดเกินเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ต้องทำการเชื่อมซ่อมแซม



(ก) แนวเชื่อมรากที่เกิดรอยเชื่อมทะลุ **(ข)** การตรวจสอบแบบ RT บนแนวเชื่อมจำลอง

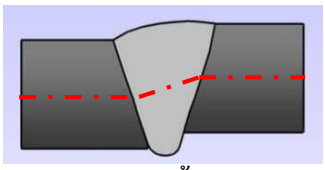
รูปที่ 8.76 ข้อบกพร่องแนวเชื่อมทะลุด้านรากของท่อและการตรวจสอบแบบวิธี RT

ที่มา : Welding fire protection piping 101, 2006

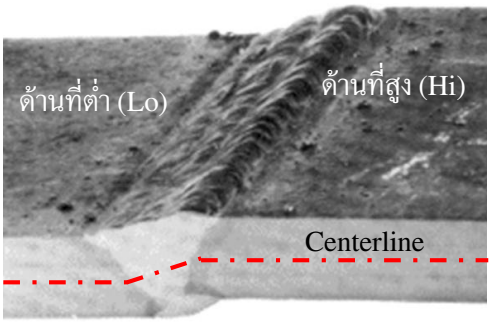
6. รอยต่อขอบเชื่อมเยื้อง (Weld misalignment) เป็นข้อบกพร่องที่สูญเสียรูปทรงความเป็นระนาบเดียวกันหรือเส้นตรงแนวเดียวกัน โดยแนวเชื่อมต่อจะเกิดการเยื้องศูนย์กันระหว่างชิ้นงานโลหะหลักที่นำมาเชื่อมต่อกัน (Misalignment) ข้อบกพร่องทำให้เกิดความยุ่งยากหรือไม่สามารถทำการประกอบงานของโครงสร้างงานเชื่อมได้ ซึ่งรูปแบบของการเยื้องขอบแนวเชื่อมที่จะเกิดได้ 2 รูปแบบ คือ

- รอยต่อขอบเชื่อมเยื้องเชิงเส้น (Linear misalignment) เป็นความเยื้องในแนวระนาบของโลหะชิ้นงานทั้งสองที่นำมาเชื่อมต่อกัน โดยที่ชิ้นหนึ่งระดับต่ำลง (Low) อีกชิ้นหนึ่งระดับสูงขึ้น (High) จึงเป็นที่รู้จักกันในชื่อของ “Misalignment Hi–Lo” รอยขอบเยื้องในลักษณะนี้มีทั้งที่เกิดกับการเชื่อมโลหะประเภทที่เป็นแผ่นหนา (Plate) และโลหะประเภทที่เป็นท่อหนา (Pipe) ดังแสดงในรูปที่ 8.77 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ข้อบกพร่องที่เยื้องผิดตำแหน่งนี้สาเหตุส่วนใหญ่มาจากการเตรียมเชื่อมยึดที่เกิดความผิดผลาดของตำแหน่งยึด ที่อาจเกิดจากการวางในตำแหน่งที่ไม่ถูกต้อง ดังแสดงในรูปที่ 8.78 (ก) หรืออาจเกิดจากการบิดตัวขณะเชื่อมจนการเชื่อมจุดยึดแตก และที่เป็นปัญหามากที่สุดที่เคยพบเจอมาเป็นการเชื่อมชิ้นงานโลหะที่มีความหนาต่างกันทั้งประเภทแผ่นและประเภทท่อ ถึงแม้ว่าจะเตรียมการยึดตำแหน่งของรอยต่อโลหะที่ทำการเชื่อมได้สมบูรณ์ (Alignment centerline) แล้วก็ตาม เหตุด้วยเพราะอัตราการขยายและการหดตัวของโลหะเมื่อได้รับความร้อนในขณะที่เชื่อมที่ต่างกัน (หนาต่างกัน) จะเกิดการบิดตัวจนก่อให้เกิดการเยื้องของขอบแนวเชื่อมได้ อย่างไรก็ตาม การเตรียมจับยึดชิ้นงานที่ดีไม่มี

ความผิดผลาดจะต้องมีการตรวจสอบความเที่ยงตรงด้วยเครื่องมือเกจวัดความเยื้องของรอยต่อ (Hi–Lo mismatch gauge) ดังแสดงตัวอย่างการตรวจสอบวัดความเยื้องในรูปที่ 8.78 (ข)



รูปแบบรอยเยื้องเชิงเส้น
(Linear misalignment)



(ก) รอยเยื้องที่เกิดกับการเชื่อมโลหะประเภทแผ่น

ที่มา : Defects and Discontinuties, 2014



(ข) รอยเยื้องที่เกิดกับการเชื่อมโลหะประเภทท่อ

ที่มา : Integrated weld defect : Linear misalignment, 2011

รูปที่ 8.77 ข้อบกพร่องรอยต่อขอบเชื่อมเยื้องเชิงเส้น (Linear misalignment weld)





(ก) การเตรียมรอยต่อที่เยื้องศูนย์ (Mismatch) **(ข)** การเตรียมรอยต่อที่ถูกต้อง (Match)

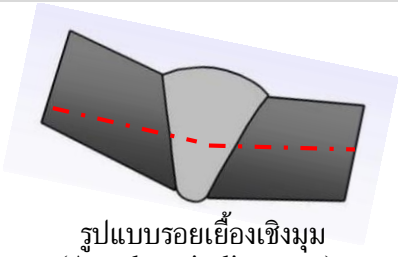
รูปที่ 8.78 การเตรียมรอยต่อที่มีอิทธิพลในการเกิดข้อบกพร่องแบบรอยขอบเชื่อมเยื้อง

ที่มา : Welddotcom, 2020

● รอยต่อขอบเชื่อมเยื้องเชิงมุม (Angular misalignment) เป็นข้อบกพร่องที่สูญเสียรูปทรงจากการที่โลหะชิ้นงานสองชิ้นมีระนาบผิวที่ไม่ขนานกันหรือไม่เป็นไปตามมุมองศาที่กำหนดไว้ มีรูปแบบคล้ายกับการบิดตัวของแนวเชื่อม ซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดขึ้นได้ทั้งการเชื่อมโลหะประเภทแผ่นและประเภทท่อ ดังแสดงรูปแบบของการเยื้องเชิงมุมในรูปที่ 8.79 (ก) และ (ข) ตามลำดับ สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการเตรียมรอยต่อที่ไม่สมดุล เช่น การเว้นระยะห่างของรอยต่อไม่เท่ากัน (Cap width) เมื่อทำการเชื่อมจะเกิดหดตัวลงไม่สัดส่วนที่ไม่เท่ากัน โดยมุมที่เยื้องไปในทิศทางที่มีระยะห่างของรอยต่อที่กว้าง กรณีนี้มักเกิดกับการเชื่อมโลหะประเภทท่อหนา ส่วนกรณีที่เกิดกับการเชื่อมโลหะประเภทแผ่นมักจะเกิดจากความกว้างของช่องราก (Root gap) ระนาบของผิวราก (Root face) และมุมเอียงของผิวรอยบาก (Angle groove face) ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้ต้องสมมาตรกันทั้งสองข้างของชิ้นงานโลหะที่เตรียมเชื่อม เพราะถ้าไม่สมมาตรกันจะหดตัวไม่เท่ากัน ระยะที่ห่าง/กว้างจะเกิดการหดตัวที่มากกว่า ซึ่งเป็นต้นเหตุของการทำให้แนวเชื่อมเกิดการเยื้องศูนย์หลังแนวเชื่อมเย็นตัวลง นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยที่มาจากขบวนการเชื่อม โดยเฉพาะมุมของหัวเชื่อมที่ต้องสร้างบ่อหลอมละลายที่สมดุลซ้าย–ขวาของชิ้นงาน เพราะถ้าเกิดการอาร์กหลอมละลายด้านใดมากด้านนั้นจะเกิดการหดตัวมากและเย็นตัวช้ากว่า จะดึงด้านตรงข้ามทำให้เกิดการบิดตัวเชิงมุมเกิดขึ้น ทำให้ชิ้นงานเชื่อมเกิดข้อบกพร่องแบบขอบเชื่อมเยื้องเชิงมุมขึ้น

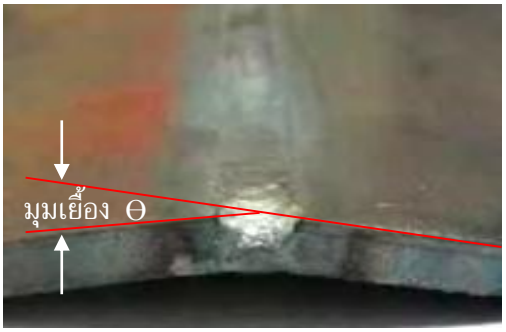
แนวทางป้องกันที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ การเตรียมรอยต่อของโลหะชิ้นงานให้สมบูรณ์ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยการจับยึด เชื่อมจุด และวัดระยะต่าง ๆ ให้ถูกต้อง ดังแสดงตัวอย่างวิธีการในรูปที่ 8.80 การเชื่อมยึดต้องได้ตำแหน่งศูนย์กลาง (Centerline) พร้อมตรวจสอบความเที่ยงตรงของระยะห่างของรอยต่อที่ต้องมีระยะที่เท่ากันทุกตำแหน่ง (Gap) และทำการตรวจสอบผิวระนาบระดับสูง–ต่ำของผิว (Hi–Lo) อย่างไรก็ตามปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสมกับความชำนาญของช่างเชื่อมมีส่วนสำคัญยิ่ง เช่น ถ้าควบคุมบ่อหลอมละลายไม่สมดุลของทั้งสองขอบรอยต่อ รอยต่อจะเกิดการหลอมละลายที่ไม่เท่ากันและเย็นตัวช้าเร็วต่างกัน ซึ่งจะเป็นต้นเหตุของการบิดตัวแล้วเกิดการเยื้องขอบแนวเชื่อมขึ้น และยิ่งไปกว่านั้นถ้าเป็นการเชื่อมโลหะที่ต่างชนิดและต่างขนาดมักจะมีโอกาสเกิดข้อบกพร่องในลักษณะนี้ได้ง่ายขึ้น

การตรวจสอบข้อบกพร่องแบบขอบเชื่อมเยื้องนี้เป็นการตรวจสอบภายนอก ที่สามารถเห็นข้อบกพร่องได้ชัดเจนเพราะเกิดการเสียรูปทรงของโครงสร้างแนวเชื่อม การตรวจสอบจะใช้เครื่องมือช่วยในการตรวจสอบ คือ Hi–Lo Welding gage ดังแสดงในรูปที่ 8.81 เพื่อความแม่นยำของการตรวจสอบ ซึ่งถ้าพบข้อบกพร่องในลักษณะนี้ต้องแก้ไขซ่อมแซมซึ่งมักเป็นการแก้ไขด้วยการเชื่อมใหม่ทั้งแนว โดยเฉพาะที่เกิดกับการเชื่อมต่อโลหะประเภทท่อที่ใช้ในการส่งถ่ายของเหลวหรือแก๊ส ถ้ามีรอยเยื้องของขอบแนวเชื่อมจะเป็นจุดที่ทำให้เกิดการปะทะกับของเหลวที่ไหลผ่าน ซึ่งส่งผลต่อแนวเชื่อมจะเกิดอัตราการสึกหรอที่สูง เกิดความเค้นสูง และยังทำให้การไหลปั่นป่วนของของเหลวหรือแก๊สภายในท่อ จะทำให้ผนังท่อสึกหรอเร็วมากขึ้นหรืออาจทะลุจนเกิดความเสียหาย ดังนั้น การเชื่อมที่ไม่ได้ตำแหน่งศูนย์กลาง (Misalignment) จึงเป็นเรื่องที่ต้องป้องกันไม่ให้เกิดและถ้าเกิดจะต้องทำการแก้ไขให้สมบูรณ์

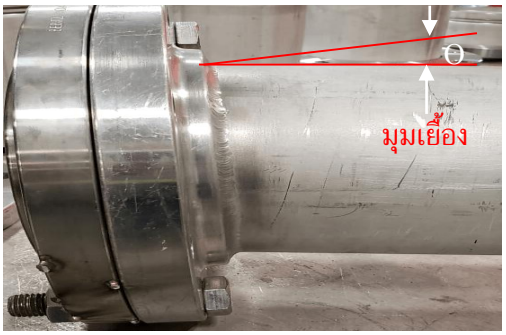


รูปแบบรอยเยื้องเชิงมุม
(Angular misalignment)

รูปที่ 8.79 ข้อบกพร่องรอยต่อขอบเชื่อมเยื้องเชิงมุม (Angular misalignment weld)



(ก) รอยเยื้องเชิงมุมของการเชื่อมโลหะประเภทแผ่น
ที่มา : Measurement of angular misalignment, 2012



(ข) รอยเยื้องเชิงมุมของการเชื่อมโลหะประเภทท่อ
ที่มา : Pipeline Safety, 2014



การเชื่อมยึด (Tack weld)



การตรวจสอบระยะห่าง (Gap)



การตรวจสอบระดับ (Hi–Lo)

รูปที่ 8.80 การเตรียมและตรวจสอบรอยต่อก่อนทำการเชื่อมป้องกันแนวเชื่อมเยื้องเชิงมุม
ที่มา : Assessment of Weld Misalignment and Shell Distortions, 2014







รูปที่ 8.81 การตรวจสอบข้อบกพร่องรอยขอบเชื่อมเยื้องเชิงมุมด้วยเกจวัด
ที่มา : G.A.L. Gade Co.–Hi–Lo Welding gage, 2011

ข้อบกพร่องรอยต่อขอบเชื่อมเยื้องทั้งเชิงเส้นและเชิงมุม ต่างก็ทำให้โครงสร้างของแนวเชื่อมไม่สมดุลในแนวกึ่งกลาง (Unbalance centerline) ซึ่งมักมีผลกระทบโดยตรงต่อการนำไปประกอบเข้ากับชิ้นส่วนของโครงสร้างอื่นที่นอกจากจะประกอบยากขึ้นแล้ว ยังทำให้โครงสร้างเกิดการงัดหรือดัดงอ จนเกิดเป็นความเค้นสะสมขึ้น เมื่อใช้งานหรือรับภาระงานก็จะทำให้ชิ้นงานแนวเชื่อมเกิดการแตกหักขึ้นได้ ดังแสดงตัวอย่าง การเชื่อมโลหะท่อที่เกิดการเยื้องเชิงเส้นขึ้นในรูปที่ 8.82 เมื่อนำไปใช้งานแนวเชื่อมต้องดัดงอขณะประกอบส่งผลให้แนวเชื่อมเกิดการแตกร้าวขึ้นภายใต้ภาระโหลดที่ต่ำกว่าที่สามารถรับได้จนเกินจริง



รูปที่ 8.82 ตัวอย่างข้อบกพร่องรอยขอบเชื่อมเยื้องเกิดการแตกร้าวเมื่อนาไปใช้งาน

ที่มา : Welding Construction Issues , 2013

ในบทเรียนนี้ผู้เขียนได้พยายามทำการรวบรวมข้อบกพร่องที่เกิดจากการเชื่อมต่อโลหะในรูปแบบต่าง ๆ ของงานเชื่อม ที่ซึ่งเป็นข้อบกพร่องที่มักพบเจอกันบ่อย ๆ และเป็นข้อบกพร่องที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงสร้างงานเชื่อม และได้พยายามค้นคว้าหาที่มาและต้นสายปลายเหตุของการเกิดข้อบกพร่องและรวมถึงวิธีการป้องกันไม่ให้การเกิดข้อบกพร่องของรูปแบบต่าง ๆ นั้น พบว่าแท้จริงแล้วข้อบกพร่องของการเชื่อม (Weld defected) มีมากมายจนไม่อาจนำมาเสนอได้หมด ยังมีข้อบกพร่องอีกจำนวนมากที่มีโอกาสที่จะเกิดขึ้น ก็คงด้วยเพราะเทคโนโลยีของการเชื่อมต่อโลหะต้องอาศัยปัจจัยหรือองค์ประกอบร่วมหลายด้าน เช่น ด้านวัสดุที่นำมาเชื่อมทั้งโลหะชิ้นงานและวัสดุลวดเชื่อม ด้านปัจจัยของเครื่องมือเชื่อม ด้านทักษะของช่างเชื่อมหรือโปรแกรมสมองแขนกล และรวมถึงสภาพแวดล้อมของสถานที่เชื่อม ซึ่งแต่ละด้านก็มีองค์ประกอบย่อย ๆ ลงไปอีกมาก ดังนั้น ไม่ใช่เรื่องแปลกหรือเรื่องที่ต้องตระหนกตกใจอะไรเมื่อเชื่อมแล้วเกิดข้อบกพร่อง เพราะการที่จะทำการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ให้เป็นค่าคงที่ทั้งหมดคงทำได้ยากมาก แต่ถ้าช่างเชื่อมหรือผู้ที่ปฏิบัติการงานเชื่อมศึกษาเรียนรู้ถึงสาเหตุที่จะก่อให้เกิดข้อบกพร่องนั้น และหาวิธีการป้องกันก็สามารถขจัดปัญหาข้อบกพร่องที่จะเกิดขึ้นได้ โดยยิ่งลงมือปฏิบัติการด้วยตนเองมากเท่าไหร่ก็ยิ่งจะสะสมประสบการณ์ความเชี่ยวชาญมากขึ้นเท่านั้น จึงเป็นที่มาของการสร้างมาตรฐานระดับความเชี่ยวชาญของบุคลากรด้านงานเชื่อมขึ้น ซึ่งมีทั้งมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา (AWS: American Welding Scciety) มาตรฐานยุโรป (IIW ; Internation Institute of Welding) เป็นต้น

ดัชนีคำศัพท์บทที่ 8

Angular misalignment – รอยเชื่อมที่เกิดการเยื้องในแบบเชิงมุม

Burn through – แนวเชื่อมทะลุ

Carter pipe –โพรงหดตัวที่จุดปลายบ่อหลอมที่คล้ายกับท่อสูบยาเส้น

Cavities – ข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศ

Changes of geometry – การสูญเสียรูปทรงของแนวเชื่อม

Cluster porosity – รูพรุนแบบรวมเป็นกลุ่ม

Cold crack – การแตกขณะเย็น

Continuous undercut – รอยกัดแหว่งแบบยาวต่อเนื่องตลอดแนวเชื่อม

Crack propagation – การขยายตัวของรอยร้าว

Crack susceptibility – ความไวต่อการแตกร้าว

Cracks – รอยร้าวของแนวเชื่อม

Crater crack – รอยแตกกึ่งกลางบ่อหลอม

Crown undercut –รอยกัดแหว่งบริเวณด้านผิวหน้าแนวเชื่อม

Defect prevention – การป้องกันข้อบกพร่อง

Discontinuies – ความไม่ต่อเนื่องของเนื้อเชื่อม

Distortion – แนวเชื่อมเกิดการบิดตัว

Edge crack – การแตกร้าวที่ขอบแนวเชื่อ

Elongated pores – โพรงอากาศแบบแนวยาว

Excess fillet weld – สว่นเกินของแนวเชื่อมมุม

Excess root weld – ส่วนเกินของด้านแนวเชื่อมราก

Excess weld reinforcement – ส่วนเกินของด้านหน้าผิวแนวเชื่อม

Excessive convexity – ความนูนส่วนเกิน

Excessive penetration – แนวเชื่อมซึมลึกมากเกินไป

External defects – ข้อบกพร่องภายนอก

Fusion line crack – การแตกร้าวในแนวเชื่อม

Hat cracking – รอยแตกที่มีรูปทรงคล้ายหมวกสวมหรือหัวดอกเห็ด

Hot crack –การแตกขณะร้อน

Imperfect shape – ความไม่สมบูรณ์ของรูปร่างและมิติของแนวเชื่อม

Inclusion – สารมลทินฝังในเนื้อเชื่อม

Incomplete fusion – การหลอมละลายไม่สมบูรณ์

Incorrect shape – รูปทรงผิดรูป

Intergranular crack – การแตกตามขอบเกรน

Intermittent undercut – รอยกัดแหว่งแบบเว้นระยะ

Internal defects – ข้อบกพร่องภายใน

Internal porosity – โพรงอากาศภายใน

Interpass หรือ Inter–run undercut – รอยกัดแหว่งระหว่างเที่ยวเชื่อม

Irregular oxide shape –รูปทรงของออกไซด์ที่ไม่แน่นอนตายตายตัว

Lack fusion crack – การแตกร้าวจุดที่เกิดการไม่หลอมละลายของแนวเชื่อม

Lamination defects – ข้อบกพร่องแบบรอยแยกชั้น

Linear misalignment – รอยต่อขอบเชื่อมเยื้องเชิงเส้น

Linear porosity – รูพรุนแบบเป็นแนวยาวต่อเนื่อง

Longitudinal crack – การแตกร้าวตามแนวยาวของรอยเชื่อม

Metallic inclusion defect – ข้อบกพร่องแบบสารโลหะฝังใน

Misalignment defects – ข้อบกพร่องจากการเยื้องศูนย์ของรอยเชื่อม

Overlap – ข้อบกพร่องรอยเชื่อมเกย

Oxide inclusion defect – ข้อบกพร่องแบบสแลกฝังในแนวเชื่อม

Piping porosity – โพรงหนอนแบบท่อใหญ่

Regular oxide shape –รูปทรงของออกไซด์ที่มีรูปทรงที่แน่นอนตายตัว

Reheat crack – การแตกร้าวเมื่อได้รับความร้อนซ้ำ

Root crack – การแตกร้าวที่แนวซึมลึก

Root undercut –รอยกัดแหว่งบริเวณผิวด้านในของแนวเชื่อม

Runoff tabs – แผ่นรองเสริมป้องกันการแตกที่ปลายแนวเชื่อม

Shape inclusion –รูปร่างของสารมลทิน

Shrink defects – ข้อบกพร่องแบบรอยยุบตัว

Single toe crack – การแตกด้านเดียวที่ตีนแนวเชื่อม

Spatters – สะเก็ดหรือเม็ดโลหะบนแนวเชื่อม

Star crack – รอยแตกที่เป็นรูปคล้ายดวงดาว

Stop filler defect – ข้อบกพร่องที่จุดหยุดลวด

Stress concentration – จุดที่เกิดการสะสมของความเค้นที่สูง

Throat crack – รอยแตกกึ่งกลางตามยาวแนวเชื่อม

Toe crack – การแตกร้าวที่ตีนแนวเชื่อม

Trangranular cracking – การแตกแบบผ่าก้อนเกรน

Transverse HAZ crack – การแตกร้าวขวางแนวผลกระทบร้อนของแนวเชื่อม

Transverse weld crack – การแตกร้าวขวางแนวเชื่อม

Unbalance centerline – แนวเชื่อมที่มีความไม่สมดุลในแนวกึ่งกลาง

Underbead crack – รอยแตกร้าวใต้แนวเชื่อม

Undercut – รอยกัดแหว่งที่ขอบแนวเชื่อม

Underfill – การเติมเนื้อร่องเชื่อมไม่สมบูรณ์

Uniformly scattered porosity – รูพรุนแบบกระจายตัว

Welding defects – ข้อบกพร่องของงานเชื่อม

Welding shrinkage – การหดตัว/ยุบตัวของแนวเชื่อม

Worm holes – โพรงหนอนเป็นกลุ่มเหมือนรูปก้างปลา

Wormholes – ข้อบกพร่องแบบโพรงหนอน

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 8

ข้อที่1. จงเขียนอธิบายความแตกต่างของข้อบกพร่องที่เกิดภายใน (Internal defects) กับข้อบกพร่องที่เกิดอยู่ภายนอก (External defects) พร้อมยกตัวอย่างประกอบการอธิบายอย่างน้อยอย่างละ 4 ชนิด ข้อบกพร่อง

ข้อที่ 2. จงบอกความแตกต่างของการแตกร้าวแบบ Hot crack กับ Cold crack พร้องอธิบายกลไกของการเกิดการแตกร้าวทั้งสองแบบมาพอสังเขป (ควรเขียนภาพประกอบการอธิบาย)

ข้อที่ 3. จงอธิบายความหมายของการแตกร้าวในรูปแบบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ พร้อมระบุตำแหน่งของการเกิดบนแนวเชื่อมมาให้ชัดเจน (วาดภาพประกอบการระบุตำแหน่งรอยแตกร้าว)

- รอยแตกร้าวปลายบ่อหลอม (Crater crack)
- การแตกร้าวขวางแนวเชื่อม (Transvere crack)
- การแตกร้าวตามยาวของแนวเชื่อม (Longitudinal crack)
- การแตกร้าวที่ไม่หลอมละลาย (Lack of fusion crack)
- การแตกร้าวที่ขอบแนวเชื่อม (Edge crack)
- การแตกร้าวแนวซึมลึก (Root crack)
- การแตกร้าวขวางแนว HAZ (Transvere HAZ crack)
- การแตกร้าวที่ตีนแนวเชื่อม (Toe crack)

ข้อที่ 4. จงบอกเทคนิคการป้องกันการแตกร้าวที่รากของแนวเชื่อม (Root crack) พร้อมบอกผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้เทคนิคดังกล่าวอย่างชัดเจน

ข้อที่ 5. จงอธิบายกลไกการเกิดผลึกของคาร์ไบด์ตามขอบเกรนที่เกิดจากให้ความร้อนซ้ำ (Reheat)

ข้อที่ 6. จงอธิบายสาเหตุหลักของการเกิดรอยฉีกร้าวของแนวเชื่อมแบบ Lamellar tearing พร้อมบอกถึงวิธีการป้องกันการเกิด (ควรวาดภาพประกอบการอธิบาย)

ข้อที่ 7. จงอธิบายความแตกต่างของข้อบกพร่องโพรงอากาศในงานเชื่อม ชนิดรูพรุน (Porosity) ชนิดโพรงหนอน (Wormholes) และชนิดช่องว่างจากการหดตัว (Shrinkage voids)

ข้อที่ 8. จงบอกถึงความแตกต่างของกลไกการเกิดพฤติกรรมของการหดตัวจากโครงสร้างเดนไดร์ (Interdendritic microshrinkage) กับการหดตัวที่ผ่านขอบเกรน (Trangranular microshrinkage)

ข้อที่ 9. จงอธิบายถึงที่มาของข้อบกพร่องแนวเชื่อมที่มีโลหะทังเตนฝังใน (Tungsten inclusion)

ข้อที่ 10. จงบอกสาเหตุของการเกิดข้อบกพร่องแบบเกิดเการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Lack of fusion) ในตำแหน่งดังต่อไปนี้ 1. Lack of inter−run fusion 2. Lack of side wall fusion และ 3. Lack of root fusion

ข้อที่ 11. จากรูปเป็นข้อบกพร่องแบบทะลุของแนวเชื่อมที่เกิดจากการหย่อนตัว (Sagging) ของบ่อหลอมละลาย จงบอกวิธีการป้องกันการเกิดมาพอเข้าใจ



(ก) การหย่อนตัวเชื่อมโลหะท่อ

ที่มา : Pipeline Pitting and Repair, 2021



(ข) การหย่อนตัวเชื่อมโลหะแผ่นหนา

ที่มา : Welder LAB, 2020

ข้อที่ 12. จากรูป (ก) และ (ข) เป็นขบวนการขั้นตอนอะไร และทำเพื่ออะไร จงอธิบายอย่างละเอียด



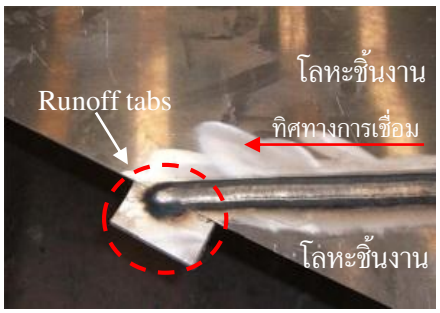
(ก)



(ข)

ที่มา : Assessment of Weld Misalignment and Shell Distortions, 2014

ข้อที่ 13. จากรูป (ก)และ (ข) เป็นขบวนการทำ Runoff tab จงอธิบายจุดประสงค์อย่างละเอียด



(ก) การสร้าง Runoff tab โลหะแผ่นบาง

ที่มา : Aluminum alloys MIG Welding, 2012



(ข) การสร้าง Runoff tab โลหะแผ่นหนา

ที่มา : AWS Syracuse section, 2012

บรรณานุกรมบทที่ 8

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) *เรื่องกำหนดมาฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม การเชื่อมและกระบวนการที่เกี่ยวข้อง–การจำแนกประเภทของความไม่สมบูรณ์ทางเรขาคณิตในวัสดุโลหะ เล่ม 1 การเชื่อมหลอมละลาย* มอก.2692 เล่ม 1–2558

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) *มาตรฐานการตรวจสอบรอยเชื่อมโครงเหล็กรูปพรรณด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย* (มยผ. 1561–51) ถึง มยผ. 1565– กรมโยธาธิการและผังเมือง พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2551

American National Standard: AWS. *Standard Symbols for Welding, Brazing and Nondestructive Examination.* Supersedes ANSI/AWS A2.4–98. 6th Edition, March 23, 2007.

American Petroleum Institute (API). *Welding Inspection and Metallurgy–Recommended Practice 577*. 1st Edition, October, 2004.

American Petroleum Institute. *Welding Pipelines and Related Facilities–API Standard M 1104*. 21st Edition, 2017.

American Society of Mechanical Engineering (ASME). *Setting: The Standard Boiler and Pressure Vessel Code (An International Code)*. Published by ASME, 2017.

Annette O'Brien, Carlos Guzman. *Welding Handbook Vol.4–Materials and Application, Part 1*. 9th Edition. American Welding Society, 2011.

AROTEC Inspection Partner Co. *Welding Defects– Part 1*. September 13, 2021.

ASM International. *Failure Analysis Case Histories : Processing Errors and Defects*. Published by ASM, 2005.

AWS–American Welding Society. *Pocket Handbook for Visual Inspection and Weld Discontinuities Causes and Remedies*. Published by AWS, 2004.

Carolin Fink and Manuela Zinke. *Welding of Nickel–based Alloy 617 Using Modified Dip Arc Processes*. Journal of Weld World–IIW. February, 2013.

CSWIP 3.1 *Welding Imperfections and Materials Inspection*. TWI Training & Examination Services. Course Reference WIS 5. TWI Ltd., 2009.

Edward R. Bohnart. *Welding and Practices*. Published by McGraw–Hill. 1st Edition, 2017.

ESAB. *Pipelines Welding Handbook–Welding techniques*, *Welding Consumable, Defects and Remedies*. XA00105920, 65 pages, 2012.

ESAB. *Repair and Maintenance Welding Handbook*. Second Edition, 2009.

ESAB. *Repair and Maintenance Welding Handbook–Selection and Application Guide Esab Repair and Maintenance Consumables*. Sescond Edition. 2011.

F. Yusof and MF. Jamaluddin. *Welding Defects and Implications on Welded Assemblies*. University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia. 2014.

Friction Stir Welding European Qualifications (FSW–Tech). *Friction Stir Welding Handbook*. Published by FSW–Tech., 2017.

Indian Railways Institute of Mechanical .*Welding Defects*. Jun 16, 2015.

Indian Railways–Center for Advance Maintenance Technology. *Hanbook on Welding Technology*. February, 2015.

Industrial Application & Chemical Section International Atomic Energy Agency (IAEA). *Training Course Series No.13. Guidebook for the Fabrication of Non–Destructive Testing (NDT) Test Specimens*. June, 2001.

Intermediate Arc Welding Information Book. *ARC WELDING–Metals & Fabrication (ENG094)*. Department of Training and Workforce Development. January, 2009.

Internation Standard: ISO 5817. *Welding–Fusion Welding joints in Steel, Nickel, Titanium and Alloys (Beam Welding Excluded)–Quality Levels for Imperfections*. Third Edition, 02–15–2014.

ISO: *Petroleum and Natural Gas Industries–Steel pipe for pipeline Transportation Systems* ISO 3183:2007 Geneva. 2007.

John N. DuPONT, John C. LIPPOLD and Samuel D. KISER. *Welding Metallurgy and Weldability of Nickel–Base Alloys*. Published by John Wiley & Sons, Inc. 2009.

KOBELCO. *Welding Imperfections and Preventive Measures*. Published by Kome Steel, LTD. Tokyo, 2015.

Larry Jeffus. *Welding and Metal Fabrication*. 1st Edition, 2011.

LINCOLN Electric. *Weld Clacking –An Excerpt from The Fabricators and Erectors Guide to Welded Steel Construction*. Lincoln Arc Welding Foundation. 2015

LINCOLN Electric. *Weld Discontinuities*. By U/LINC WC–514, Lincoln Global, Inc. 08–2015.

MiHa Kenda, et.al. *Analysis and Prevention of Weld Crater Cracking in Circumferential Laser Microwelding of Automotive pressure sensors*. Engineering Failure Analysis, Vol.128, 2021.

Minhaj M. Alam, Z. Barsoum and A. Kaplan. *The Effects of Surface Topography and Lack of Fusion on the Fatigue Strength of laser Hybrid Welds*. Journal of Materials Science. 2009.

P.S. Wei. *The Physics of Weld Bead Defects*. Novenber 21st 2012.

Phi Evans. *Cracking Down on Weld Cracks*. Publication in the Fabricator, July 16, 2012.

Sandeep Anand. *Welding Defects*. Welding & NDT, December 6, 2017.

Sonit Singh. *Analysis of Various Defects Involved in Welding Metallurgy*. Conference Paper, KIT University. March, 2018.

Stavros Kairis. *Alumunum Alloys MIG Welding Procedure Instructions*. February 8, 2012.

Technoweld. *The Most Common Welding Defects: Causes and Remedies*. Nov 13, 2019.

TWI Ltd. *Welding Inspection–Defects/Repairs*, Course Reference WIS 5. 2003.

U. Zerbst. *Application of Fracture Mechanics to Welds with Crack Origin at the Weld Toe: A Review Part 1: Consequences of Inhomogeneous Microstructure for Materials Testing and Failure Assessment*. Materials Science. Welding in the World. 13 September 2019.

UNITOR–Maritime Welding Handbook: *Welding and Related Processes for Repair and Maintenance Onboard*. 14th Edition, 2nd Revision, 2015.

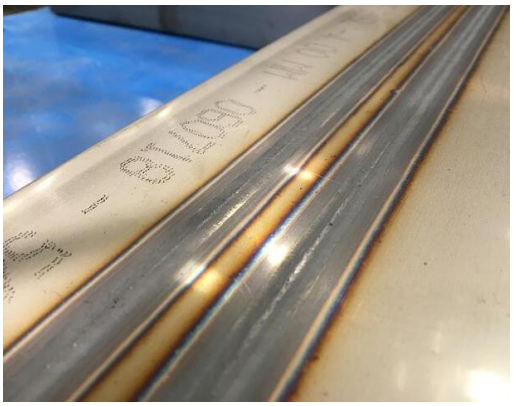
WELD DEFECTS KIT. *Real Career–Welding Solutions 13 Models*. 2017.

William R. Oates, Alexander M. Saitta. *Welding Handbook Vol.4– Materials and Application, Part 2.* 9th Edition. American Welding Scciety, January 1, 1987.

บทที่ 9

กรณีศึกษา :
การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก
Welding Austennitic Stainless Steels





ที่มา : Inverter Welding Technology, Introduction to Welding Stainless Steels, 2018

จุดประสงค์การเรียนรู้ บทที่ 9 กรณีศึกษา : การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

- รู้และเข้าใจถึงชนิดและประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก
- เข้าใจและอธิบายถึงการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกชนิดเดียวกันและต่างชนิดกัน
- เข้าใจและอธิบายถึงพฤติกรรมทางโลหะวิทยาของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก
- เข้าใจและอธิบายถึงอิทธิพลของแก๊สปกคลุมของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก
- เข้าใจและอธิบายถึงสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก
- เข้าใจและอธิบายถึงกลไกการกัดกร่อนของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก
- มีจรรยาบรรณในการวิเคราะห์และประเมินผลคุณภาพของเนื้อเชื่อมเมื่อต้องทำการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

"Case Study : Welding Austenitic Stainless Steels" บทเรียนนี้ว่าด้วยกรณีศึกษาของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ที่เป็นผลงานวิจัยวิจัยเฉพาะทาง ซึ่งเป็นความเชี่ยวชาญและเป็นความสนใจของผู้เขียนตลอดมา โดยผลงานวิจัยทดลองที่นำมาเสนอไว้เป็นกรณีศึกษาในบทเรียนนี้ ทุกงานวิจัยได้ผ่านการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ (Peer review) ของวารสารและได้ทำการเผยแพร่สู่สาธารณะในระดับนานาชาติเป็นที่เรียบร้อยแล้ว (Publication)

วัสดุในงานวิศวกรรมประเภทโลหะ (Metal materials) ไม่ว่าจะเป็นโลหะกลุ่มที่เป็นตระกูลเหล็ก (Ferrous metals) และเป็นโลหะกลุ่มที่ไม่ใช่เหล็ก (Non–ferrous metals) เห็นได้ชัดเจนว่ามีการนำมาประยุกต์ใช้งานกันหลากหลายรูปแบบงานที่มากกว่าวัสดุวิศวกรรมประเภทอื่น ๆ ก็คงด้วยเหตุผลที่มีข้อดีมากมายของวัสดุประเภทโลหะเป็นสำคัญ หนึ่งในข้อดีของเหตุผลในการเลือกใช้งานวัสดุที่เป็นโลหะ คือ ความสามารถในการประกอบเป็นโครงสร้างงานหรือผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ดี ได้ง่าย ได้สะดวก ได้รวดเร็ว ได้คุณภาพ และได้ทุกชนิดของวัสดุโลหะ ก็คือการประกอบต่อติดกันด้วยกรรมวิธีการเชื่อม (Joint welding)

วัสดุโลหะกลุ่มเหล็ก ได้แก่จำพวก เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) เหล็กกล้าผสม (Alloy steel) และเหล็กหล่อ (Cast iron) ก็จะมีปริมาณการเลือกนำมาใช้งานมากกว่าวัสดุกลุ่มที่ไม่ใช่เหล็กอันได้แก่จำพวกโลหะอลูมิเนียม (Aluminum) ทองแดง (Copper) ทองเหลือง (Brass) ดีบุก (Tin) ตะกั่ว (Lead) สังกะสี (Zinc) และโลหะผสมเหล่านี้ (Alloy) เป็นต้น โดยเฉพาะในงานที่ต้องนำมาทำการประกอบด้วยการเชื่อม ก็ด้วยเหตุเพราะว่าโลหะจำพวกเหล็กโดยภาพรวมมีแนวโน้มด้านความสามารถในการนำมาเชื่อมจะสูงกว่า มีปัญหาน้อยกว่าจึงมีความต้องการที่มากกว่า ดังนั้น ไม่น่าแปลกใจว่าทำไมงานวิจัยต่าง ๆ ส่วนใหญ่เป็นการแก้ปัญหาและพัฒนาการเชื่อมโลหะที่เป็นเหล็ก เป็นสำคัญ

โลหะเหล็กกล้าไร้สนิมหรือโลหะเหล็กที่ปราศจากสนิม ที่มีชื่อเรียกกันจนเป็นที่เข้าใจว่า "Stainless steel" จัดว่าเป็นโลหะกลุ่มเหล็กพิเศษที่มีสมบัติโดดเด่นที่ต่างไปจากสมบัติพื้นฐานต้นตระกูลของเหล็ก คือไม่เป็นสนิม (Passive film protective) และบางเกรดไม่ดูดติดกับแม่เหล็ก (Non–magnetic) โดยเฉพาะความไม่เป็นสนิม (ไม่เกิดออกไซด์สีแดง) จึงเหมาะแก่การนำไปใช้กับงานที่ต้องการความสะอาด ความปลอดภัยด้านอาหารและยา สภาพงานที่ต้องทนต่อสภาพการการกัดกร่อน นอกจากนี้เหล็กกล้าไร้สนิมยังมีความราบเรียบเป็นเงาที่สวยงาม จึงเป็นที่ต้องการนำไปประกอบเป็นโครงสร้างอาคารหรือชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเน้นความสวยงาม แต่มีความแข็งแรงและคงทนเหมือนกับโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนเกรดอื่น ๆ ทุกประการ บางเกรดที่มีความโดดเด่นด้านไม่ดูดติดกับแม่เหล็ก (Austenitic stainless steel) จะเหมาะกับงานที่ต้องปราศจากคลื่นแม่เหล็กรบกวน และต้องสะอาด เช่น งานด้านอุปกรณ์และเครื่องมือทางการแพทย์ หรืองานทางด้านระบบอิเลคทรอนิกส์ควบคุม บางเกรดมีสมบัติเด่นด้านความเหนียวขึ้นรูปได้ง่าย บางเกรดมีลักษณะเฉพาะด้านความแข็งเกร่ง และบางเกรดก็สามารถนำไปปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ เป็นต้น อย่างไรก็ตามโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมนี้ด้วยพื้นฐานที่เป็นโลหะประเภทเหล็ก การเชื่อมต่อหรือประกอบ (Joint) ก็จำเป็นที่

จะต้องใช้เทคโนโลยีการเชื่อมเช่นเดียวกันกับโลหะเหล็กทั่ว ๆ ไป ดังนั้น เนื้อหาสาระหลักของบทเรียนนี้จะเป็นการรวบรวมองค์ความรู้จากงานวิจัยของผู้เขียนและจากผลงานวิจัยเผยแพร่จากแหล่งต่าง ๆ ผนวกกับประสบกรณ์ด้านเทคโนโลยีงานเชื่อมที่ได้ลงมือปฏิบัติมาด้วยตนเองในด้านการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก โดยจะกล่าวและรวบรวมถึงองค์ความรู้ใหม่ เทคนิคปฏิบัติการเชื่อมที่พัฒนาขึ้น และข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากบทสรุปของผลการวิจัยการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกของผู้เขียน ดังต่อไปนี้

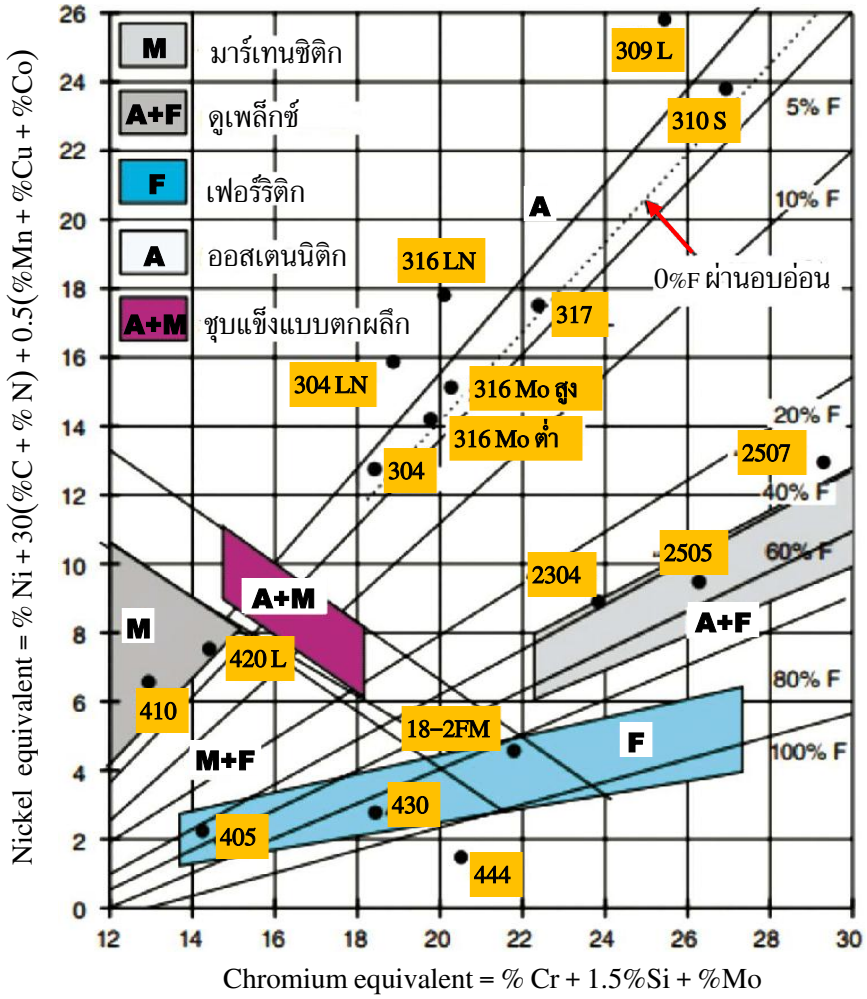
9.1 การแบ่งประเภทของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม (Type of stainless steels)

วัสดุกลุ่มเหล็กเป็นวัสดุที่มีสมบัติด้านความทนทานต่อการกัดกร่อนต่ำมาก จึงมักพบเห็นอยู่บ่อย ๆ ว่าเหล็กเมื่อนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้น มีสภาพเป็นกรด ด่าง หรือน้ำทะเลจะเกิดการกัดกร่อนขึ้น ซึ่งถือว่าเป็นจุดด้อยของวัสดุประเภทโลหะเหล็กที่จะนำไปใช้งาน จึงได้พยายามคิดค้นเพื่อที่จะแก้ปัญหาด้านการกัดกร่อนมาตลอดเวลาโดยนักโลหะวิทยา ซึ่งในปี ค.ศ.1913 Harry Brearly ได้คิดค้นเหล็กกล้าผสมที่จะนำไปใช้งานชนิดหนึ่ง ที่มีปริมาณของคาร์บอน 0.35% และโครเมียม 14% (ปัจจุบันคือ AISI 430) แล้วต้องการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคแต่มีปัญหาไม่สามารถกัดกรดเห็นโครงสร้างได้ เพราะเนื้อเหล็กทนการกัดของกรดได้ จากปัญหาดังกล่าวได้เกิดความคิดใหม่ว่าคงเป็นสมบัติที่ดี ถ้าจะนำไปใช้สำหรับงานที่ต้องการทนกรด จึงได้นำข้อดีของเหล็กผสมชนิดนี้มาใช้งาน และได้มีการพัฒนามาเรื่อย ๆ จนเกิดเหล็กกล้าผสมที่ทนการกัดกร่อนได้ดี จนถึงปัจจุบันที่รู้จักเหล็กกล้าผสมกลุ่มนี้ในชื่อของเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steels) ซึ่งจะได้อธิบายถึงรายละเอียดของเหล็กกล้าผสมชนิดนี้ต่อไป

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เป็นเหล็กกล้าที่ผสมธาตุโครเมียมที่มากกว่า 12% โดยโครเมียมที่ผสมลงไปเมื่อได้สัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจนก็จะรวมตัวกันกลายเป็นสารประกอบโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ที่เกิดอยู่ตามผิวของเหล็กที่มีลักษณะเป็นชั้นบาง ๆ (Thin film) ที่บางครั้งเรียกว่า ออกไซด์ฟิล์ม (Oxide film) โดยออกไซด์ฟิล์มนี้จะมีสีใส มีความเหนียว และเคลือบติดแน่นอยู่ที่ผิวเหล็ก จากสมบัติดังกล่าวเกิดเป็นข้อดีที่สามารถนำมาใช้เพื่อปกปิดพื้นผิวของเหล็กไม่ให้สัมผัสกับออกซิเจนในบรรยากาศ ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการกัดกร่อนที่ผิวเหล็กขึ้นอีก ซึ่งตามหลักการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) จะเรียกออกไซด์ฟิล์มนี้ว่า เป็นขั้วแคโทด (Cathode) จากการวิจัยพบว่าประสิทธิภาพของออกไซด์ฟิล์มจะขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุโครเมียมที่ผสมต้องมากเพียงพอในการเกิดฟิล์ม ซึ่งส่วนผสมปกติจะต้องมากถึง12% เหตุผลเพราะมีโครเมียมบางส่วนจะไปรวมตัวกับคาร์บอนกลายเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr_7C_3 หรือ $Cr_{23}C_6$) ซึ่งไม่ได้ช่วยในการสร้างฟิล์ม ดังนั้น โครเมียมที่เหลืออาจไม่มากเพียงพอที่สร้างฟิล์มได้ดี ในทางปฏิบัติเหล็กกล้าไร้สนิมจึงต้องเติมธาตุโครเมียมให้มากขึ้น (ตามมาตรฐานจะผสมอยู่ระหว่าง 12–28%) นอกจากโครเมียมแล้วยังมีธาตุนิกเกิล (Nickel) โมลิบดินัม (Molybdenum) ไทเทเนียม (Titanium) และนิโอเบียม (Niobium) ที่ผสมเพิ่มเติมเข้าไปอยู่รวมกันในเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อเจตนาต้องการสมบัติพิเศษบางอย่างในเหล็กกล้าไร้สนิม เช่น สมบัติที่ไม่ดูดติดกับ

แม่เหล็ก (Non–magnetic) จากบทบาทของธาตุผสมนิกเกิลเป็นต้น

เหล็กกล้าไร้สนิมได้มีการผลิตออกมาใช้งานกันมากมายตามความต้องการที่เหมาะสมกับงาน และเพื่อความเข้าใจที่ตรงกันของการเรียกชื่อเหล็กกล้าไร้สนิม จึงได้พยายามจำแนกกลุ่มของเหล็กกล้าไร้สนิมโดยอาศัยลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกันได้ 5 กลุ่ม ซึ่งสามารถพิจารณาการแบ่งกลุ่มได้จาก Schaeffler diagram ดังในรูปที่ 9.1



รูปที่ 9.1 แผนภาพแสดงขอบเขตการแบ่งกลุ่มของเหล็กกล้าไร้สนิม (Schaeffler diagram)

ที่มา : ASM Internation : Alloy Digest Sourcebook, Introduction to Stainless Steels, 2000

จากการศึกษารวบรวมข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวกับกลุ่มของเหล็กกล้าไร้สนิมพบว่า ปัญหาของเหล็กกล้าไร้สนิมที่พบมาก คือ มักเกิดการกัดกร่อนขึ้นตามบริเวณขอบเกรน (Grain boundary) ของเนื้อเหล็ก ซึ่งเรียกการกัดกร่อนแบบนี้ว่า Intergranular corrosion โดยปัญหานี้มักเกิดขึ้นกับเหล็กกล้าไร้สนิมทุกกลุ่มที่มีระดับปริมาณของโครเมียมที่ผสมอยู่ในเหล็กกล้านั้นลดต่ำลง (ต่ำกว่า 12%) ซึ่ง

สาเหตุที่โครเมียมลดต่ำลงก็เกิดจากการที่โครเมียมเกิดการฟอร์มตัวเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ขึ้นตามขอบเกรนทำให้บริเวณใกล้ขอบเกรนมีปริมาณของโครเมียมลดต่ำลง (Chromium depletion) ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีความต้านทานการกัดกร่อนลดลง จึงเป็นเหตุให้เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนขึ้น ดังแสดงกลไกการกัดกร่อนในรูปที่ 9.2 และ รูปที่ 9.3 เป็นตัวอย่างโครงสร้างชิ้นงานโลหะที่เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนที่อ้างอิงจากผลการวิจัยทดลอง โดย Wichan Chuaiphan et al. (2020) การกัดกร่อนในลักษณะนี้เนื้อเหล็กจะหลุดออกไปที่ละเกรนไปเรื่อย ๆ อย่างไรก็ตาม ปัญหาการกัดกร่อนตามขอบเกรนนี้ ได้มีข้อสรุปถึงวิธีการแก้ไขและป้องกันได้ดังนี้

1) ใช้หลักการเพิ่มปริมาณโครเมียมที่ผสมให้สูงขึ้น ซึ่งอาจผสมสูงถึง 20% เป็นหลักการเผื่อโครเมียมให้คงเหลืออยู่ตามขอบเกรนในเนื้อเหล็กมากกว่า 12%

2) ใช้หลักการลดปริมาณคาร์บอนในเหล็กให้มีปริมาณต่ำ ๆ จนถึงระดับปริมาณ 0.03% เพราะที่ปริมาณคาร์บอนระดับนี้สามารถละลายในเฟสเฟอร์ไรต์ได้หมด ไม่มีคาร์บอนส่วนเกินที่จะมารวมกับโครเมียมเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ได้ จึงทำให้มีโครเมียมที่ขอบเกรนเหลือเพียงพอ

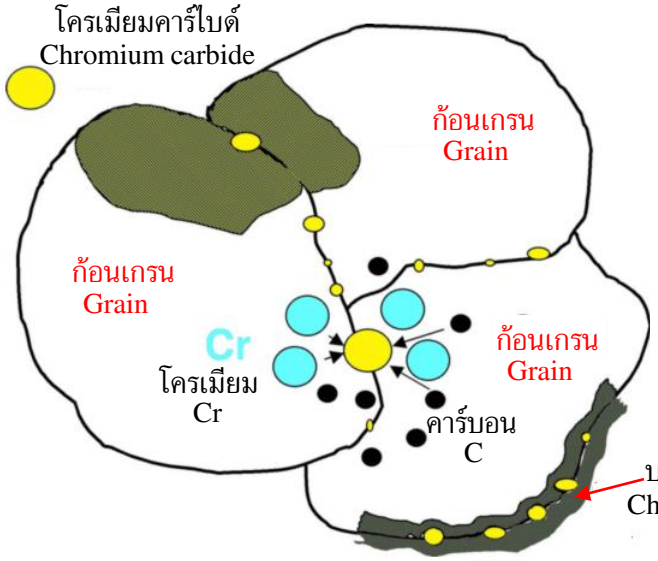
3) ใช้หลักการเติมธาตุผสมตัวอื่น ๆ ลงไป เพื่อให้ทำหน้าที่รวมตัวกับคาร์บอนแทนโครเมียม ช่วยทำให้โครเมียมที่ผสมยังคงมีอยู่ในปริมาณที่เพียงพอ ธาตุอื่น ๆ ที่ผสมต้องเป็นธาตุที่มีความไวในการรวมตัวกับคาร์บอนมากว่าโครเมียม ได้แก่ ธาตุไทเทเนียม (Ti) โมลิบดินัม (Mo) นิโอเบียม (Nb) วาเนเดียม (V) และทังสเตน (W) วิธีนี้มีความนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม

4) ใช้หลักการอบชุบทางความร้อน โดยวิธีการนำชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการขึ้นมาแล้วมาอบที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้โครเมียมคาร์ไบด์สลายตัวกลายเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มลงในสารชุบ ทำให้คาร์บอนไม่สามารถรวมตัวกับโครเมียมเป็นคาร์ไบด์ได้อีก จึงแยกกันอยู่ ส่งผลให้ปริมาณโครเมียมที่ขอบเกรนมีมากพอที่จะป้องกันการกัดกร่อนได้

5) ใช้หลักการหลีกเลี่ยงการให้ความร้อนแก่เหล็กในช่วงอุณหภูมิในประมาณ 650–700^{o}C อาจเป็นการอบคืนตัว (Tempering) หรือเผาเหล็กให้ร้อนเพื่องานต่าง ๆ เพราะช่วงอุณหภูมินี้อะตอมคาร์บอนสามารถแพร่ซึม (Diffusion) ไปรวมตัวกับอะตอมของโครเมียมแล้วเกิดเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ได้ เมื่อโครเมียมบางส่วนกลายเป็นคาร์ไบด์ทำให้ปริมาณลดลง ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนขึ้น

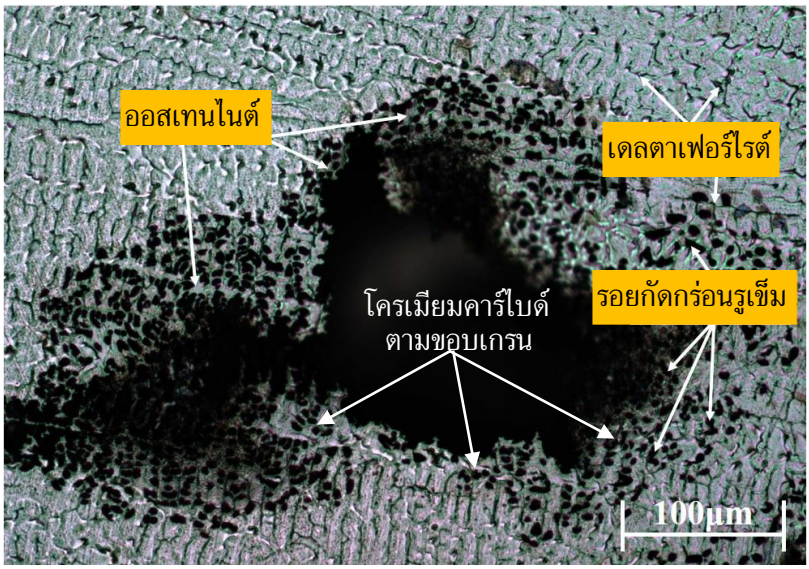
6) กรณีของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเชื่อมมา พบว่าบริเวณถัดจากขอบของแนวเชื่อมจะเกิดเป็นแนวกว้าง (Band) โดยประมาณ 25 มิลลิเมตร ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความร้อนในการเชื่อม โดยความร้อนที่เกิดอยู่ในช่วงประมาณ 650 –700^{o}C ที่ระดับอุณหภูมินี้จะเกิดปรากฏการแพร่ซึมของอะตอมคาร์บอนและโครเมียมทำให้เกิดเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ขึ้น ส่งผลให้ปริมาณโครเมียมในเนื้อเหล็กมีปริมาณลดลง เมื่อนำเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเชื่อมนี้ไปใช้งานมักเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนในบริเวณดังกล่าว วิธีการแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมไปทำการอบชุบเพื่อสลายโครเมียมคาร์ไบด์ก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งสามารถทำได้กับชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก ๆ แต่สำหรับงานภาคสนามหรืองานติดตั้งขนาดใหญ่ ๆ สามารถแก้ปัญหาได้โดยการเลือกเกรดของลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของ

โครเมียมสูง ๆ คาร์บอนต่ำ ๆ หรือมีธาตุผสมจำพวกที่รวมกับคาร์บอนแทนโครเมียมได้มาทำการเชื่อม ก็สามารถลดปัญหาการกัดกร่อนตามขอบเกรนได้



รูปที่ 9.2 กลไกการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามบริเวณขอบเกรน

ที่มา : M. Suresh Kumar, M. Sujata, M.A. Venkataswamy, S.K. Bhaumik, Failure analysis of a stainless steel pipeline, Eng. Fail Anal, 2008



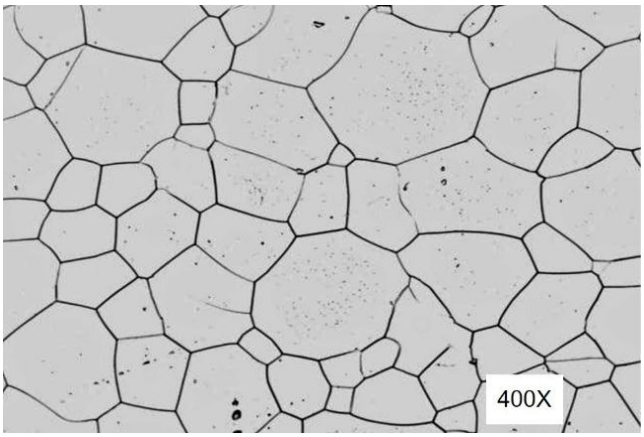
รูปที่ 9.3 ตัวอย่างการกัดกร่อนบนผิวงานที่เกิดตามบริเวณขอบเกรน

ที่มา : Wichan Chuaiphan et. al. Journal of Advance Joining Processes., 2020

9.1.1 เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steel)

เป็นเหล็กกล้าที่มีโครงสร้างพื้น (Matrix structure) เป็นเฟสเฟอร์ไรต์ ที่มีรูปแบบระบบผลึกเป็น BCC ทุกช่วงระดับอุณหภูมิ เนื่องจากไม่มีสมบัติในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก ที่เรียกกันว่า

Non–allotropic property ดังนั้น เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ไม่สามารถทำการเพิ่มความแข็งด้วยการอบชุบได้ เหตุผลหลักมาจากบทบาทของโครเมียมที่มีปริมาณผสมสูงถึง 10.5–30% ซึ่งโครเมียมเป็นตัวที่ทำให้เกิดโครงสร้างเฟอร์ไรต์ได้ง่าย (Ferrite stabilizer) นอกจากนี้ โครเมียมยังเป็นตัวการสำคัญในการต้านทานการกัดกร่อน เพิ่มความแข็งแรง ซึ่งสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้จะสูงขึ้นเมื่อปริมาณของโครเมียมที่ผสมเพิ่มขึ้น นอกจากโครเมียมแล้วยังมีธาตุผสมอื่น ๆ ได้แก่ ซิลิกอน โมลิบดินัม และแมงกานีส ที่ช่วยส่งเสริมให้เกิดสมบัติดังกล่าว ดังแสดงส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ในตารางที่ 9.1(ก) โดยพบว่าโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้านี้ประกอบไปด้วยเฟสเฟอร์ไรต์เป็นหลัก ดังแสดงรูปโครงสร้างในรูปที่ 9.4 และมีเฟสคาร์ไบด์ที่เกิดจากคาร์บอนและคาร์ไบด์ที่เกิดจากธาตุผสมอื่นกระจายอยู่ทั่วไป จนทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกมีสมบัติที่แตกต่างกันเพื่อตอบสนองความต้องการที่จะนำไปใช้งานโดยเฉพาะสมบัติทางกลดังในตารางที่ 9.1 (ข) ซึ่งถือว่าผู้ใช้ให้ความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง



รูปที่ 9.4 โครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์ (Matrix ferrite structure) ของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก
ที่มา : Vac Aero International Inc. Grain Size Measurement : The Jeffries Planimetric Method, 2013

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติกนี้ยังแยกออกได้เป็น 2 ประเภท ตามความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งาน คือ ประเภทเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก–คาร์บอนต่ำ (Ferritic stainless steel – low carbon) กับประเภทเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก–ทนความร้อนสูง (Ferritic stainless steel – refractory) โดยจะได้กล่าวถึงรายละเอียดแต่ละประเภทดังนี้

1. ประเภทเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก–คาร์บอนต่ำ (Ferritic stainless steel – low carbon)

มีส่วนผสมของโครเมียม 15–18% และคาร์บอนไม่เกิน 0.12% เหล็กประเภทนี้เหมาะใช้ทำพวกอุปกรณ์ในห้องครัว ชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ไม่เกิดความร้อน งานโครงสร้างประเภทที่ตกแต่งสวยงามหรืองานอื่น ๆ ที่ใช้ในอาคาร เป็นต้น จากลักษณะการใช้งานจะไม่เน้นความแข็งแรงแต่เน้นความทนทานการกัดกร่อน จึงพยายามลดคาร์บอนให้ต่ำลงเพื่อไม่ให้ไปรวมตัวกับโครเมียมจนกลายเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ที่จะทำให้โครเมียมลดต่ำลงแล้วเกิดการกัดกร่อนได้ง่าย ในทางปฏิบัติบางครั้งอาจมีคาร์ไบด์เกิดขึ้นบ้าง ถ้าต้องการให้ได้เฟสเฟอร์ไรต์อย่างสมบูรณ์สามารถทำได้ โดยการนำไปอบให้ร้อนประมาณ 1,000 ^{o}C เพื่อ

ตารางที่ 9.1 (ก) ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก

ที่มา : EN 10088 Stainless steels Part 1: List of stainless steels.CEN, 2005

เกรด	ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)					
AISI	Cr	C	Mn	Si	P	S
429	14–16	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03
430	16–18	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03
430F	16–18	0.12	1.25	1.0	0.06	0.15
430FSe	16–18	0.12	1.25	1.0	0.06	0.06
434	16–18	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03
436	16–18	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03
439	17.75–18.75	0.07	0.60	0.60	0.04	0.03
442	18–23	0.20	1.0	1.0	0.04	0.03
443	18–23	0.20	1.0	1.0	0.04	0.03
444	17.5–19.5	0.025	1.0	1.0	0.04	0.03
446	23–27	0.20	1.5	1.0	0.04	0.03
26–1S	25–27	0.06	0.75	0.75	0.04	0.02

ตารางที่ 9.1 (ข) สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก

ที่มา : EN 10088 Stainless steels Part 1: List of stainless steels.CEN, 2005

เกรด AISI	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength 0.2% Office (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Rockwell –B)
429	486	293	30	76
430	517	310	30	82
430F	551	379	25	86
430Fse	551	379	25	86
434	531	365	23	83
436	531	365	23	83
439	482	280	30	80
442	551	310	25	90
443	551	345	25	86
444	483	276	30	83
446	551	345	25	86
26–1S	482	345	30	85

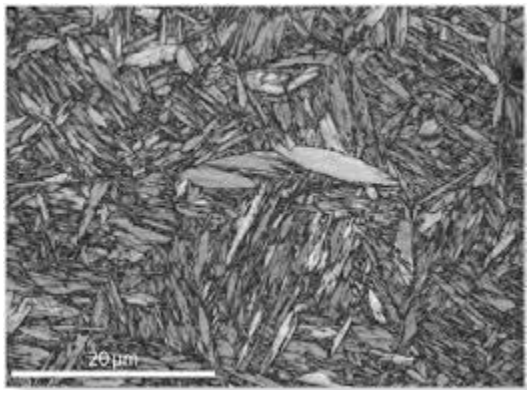
สลายคาร์ไบด์จากนั้นจุ่มลงสารชุบน้ำทันที การเย็นตัวเร็วทำให้เกิดคาร์ไบด์ได้ไม่ทัน สุดท้ายจะได้เฟสเฟอร์ไรต์ทั้งหมดอย่างสมบูรณ์ แต่ต้องระวังขณะนำไปใช้งานอย่าให้สัมผัสความร้อนสูงถึง 650–700 ^{o}C จะเกิดการแพร่ซึมของอะตอมเกิดเป็นคาร์ไบด์ได้อีก ทำให้เหล็กสูญเสียสมบัติความเหนียวไป การเชื่อมเหล็กกล้าประเภทนี้มีปัญหาค่อนข้างน้อยเพราะมีคาร์บอนต่ำ เช่น จะไม่เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่แนวเชื่อมและมีโอกาสเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ได้แต่น้อยมาก ความสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้สูงมากในบรรยากาศทั่ว ๆ ไปแต่ไม่ดีในบรรยากาศที่เป็นน้ำทะเลหรือสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดสูง

2. ประเภทเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก–ทนความร้อนสูง (Ferritic stainless steel–refractory) เป็นเหล็กที่ส่วนผสมของโครเมียมสูงมากถึง 25–30% และคาร์บอน 0.3% ผลิตขึ้นเพื่อเน้นให้มีสมบัติทนต่อความร้อนได้สูงถึง 1,000 ^{o}C และอาจสูงถึง 1,300 ^{o}C ถ้าปริมาณโครเมียมที่ผสมสูงขึ้น โดยพบว่าโครงสร้างพื้นฐานของเหล็กประเภทนี้เป็นเฟอร์ไรต์ และมีโครเมียมคาร์ไบด์ตกผลึกกระจายอยู่ทั่วไป ดังนั้น สมบัติโดยรวมของเหล็กประเภทนี้มีความแข็งสูง มักนิยมนำไปตีขึ้นรูป (Forging) หรือรีดขึ้นรูป (Rolling) เพื่อใช้ทำพวกชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเตา ท่อแก๊สร้อน ท่อไอน้ำ หรือชิ้นส่วนของงานที่ต้องสัมผัสความร้อน ข้อควรระวังในการนำไปใช้งานเนื่องจากมีโครเมียมผสมสูงและเมื่อได้รับความร้อนสูงถึง 550–750 ^{o}C จะเกิดปรากฏการแพร่ซึมของอะตอมโครเมียมไปรวมกับอะตอมของคาร์บอนกลายเป็นคาร์ไบด์ ที่เรียกกันว่า Sigma phase โดยเกิดขึ้นเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่อง จนในที่สุดเนื้อเหล็กเกิดความแข็งเปราะ มีความเหนียวลดลง และเกิดการแตกร้าวหรือแตกหักขณะใช้งาน เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทเฟอร์ริติก–ทนความร้อนสูงนี้บางเกรดมีคาร์บอนสูงมากจนมีลักษณะคล้ายกับเหล็กหล่อโครเมียมสูง (High chromium cast iron) ซึ่งสามารถนำมาใช้ทดแทนกันได้

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติกทุกประเภท มีข้อดีหลาย ๆ ด้าน ได้แก่ ด้านการกัดกร่อน ซึ่งทนทานต่อการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (Uniform corrosion) แบบรูเข็ม (Pitting corrosion) แบบภายใต้รอยซ้อน (Crevice corrosion) ทนทานต่อการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นในสภาพกัดกร่อนที่มีคลอไรด์ (SCC) และทนต่อสภาพแวดล้อมที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบที่อุณหภูมิสูง ส่วนทางด้านสมบัติทางกลมีค่าความสามารถในการยืดตัวและต้านทานแรงดึงสูง ความเหนียวปานกลาง แต่ก็มีข้อด้อยเหมือนกับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มอื่น ๆ เช่นกัน ได้แก่ เกิดการฟอร์มตัวของโครเมียมคาร์ไบด์ขึ้นตามบริเวณขอบเกรน (Grain boundary) ทำให้บริเวณที่ใกล้กับขอบเกรนมีปริมาณของโครเมียมลดลง (Chromium depletion) ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำลง จึงมักเกิดการกัดกร่อนขึ้นตามขอบเกรน (Intergranular corrosion) ความง่ายในการฟอร์มตัวของโครเมียมคาร์ไบด์และไนไตรด์ยังมีผลทำให้หลังการเชื่อมเกิดการแตกเปราะขึ้น ซึ่งเรียกพฤติกรรมนี้ว่าความไวต่อการเกิดคาร์ไบด์ สำหรับสมบัติทางด้านการดูดติดแม่เหล็กยังคงเหมือนกับเหล็กกล้าคาร์บอน จากสมบัติที่ดีที่กล่าวมาของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก ทำให้การเลือกใช้งานของเหล็กกล้าผสมกลุ่มนี้มีหลากหลายงานมากขึ้น มีแนวโน้มสูงขึ้นเหตุผลเพราะมีราคาถูกกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มอื่นที่มีนิกเกิลผสมซึ่งมีราคาแพงมาก จะมีปัญหาบ้างในเรื่องของการสูญเสียความแกร่งหลังผ่านการเชื่อม

9.1.2 เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic stainless steel)

เหล็กกล้ากลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่ผลิตขึ้นเพื่อต้องการเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความแข็งสูง ซึ่งมีค่าความแข็งสูงกว่ากลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมทุก ๆ กลุ่ม โดยกำหนดให้มีโครงสร้างพื้นเป็นมาร์เทนไซต์ ดังแสดงลักษณะของโครงสร้างในรูปที่ 9.5 โดยโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนและโครเมียมที่ผสมอยู่ เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 0.15–1.20% และมีโครเมียมอยู่ระหว่าง 11–20% ซึ่งสามารถทำให้ได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ 100% ที่ปริมาณคาร์บอนเพียง 0.1% เท่านั้น แต่มีข้อแม้ว่าต้องมีโครเมียมที่ผสมอยู่ด้วยมากเพียงพอ ดังนั้น การแบ่งประเภทของเหล็กกล้ากลุ่มนี้จึงอาศัยหลักการแบ่งตามระดับของปริมาณคาร์บอนและโครเมียมที่ผสม ดังแสดงส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ในตารางที่ 9.2. ส่วนสมบัติเด่นด้านความแข็งและทนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ก็ขึ้นอยู่กับระดับปริมาณของคาร์บอนและโครเมียมที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็กรวมไปถึงสมบัติทางกลด้านต่าง ๆ ดังแสดงเป็นตัวอย่างบางเกรดในตารางที่ 9.3 และนอกจากนี้ ยังสามารถจัดแบ่งเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติกนี้ได้เป็น 4 ประเภทดังรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 9.5 ลักษณะของโครงสร้างพื้นมาร์เทนไซต์ (Matrix martensite structure) ในเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทกลุ่มมาร์เทนซิติก
ที่มา : H. Kitahara et al., Crystallographic of Matersite in Carbon and Alloy Steels, 2006

1. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก คาร์บอนต่ำ (Martensitic stainless steel–low carbon)

เหล็กกลุ่มนี้เน้นต้องการให้มีคาร์บอนผสมต่ำที่ไม่เกิน 0.15% และมีโครเมียมผสมอยู่ระหว่าง 12–14% เมื่อนำไปชุบแข็งด้วยสารชุบน้ำมัน จะได้โครงสร้างหลังการชุบเป็นมาร์เทนไซต์แต่เป็นมาร์เทนไซต์ของโครเมียม เป็นเพราะในส่วนผสมมีคาร์บอนต่ำมาก โครงสร้างมาร์เทนไซต์ของโครเมียมจะแตกต่างจากมาร์เทนไซต์ของคาร์บอน ระดับค่าความแข็งจะต่ำกว่า 50 HRC โดยมีค่าความเค้นแรงดึงสูงถึง 140 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร ค่าความเค้นจุดครากสูง 120 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร และมีอัตราการยืดตัวค่อนข้างสูงถึง 10–15% ถ้านำไปทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิประมาณ 450–500 ^{o}C ค่าความสามารถในการยืดตัวจะสูงเพิ่มขึ้น โดยที่ไม่ทำให้ค่าความแรงดึงลดลง สำหรับในกรณีที่นำไปทำการอบอ่อน (Annealing) ที่อุณหภูมิประมาณ 800–900 ^{o}C ใช้เวลาประมาณ 1–3 ชั่วโมง ระดับค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดเพียง 50–70 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร แต่พบว่าอัตราการยืดตัวเพิ่มสูงขึ้นถึง 25–30% การใช้งาน

ตารางที่ 9.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก

ที่มา : J.R. Davis, ASM Specialty Handbook Carbon and Alloy Steels, 1996

เกรด AISI	ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)					
	Cr	C	Mn	Si	P	S
403	11.5–13	0.15	1.0	0.5	0.04	0.03
410	11.5–13.5	0.15	1.0	1.0	0.04	0.03
410S	11.5–13.5	0.08	1.0	1.0	0.04	0.03
414	11.5–13.5	0.15	1.0	1.0	0.04	0.03
416	12–14	0.15	1.25	1.0	0.06	0.15
416Se	12–14	0.15	1.25	1.0	0.06	0.06
420	12–14	0.15	1.0	1.0	0.04	0.03
420F	12–14	0.38	1.25	1.0	0.06	0.15
422	11–13	0.20–0.25	1.0	0.75	0.02	0.02
431	15–17	0.20	1.0	1.0	0.04	0.03
440A	16–18	0.60–0.75	1.0	1.0	0.04	0.03
440B	16–18	0.75–0.95	1.0	1.0	0.04	0.03
440C	16–18	0.95–1.20	1.0	1.0	0.04	0.03
440F	16–18	0.95–1.20	1.25	1.0	0.04	0.1–0.35
440FSe	16–18	0.95–1.20	1.25	1.0	0.04	0.03

ตารางที่ 9.3 ตัวอย่างสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติกบางชนิด

ที่มา : Technical Data BLUE SHEET, Allegheny Ludlum Corporation, Pittsbugh,PA 2010

เกรด AISI	Mechanical properties				
	Tensile strength ksi (MPa)	0.2%Offset yield Strength ksi (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRC)	Hardness (HRB)
440A	62(427)	104(717)	20	57–60	95
425Mod**	55(379)	94(648)	24	57–60	93
420HC*	45(310)	87(600)	28	56–59	88
420	45(310)	85(586)	29	53–57	87
410HC*	43(310)	78(538)	30	45–52	83
410	42(290)	74(510)	34	38–45	82

** เกรดพิเศษที่มีคาร์บอนผสมมากกว่าเกรดมาตรฐาน*

*** เกรดพิเศษผสมโมลิบดินัม*

ของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้จะเป็นงานที่ทนแรงดึงสูง ๆ และเป็นงานที่เน้นทนการกัดกร่อน จำพวกเพลาของ Gas turbine เพลาข้อเหวี่ยง วาวล์ และจำพวกใบมีดตัดต่าง ๆ ที่ต้องปราศจากสนิม เป็นต้น

2. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก คาร์บอนปานกลาง (Martensitic stainless steel–medium carbon) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทที่เน้นความแข็งเพิ่มขึ้น โดยปรับคาร์บอนให้สูงขึ้นเป็น 0.2–0.4% และโครเมียมผสมอยู่ระหว่าง 13–15% โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่ได้หลังการชุบลงในน้ำ ได้เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ของคาร์บอนซึ่งมีความแข็งอยู่ระหว่าง 50–55 HRC โดยมีค่าความเค้นแรงดึงประมาณ 100–110 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร และมีอัตราการยืดตัวอยู่ระหว่าง 10–12% แต่ถ้านำไปทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 ^{o}C ใช้เวลาประมาณ 1–3 ชั่วโมง ระดับค่าความเค้นแรงดึงลดลงที่ 60–70 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตรขึ้นเล็กน้อย แต่พบว่าอัตราการยืดตัวเพิ่มสูงขึ้นถึง 25% การใช้งานของเหล็กกล้าประเภทนี้จะเน้นเป็นอุปกรณ์หรือเครื่องมือสำหรับตัด เช่น จำพวกใบมีดผ่าตัด หรือใบมีดในงานอุตสาหกรรมที่เรียกกันว่า Cutlery stainless เป็นต้น

3. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก คาร์บอนสูง (Martensitic stainless steel–high carbon) เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้มีคาร์บอนผสมสูงถึง 0.6–1% และโครเมียมผสมอยู่ระหว่าง 14–16% ซึ่งทั้งคาร์บอนและโครเมียมจะผสมสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทอื่น ๆ เป็นเหตุทำให้เหล็กประเภทนี้เกิดการฟอร์มตัวเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง เมื่อนำไปทำการอบให้ร้อนเพื่อให้คาร์ไบด์สลายตัวเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมด ก็จะพบว่ามีคาร์ไบด์ที่ไม่สลายตัว (Non–dissolved carbide) ตกค้างอยู่ในที่ปริมาณมาก เมื่อชุบลงในสารชุบน้ำก็จะได้มาร์เทนไซต์ที่ไม่สม่ำเสมอและมีจำนวนไม่มากเพราะมีคาร์บอนในออสเทนไนต์ต่ำเกินไป (คาร์บอนไปรวมตัวกับโครเมียมเป็นโครเมียมคาร์ไบด์) ส่งผลให้ความสามารถในการชุบแข็งของเหล็กลดลง แต่อย่างไรก็ตาม ระดับของค่าความแข็งที่ได้ก็ยังสูงกว่าประเภทอื่น ๆ ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 55–60 HRC คาร์ไบด์ที่เป็นปัญหาไม่สลายตัวจะเป็นลักษณะของโครงสร้างยูเทกติก (Eutectic structure) ซึ่งเรียกว่า “โครงสร้างเลเดบูไรต์ (Lederburite structure)” นอกจากนี้ ยังพบว่าการที่คาร์บอนกับโครเมียมรวมตัวกลายเป็นคาร์ไบด์มาก ๆ นั้นมักเกิดปัญหาค่าความต้านทานการกัดกร่อนลดลง เพราะโครเมียมลดลงจนเหลือไม่เพียงพอ วิธีการแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยเติมธาตุไทเทเนียม หรือนิโอเบียมลงไปเล็กน้อยเพื่อไปทำหน้าที่รวมกับคาร์บอนแทนโครเมียม สำหรับการใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้ นิยมนำไปทำเป็นเครื่องมือหรืออุปกรณ์งานตัด เช่นเดียวกันกับประเภทคาร์บอนปานกลาง แต่มีสมบัติที่มีความแข็งสูงกว่า มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า และอาจแตกหักได้ง่าย ถ้าไม่นำไปผ่านขั้นตอนการอบคืนตัว (Tempering)

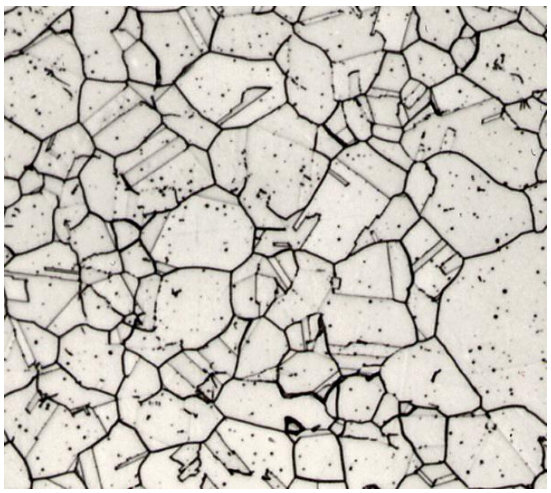
4. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก คาร์บอนต่ำ โครเมียมสูง (Martensitic stainless steel–low carbon–high chromium) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทพิเศษ ที่พัฒนาปรับปรุงจากข้อด้อยของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทคาร์บอนต่ำที่มีปัญหาด้านค่าความแข็ง โดยทำการเพิ่มธาตุผสมนิกเกิล 2–4% และเพิ่มปริมาณโครเมียมสูงขึ้นเป็น 15–20% เพื่อต้องการที่จะให้เกิดโครงสร้างออสเทนไนต์ 100%

ขณะทำการอบให้ร้อน เพราะนิกเกิลเป็นตัวช่วยทำให้เกิดเสถียรภาพออสเทนไนต์มากขึ้น เมื่อชุบลงในสารชุบน้ำมัน ก็จะได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่สม่ำเสมอ ส่งผลทำให้มีสมบัติความเค้นแรงดึงสูงสุด 120 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร ค่าความเค้นจุดคราก 100 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร และมีอัตราการยืดตัว 11% ค่าความเหนียวของเหล็กประเภทนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 ^{o}C หรือถ้าต้องการที่จะเพิ่มความสามารถในด้านการทนทานต่ออุณหภูมิสูง แนะนำให้เพิ่มธาตุผสมทังสเตนและโมลิบดินัมเข้าไปเล็กน้อย การนำไปใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้นิยมนำไปใช้กับงานที่ต้องสัมผัสน้ำหรือน้ำทะเล

9.1.3 เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic stainless steel) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้นิยมนำมาใช้งานกันมาก มีสมบัติพิเศษไม่ดูดติดกับแม่เหล็กเพราะมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นออสเทนไนต์ที่มีระบบผลึกเป็นแบบ FCC ดังแสดงลักษณะของโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 9.6 เว้นแต่การนำไปผ่านขบวนการขึ้นรูปเย็น (Cold work) ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างรุนแรงทำให้เกิดความเค้นตกค้าง (Residual stress) และไม่ได้นำไปผ่านขบวนการอบอ่อน หรือเกิดจากการมีโครงสร้างเดลตาเฟอร์ไรต์ (Delta ferrite) อยู่ในโครงสร้างพื้นออสเทนไนต์ของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมหรือหล่อขึ้นรูปมามากเกินไป ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดสมบัติดูดติดกับแม่เหล็กได้ ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีส่วนผสมสูงที่เรียกว่า Super austenitic เช่น เกรด AISI 904L จะไม่เกิดสมบัติที่ดูดติดแม่เหล็กแน่นอนไม่ว่าจะผ่านขบวนการใด ๆ มาก็ตาม เมื่อพิจารณาจากส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกนี้พบว่าสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก ประเภทโลหะผสมโครเมียม–นิกเกิล (Cr–Ni Austenitic stainless steel) เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้มีส่วนผสมของโครเมียมและนิกเกิลเป็นหลักโดยรู้จักกันในนามของเหล็กกล้าไร้สนิม Series 300 ดังแสดงในตารางที่ 9.4 ตามมาตรฐานของ AISI และ UNS พร้อมแสดงสมบัติทางกลดังในตารางที่ 9.5 เป็นที่ทราบกันดีว่าเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้ทนการกัดกร่อนได้ดีกว่ากลุ่มเฟอร์ริติกและกลุ่มมาร์เทนซิติก แต่ถ้านำไปใช้งานที่อุณหภูมิระหว่าง 480–860 ^{o}C มักเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรน ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนได้ง่าย และถ้านำไปทำการเชื่อมแบบหลอมละลายเมื่อแนวเชื่อมแข็งตัว มักเกิดเฟสโครงสร้างเดลตาเฟอร์ไรต์ (Delta ferrite) ขึ้น และทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) ตามขอบเกรน ซึ่งในขบวนการเชื่อมต้องควบคุมการเย็นตัวให้เกิดเป็นโครงสร้างเดลตาเฟอร์ไรต์อยู่ระหว่าง 3–8% ในโครงสร้างพื้นออสเทนไนต์ ซึ่งช่วยควบคุมไม่ให้เกิดการกัดกร่อนขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่าปริมาณโครงสร้างเดลตาเฟอร์ไรต์น้อย ๆ จะช่วยป้องกันการการแตกร้าวขณะร้อนได้ (Hot crack) ได้ดี และยังเป็นที่ทราบกันดีว่าเหล็กกล้าประเภทนี้มีโครงสร้างออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิห้องซึ่งไม่สามารถทำการชุบแข็งได้ แต่พบว่าถ้าทำการอบให้ร้อนที่อุณหภูมิที่ 1,000 ^{o}C แล้วจุ่มลงในสารชุบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 ^{o}C ก็สามารถทำให้เกิดโครงสร้างเฟสมาร์เทนไซต์ขึ้นได้ เพราะนิกเกิลที่ละลายอยู่ในเฟสออสเทนไนต์ มีบทบาทที่จะทำให้เกิดเป็นเฟส

มาร์เทนไซต์ได้ก็ต่อเมื่อเกิดการเปลี่ยนเฟสในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ นอกจากการชุบแล้ว พบว่าการเพิ่มความแข็งยังสามารถทำได้โดยอาศัยความเครียดภายหลังผ่านการขึ้นรูปเย็น หรือที่เรียกกันว่า "ความเครียดแข็ง (Strain hardening)" โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างเฟสออสเทนไนต์ไปเป็นเฟสออสเทนไนต์ผสมมาร์เทนไซต์ ซึ่งมีค่าความเค้นแรงดึงสูงขึ้นกว่าการอบชุบถึง 3 เท่า (ผ่านการอบชุบ 61 กก./มม^2 ส่วนความเครียดแข็งสูงถึง 180 กก./มม^2) ปัจจุบันมีวิธีการใหม่ที่นิยมใช้กันเพื่อเพิ่มความแข็งให้กับเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้ คือ การชุบแข็งด้วยการตกผลึก (Precipitation hardening) ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มใหม่ที่เรียกกันว่า เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มชุบแข็งโดยการตกผลึก (Precipitation hardening stainless steel) โดยจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 9.6 โครงสร้างพื้นออสเทนไนต์ของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก
ที่มา : Wichan Chuaiphan, Metallurgical Investication of Dissimilar Weldment between AISI 304 Stainless Steel and Some Other Steels, D.Eng.,TGGS, KMUTNB, 2011

2. เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก ประเภทโลหะผสมโครเมียม–แมงกานีส–ไนโตรเจน (Cr–Mn–N Austenitic stainless steel) เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้เกิดขึ้นหลังมีการใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทโลหะผสมโครเมียม–นิกเกิลมาเป็นเวลานาน โดยเกิดจากสภาวะที่โลหะนิกเกิลมีราคาแพงมากขึ้นส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงมาก ผลิตภัณฑ์เหล็กกล้าไร้สนิมผสมโครเมียม–นิกเกิลก็มีราคาสูงตามไปด้วย เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้พยายามคิดค้นหาโลหะผสมตัวอื่นที่สามารถทดแทนนิกเกิลได้ ซึ่งได้พบว่าโลหะแมงกานีส (Mn) มีคุณลักษณะทางโลหะวิทยาใกล้เคียงมากที่สุด ที่สามารถควบคุมให้เกิดโครงสร้างออสเทนไนต์ (FCC structure) ที่อุณหภูมิห้องได้ ซ้ำยังมีราคาถูกและเติมไนโตรเจนเข้าไปเพื่อช่วยให้เกิดเสถียรภาพออสเทนไนต์ได้มากยิ่งขึ้น เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้มีสมบัติใกล้เคียงกับเกรด AISI 304 มากที่สุด หรืออาจเรียกได้ว่าเป้าหมายหลักของการผลิตขึ้นมาก็เพื่อทดแทนเกรด AISI 304 ที่นิยมใช้งานกันแพร่หลาย ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้รู้จักกันในนามของเหล็กกล้าไร้สนิม Series 200 หรือเรียกกันว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดทางเลือก (Alternative stainless steel) ดังแสดงเกรดต่าง ๆ ของเหล็กกลุ่มนี้พร้อมแสดงปริมาณส่วนผสมทางเคมีในตารางที่ 9.6

ตารางที่ 9.4 เกรดและส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก ประเภทโลหะผสมโครเมียม–นิกเกิล (Series 300)

ที่มา : ASM International, Stainless Steels for Design Engineering (#05231G), 2008

เกรด AISI	เกรด UNS	ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)						
		Cr	Ni	C	Mn	Si	P	อื่น ๆ
301	S30100	16–18	6–8	0.15	2.0	1.0	0.045	–
302	S30200	17–19	8–10	0.15	2.0	1.0	0.45	–
302B	S30215	17–19	8–10	0.15	2.0	2–3	0.045	–
303	S30300	17–19	8–10	0.15	2.0	1.0	0.20	Mo 0.60
304	S30400	18–20	8–10	0.08	2.0	1.0	0.045	–
304N	S30451	18–20	8–10.5	0.08	2.0	1.0	0.045	N 0.1–0.16
304L	S30403	18–20	8–12	0.03	2.0	1.0	0.045	–
304LN	S30453	18–20	8–12	0.03	2.0	1.0	0.045	N 0.1–0.16
305	S30500	17–19	10.5–13	0.12	2.0	1.0	0.045	–
308	S30800	19–21	10–12	0.08	2.0	1.0	0.045	–
309	S30900	22–24	12–15	0.20	2.0	1.0	0.045	–
309S	S30908	22–24	12–15	0.08	2.0	1.0	0.045	–
310	S31000	24–26	19–22	0.25	2.0	1.5	0.045	–
310S	S31008	24–26	19–22	0.08	2.0	1.5	0.045	–
314	S31400	23–26	19–22	0.25	2.0	1.5–3.0	0.045	–
316	S31600	16–18	10–14	0.08	2.0	1.0	0.045	Mo 2–3
316F	S31620	16–18	10–14	0.08	2.0	1.0	0.20	Mo 1.75–2.5
316L	S31603	16–18	10–14	0.03	2.0	1.0	0.045	Mo 2–3
316N	S31651	16–18	10–14	0.08	2.0	1.0	0.045	Mo 2–3 N 0.1–0.14
316LN	S31653	16–18	10–14	0.03	2.0	1.0	0.045	Mo 2–3 N 0.1–0.14
317	S31700	18–20	11–15	0.08	2.0	1.0	0.045	Mo 3–4
317L	S31703	18–20	11–15	0.03	2.0	1.0	0.045	Mo 3–4
321	S32100	17–19	9–12	0.08	2.0	1.0	0.045	–
347	S34700	17–19	9–13	0.08	2.0	1.0	0.045	–
348	S34800	17–19	9–13	0.08	2.0	1.0	0.045	–
384	S38400	15–17	17–19	0.08	2.0	1.0	0.045	–

AISI = American Iron and Steel Institute

UNS = Unified Numbering System

ตารางที่ 9.5 สมบัติทางกลเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกประเภทโลหะผสมโครเมียม–นิกเกิล

ที่มา : ASM International, Stainless Steels for Design Engineering (#05231G), 2008

เกรด AISI	Tensile strength (MPa)	0.2%Offset yield strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness Rockwell–B
301	758	276	60	85
302	612	276	50	85
302B	655	276	55	85
303[a]	620	241	50	76
303Se[b]	620	241	50	76
304	579	290	55	80
304L	558	269	55	79
302Cu[c]	503	214	70	70
304N	620	331	50	85
304LN	594	300	60	85
305	586	262	50	80
308[c]	793	552	40	80
309	620	310	45	85
309S	620	310	45	85
310	655	310	45	85
301S	655	310	45	85
314	690	345	40	85
316	579	290	50	79
316F	586	262	60	85
316L	517	220	50	79
316N	620	331	48	85
316LN	573	279	52	80
317	620	276	45	85
317L	593	262	55	85
317LMN	662	373	49	88
321	620	241	45	80
330	552	262	40	80
347	655	276	45	85
348	655	276	45	85
384[c]	517	241	55	70

a = Annealed sheet and strip, b = Annealed bars, c = Wire, 1 MPa = 145.03 psi

อย่างไรก็ตามสมบัติโดยรวมก็ยังด้อยกว่าเกรด AISI 304 เช่น ต้านทานการกัดได้ต่ำกว่า ทนความร้อนได้น้อยกว่า แต่จุดเด่นของเหล็กกล้าประเภทนี้มีความสามารถในการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์สูง เหมาะสำหรับผลิตเป็นเครื่องมือเครื่องใช้ในครัวเรือน หรืองานประกอบสวยงามภายในอาคาร รวมไปถึงงานที่ไม่สัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด–ด่าง ดังแสดงลักษณะการนำไปใช้งานในรูปที่ 9.7 ส่วนความสามารถในการเพิ่มความแข็งสามารถทำได้เหมือนกันกับประเภทแรก ถ้าพิจารณาถึงความแตกต่างของลักษณะพื้นผิวพบว่าไม่มีความแตกต่างที่สามารถแยกได้ เพราะมีความเรียบ ความเงามันวาว และความสวยงามที่เหมือนกัน แต่ถ้าผ่านการใช้งานไประยะหนึ่งจะมีผิวที่แตกต่างสามารถแยกได้ เหล็กกล้าไร้สนิม Series 200 จะมีฟิล์มที่เกิดเป็นออกไซด์มากกว่าและมีความเงาน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้ต้องได้รับการขัดผิวอยู่เสมอ ๆ จึงจะมีผิวที่เงาและสวยงาม

ตารางที่ 9.6 เกรดและส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก ประเภทโลหะผสมโครเมียม–แมงกานีส–ไนโตรเจน (Series 200)

ที่มา : AK Steel Corporation, Austenitic Stainless Steel, 2014

เกรด AISI	เกรด UNS	ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)						
		Cr	Ni	Mn	N	C	S	อื่น ๆ
201	S20100	16.0–18.0	3.5–5.5	5.5–7.5	0.25max	0.15max	0.030max	
	S20103	16.0–18.0	3.5–5.5	5.5–7.5	0.25max	0.03max	0.030max	
201LN	S20153	16.0–17.5	4.0–5.0	6.4–7.5	0.10–0.25	0.03max	0.030max	Cu1.0max
	S20161	15.0–18.0	4.0–6.0	4.0–6.0	0.08–0.20	0.15max	0.040max	
202	S20200	17.0–19.0	4.0–6.0	7.5–10.0	0.25max	0.15max	0.030max	
203	S20300	16.0–18.0	4.0–6.0	5.0–6.5	–	0.08max	0.18–0.35	Cu1.75–2.25
204	S20400	15.0–17.0	1.5–3.0	7.0–9.0	0.15–0.30	0.03max	0.030max	
	S20430	15.5–17.5	1.5–3.5	6.5–9.0	0.05–0.25	0.15max	0.030max	Cu2.0–4.0
205	S20500	15.5–17.5	1.5–3.5	14.0–15.5	0.32–0.40	0.12–0.25	0.030max	
214	S21400	17.0–18.5	1.0max	14.0–16.0	0.35min	0.12max	0.030max	
216	S21600	17.5–22.0	5.0–7.0	7.5–9.0	0.25–0.50	0.08max	0.030max	Mo2.0–3.0
	S21603	17.5–22.0	5.0–7.0	7.5–9.0	0.25–0.50	0.03max	0.030max	Mo2.0–3.0
	S24000	17.0–19.0	2.25–3.75	11.5–14.5	0.20–0.40	0.08max	0.030max	

AISI = American Iron and Steel Institute

UNS = Unified Numbering System



รูปที่ 9.7 ตัวอย่างการนำไปใช้งานของ เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก ประเภทโลหะผสม โครเมียม–แมงกานีส–ไนโตรเจน

ที่มา : วิชาญ ช่วยพันธ์ เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีการเชื่อม, 2015

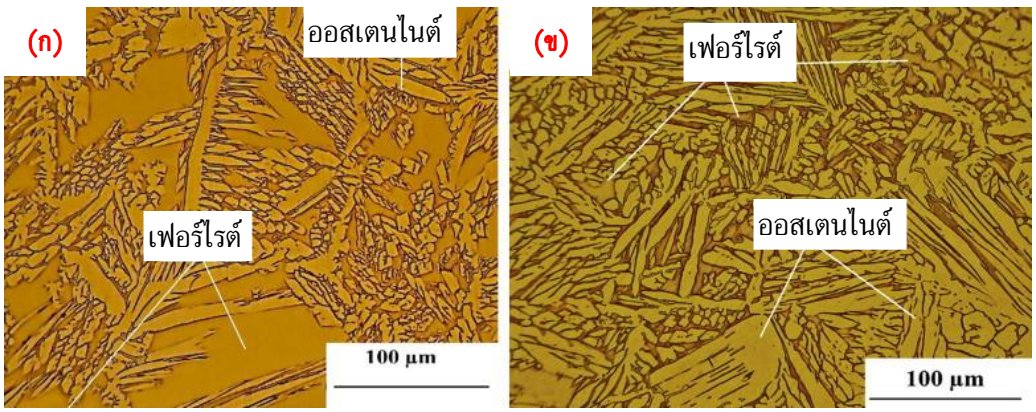
9.1.4 เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex stainless steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้พัฒนาขึ้นมาครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1927 และได้มีการผลิตออกมาใช้งานกันอย่างจริงจังเมื่อปี ค.ศ. 1930 ข้อมูลจาก Lian–Fu Li et al. (2005) โลหะประเภทนี้มีโครงสร้างพื้นที่แตกต่างจากเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มอื่น ๆ โดยประกอบขึ้นด้วยสองโครงสร้างที่ผสมเท่า ๆ กันระหว่างเฟสเฟอร์ไรต์ (Ferrite) กับเฟสออสเทนไนต์ (Austenite) ดังแสดงลักษณะของโครงสร้างในรูปที่ 9.8 ซึ่งเป็นที่มาของการตั้งชื่อ เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในตารางที่ 9.7 รุ่นแรก ๆ จะเป็นเกรด AISI 239 ใช้งานได้ดีแต่มีขีดจำกัดในการเชื่อม โดยบริเวณ HAZ มีความเหนียวต่ำ และยังทำให้เกิดเฟสเฟอร์ไรต์มากไม่ทนต่อการกัดกร่อน ซ้ำยังมีแนวโน้มเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนได้ง่ายเพราะมีคาร์บอนผสมอยู่สูง ต่อมาได้พัฒนาเป็นรุ่นที่สอง ได้แก่เกรด AISI 2304 โดยลดธาตุผสมนิกเกิลที่มีราคาแพง มาใช้ธาตุแมงกานีสแทน และทำการหลอมด้วยเตาแบบเอโอดี (Argon oxygen decaburization: AOD) ที่ควบคุมปริมาณคาร์บอนให้ต่ำ ซึ่งใช้เป็นตัวช่วยเพิ่มความเหนียวและลดการกัดกร่อนตามขอบเกรน และการเพิ่มธาตุไนโตรเจนที่ช่วยทำให้เกิดเฟสของออสเทนไนต์เสถียรมากขึ้น แต่พบว่า ถ้านำไปใช้งานที่มีความเข้มข้นของสารเคมีสูง ๆ หรือในน้ำทะเลจะมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ไม่ดี จึงได้มีการพัฒนาโดยการผสมทั้งแมงกานีส นิกเกิล และไนโตรเจน จนได้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความเหนียว ทนการกัดกร่อนตามขอบเกรนและสภาพแวดล้อมที่เข้มข้น ซึ่งใช้งานกันแพร่หลาย เรียกเกรดเหล็กนี้ว่า เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรดมาตรฐานได้แก่ เกรด AISI 2205 นอกจากที่กล่าวมาแล้ว ยังมีเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์ที่ผลิตขึ้นใช้กับงานเฉพาะประเภทอุตสาหกรรมน้ำมันและแก๊ส (Oli & Gas) ที่ต้องทนต่อการกัดกร่อนและทนต่อแรงดัน โดยเพิ่มปริมาณของธาตุผสมที่สูงขึ้น ซึ่งเรียกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมซุปเปอร์ดูเพล็กซ์ (Super duplex stainless steel) ได้แก่ AISI 2507 และเหล็กกล้าไร้สนิมไฮเปอร์ดูเพล็กซ์ (Hyper duplex

stainless steel) ได้แก่ AISI 3207 และ AISI 2707 โดยเกรดพิเศษเหล่านี้มีสมบัติโดยรวมที่ดีกว่า AISI 2205

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์เกรดมาตรฐาน AISI 2205 ที่ใช้งานกันทั่ว ๆ ไปนี้ มีส่วนผสมของธาตุหลักได้แก่ โครเมียม นิกเกิลและโมลิบดินัม (Cr–Ni–Mo) จากการศึกษาวิจัยพบว่า เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์ที่มีสมบัติที่ดีที่สุดและมีความต้านทานการกัดกร่อนสูง ต้องมีสัดส่วนโครงสร้างระหว่างเฟสเฟอร์ไรต์กับเฟสออสเทนไนต์เท่ากัน (50% ต่อ 50%) แต่ที่ใช้งานกันในปัจจุบันมีความหลากหลายสัดส่วนที่แปรผันไป เช่น เฟสเฟอร์ไรต์กับเฟสออสเทนไนต์ (30% ต่อ 70%) หรือ (40% ต่อ 60%) ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุผสมหลักข้างต้น ที่พบมากส่วนใหญ่เป็นสัดส่วน 40% ต่อ 60% ที่มีสมบัติดูดติดแม่เหล็กได้ มีความแข็งแรงสูง ทนต่อการกัดกร่อน และสึกกร่อนจากความล้า (Corrosion and erosion fatigue) มีค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion) ที่ต่ำและมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูง มีความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ทนความร้อนได้สูงมากกว่า 300 ^{o}C แต่ความแกร่งลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า –50 ^{o}C ค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากอยู่ระหว่าง 550–690 MPa โดยจะสูงขึ้นเมื่อผ่านการอบอ่อน จากที่กล่าวมาสมบัติที่ดีร่วมกันระหว่างความต้านทานการกัดกร่อนที่สูงกับการมีสมบัติทางกลที่ดีเยี่ยมนั้น เกิดจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์กับออสเทนไนต์ที่ผสมกันในสัดส่วนที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน

การมีเฟสเฟอร์ไรต์ในเนื้อโลหะทำให้มีสมบัติดูดติดแม่เหล็ก แต่มีสมบัติที่มีอัตราการขยายตัวตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ และยังมีค่าความสามารถในการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ด้วยเหตุนี้เหล็กกล้าไร้สนิมแบบสองเฟส (Dual phase) นี้จึงมีขีดความสามารถในการนำมาประกอบกันด้วยกรรมวิธีการเชื่อมได้ดีมาก และปัจจุบันเป็นที่นิยมนำมาใช้เชื่อมกันมากขึ้น โดยเฉพาะการเชื่อมแบบต่างเกรดกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดอื่น ๆ (Dissimilar weld joint)



(ก) เกรด UNS S32750 **(ข)** เกรด SDSS API X–65

รูปที่ 9.8 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex stainless steel)

ที่มา : M. Sadeghian et al.,Journal of Materias & Design, Vol. 60, pp. 678–684,2014

ตารางที่ 9.7 เกรดและส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

ที่มา : Outokumpu : Stainless steel & High performance alloy, Duplex stainless steel, 2013

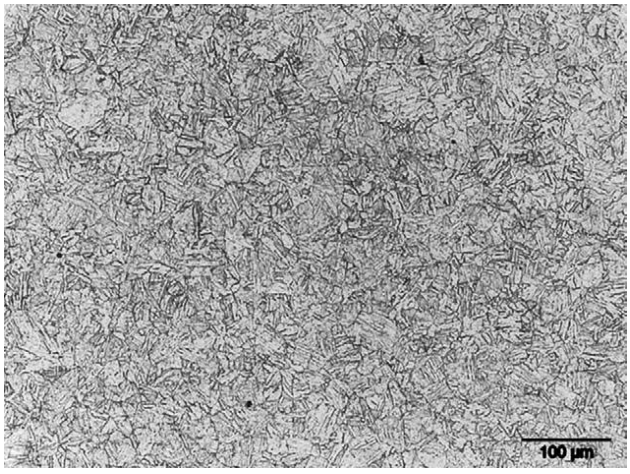
เกรด	เกรด	ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)							
UNS	EN	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu	W
Wrought duplex stainless steels									
First−generation duplex grades									
S32900	1.4460	0.08	23.0–28.0	2.5–5.0	1.0–2.0	–	1.00	–	–
S31500	1.4424	0.03	18.0–19.0	4.3–5.2	2.5–3.0	0.05–0.1		–	–
S32404		0.04	20.5–22.5	5.5–8.5	2.0–3.0	0.20	2.00	1.0–2.0	–
Second−generation duplex grades									
Lean									
S32001	1.4482	0.03	19.5–21.5	1.0–3.0	0.6	0.05–0.17	4.0–6.0	1.0	–
S32101	1.4162	0.04	21.0–22.0	1.35–1.7	0.1–0.8	0.20–0.25	4.0–6.0	0.1–0.8	–
S32202	1.4062	0.03	21.5–24.0	1.0–2.8	0.45	0.18–0.26	2.00	–	–
S82011		0.03	20.5–23.5	1.0–2.0	0.1–1.0	0.15–0.27	2.0–3.0	0.5	–
S32304	1.4362	0.03	21.5–24.5	3.0–5.5	0.05–0.6	0.05–0.20	2.50	0.05–0.60	–
	1.4655	0.03	22.0–24.0	3.5–5.5	0.1–0.6	0.05–0.20	2.00	1.0–3.0	–
Standard									
S32003		0.03	19.5–22.5	3.0–4.0	1.5–2.0	0.14–0.20	2.00	–	–
S31803	1.4462	0.03	21.0–23.0	4.5–6.5	2.5–3.5	0.08–0.20	2.00	–	–
S32205	1.4462	0.03	22.0–23.0	4.5–6.5	3.0–3.5	0.14–0.20	2.00	–	–
25 Cr									
S31200		0.03	24.0–26.0	5.5–6.5	1.2–2.0	0.14–0.20	2.00	–	–
S31260		0.03	24.0–26.0	5.5–7.5	2.5–3.5	0.10–0.30	1.00	0.2–0.8	0.1–0.5
S32506		0.03	24.0–26.0	5.5–7.2	3.0–3.5	0.06–0.20	1.00	–	0.05–0.30
S32520	1.4507	0.03	24.0–26.0	5.5–8.0	3.0–4.0	0.20–0.35	1.50	0.5–2.0	–
S32550	1.4507	0.04	24.0–27.0	4.5–6.5	2.9–3.9	0.10–0.25	1.50	1.5–2.5	–
Super duplex									
S32750	1.4410	0.03	24.0–26.0	6.0–8.0	3.0–5.0	0.24–0.32	1.20	0.5	–
S32760	1.4501	0.03	24.0–26.0	6.0–8.0	3.0–4.0	0.20–0.30	1.00	0.5–1.0	0.5–1.0
S32808		0.03	27.0–27.9	7.0–8.2	0.8–1.2	0.30–0.40	1.10	–	2.1–2.5
S32906		0.03	28.0–30.0	5.8–7.5	1.5–2.6	0.30–0.40	0.80–1.5	0.8	–
S32950		0.03	26.0–29.0	3.5–5.2	1.0–2.5	0.15–0.35	2.00	–	–
S39274		0.03	24.0–26.0	6.8–8.0	2.5–3.5	0.24–0.32	1.0	0.2–0.8	1.5–2.5
S39277		0.025	24.0–26.0	6.5–8.0	3.0–4.0	0.23–0.33	0.80	1.2–2.0	0.8–1.2
	1.4477	0.03	28.0–30.0	5.8–7.5	1.5–2.6	0.30–0.40	0.80–1.50	0.8	–
Hyper duplex									
S32707		0.03	26.0–29.0	5.5–9.5	4.0–5.0	0.30–0.50	1.50	1.0	–
S33207		0.03	29.0–33.0	6.0–9.0	3.0–5.0	0.40–0.60	1.50	1.0	–

UNS = Unified Numbering System

EN = European Norms

9.1.5 เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มชุบแข็งโดยการตกผลึก (Precipitation hardening stainless steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้เกิดขึ้นครั้งแรกในราวปี ค.ศ. 1940 เป็นโลหะที่มีโครเมียมและนิกเกิลเป็นธาตุผสมหลักพร้อมกับมีธาตุผสมอื่น ๆ อีกหลายธาตุ ความแตกต่างของธาตุผสมอื่น ๆ เมื่อนำไปเพิ่มความแข็งโดยการผ่านขบวนการทางความร้อน ด้วยวิธีอบให้เกิดการตกลึกของธาตุที่ผสม (Precipitation hardening) โครงสร้างสุดท้ายที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากออสเทนไนต์ (Austenite)ไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) ตามอัตราความเร็วของการเย็นตัวของการชุบแข็ง (M_{Start} และ M_{finish}) จะนำมาเรียกเชื่อมเกรดนั้น ๆ เช่น เกรด 17–4PH (AISI 630) ทำให้เกิดเป็นเกรดหรือชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ ดังแสดงในตารางที่ 9.8 โดยมีลักษณะของโครงสร้างจุลภาคพื้นฐานดังตัวอย่างเกรด 17–4PH แสดงในรูปที่ 9.9 ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้สามารถเพิ่มความแข็งด้วยวิธีการตกตะกอน โดยเป็นการตกตะตอนของสารประกอบในโครงสร้างพื้น เกิดขึ้นในระหว่างการบ่มด้วยความร้อน (Aging treatment) ซึ่งสารประกอบจะเกิดจากธาตุผสม ซึ่งได้แก่ โลหะอลูมิเนียม ทองแดง โมลิบดินัม และนิโอเบียม ตัวอย่างเช่น เกรด 17–4PH ที่เพิ่มธาตุผสมทองแดง หรือเกรด PH15–7Mo ที่เพิ่มธาตุผสมอลูมิเนียมก็เพื่อทำหน้าที่ตกตะกอนเพิ่มความแข็ง เหล็กกล้ากลุ่มนี้มีสมบัติที่พิเศษหลายด้านได้แก่ มีความสามารถแปรรูปได้ง่าย มีความแข็งแรงสูง มีความเหนียวค่อนข้างสูง มีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี มีอัตราการบิดเบี้ยวน้อย และมีความสามารถในการเชื่อมสูง ซึ่งสมบัติที่กล่าวมาเป็นสมบัติด้านดีรวมกันของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกกับออสเทนนิติก กล่าวคือ สามารถทำให้แข็งขึ้นได้ด้วยขบวนการทางความร้อนเหมือนกับเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก และในขณะเดียวกันก็มีสมบัติที่ต้านทานการกัดกร่อนได้ดีคล้ายกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก แต่อย่างไรก็ตามสมบัติที่โดดเด่นที่สุดของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้เน้นที่มีความสามารถแปรรูปได้ง่าย จึงเห็นได้ว่าการนำไปใช้งานส่วนใหญ่เป็นลักษณะที่แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ลักษณะเป็นแท่ง เป็นเส้นลวด เป็นแผ่น และก็เป็นผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ เป็นต้น



รูปที่ 9.9 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมชุบแข็งโดยการตกผลึก (เกรด 17–4PH)

ที่มา : J.D. Bressan et al., Journal of Materials Processing Technology 205, 2008

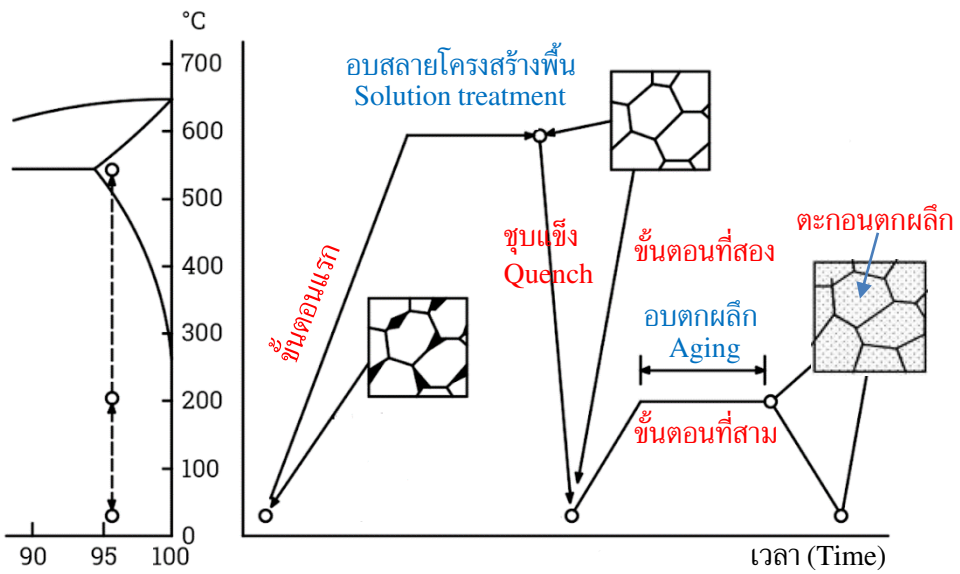
ตารางที่ 9.8 เกรดและส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมชุบแข็งโดยการตกตะกอน

ที่มา : AK Stainless Steels : Precipitation hardening stainless steel, 2016

เกรด (Common name)	ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)									
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb
15–5PH	0.07 max	1.00 max	0.04 max	0.03 max	1.00 max	14.00–15.50	3.50–5.50	–	2.50–4.50	0.15–0.45
PH15–7Mo	0.09 max	1.00 max	0.04 max	0.04 max	1.00 max	14.00–16.00	6.50–7.75	2.00–3.00	2.00–3.00	0.75–1.50
PH14–8Mo	0.05 max	1.00 max	0.04 max	0.04 max	1.00 max	13.75–15.00	7.75–8.75	2.00–3.00	2.00–3.00	0.75–1.50
17–4PH	0.07 max	1.00 max	0.04 max	0.03 max	1.00 max	15.00–17.50	3.00–5.00	–	3.00–5.00	0.15–.045
17–7HP	0.09 max	1.00 max	0.04 max	0.03 max	1.00 max	16.00–18.00	6.50–7.75	–	0.75–1.50	–
AM–350	0.11 max	0.50–1.25	0.04 max	0.03 max	0.05 max	16.00–17.00	4.00–5.00	2.50–3.25	0.75–1.50	0.15–.045
AM–355	0.15 max	0.50–1.25	0.04 max	0.03 max	0.05 max	15.00–16.00	4.00–5.00	2.50–3.25	0.75–1.50	0.15–.045

Common name = ชื่อที่ใช้เรียกตามเกรดตามโครงสร้างที่ได้หลังจากผ่านขบวนการอบตกผลึก

ขบวนการทางความร้อนในการเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มี 3 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 9.10



รูปที่ 9.10 กรรมวิธีการเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนของเหล็กกล้าไร้สนิม

ที่มา : F.E Mariani, et al., ASTM, Materials Performance and Charaterization, Vol.5, (1), 2016

ขั้นตอนที่แรก เป็นขั้นตอนการให้ความร้อนเพื่อทำให้เป็นสารละลายเนื้อเดียว (Solution heat treatment : SHT) ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมจะใช้อุณหภูมิช่วงประมาณ 980–1,120 ^{o}C เพื่อให้สารประกอบที่จะตกตะกอนและธาตุผสมเกิดการละลายเป็นเนื้อเดียวกันในลักษณะของสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated solution) ในทางปฏิบัติขั้นตอนนี้สามารถทำได้ในระหว่างการขึ้นรูป เช่น ในระหว่างการรีดขึ้นรูปร้อน ซึ่งเรียกขั้นตอนนี้ว่า “Mill annealing”

ขั้นตอนที่สอง เป็นขั้นตอนการชุบแข็งหรือการเย็นตัว (Quenching or cooling) ในขั้นตอนนี้จะนำโลหะผสมที่อยู่ในสภาพเป็นสารละลายเนื้อเดียวอิ่มตัวยิ่งยวด จุ่มลงในสารชุบที่อาจเป็นได้ทั้ง อากาศ น้ำ หรือน้ำมัน ที่มีอัตราการเย็นตัวสูงมากพอที่จะทำให้เนื้อโลหะยังคงอยู่ในสภาพของสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด อัตราการเย็นตัวมีผลต่อขนาดของเกรน โดยอัตราการเย็นตัวต่ำเกรนจะหยาบ (Coarse grain) อัตราการเย็นตัวสูงเกรนจะละเอียด (Fine grain) ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของโลหะโดยตรง

ขั้นตอนที่สาม เป็นขั้นตอนการตกตะกอนหรือการบ่มแข็ง (Precipitation or age hardening) ขั้นตอนนี้ จะให้ความร้อนเพื่อให้สารละลายของแข็งที่อิ่มตัวยิ่งยวดเกิดการแยกตัวของเฟสที่สอง (Secondary phase) ที่มีลักษณะเป็นกลุ่มของอนุภาคที่ตกตะกอนเล็ก ๆ กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพื้นหลัก โดยขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิ ซึ่งตะกอนเล็ก ๆ เหล่านี้มีบทบาทหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะไม่ให้เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายขณะถูกแรงกระทำจากภายนอก หรือเรียกว่าแรงต้านภายในก็ได้ (Internal force) ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเป็นการเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงให้กับโลหะ สำหรับโลหะผสมบางชนิดอาจเกิดการตกตะกอนที่อุณหภูมิห้องหลังจากเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้องไปแล้วระยะหนึ่ง ซึ่งเรียกการตกตะกอนแบบนี้ว่า “Natural aging” แต่ถ้ามีการให้ความร้อนเพื่อเร่งหรือส่งเสริมให้เกิดการตกตะกอนขึ้นเรียกการตกตะกอนนี้ว่า “Artificial aging” โครงสร้างที่ได้จะมีผลึกจากธาตุโลหะที่ผสมอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิม เช่น Ni_3Al หรือ Ni_3Ti หรือ Ni_3Cu ถ้าเกิดอยู่ในโครงสร้างเฟสมาร์เทนไซต์จะเป็นเกรด AISI 17–4PH ถ้าเกิดอยู่ในโครงสร้างเฟสกึ่งออสเทนไนต์ เป็นเกรด AISI 17–7PH และ AISI 600 เป็นต้น เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีความแข็งสูงมาก และไม่เกิดการบิดเบี้ยวหลังจากการอบชุบ

ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการแยกประเภทและอธิบายถึงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดต่าง ๆ ถึงความเหมือนกันในบางประการและแตกต่างกันในบางประการ เพื่อเป็นพื้นฐานในการสร้างความรู้และความเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงของเหล็กกล้าไร้สนิมเมื่อต้องนำไปทำการประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ โดยเฉพาะการที่จะต้องนำความรู้ไปใช้ในการพิจารณาเลือกใช้ขบวนการเชื่อมที่เหมาะสม และการกำหนดปัจจัยการเชื่อมที่ถูกต้อง ที่จะไม่เกิดข้อบกพร่องของแนวเชื่อม รวมไปถึงกรณีที่เกิดพบเจอข้อบกพร่องจากการเชื่อมหรือเกิดปัญหาใด ๆ ที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนหรือวิธีการเชื่อม ก็สามารถที่จะนำความรู้พื้นฐานของเหล็กกล้าไร้สนิมที่กล่าวมาข้างต้นไปใช้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งในหัวข้อถัดไปนี้เป็นการกล่าวถึงการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมที่เป็นองค์ความรู้ใหม่ เทคนิคใหม่จากผลการวิจัยของผู้เขียนเองและนักวิจัยท่านอื่น ๆ ที่ได้เผยแพร่งานวิจัยไว้ในวารสารงานวิจัยต่าง ๆ

บทนำการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Welding of austenitic stainless steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกพบว่าเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีปริมาณการใช้งานมากที่สุดเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มอื่น ๆ โดยมีการนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นโครงสร้างอาคารและประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย และมีจำนวนมากเช่นกันที่ต้องประกอบให้เป็นชิ้นเดียวกันด้วยกรรมวิธีการเชื่อม (Welding joints) ความหลากหลายของงานที่ต้องเชื่อมก็ส่งผลให้เกิดปัญหาที่หลากหลายของขบวนการเชื่อมเช่นกัน จึงได้เกิดงานวิจัยมากมายที่เกี่ยวกับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มไม่ดูดติดแม่เหล็กชนิดนี้ โดยมีทั้งวิจัยเพื่อแก้ปัญหาของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติกที่เกิดขึ้นแล้วในอดีตจนถึงปัจจุบัน และทำการวิจัยเพื่อพัฒนาขีดความสามารถในการเชื่อมโลหะชนิดนี้ให้มีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น โดยเฉพาะความสนใจและความเชี่ยวชาญของผู้เขียนที่ได้ศึกษาและทำงานวิจัยในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกตลอดมา โดยได้ทำการรวบรวมและสรุปข้อมูลผลการวิจัยทั้งหมดมาเผยแพร่ในบทเรียนนี้ ซึ่งจะจัดหมวดหมู่ขององค์ความรู้ในแง่มุมต่าง ๆ จากผลการวิจัยที่ผ่านมาสรุปและเรียบเรียงให้ง่ายต่อการศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้งานของผู้ที่สนใจ โดยผลการวิจัยของผู้เขียนที่รวบรวมนำมาเขียนมีวัตถุประสงค์การวิจัยหรือเป้าหมายที่ต้องการแก้ปัญหาที่แตกต่างกัน เช่น ในบางเรื่องวิจัยมุ่งเน้นถึงสิ่งที่ต้องระมัดระวังป้องกันไม่ให้เกิดขึ้นในขบวการเชื่อม (Prevention)เหล้กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก หรือบางเรื่องก็จะใช้ผลการวิจัยเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้งานที่เหมาะสม (Optimization) และบางเรื่องก็เป็นศึกษาพัฒนาเพื่อการนำมาประยุกต์ใช้งานในอนาคต ดังที่จะได้อธิบายในหัวข้อประเด็นต่าง ๆ ที่สำคัญ ดังนี้

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกทุกเกรดที่กล่าวมาตอนต้นล้วนเป็นโลหะกลุ่มเหล็กกล้า (Steels) ดังนั้น ความสามารถพื้นฐานทางการเชื่อมจึงไม่แตกต่างกันมาก ความหมายคือ สามารถทำการเชื่อมได้ทุกขบวนการเชื่อมไม่ว่าเป็นการเชื่อมแบบหลอมละลายเติมลวดและไม่เติมลวด (Fusion welding) หรือการเชื่อมแบบไม่หลอมละลาย (Non-fusion welding) โดยการเชื่อมที่ต่างขบวนการ ต่างปัจจัยการเชื่อม และต่างกันในองค์ประกอบอื่น ๆ ย่อมส่งผลต่อประสิทธิภาพของแนวเชื่อม ต่อคุณภาพของรอยต่อ และข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้น ดังที่จะได้กล่าวถึงสาระสำคัญและผลงานการวิจัยที่สำคัญต่อการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกดังต่อไปนี้

9.2 โลหะวิทยางานเชื่อม (Welding metallurgy)

การเชื่อมวัสดุที่เป็นประเภทโลหะ (Welding metals) ความรู้ความเข้าใจในพื้นฐานทางโลหะวิทยาของโลหะที่นำมาเชื่อมที่เราเรียกว่าโลหะหลัก (Base metal) มีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง เพราะโดยหลักพื้นฐานของการเชื่อมเป็นการนำโลหะมาต่อเข้าด้วยกัน ถ้าวัสดุโลหะนั้นมีองค์ประกอบทางโลหะวิทยาที่เหมือนกันทุกประการ (Similar metal) โอกาสที่จะได้รอยเชื่อมต่อที่มีประสิทธิภาพสูงและเกิดข้อบกพร่องน้อยก็มีโอกาสเป็นได้มาก แต่ก็เป็นที่ทราบกันดีว่าเนื้อเชื่อมที่ได้จากขบวนการเชื่อมจะแตกต่างจากโลหะหลักก่อนเชื่อม โดยเฉพาะการเชื่อมแบบหลอมละลายที่ใช้ความร้อนหลอมละลาย

โลหะและให้เย็นตัวติดกันเป็นแนวเชื่อม กลไกในลักษณะนี้จะมีผลกระทบในทางโลหะวิทยาของเหล็กที่นำมาเชื่อมทั้งกายภาพภายนอกของรูปร่างแนวเชื่อ (Weld bead shape) และโครงสร้างจุลภาคภายในของเนื้อเชื่อม (Microstructure) โดยจะรวบรวมเอาผลงานวิจัยของผู้เขียนเองและผลงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องมานำเสนอเพื่อเป็นแนวทางและข้อปฏิบัติที่ถูกต้อง รวมถึงองค์ความรู้ใหม่ ๆ เทคนิคใหม่ ๆ และเทคโนโลยีสมัยใหม่ของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติกในแต่ละด้านแต่ละแง่มุม ดังต่อไปนี้

1. บ่อหลอมละลายและโครงสร้างภายใน (Weld pool and microstructure)

การเชื่อมแบบหลอมละลายที่อาศัยการอาร์กเพื่อการหลอมละลายจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องสร้างและควบคุมบ่อหลอมละลายขณะทำการเชื่อม เพราะขนาดและรูปแบบของส่วนที่เกิดจากการหลอมละลายจะเป็นที่มาของขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อม ส่วนโครงสร้างจุลภาคภายในเนื้อเชื่อมจะเกี่ยวข้องกับส่วนผสมทางเคมีของโลหะที่เชื่อมกับกลไกการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายจนกลายเป็นของแข็ง (Solidification) ที่เรียกว่า “แนวเชื่อม (Weldment)”

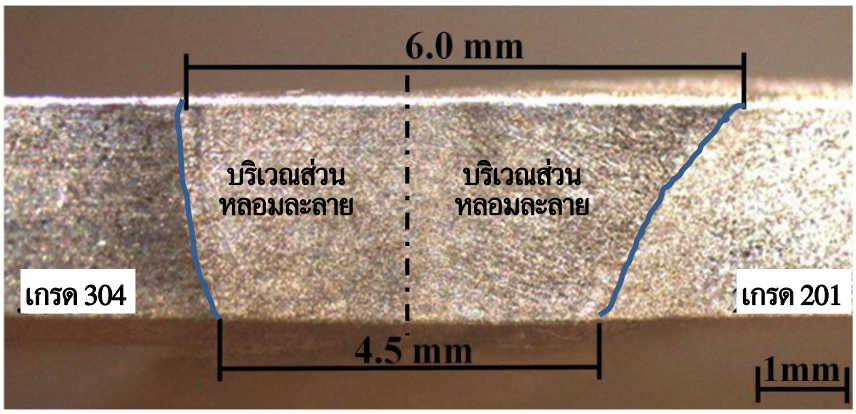
บ่อหลอมละลายของการเชื่อมจะถูกควบคุมด้วยปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่การเชื่อม ที่เรียกกันว่า “Heat input” ที่มีความสัมพันธ์กันของ กระแสไฟเชื่อม (Welding current) แรงดันเชื่อม (Arc volt) และความเร็วในการเชื่อม (Welding speed) ซึ่งมีอิทธิพลต่อขนาดของแนวเชื่อมทั้งในด้านความกว้าง (Fusion zone width : W) และในด้านความลึก (Penetration depth : D) หรือที่รู้จักและเรียกกันว่า D/W ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าเพื่อการอาร์กที่สูงก็จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อการทำให้แนวเชื่อมมีขนาดที่กว้างขึ้น และมีการซึมลึกที่มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยเชิงทดลองของ Wichan Chuaiphan และ Loeshpahn Srijaroenpramong (2014) ที่ทำการวิจัยทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนติก เกรด AISI 201 โดยขบวนการเชื่อม GTAW ด้วยปัจจัยความเร็วเชื่อมที่ต่างกันที่ต้องการทำให้ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าไม่เท่ากัน โดยพบว่าที่ความเร็วเชื่อมที่สูงขึ้นปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าจะลดลง และส่งผลทำให้ขนาดความกว้างและความลึกของแนวเชื่อมลดลง ดังแสดงผลการทดลองในตารางที่ 9.9 ข้อมูลนี้เป็นผลของการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกประเภทแผ่นบาง (3 มม.) ด้วยวิธีการเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม (Autogenously welding) ซึ่งสามารถนำไปใช้อ้างอิงเพื่อเป็นแนวโน้มในการพยากรณ์ขนาดของแนวเชื่อมได้กับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกเกรดอื่น ๆ ทั้งซีรีย์ 200 และซีรีย์ 300

ตารางที่ 9.9 อิทธิพลของความร้อนจากการอาร์กที่มีต่อขนาดของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 214, 2014

ชิ้นงานทดสอบ (ความเร็วในการเชื่อม)	ความร้อนที่ป้อนเข้า (Heat input)	ขนาดของแนวเชื่อม (Weld bead size)	
		แนวบน (Width face weld)	แนวล่าง (Width root weld)
A (1.5 mm/s)	0.850 kJ/mm	6.4 mm	5.1 mm
A (1.5 mm/s)	0.850 kJ/mm	5.5 mm	4.5 mm
A (1.5 mm/s)	0.850 kJ/mm	4.2 mm	3.6 mm

นอกจากนี้ Wichan Chuaiphan และ Loeshpahn Srijaroenpramong (2019) ยังได้ทำการวิจัยทดลองถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแนวเชื่อมที่สัมพันธ์กันของสัดส่วน D/W ในกรณีการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกแบบต่างเกรดด้วยวิธีการไม่เติมลวด (Autogenously dissimilar welding) โดยการทดลองเชื่อมระหว่างตระกูลซีรีย์ 200 เกรด 201 กับตระกูลซีรีย์ 300 เกรด 304 ซึ่งทั้งสองเกรดเป็นที่นิยมนำมาใช้งานกันในปริมาณที่สูงมาก เป้าหมายเพื่อต้องพิสูจน์ทราบว่าการเชื่อมแบบโลหะต่างชนิดกันพฤติกรรมการเกิดของบ่อหลอมละลายจะเป็นอย่างไร โดยพบว่า บ่อหลอมละลายมีรูปทรงที่ไม่สมมาตร บ่อหลอมละลายด้านโลหะเกรด 201 จะกว้างกว่าด้าน 304 เหตุผลเพราะโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 201 ที่มีธาตุแมงกานีสผสมสูง ซึ่งมีสมบัติด้านค่าความจุความร้อน (Volumetric heat capacities) ที่ต่ำกว่าโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ที่มีธาตุนิกเกิลผสมสูง คือ ที่ความจุความร้อน 3905 และ4015 $kJ.cm^{-3}.K^{-1}$ ตามลำดับ จากเหตุผลดังกล่าวมีอิทธิพลทำให้รูปร่างของแนวเชื่อมไม่สมมาตรเกิดขึ้น (Asymmetric) โดยเกิดเป็นลักษณะพื้นที่บริเวณส่วนหลอมละลาย (Fusion zone) ทางด้านโลหะ 201 จะมีมากว่าทางด้านโลหะ 304 ดังแสดงในรูปที่ 9.11 จากผลการวิจัยดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าค่าความจุความร้อนที่เป็นค่าสมบัติเฉพาะตัวของโลหะแต่ละชนิดจะมีผลกระทบต่อความสามารถในการหลอมละลายจากการอาร์กเชื่อม โดยเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญต่อการพิจารณาในการออกแบบการเชื่อมโลหะในกรณีที่ต้องการเชื่อมต่อโลหะที่ต่างชนิดกัน



รูปที่ 9.11 แนวเชื่อมที่เกิดจากการหลอมของเหล็กกล้าไร้สนิม

ที่มา : F.E Mariani, et al., ASTM, Materials Performance and Charaterization, Vol.5, (1), 2016

ปัจจัยในการสร้างบ่อหลอมละลายด้วยการอาร์ก (Factor of arc fusion)

มีหลายปัจจัยพอจะสรุปจากผลการวิจัยที่หลากหลายดังนี้

- ปัจจัยจากขบวนการเชื่อม (Factor of welding processes) ปัจจัยข้อนี้เป็นที่ทราบกันดีว่าการเชื่อมด้วยกรรมวิธีที่ต่างกันจะมีกลไกในการอาร์กเพื่อสร้างบ่อหลอมละลายที่ต่างกัน เช่น การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) จะสร้างบ่อหลอมละลายด้วยการอาร์กระหว่างลวดเติมกับ

ชิ้นงาน บ่อหลอมละลายมีขนาดที่ใหญ่และกว้างไปตามขนาดของลวดเชื่อมที่ใช้ แต่สำหรับการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมทิก (GTAW) สร้างบ่อหลอมละลายด้วยการอาร์กจากลวดทังสเตนซึ่งไม่ใช่ลวดเติม ดังนั้น บ่อหลอมละลายจึงแคบ ส่วนการเชื่อมแบบหลอมละลายด้วยลำแสงต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นลำแสงของเลเซอร์ หรือลำแสงของอิเลคตรอน กรรมวิธีการเชื่อมประเภทนี้จะเกิดบ่อหลอมละลายที่มีขนาดเล็กมาก เหตุเพราะปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานสูงมาก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าขนาดของบ่อหลอมละลายจะมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันและส่งผลทำให้ได้ขนาดของแนวเชื่อมที่แตกต่างกันออกไป ดังงานวิจัยเชิงทดลองเปรียบเทียบของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 ด้วย 3 ขบวนการเชื่อม คือ ขบวนการเชื่อม SMAW ขบวนการเชื่อม EBW และ ขบวนการเชื่อม LBW ดังแสดงในรูปที่ 9.12 เห็นได้ชัดเจนมากว่าขนาดของพื้นที่ส่วนที่หลอมละลาย (Fusion area) ของแต่กรรมวิธีการเชื่อมแตกต่างมาก ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าขนาดหรือพื้นที่ของบ่อหลอมละลายสามารถควบคุมได้จากการเลือกชนิดของขบวนการเชื่อม



แนวเชื่อมของ SMAW *ที่มา : Wichan .C, 2011*

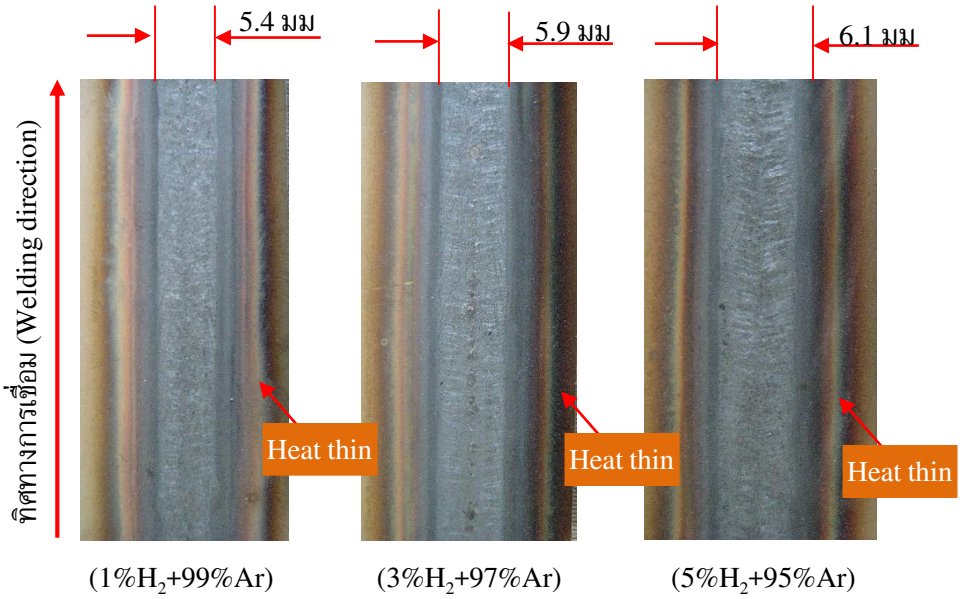
แนวเชื่อมของ EBW *ที่มา : Anastasia. N, 2017*

แนวเชื่อมของ LBW *ที่มา : Ferro Um., 2015*

รูปที่ 9.12 แนวเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมที่สร้างบ่อหลอมละลายได้แตกต่างกัน

● ปัจจัยจากแก๊สปกคลุม (Factor of shielding gases) แก๊สปกคลุมแนวเชื่อมจะใช้แก๊สเฉื่อย (Inert gas) แก๊สประเภทนี้ไม่มีอิทธิพลต่อการสร้างขนาดบ่อหลอมละลาย แต่มีแก๊สประเภทที่เป็นแอคทีฟ (Active gas) ที่มีสมบัติในการเพิ่มความร้อนในขณะอาร์กที่นิยมนำมาผสมกับแก๊สเฉื่อย ซึ่งจะเป็นตัวการทำให้การอาร์กง่ายขึ้น และส่งผลต่อการบ่อหลอมละลายได้รวดเร็วทำให้สามารถเพิ่มความเร็วในการเชื่อมได้ดี แต่ขณะเดียวกันก็จะส่งผลให้ขนาดของบ่อหลอมกว้างและลึกมากขึ้น จึงต้องควบคุมปัจจัยการเชื่อมอื่น ๆ ควบคู่ไปด้วย ได้แก่ กระแสไฟเชื่อม (Welding current) ความเร็วในการเชื่อม (Welding speed) และระยะอาร์กเชื่อม (Arc welding) เป็นต้น ดังรายงานสรุปผลการวิจัยของ Wichan Chuaiphan et al. (2020) ที่ทำการทดลองใช้แก๊สแอคทีฟไฮโดรเจนผสมกับแก๊สอาร์กอน ที่ (1%H_2+99%Ar) ที่ (3%H_2+97%Ar) (5%H_2+95%Ar) เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกนิกเกิลต่ำเกรด AISI 201 ด้วยขบวนการเชื่อมทิก (TIG) และปัจจัยการเชื่อมเดียวกันพบว่าเมื่อปริมาณ

แก๊สแอคทีฟไฮโดรเจนที่ผสมมากขึ้นจะทำให้ขนาดของแนวเชื่อมกว้างและลึกมากขึ้น และยังได้พบว่าขบวนการเชื่อมอาร์กได้ง่ายขึ้น เกิดบ่อหลอมละลายได้รวดแร็วสามารถทำการเชื่อมได้ความเร็วที่สูงมากขึ้น ดังแสดงลักษณะและขนาดของแนวเชื่อมในรูปที่ 9.13 และยังพบว่าบริเวณรอบแนวเชื่อมเกิดการเผาไหม้ของโครเมียมออกไซด์ (Heat tint) เป็นแนวที่กว้างขึ้นเมื่อใช้ปริมาณแก๊สแอคทีฟที่ผสมมากขึ้น



รูปที่ 9.13 ขนาดแนวเชื่อมที่เกิดจากผลของแก๊สแอคทีฟของเหล็กกล้าไร้สนิมอสสเตนนิติก

ที่มา : Wichan Chuaiphan, et al., Journal of Advance Joining Processes, Vol.1, 2020

โครงสร้างของแนวเชื่อม (Microstructure of fusion weld)

โครงสร้างจุลภาคที่ได้หลังจากการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายจะถูกควบคุมโดยกลไกการแข็งตัวของน้ำโลหะ (Solidification of metal) สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กล้าไร้สนิมออสเทนนิติกจะมีความแตกต่างจากการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทอื่น ๆ ที่กลไกการแข็งตัวต้องควบคุมจำนวนปริมาณของโครงสร้างเฟสเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ที่จะเกิดขึ้นท่ามกลางโครงสร้างพื้นของเฟสออสเทนไนต์ (Austenite) ให้อยู่ในเกณฑ์ปริมาณมาตรฐานที่ยอมรับได้ คือ 3–8 % เพื่อรักษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) หรือป้องกันไม่ให้เกิดการกัดกร่อนที่บริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เฟสโครงสร้างเฟอร์ไรต์ดังกล่าวจะเรียกกันว่า “เดลตาเฟอร์ไรต์ (Delta–ferrite)”

การเกิดเฟสโครงสร้างเดลตาเฟอร์ไรต์ร่วมอยู่กับเฟสโครงสร้างออสเทนไนต์ในเนื้อโลหะเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ถูกกำหนดโดยสัดส่วนของธาตุโครเมียม (Cr) กับธาตุนิกเกิล (Ni) ที่ผสมอยู่ในส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อม ซึ่งอยู่ในรูปของ Chromium equivalent (Cr_{eq}) กับ Nickel equivalent (Ni_{eq}) ซึ่งคำนวณได้จากสมการซึ่งอ้างอิงจาก Schaeffler ดังนี้

$$\text{Chromium equivalent } (Cr_{eq}) = \%Cr + \%Mo + 1.5\%Si + 0.5\%Nb + 2\%Ti$$

$$\text{Nickel equivalent } (Ni_{eq}) = \%Ni + 30\%C + 0.5\%Mn$$

โดยค่าสัดส่วน Cr_{eq}/Ni_{eq} ที่ได้สามารถทำนายถึงรูปแบบการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายได้ ซึ่งรูปแบบการเย็นตัวนี้เรียกว่า โหมดการแข็งตัว (Solidification Mode) ซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดขึ้นได้ 4 โหมด ดังนี้

- ออสเทนไนต์โหมด Austenite mode (A) :

  $L \longrightarrow (L + \gamma) \longrightarrow \gamma$

  การแข็งตัวรูปแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อ $(Cr_{eq}/Ni_{eq}) < 1.25$

- ออสเทนไนต์–เฟอร์ไรต์โหมด Austenite – Ferrite mode (AF) :

  $L \longrightarrow (L + \gamma) \longrightarrow (L + \gamma + \delta)(\gamma + \delta)$

  การแข็งตัวรูปแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อ $1.25 < (Cr_{eq}/Ni_{eq}) < 1.48$

- เฟอร์ไรต์–ออสเทนไนต์โหมด Ferrite – Austenite mode (FA) :

  $L \longrightarrow (L + \delta) \longrightarrow (L + \delta + \gamma) \longrightarrow (\gamma + \delta),$

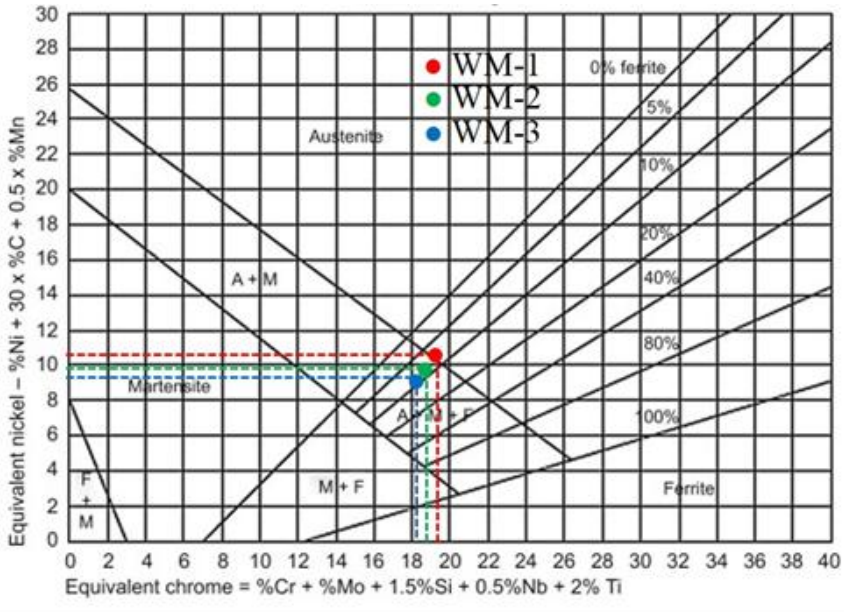
  การแข็งตัวรูปแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อ $1.48 < (Cr_{eq}/Ni_{eq}) < 1.95$

- เฟอร์ไรต์โหมด Ferrite mode (F) :

  $L \longrightarrow (L + \delta) \longrightarrow \delta \longrightarrow (\gamma + \delta)$

  การแข็งตัวรูปแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อ $(Cr_{eq}/Ni_{eq}) > 1.95$

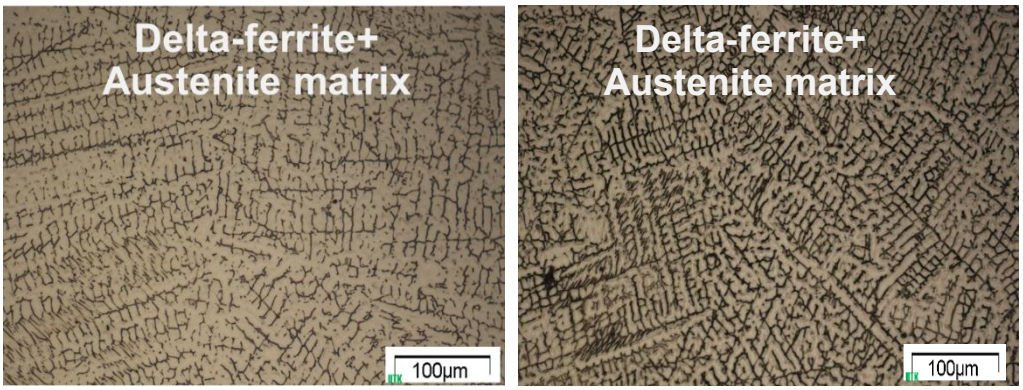
จากโหมดการเปลี่ยนเฟสเมื่อเกิดการเย็นตัวที่กล่าวมา ทำให้สามารถทราบถึงลำดับกลไกของการเปลี่ยนแปลงเฟสของบ่อหลอมละลาย และสามารถทำนายโครงสร้างสุดท้ายที่จะได้หลังสิ้นสุดการเย็นตัว อย่างไรก็ตาม โหมดการเย็นตัวสามารถบอกชนิดโครงสร้างที่ได้ แต่ไม่สามารถบอกถึงปริมาณหรือสัดส่วนที่แน่นอนได้ โดยเฉพาะในโหมดของ AF กับ FA ที่เกิดขึ้นสองเฟสโครงสร้างร่วมกัน ซึ่งมี Schaeffer A.L. (1949) ได้คิดค้นสร้างแผนภาพขึ้นมาเพื่อใช้ในการทำนายถึงปริมาณสัดส่วนของเฟสโครงสร้างที่จะเกิดขึ้นที่ได้รับอิทธิพลจากสัดส่วนผสมทางเคมี (Cr_{eq}/Ni_{eq}) ที่เรียกกันว่า Schaeffler diagram ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 9.14 เป็นผลทดลองการวิจัยของ Wichan Chuaiphan et al. (2020) ที่ทำนายถึงปริมาณของเฟสเฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างพื้นออสเทนไนต์ภายในเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 216 ที่มีสัดส่วน (Cr_{eq}/Ni_{eq}) ที่ต่างกัน คือ ชิ้นงานWM–1=1.82 ชิ้นงาน WM–2 =2.01 และชิ้นงาน WM–3=2.04 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัดส่วนของ (Cr_{eq}/Ni_{eq}) ที่สูงขึ้นทำนายได้ว่าโอกาสที่เกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ก็จะมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามหลักทฤษฎีของโหมดการแข็งตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติก



รูปที่ 9.14 Schaeffler diagram ทำนายเฟอร์ไรต์เหล็กกล้าไร้สนิมออสสเตนนิติก AISI 216

ที่มา : Wichan Chuaiphan, et al., Journal of Advance Joining Processes, Vol.2, 2020

จากตัวอย่างผลการวิจัยทดลองและจากคำอธิบายข้างต้นพิสูจน์ให้เห็นได้ว่าการควบคุมปริมาณสัดส่วนผสมทางเคมีที่อยู่ในรูปของ Equivalent (eq) ก็จะสามารถกำหนดปริมาณของสัดส่วนเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ได้ ดังนั้น จึงมีนักวิจัยด้านโลหะวิทยางานเชื่อมได้ทำการวิจัยเชิงทดลองเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติกด้วยการเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมทางเคมีที่ต่างกัน (ซึ่งก็คือเกรดต่างกัน) เพื่อเปรียบเทียบพิสูจน์ระหว่างผลวิจัยที่ได้จากการทำนาย (Prediction) กับผลจากการทดลอง (Experiment) ดังตัวอย่างงานวิจัยของ Wichan Chuaiphan et al. (2020) ได้ทำการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกระหว่างซีรีย์ 200 กับซีรีย์ 300 ด้วยเกรด AISI 200Cu กับเกรด AISI 304 โดยการเลือกใช้ลวดเชื่อมเกรด ER 309L กับเกรด ER 316L ด้วยขบวนการเชื่อมทิก (TIG) ผลการวิจัยพบว่าเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดชนิดที่มีส่วนผสมของโครเมียมที่สูงกว่า (309L) จะมีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์เกิดขึ้นน้อยกว่าที่เชื่อมด้วยลวดที่ผสมโครเมียมต่ำกว่า ซึ่งก็เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับหลักทฤษฎีโหมดการแข็งตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติก ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า เนื้อเชื่อมที่ต้องการลดปริมาณการเกิดของเปอร์เซ็นต์เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ ให้เลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของโครเมียมสูงเป็นสำคัญ ดังตัวอย่างเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่มีเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์แตกต่างกันในรูปที่ 9.15 โดยในรูป (ก) แสดงถึงโครงสร้างที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมที่มีโครเมียมผสมสูง (ER 309L) ซึ่งมีผลทำให้เกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ต่ำ (5.56%) ส่วนรูป (ข) เป็นโครงสร้างที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมที่มีโครเมียมผสมต่ำ (ER 316L) จะเห็นได้ชัดเจนว่าส่งผลทำให้เกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่สูง (7.37%)



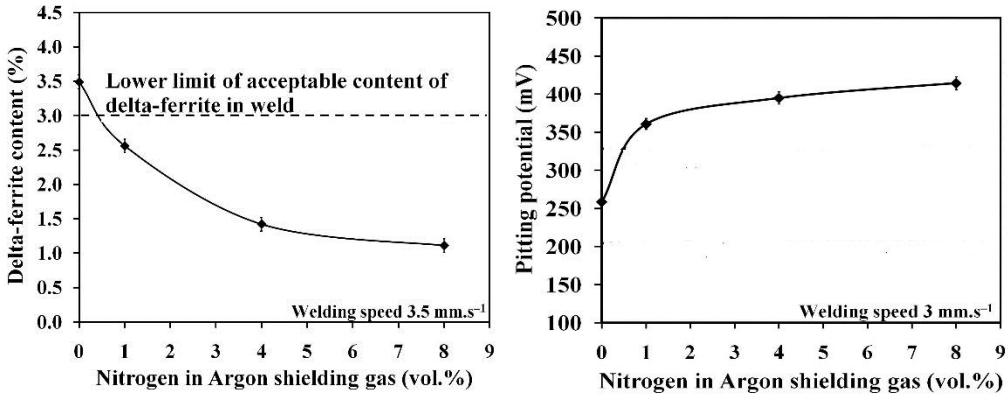
(ก) เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ 5.56% **(ข)** เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ 7.37%

รูปที่ 9.15 โครงสร้างที่มีเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์เหล็กกล้าไร้สนิมอสสเตนนิติก

ที่มา : Wichan Chuaiphan, et al., Journal of Materials Research and Technology, Vol. 9(3), 2020

การควบคุมปริมาณเฟสเฟอร์ไรต์ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติกมีความจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่ง เพราะมีผลกระทบโดยตรงต่อความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็ม โดยวิธีการป้องกันด้วยการเพิ่มหรือรักษาปริมาณของธาตุโครเมียมที่ได้จากลวดเชื่อมเติมเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากและมีประสิทธิภาพค่อนข้างดี ซึ่งได้กล่าวเป็นตัวอย่างมาแล้วข้างต้น ปัจจุบันได้มีการวิจัยทดลองหาวิธีการควบคุมปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในวิธีการต่าง ๆ กรณีที่เชื่อมจำพวกโลหะแผ่นบางโดยที่ไม่ได้ใช้ลวดเชื่อมเติม (Autogenous welding) การเชื่อมกรณีแบบนี้มีโอกาสที่จะเกิดปริมาณของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ได้มาก เพราะกรรมวิธีของการเชื่อมจะเกิดการสูญเสียธาตุโครเมียมไปบางส่วนทำให้โครเมียมลดลงเสมอ ได้มีการวิจัยเชิงทดลองใช้แก๊สไนโตรเจน (N_2) ผสมกับแก๊สอาร์กอน (Ar) ใช้ในการปกคลุมแนวเชื่อม (Shielding gas) โดยเกิดจากหลักทฤษฎีทางด้านโลหะวิทยาที่ว่า แก๊สไนโตรเจนมีความเสถียร (Stabiliser) กับโครงสร้างออสเทนไนต์มากกว่าเฟอร์ไรต์ ดังนั้น จึงต้องการเติมไนโตรเจนลงไปในเนื้อเชื่อมผ่านทางแก๊สปกคลุมเพื่อเข้าไปช่วยฟอร์มตัวเฟสออสเทนไนต์ให้มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้สัดส่วนของเฟสเฟอร์ไรต์ลดลง ดังตัวอย่างผลการวจัยของ Wichan Chuaiphan et al. (2019) ที่ทำการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกแบบไม่เติมลวดเชื่อม โดยใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมกับไนโตรเจนที่ปริมาณ (1%N + 99%Ar) (4%N + 96%Ar) และ(8%N + 92%Ar) จากผลการทดลองได้ข้อสรุปว่า เมื่อเพิ่มปริมาณไนโตรเจนเข้าในเนื้อเชื่อมมากขึ้นส่งผลกระทบทำให้สัดส่วนปริมาณของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ลดลงอย่างชัดเจน ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 9.16 (ก) ซึ่งผลการวิจัยทดลองนี้ได้ขยายผลนำไปพิสูจน์ทดสอบความสามารถต่อการทนต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) พบว่าเมื่อปริมาณของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ลดลง ความต้านทานการกัดกร่อนจะสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9.16 (ข) ด้วยเพราะกลไกการเกิดกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitted) จะเกิดขึ้นได้ไวและง่ายมากที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์กับเฟสออสเทนไนต์ (Grain boundary) ดังนั้น การลดหรือการกำจัดปริมาณของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ก็เป็นการลดหรือกำจัดโอกาสที่จะมีจุดเริ่มต้นของการกัดกร่อนแบบรู

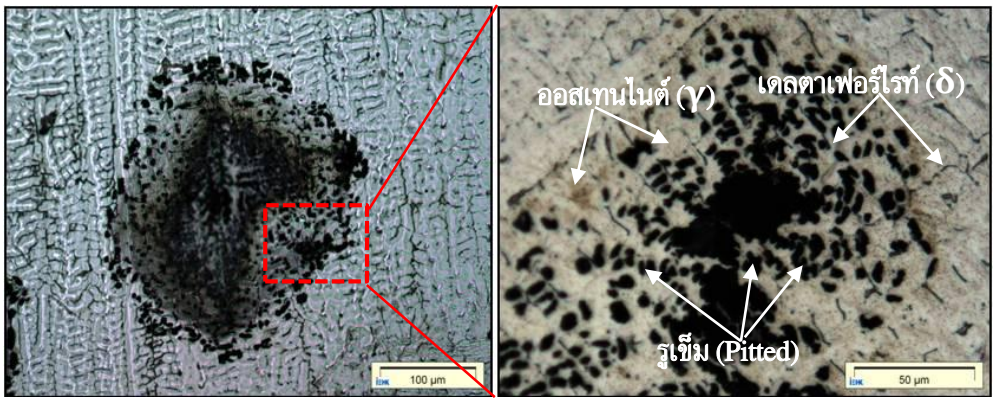
เข็ม ส่งผลให้เนื้อเชื่อมนั้นมีประสิทธิภาพในการต้านทานการกัดกร่อนได้สูงขึ้น ดังแสดงตัวอย่างลักษณะรูปแบบของการกัดกร่อนแบบรูเข็มดังกล่าวในรูปที่ 9.17



(ก) เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ลดลงเมื่อเพิ่ม N_2 **(ข)** ความต้านทานกัดกร่อนเพิ่มขึ้น

รูปที่ 9.16 การใช้แก๊สไนโตรเจนควบคุมเดลตาเฟอร์ไรต์และการกัดกร่อน

ที่มา : Wichan Chuaiphan, et al., Journal of Defence Technology, Vol. 15, 2019



(ก) ลักษณะรูปแบบการกัดกร่อนแบบรูเข็ม **(ข)** ขยายรูปแบบการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

รูปที่ 9.17 ลักษณะรูปแบบการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion)

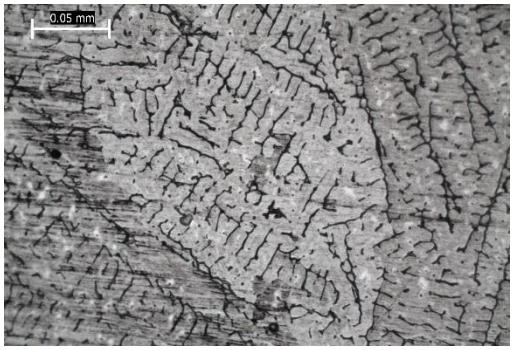
ที่มา : Wichan Chuaiphan, et al., Journal of Defence Technology, Vol. 15, 2019

นอกจากนี้วิธีการควบคุมสัดส่วนปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อม ยังมีเทคนิคจากการควบคุมปัจจัยการเชื่อม โดยอาศัยหลักการเพิ่มอัตราเร็วของการเย็นตัวของบ่อหลอมละลาย เพราะโดยปกติการเย็นตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกโครงสร้างสุดท้ายต้องเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ทั้งหมด แต่ถ้าบ่อหลอมละลายมีอัตราการเย็นตัวที่ช้าลง เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ก็มีเวลามากพอที่จะฟอร์มตัวขึ้นปะปนอยู่ในเฟสออสเทนไนต์ แต่ในทางกลับกันถ้าน้ำโลหะเหลวของบ่อหลอมละลายมีอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วขึ้น เวลาสำหรับการฟอร์มตัวของเฟสเฟอร์ไรต์ก็จะไม่เพียงพอ ส่งผลให้โอกาสที่จะเกิด

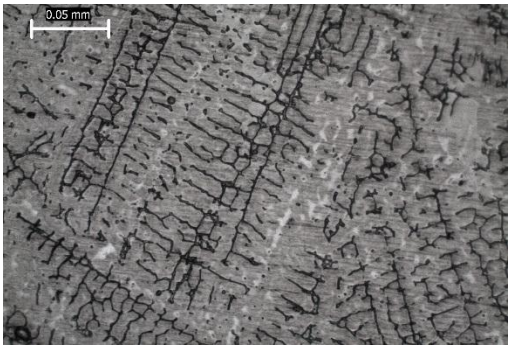
เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ก็น้อยลงหรือเกิดยากขึ้น แต่ในบางตำแหน่งที่อาจเกิดขึ้นได้บ้างแต่ก็ปริมาณที่น้อย ดังนั้น ปัจจัยการเชื่อมเรื่องของความร้อนที่ป้อนเข้าสู้ขบวนการอาร์ก (Heat input) จึงเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการเย็นตัวของน้ำโลหะ กล่าวคือ ถ้าปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสูง (High heat input) อัตราการเย็นตัวย่อมช้า โอกาสที่จะเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ก็มากขึ้น แต่ถ้าปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าต่ำ (Low heat input) อัตราการเย็นตัวจะเร็วโอกาสที่จะเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ก็น้อยลง ดังนั้นการกำหนดปัจจัยการเชื่อมของความร้อนที่ป้อนเข้าจึงใช้เป็นเทคนิคการควบคุมปริมาณการเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติกได้เป็นอย่างดี

ในทางปฏิบัติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตจึงมักปรับปัจจัยเพิ่มความเร็วในการเชื่อม (Welding speed) เพราะการเชื่อมที่เร็วขึ้นทำให้ความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานต่ำลง นอกจากจะสามารถเชื่อมงานได้รวดเร็วขึ้นแล้ว ยังสามารถลดความร้อนที่ป้อนเข้าซึ่งช่วยในการลดปริมาณของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ได้ด้วย ดังตัวอย่างผลการวิจัยของ Wichan Chuaiphan et al. (2014) ที่ทำการทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกซีรีย์ 200 เกรด AISI 201 ด้วยขบวนการเชื่อมทิก โดยใช้กำหนดความเร็วในการเชื่อมที่ต่างกัน (1.5 mm/s, 2.5mm/s และ 3.5mm/s) ซึ่งปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าอยู่ที่ 0.850 kJ/mm, 0.494 kJ/mm และ 0.345 kJ/mm ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าเมื่อความเร็วชื่อมเพิ่มขึ้นปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าลดลง ส่งผลทำให้ขนาดความยาวของแขนเดนไรต์ (Dendrite length) สั้นลงและระยะห่างของแขนเดนไรต์ (Interdendrite spacing) ก็แคบลง ซึ่งโดยภาพรวม หมายถึงปริมาณสัดส่วนของเดลตาเฟอร์ไรต์ที่อยู่ในโครงสร้างพื้นออสเทนไนต์ลดลง จึงสามารถสรุปได้ว่าความเร็วที่สูงขึ้นทำให้ความร้อนป้อนเข้าต่ำลง สามารถที่จะใช้ในการควบคุมลดการเกิดสัดส่วนปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมได้ ดังแสดงโครงสร้างจุลภาคที่ปริมาณเดลตาเฟอร์ไรต์ต่างกันที่เกิดจากความร้อนที่ป้อนเข้าไม่เท่ากันในรูปที่ 9.18

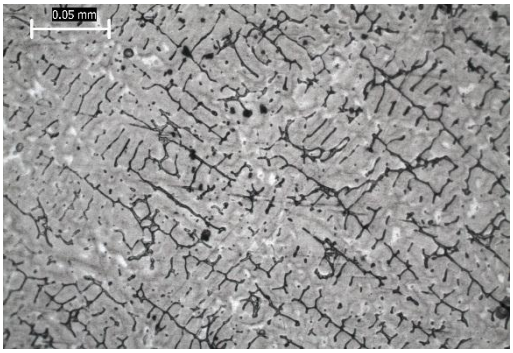
สำหรับกรณีที่เชื่อมโลหะต่างชนิด (Dissimilar welding) ที่ทำการเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติกต่างซีรีย์ ระหว่างซีรีย์ 200 กับ ซีรีย์300 เช่น ทำการเชื่อมระหว่างเกรด AISI 201 กับ AISI 304 พบว่าความสามารถในการละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของโลหะเหล็กประเภทนี้ดีมาก การกระจายตัวของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์จะกระจายไปในแต่ละตำแหน่งอย่างสม่ำเสมอของโลหะทั้งคู่ ซึ่งวิธีการตรวจวัดปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์จะใช้เครื่องวัด FERITSCOPE–FMP30 ที่ใช้หลักการสะท้อนกลับของสมบัติความเป็นแม่เหล็กของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่เป็นระบบผลึกแบบ BCC ในหลายตำแหน่งของเนื้อเชื่อมแล้วหาค่าเฉลี่ยทั้งหมด ซึ่งค่าที่วัดได้ของแต่ละบริเวณมีความแตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้น การรายงานผลการวิจัยเรื่องของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในโครงสร้างพื้นฐานของออสเทนไนต์จึงเป็นค่าเฉลี่ยจากทดสอบ สำหรับกรณีที่เป็นการเชื่อมกับโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกซีรีย์เดียวกัน เช่น การเชื่อมระหว่างเกรด AISI 205 กับ AISI 216 หรือ AISI 304 กับ AISI 309 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเชื่อมมีการเกิดและกระจายตัวของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์สม่ำเสมอทั่วบริเวณ อาจมีบางในบางกรณีที่ชิ้นงานที่นำมาเชื่อมต่อมีความหนาบางแตกต่างกัน



(ก) เดลตาเฟอร์ไรต์ที่ ความเร็ว 1.5 mm/s



(ข) เดลตาเฟอร์ไรต์ที่ ความเร็ว 2.5 mm/s



(ค) เดลตาเฟอร์ไรต์ที่ ความเร็ว 3.5 mm/s

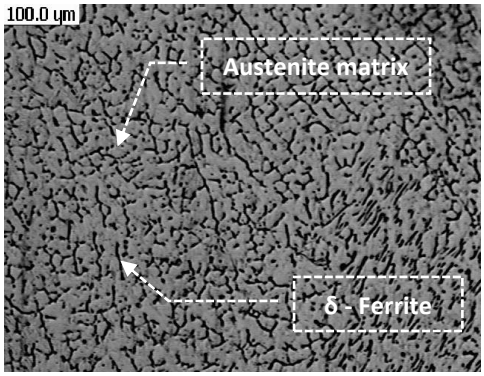
รูปที่ 9.18 สัดส่วนของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในโครงสร้างพื้นออสเทนไนต์ที่ระดับความเร็วในการเชื่อมต่างกัน

ที่มา : Wichan Chuaiphan, et al., Journal of Materials Processing Technology, Vol. 214, 2014

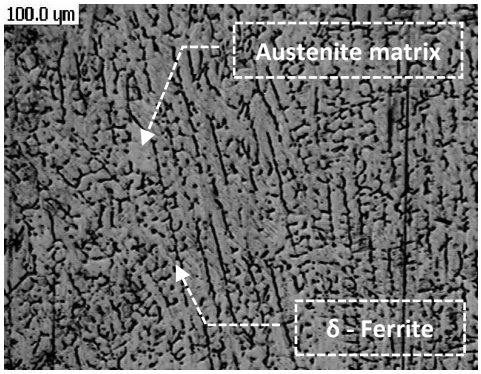
2. โครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกกับโลหะชนิดอื่น (Microstructure of ASS welding with other steels)

เหล็กกล้าไร้สนิมทุกประเภทเป็นที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้งานกันหลากหลาย สำหรับชิ้นงานโครงสร้างส่วนใหญ่มักเป็นการเชื่อมประกอบ ซึ่งกรณีที่เชื่อมโลหะชนิดเดียวกันที่เหมือนกันทุกประการจะมีปัญหาน้อยมาก มักมีปัญหากับการเชื่อมโลหะที่ต่างชนิดกัน ซึ่งได้แก่การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ASS กับ เหล็กกล้าคาร์บอน หรือกับเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทอื่น เช่น ประเภท Martensitic Stainless steel : MSS ประเภท Ferritic Stainless steel : FSS หรือ ประเภท Duplex Stainless steel : DSS และรวมไปถึงประเภท Precipitation Stainless steel : PSS ซึ่งเนื้อเชื่อมที่เป็นการหลอมละลายรวมกันจากโลหะต่างชนิดก็จะมีสมบัติและองค์ประกอบภายในที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้น จึงได้เกิดการวิจัยเชิงทดลองหาความเหมาะสมของการเชื่อมแบบโลหะต่างชนิดกันที่เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละคู่ของการเชื่อมจำนวนมาก ดังตัวอย่างการวิจัยทดลองของ Wichan Chuaiphan et al. (2009) ที่ทดลองเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 กับเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1020 การเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีปริมาณโครเมียมผสมต่างกัน โดยมีเป้าหมายต้องการเติมโครเมียมลงไปในบ่อหลอมลายเพื่อเข้าไปสร้างแนวเชื่อมให้เกิดเป็นเกรดเหล็กกล้าไร้สนิมทนการกัดกร่อนนำไปใช้แก้ปัญหาการเชื่อมต่อของระบบของหม้อไอน้ำ ผลการวิจัยได้คำตอบว่าเนื้อเชื่อมที่ได้มีสมบัติเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติก

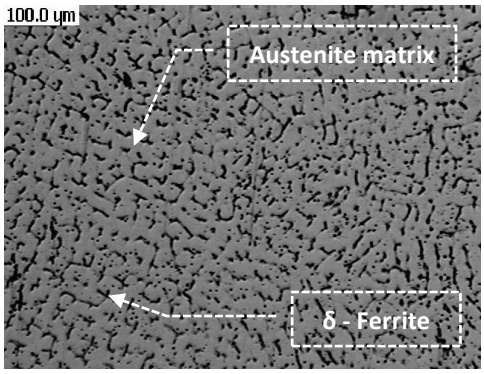
โดยเกิดเฟสโครงสร้างเดลตาเฟอร์ไรต์ (δ–ferrite) ในโครงสร้างพื้นออสเทนไนต์ ดังแสดงลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมที่เลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีโครเมียมผสมต่างกัน ในรูปที่ 9.19 และเมื่อนำไปทดสอบหาความสามารถต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็ม พบว่ามีสมบัติใกล้เคียงกับเกรด AISI 304 โดยเนื้อเชื่อมที่ใช้ลวดเชื่อม ER 309L จะให้สมบัติที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีปริมาณโครเมียมผสมอยู่ในลวดเชื่อมสูง (26%Cr) ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการเชื่อมถ้าต้องการเชื่อมต่อระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม ASS กับเหล็กกล้าคาร์บอนสามารถเชื่อมได้โดยแนะนำให้เลือกลวดเชื่อมที่มีโครเมียมผสมสูง



(ก) เชื่อมด้วยลวดเชื่อม AISI 308L



(ข) เชื่อมด้วยลวดเชื่อม AISI 309L



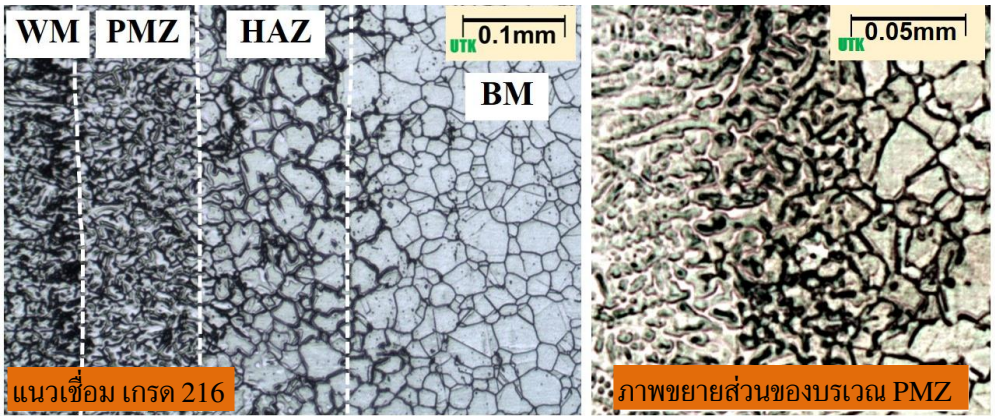
(ค) เชื่อมด้วยลวดเชื่อม AISI 316L

รูปที่ 9.19 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม ASS กับเหล็กกล้าคาร์บอน

ที่มา : Wichan Chuaiphan, et al., Journal of Applied Mechanics and Materials . Vol. 238–270 หน้า 283–290, 2012

การเชื่อมโลหะต่างชนิดปัญหาของ Interface zone จะเป็นจุดอ่อนแอของการเชื่อมโลหะต่างชนิด (Dissimilar welding) ความหมายของ Interface zone จะหมายถึง บริเวณที่เป็นแนวรอยต่อของระหว่างโลหะหลัก (Base metal) ที่ยังไม่หลอมละลายกับแนวเชื่อมที่หลอมละลาย (Fusion metal) ซึ่งปกติในกรณีของการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรดเดียวกันแนวรอยต่อของ Interface zone เนื้อเกรนที่เปลี่ยนแปลงจะผสานกลมกลืน ดังตัวอย่างผลการวิจัยของ Wichan Chuaiphan et al. (2020) ที่ทำการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนิกเกิลต่ำเกรด AISI 216 ด้วยขบวนการเชื่อมทิก จะเห็นได้ชัดเจนว่าบริเวณของ Interface zone เกิดการผสมกันระหว่างส่วนที่หลอมละลายกับส่วนที่ไม่หลอมละลาย (Partially metal zone) หรือที่เรียกกันว่า PMZ ซึ่งลักษณะของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแบบ

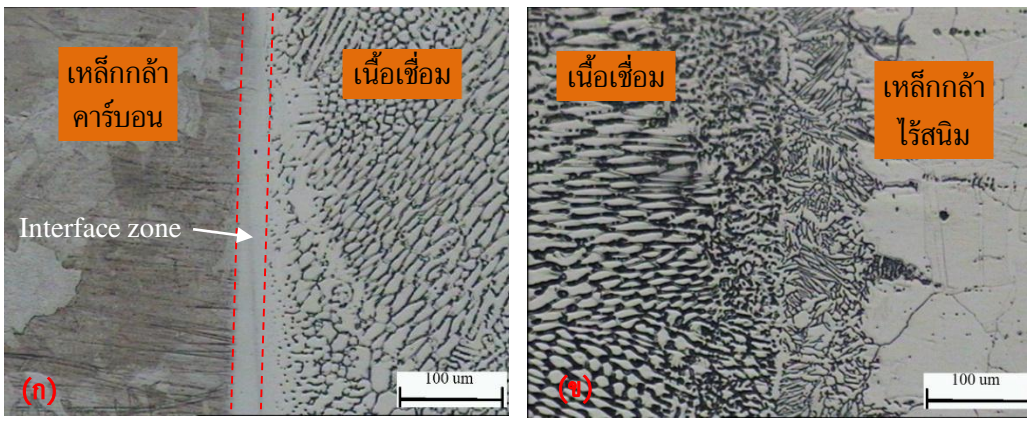
นี้จะไม่เกิดแนว Interface zone ที่เป็นแนวขอบยาวตลอดแนวเชื่อม ดังแสดงลักษณะของโครงสร้างดังกล่าวในรูปที่ 9.20 เหตุผลเนื่องมาจากโลหะที่ทำการเชื่อมกับน้ำโลหะที่หลอมละลายในบ่อหลอมละลายเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเดียวกัน หรืออาจใช้ลวดเชื่อมเติมชนิดเดียวกัน (Similar welding)



รูปที่ 9.20 Interface zone ของแนวเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316

ที่มา : Wichan Chuaiphan, et al., Journal of Advanced Joining Processes. Vol. 2, 2020

สำหรับกรณีที่เชื่อมโลหะต่างชนิดที่ไม่ใช่เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเดียวกัน หรือต่างประเภทของโลหะ เช่น การเชื่อมกับโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน แนว Interface zone จะเกิดเป็นขอบที่ชัดเจนยาวตลอดแนวเชื่อม ซึ่งสอดคล้องกับเป็นผลการวิจัยระดับปริญญาเอกของ Wichan Chuaiphan (2011) ที่ทำการทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 กับเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1020 ด้วยลวดเชื่อม E 316 พบว่าแนว Interface zone ด้านเหล็กกล้าคาร์บอนเกิดขึ้นชัดเจนมากดังแสดงในรูปที่ 9.21(ก) ส่วนในรูป (ข) จะเห็นได้ว่าแนว Interface zone จะผสมผสานกันไม่มีขอบที่แบ่งแนวด้วยเพราะบ่อหลอมละลายเติมลวดเชื่อมที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม น้ำโลหะเชื่อมกับโลหะหลักด้าน AISI 304 จึงเป็นโลหะชนิดเดียวกัน



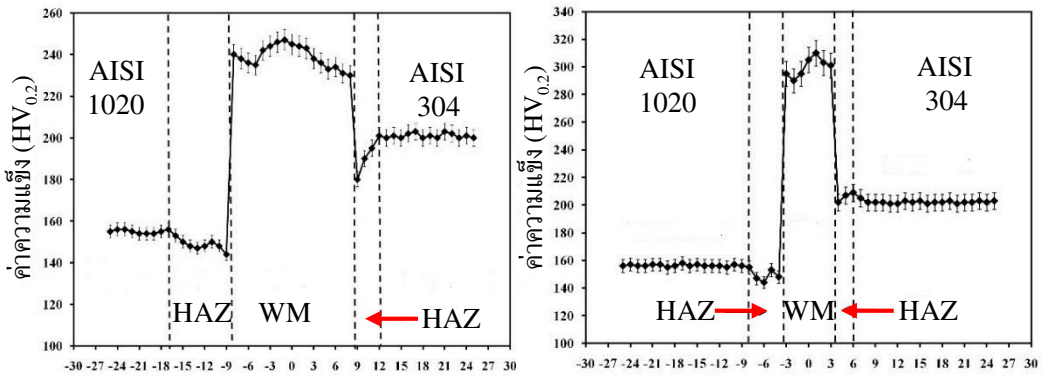
รูปที่ 9.21 Interface zone ของแนวเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน

ที่มา : Wichan Chuaiphan, et al., Journal of Advanced Joining Processes. Vol. 2, 2020

3. บริเวณผลกระทบจากความร้อน (Heat affecter zone) : HAZ

ขบวนการเชื่อมแบบหลอมละลายจำเป็นต้องสร้างความร้อนเพื่อการหลอมละลายให้โลหะติดเป็นเนื้อเดียวกัน จึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากอิทธิพลของความร้อนได้ ซึ่งเรียกกันว่าบริเวณกระทบร้อน (Heat affecter zone) หรือที่รู้จักกันในคำย่อว่า HAZ ปัจจัยสำคัญคือ ปริมาณของความร้อนที่ป้อนเข้าสู่การอาร์กแบบหลอมละลาย มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องควบคุมค่าปริมาณความร้อนที่เหมาะสม เพราะจะมีผลกระทบต่อคุณภาพของเนื้อโลหะเชื่อมโดยตรง ดังผลงานวิจัยทดลองของ Himanshu Vashishtha et al. (2014) ที่ได้ทำการทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกชนิดผสมโครเมียม–แมงกานีส (Cr–Mn) ด้วยขบวนการเชื่อม MMAW โดยเชื่อมด้วยปัจจัยใช้ปริมาณความร้อนป้อนเข้าไปต่างกัน พบว่าขบวนการเชื่อมที่รับความร้อนจากการอาร์กที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและยังส่งผลทำให้ความกว้างของบริเวณผลกระทบร้อน (Heat affected zone : HAZ) และบริเวณของการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ (Sensitized zone : SZ) ซึ่งรวมไปถึงบริเวณของการเผาไหม้ของออกไซด์ฟิล์มที่เรียกกันว่า “Heat Tint” ขยายกว้างขึ้นตามไปได้ด้วย โดยเป็นที่ทราบกันดีว่างานเชื่อมที่ดีควรจะต้องมีบริเวณผลกระทบจากความร้อนที่แคบที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งในทางหลักการของโลหะวิทยาสามารถอธิบายได้ว่า ขนาดความกว้างของบริเวณผลกระทบร้อน หรือที่เรียกกันว่า HAZ เป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) อันเนื่องมาจากอิทธิพลความร้อนของบ่อหลอมละลายถ่ายโอนผ่านบริเวณดังกล่าวด้วยระดับอุณหภูมิที่สูงมากพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง โดยที่บริเวณดังกล่าวไม่เกิดการหลอมละลาย และเมื่อโครงสร้างเปลี่ยนสมบัติทางกลก็เปลี่ยนตาม ซึ่งจะเปลี่ยนไปในทางที่ด้อยลง ขนาดความกว้างของ HAZ นอกจากได้รับผลจากความร้อนที่ป้อนเข้ามา พบว่าสมบัติค่าการนำความร้อนของโลหะที่นำมาเชื่อม (Heat conductivity) จะมีอิทธิพลร่วมด้วยอย่างมากต่อความกว้างของบริเวณกระทบร้อนหรือ HAZ กล่าวคือ ถ้าโลหะที่เชื่อมมีค่าการนำความร้อนที่สูง (High heat conductivity) จะส่งผลทำให้ขนาดของ HAZ เล็กลงและแคบ เนื่องจากมีอัตราการแพร่กระจายของความร้อนได้สูงและดี ความร้อนถูกกระจายออกไปเป็นวงกว้าง เป็นเหตุให้ไม่เกิดความร้อนสะสมที่สูงและไม่มากเพียงพอต่อการสร้างผลกระทบในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะหลัก ซึ่งในทางตรงกันข้ามถ้าโลหะที่เชื่อมมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ (Low heat conductivity) ประสิทธิภาพในการระบายความร้อนต่ำส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมในปริมาณที่สูงและมากเพียงพอต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่บริเวณ HAZ ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการวิจัยของ Wichan Chuaiphan et al. (2009) ที่ทำการวิจัยทดลองเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 กับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1020 ที่มีค่าการนำความร้อนที่ 0.142 และ 0.015 W/mk ตามลำดับ ผลการทดลองพิสูจน์ให้เห็นได้ชัดเจนว่าบริเวณ HAZ ด้านเหล็กกล้าไร้สนิมมีขนาดที่แคบกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังแสดงผลการวิจัยทดลองในรูปที่ 9.22 ด้วยเหตุเพราะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่มีส่วนผสมทางเคมีที่ต่างไปจากเหล็กกล้าคาร์บอน มีระบบผลึกเป็นแบบ FCC ที่มีความสามารถในการเป็นตัวกลางนำความร้อนได้ดีกว่า ความร้อนที่ระบาย

ออกไปกระจายตัวไปได้ดีไม่เกิดความร้อนสะสม จึงเป็นผลทำให้เกิดพื้นที่กระทบร้อนที่เล็กกว่าหรือแคบกว่า โดยเป็นไปในรูปแบบเดียวกันทั้งแนวเชื่อมด้านหน้าและแนวเชื่อมด้านหลังหรือด้านราก ดังใน รูป (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) แนวเชื่อมด้านหน้า (Face weld) **(ข)** แนวเชื่อมด้านหลัง (Root weld)

รูปที่ 9.22 อิทธิพลของความร้อนจากการอาร์กเชื่อมต่อขนาดของ HAZ

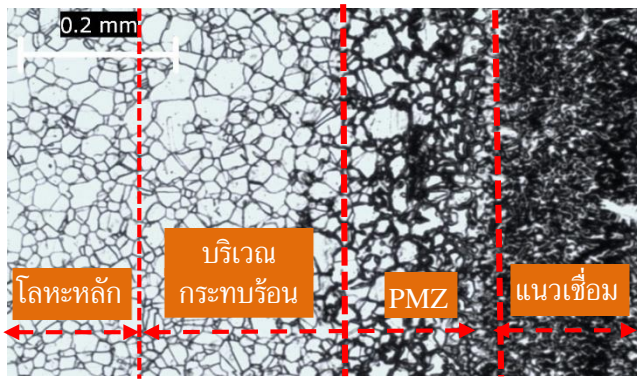
ที่มา : Wichan Chuaiphan et al., Key Engineering Material, Vol. 410–411, pp. 533–541, 2009

● ผลกระทบร้อนสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกต่างชนิด (HAZ of dissimilar welding ASS welding) : ซีรีย์ 200 กับ ซีรีย์ 300

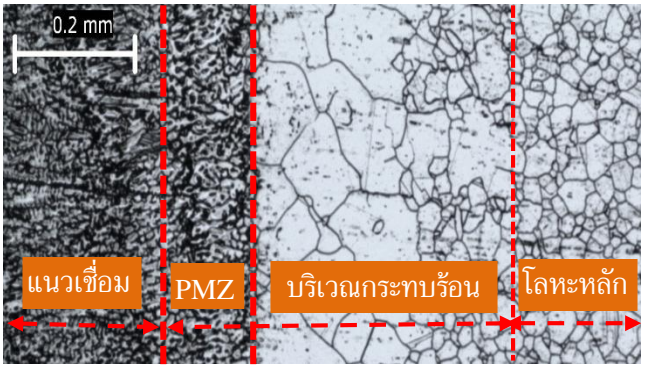
การเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ใช้วิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายด้วยความร้อน จึงเกิดบริเวณที่กระทบจากความร้อนเกิดขึ้นเสมอ นอกจากจะส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคภายในแล้ว ยังมีผลกระทบต่อความสวยงานของพื้นผิวที่เป็นเงาแวววาวโดดเด่นของเหล็กกล้าไร้สนิมอีกด้วย

สำหรับผลกระทบด้านโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องจากผลกระทบของความร้อนที่เกิดขึ้นบนบริเวณไม่เกิดการหลอมละลาย หรือบริเวณ HAZ ของการเชื่อมโลหะที่ต่างชนิดหรือต่างเกรด แต่ละด้านของโลหะหลักจะมีรูปแบบของ HAZ ที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับกลไกความสามารถในการระบายความร้อนหรือการเป็นตัวนำความร้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งเหตุผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวิจัยเชิงทดลองของ Wichan Chuaiphan et al. (2019) ที่ได้ทำการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติก ระหว่างซีรีย์ 200 โดย AISI 201 กับซีรีย์ 300 โดย AISI 304 พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคในแต่ละบริเวณ (Zone) มีความแตกต่างกัน กล่าวคือ ด้านฝั่งโลหะหลัก 201 บริเวณของ PMZ หรือบริเวณที่เกิดการหลอมละลายบางส่วนจะกว้างมาก เหตุผลเพราะเนื้อของโลหะมีค่าความสามารถในการนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่สูงกว่า ความร้อนจึงแพร่กระจายไปทำให้เกิดการหลอมละลายในบางส่วนมากกว่าและเป็นพื้นที่บริเวณกว้าง จึงส่งผลทำให้โซนหรือบริเวณถัดไปมีระดับความร้อนที่ลดต่ำลง ซึ่งไม่มากพอที่จะ

ทำให้ขนาดของเกรนเกิดการเปลี่ยนแปลงโตขึ้น โดยเห็นได้ชัดเจนว่าขนาดเกรนบริเวณกระทบร้อนมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดเกรนเดิมของโลหะหลัก ดังแสดงในรูปที่ 9.23 (ก) ส่วนด้านฝั่งโลหะหลัก 304 บริเวณของ PMZ จะแคบกว่าด้วยเพราะมีค่าความสามารถในการนำหรือกระจายความร้อนได้ต่ำกว่าความร้อนจากบ่อหลอมละลายระบายออกไปสะสมสูง ทำให้บริเวณ PMZ มีสัดส่วนที่หลอมละลายมากกว่าที่ไม่หลอมละลายอย่างเห็นได้ชัดเจน และด้วยการกระจายความร้อนที่ช้าทำให้บริเวณถัดไปยังมีระดับความร้อนที่สูงมากพอที่จะให้เกรนเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดที่โตขึ้น ซึ่งแตกต่างจากขนาดของเกรนเดิมของโลหะหลัก ดังแสดงในรูปที่ 9.23 (ข)



(ก) HAZ ด้านโลหะหลัก AISI 201



(ข) HAZ ด้านโลหะหลัก AISI 304

รูปที่ 9.23 พฤติกรรมของการเกิด HAZ ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกแบบต่างชนิด *ที่มา : Wichan Chuaiphan et al., Defence Technology, Vol. 15 pp. 170–178, 2019*

● ผลกระทบร้อนสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกต่างชนิด (HAZ of dissimilar welding ASS welding different grade) : ซีรีย์ 200 ต่างเกรด

ด้วยเหตุที่ผู้เขียนมีความสนใจในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกผสมแมงกานีส (นิเกิลต่ำ) หรือซีรีย์ 200 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมราคาถูกจนมักเรียกกันว่า Alternative stainless steel เพื่อศึกษาขีดความสามารถในการประยุกต์ใช้งาน จึงได้ทำการวิจัยเชิงทดลองจำนวนหลายงาน จำนวนหนึ่งเป็นการวิจัยทดลองเชื่อมซีรีย์ 200 ต่างเกรด ดังตัวอย่างทดลองทำการเชื่อมเกรด AISI 205 กับเกรด AISI 216

โดยขบวนการเชื่อมทิก ด้วยเทคนิคการเติมลวด AISI ER 307 จากผลการวิจัยพบว่าการเชื่อมโลหะซีรีย์เดียวแต่ต่างเกรด บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจากเชื่อมทั้งสองข้างมีความแตกต่างกันน้อยมากอย่างมีนัยสำคัญ ไม่ว่าจะเป็นบริเวณของ PMZ และขนาดของเกรนที่บริเวณ HAZ ดังรูปแสดงการเปรียบเทียบในรูปที่ 9.24 (ก) และ (ข) ซึ่งผลดังกล่าวเป็นเพราะโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งคู่เป็นประเภทออสเทนนิติกซีรีย์ 200 ที่เกิดจากธาตุผสมแมงกานีสเป็นหลักเหมือนกัน มีค่าสมบัติทางกายภาพโดยเฉพาะค่าความสามารถในการนำความร้อนที่เท่ากัน คือ 15 W/m.k จึงสรุปได้ว่าถึงแม้จะเป็นการเชื่อมโลหะต่างชนิดแต่ถ้าโลหะคู่นั้นมีค่าความสามารถในการนำความร้อนที่ไม่แตกต่างกันหรือเท่ากัน ก็จะเกิดพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคที่เกิดจากผลกระทบร้อนที่ไม่แตกต่างกัน



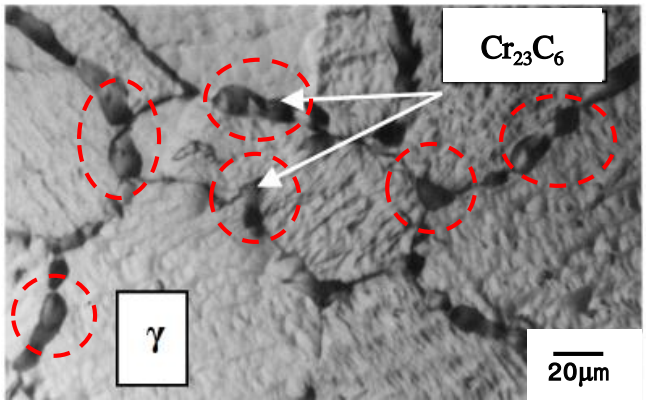
(ก) ผลกระทบร้อน ด้านโลหะหลัก AISI 205 **(ข)** ผลกระทบร้อน ด้านโลหะหลัก AISI 216

รูปที่ 9.24 การเกิด HAZ ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่มีค่าการนำความร้อนเท่ากัน
ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Manufacturing Processes, Vol. 58, pp. 163–178, 2020

4. การเกิดโครเมียมคาร์ไบด์บริเวณกระทบร้อน (Chromium carbide at HAZ)

เหล็กกล้าไร้สนิมทุกประเภทมีธาตุโครเมียมเป็นธาตุผสมหลักที่เหมือนกัน เพื่อทำหน้าที่ในการสร้างออกไซด์ฟิล์มป้องกันการกัดก่อนที่เรียกกันว่า ฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) โดยต้องมีสัดส่วนผสมในปริมาณที่มากเพียงพอในการสร้างฟิล์ม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติกต้องมีโครเมียมผสมอยู่มากกว่า 12% ซึ่งถ้าน้อยกว่านี้ประสิทธิภาพของฟิล์มจะต่ำ ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนก็จะลดลง โดยส่วนใหญ่ผสมอยู่ที่ 20–30% ดังนั้น การรักษาระดับปริมาณของโครเมียมไม่ให้ลดลงหรือสูญเสียไปเป็นสิ่งที่สำคัญยิ่ง การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกแบบหลอมละลายเป็นขบวนการขึ้นรูปที่มีโอกาสทำให้เกิดการสูญเสียโครเมียมได้มากที่สุด โดยจะสูญเสียไปในรูปของการที่โครเมียมไปรวมตัวกับคาร์บอนกลายเป็นสารประกอบโครเมียมคาร์ไบด์ ($Cr_{23}C_6$) ขึ้นที่บริเวณกระทบร้อน (HAZ) ของรอยเชื่อม เพราะบริเวณนี้ได้รับความร้อนสูงสุดถึง 1,350 ^{o}C (ติดกับบ่อหลอมละลาย) แต่ไม่เกิดการหลอมละลาย โดยความร้อนจะลดลงตามระยะห่างจากขอบของบ่อหลอมละลาย ในระยะที่ระดับความร้อนอุณหภูมิระหว่าง 815–426 ^{o}C ธาตุโครเมียม (Cr) จะเคลื่อนตัวไปรวมกับธาตุคาร์บอน (C) และเกิดการตกผลึกในระดับจุลภาคเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ ($Cr_{23}C_6$) ขึ้นที่ขอบเกรน

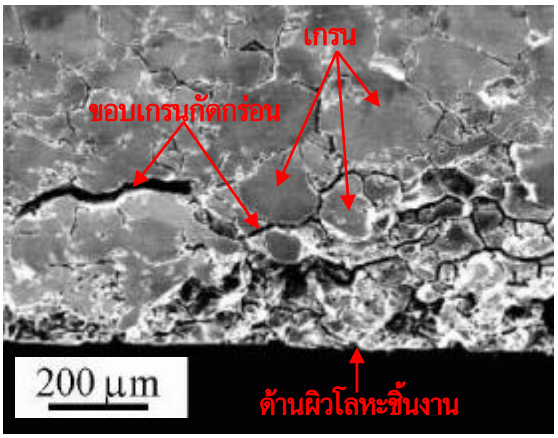
และกระจายตัวไปตามขอบของเกรน กลไกการเกิดลักษณะนี้เรียกว่า “Sensitization” ซึ่งสมบัติของโครเมียมคาร์ไบด์มีความแข็งสูงและเปราะที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล ประเด็นที่สำคัญมีศักดิ์ไฟฟ้าเป็นขั้วคาโทด (Cathode) ที่อยู่ท่ามกลางขั้วอาโนด (Anode) ซึ่งเมื่อนำไปใช้งานที่ต้องสัมผัสกับสารละลายที่นำไฟฟ้า (Electrolyte) จะเกิดการแลกเปลี่ยนอิเลคตรอนทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นที่เนื้อโลหะที่มีสภาพเป็นขั้วอาโนด ดังตัวอย่างของโครเมียมคาร์ไบด์ที่ตกผลึกอยู่ตามขอบเกรนในรูปที่ 9.25



รูปที่ 9.25 การเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ที่ตกผลึกตามขอบเกรนของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติก

ที่มา : มนูญ เลิศวิจิตรพันธุ์ บทความวิชาการ วารสารวิชาการเทคโนโลยี

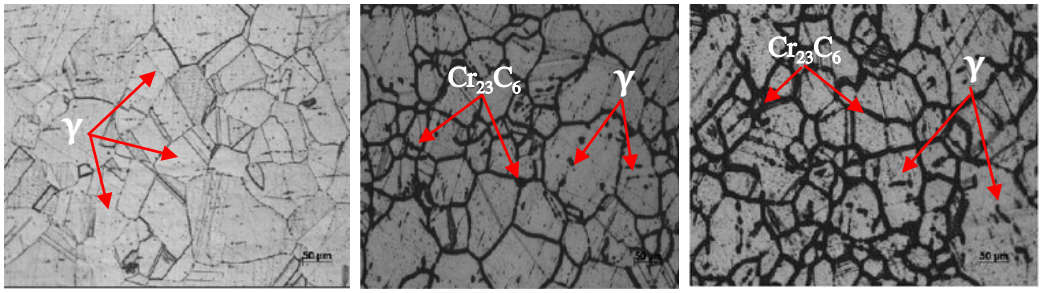
กลไกการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่บริเวณขอบเกรนไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะได้รับความร้อนจากการเชื่อมเท่านั้น แต่สามารถเกิดขึ้นได้เสมอเมื่อนำโลหะเหล็กชนิดนี้ไปใช้งานที่สภาพแวดล้อมอุณหภูมิสูงถึง 426 ^{o}C เป็นเวลานานอย่างต่อเนื่องก็จะทำให้สามารถเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามของเกรนได้ เมื่อโครเมียมส่วนหนึ่งไปรวมตัวกับคาร์บอนที่ขอบเกรน ทำให้บริเวณที่ชิดกับขอบเกรนเหลือปริมาณโครเมียมที่ต่ำลงกว่า 12 % ซึ่งไม่สามารถที่จะต้านทานการกัดกร่อนได้จึงเกิดการกัดกร่อนขึ้น โดยจะกัดกร่อนตลอดแนวตามขอบเกรนที่มีโครเมียมต่ำ (Chromium depleted zone) พฤติกรรมการกัดกร่อนลักษณะนี้เรียกว่า “การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion)” จะเกิดขึ้นได้ง่ายในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ดังแสดงลักษณะรูปแบบของการกัดกร่อนตามขอบเกรนในรูปที่ 9.26



รูปที่ 9.26 การกัดกร่อนตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่เกิดจากโครเมียมคาร์ไบด์ตกผลึกตามขอบเกรน

ที่มา : M. Shimada et al. Acta Materialia Vol. 50, pp. 2331–2341, 2002

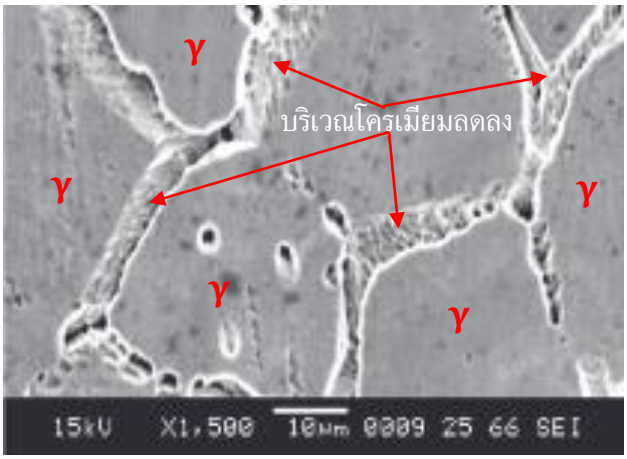
Ravindra Vasantrao Taiwade et al. (2014) ได้ทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ถึงพฤติกรรมของการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรนในกรณีที่ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมอุณหภูมิสูง โดยเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304L ทำการทดลองให้ความร้อนที่ 750 ^{o}C ที่ระยะเวลานานต่างกัน ผลการทดลองสามารถเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนเป็นเวลานานขึ้นจะเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ได้มากขึ้น ดังแสดงปริมาณของ $Cr_{23}C_6$ เพิ่มขึ้นตามขอบเกรนในรูปที่ 9.27 โดยบริเวณที่ธาตุโครเมียมแพร่ออกไปรวมกับคาร์บอนมากขึ้น ส่งผลทำให้บริเวณนั้นมีโครเมียมลดลง บริเวณดังกล่าวถูกเรียกว่า Chromium depleted region ซึ่งอยู่รอบ ๆ คาร์ไบด์ตามขอบเกรน ดังแสดงในรูปที่ 9.28



(ก) 750 ^{o}C เวลา 1 วัน **(ข)** 750 ^{o}C เวลา 8 วัน **(ค)** 750 ^{o}C เวลา 24 วัน

รูปที่ 9.27 ปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์ตกผลึกตามขอบเกรนเมื่อเวลานานขึ้น

ที่มา : Ravindra Vasantrao Taiwade ISIJ International Vol. 54, No. 8, pp. 1898–1906, 2014

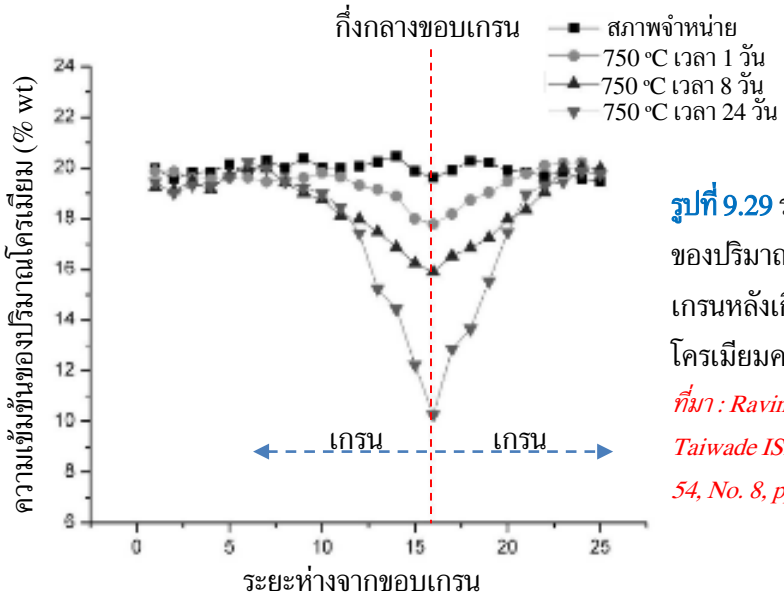


รูปที่ 9.28 การกัดกร่อนตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่เกิดจากโครเมียมคาร์ไบด์ตกผลึกตามขอบเกรน

ที่มา : Ravindra Vasantrao Taiwade ISIJ International Vol. 54, No. 8, pp. 1898–1906, 2014

Chromium depleted region เป็นตำแหน่งที่มีความอ่อนแอต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม เพราะสูญเสียโครเมียมไปในรูปของโครเมียมคาร์ไบด์ และเกิดความเสียหายจากการกัดกรอนตามขอบเกรน โดยมีการพิสูจน์ทราบถึงรูปแบบการสูญเสียโครเมียมของบริเวณดังกล่าวจากผลการวิจัยทดลองในกราฟรูปที่ 9.29 ที่ทำการตรวจวัดการลดลงของโครเมียมจะเห็นได้ว่าปริมาณ

ของโตรเมียมที่จุดกึ่งกลางของขอบเกรนจะเหลือปริมาณโครเมียมต่ำที่สุดและเหลือในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อห่างออกไปจากขอบเกรน ซึ่งสอดคล้องกับการที่ชิ้นงานได้รับความร้อนเป็นเวลานานการสูญเสียโครเมียมไปกับสารประกอบโครเมียมคาร์ไบด์ก็สูงขึ้น เหลือโครเมียมน้อยลง



รูปที่ 9.29 ระดับความเข้มข้นของปริมาณโครเมียมตามขอบเกรนหลังเกิดการตกผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์

ที่มา : Ravindra Vasantrao Taiwade ISIJ International Vol. 54, No. 8, pp. 1898–1906, 2014

● แนวทางการป้องกันหรือลดการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรนที่บริเวณกระทบร้อน

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามของเกรน (Sensitization) คือ 1. ความร้อนจากการเชื่อม (Heat input) 2. ธาตุคาร์บอนที่จะรวมตัวเป็นสารประกอบ (Carbon content) และ 3. ปัจจัยทางความร้อนหลังการเชื่อม (Heat treatment) ดังนั้น จึงต้องควบคุมปัจจัยสำคัญด้วยวิธีการดังนี้

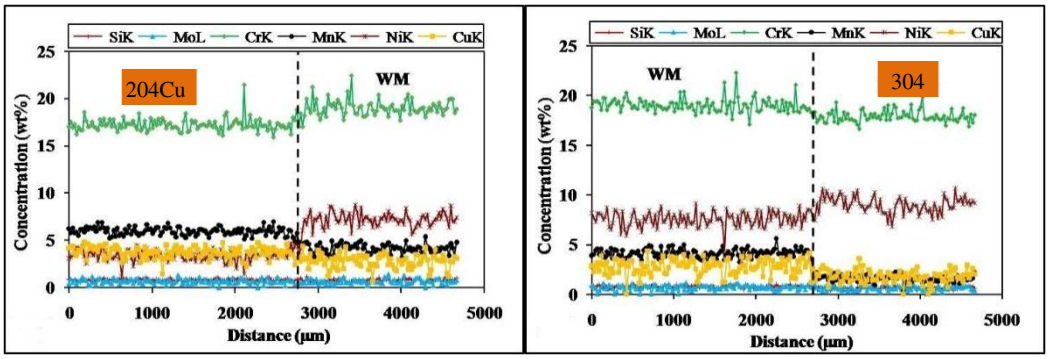
1. การควบคุมปริมาณความร้อนจากการเชื่อมแบบหลอมละลาย กรรมวิธีการเชื่อมแต่ละขบวนการมีกลไกการป้อนความร้อนสู่บ่อหลอมละลายแตกต่างกัน ควรจะเลือกขบวนการเชื่อมที่สามารถสร้างบ่อหลอมได้เร็วหรือลดเวลาในการเชื่อม เพื่อที่จะใช้พลังงานความร้อนป้อนเข้าไม่สูง ทำให้อุณหภูมิที่บริเวณกระทบร้อนต่ำโอกาสหรือความสามารถที่โครเมียมจะเคลื่อนตัวไปรวมกับคาร์บอนก็น้อยลงหรือต่ำลงจะทำให้มีสามารถลดโครเมียมคาร์ไบด์ได้ ขบวนการเชื่อมที่เหมาะสม ได้แก่ ขบวนการเชื่อม GTAW ขบวนการเชื่อม PAW ขบวนการเชื่อม LBW ขบวนการเชื่อม EBW ด้วยเพราะขบวนการเชื่อมดังกล่าวนี้จะเกิดบ่อหลอมละลายจากการอาร์กที่เล็กและแคบ ที่สำคัญความร้อนจะกระทบต่อบริเวณรอบข้างของแนวเชื่อมน้อย

2. การควบคุมโดยการลดปริมาณคาร์บอน เป็นวิธีการค่อนข้างตรงประเด็นที่สามารถลดได้โดยตรงเพราะถ้าปริมาณคาร์บอนน้อยหรือต่ำโครเมียมก็ไม่สามารถรวมตัวเกิดเป็นคาร์ไบด์ได้ ซึ่งสามารถทำได้โดยการลวดเชื่อมเติมที่มีคาร์บอนต่ำ เช่น เกรด304L 316L หรือ 309L เป็นต้น หรือเลือก

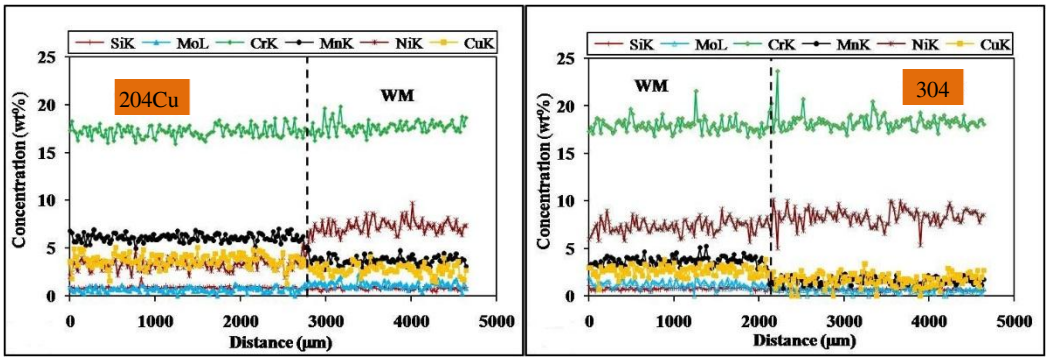
ลวดเชื่อมที่มีธาตุผสมพิเศษที่มีความไวต่อการรวมตัวกับธาตุคาร์บอนได้เร็วกว่าธาตุโครเมียม เช่น ธาตุไทเทเนียม (Ti) ไนโอเบียม (Nb) เช่น เกรด 347 หรือ 321 ธาตุเหล่านี้จะทำหน้าที่ไปรวมตัวกับคาร์บอนแทนโครเมียม จะได้เป็นสารประกอบไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) หรือไนโอเบียมคาร์ไบด์ (NbC) เป็นต้น ทำให้ไม่เกิดปรากฏการณ์สูญเสียปริมาณของโครเมียมหรือไม่ลดลง

3. การอบสลายคาร์ไบด์ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Solution annealing) เป็นวิธีการสลายโครเมียมคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นแล้วให้โครเมียมกลับสู่สภาพดังเดิม ส่วนใหญ่จะใช้วิธีนี้กับโครเมียมคาร์ไบด์ที่เกิดบริเวณ HAZ ของแนวเชื่อม โดยวิธีการอบให้ความร้อนถึงอุณหภูมิประมาณ 1,050 ^{o}C และอบแช่ไว้เพื่อให้เวลาสำหรับการสลายตัวของคาร์ไบด์ จากนั้นก็ให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วป้องกันการรวมตัวกันอีก วิธีการนี้อาจเรียกว่า PWHT ก็ได้

จากหลักการแนวทางป้องกันหรือลดการคาร์ไบด์จากโครเมียมที่กล่าวมาได้มีการนำวิธีการเหล่านี้ไปทำการวิจัยทดลองกับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกทั้งที่เป็นแบบเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน (Similar welding) และแบบเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน (Dissimilar welding) ซึ่งก็ได้ผลการวิจัยที่เป็นไปตามหลักทฤษฎี ซึ่งอ้างอิงได้จากผลการวิจัยของ Wichan Chuaiphan et al. (2020) ที่ทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติกเกรด AISI 204Cu กับเกรด AISI 304 ด้วยการเลือกใช้ลวดเชื่อมเกรดที่มีคาร์บอนผสมต่ำ คือ ER309L กับ ER316L โดยมีเจตนาที่ต้องการให้เหลือโครเมียมภายในเนื้อเชื่อมมากเพียงพอต่อการป้องกันการกัดกร่อน เพราะเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 204Cu มีโครเมียมผสมต่ำ (17.50 wt%) แต่มีคาร์บอนผสมสูง (0.1%) จากผลการวัดปริมาณโครเมียมในเนื้อเชื่อมเทียบกับในเนื้อโลหะหลัก จะเห็นได้ชัดเจนว่าการเลือกลวดเชื่อมที่มีปริมาณโครเมียมผสมสูงสามารถที่จะใช้นำไปเจือในเนื้อเชื่อมที่มีโครเมียมต่ำได้อย่างสมบูรณ์ของลวดเชื่อมทั้ง ER309L และER316L ดังแสดงผลการตรวจวัดจาก EDS line สแกน ในรูปที่ 9.30 ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าวิธีการป้องกันการสูญเสียโครเมียมที่ไปอยู่ในรูปของคาร์ไบด์ตามขอบเกรนของแนวเชื่อม แล้วทำให้ขอบเกรนพร่องโครเมียมส่งผลทำให้เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรน สามารถป้องกันได้ด้วยการเติมโครเมียมเพิ่มลงไปจากที่ผสมอยู่ในลวดเชื่อม ซึ่งเหมาะสำหรับในกรณีที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดความร้อนจากการอาร์หลอมละลายได้ หรือมีขีดจำกัดในการเลือกขบวนการเชื่อมได้ โดยโครเมียมจะแพร่กระจายเข้าไปอยู่ทั้งในเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ (δ–ferrite) และเฟสออสแทนไนต์ (γ) แต่พบว่าละลายเป็นสารละลายของแข็งได้ในเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ได้มากกว่าเฟสออสเทนไนต์ ด้วยเหตุผลเพราะธาตุโครเมียมมีเสถียรภาพในการเกิดเฟสระบบผลึก BCC ได้ง่ายกว่า FCC ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Wichan Chuaiphan et al. (2020) ดังแสดงผลการทดลองในตารางที่ 9.10 ซึ่งจากผลการทดลองนี้ก็เป็นเหตุผลที่สนับสนุนหลักการที่ว่าถ้าเนื้อเชื่อมมีเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์จำนวนมากก็จะส่งผลลดความต้านทานการกัดกร่อนลง เพราะเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์เป็นตัวที่ดึงเอาโครเมียมไปทำให้ปริมาณโครเมียมที่ขอบเกรนด้านของ γ เกิดการสูญเสียโครเมียมและจะเกิดความอ่อนแอของออกไซด์ฟิล์ม ดังนั้น การเติมโครเมียมเข้าไปขณะเชื่อมจะช่วยทำให้เนื้อเชื่อมคงสมบัติความเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมได้ดี



(ก) การกระจายของธาตุโครเมียมในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวด ER309L



(ข) การกระจายของธาตุโครเมียมในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวด ER316L

รูปที่ 9.30 ผลการตรวจวัดธาตุผสมจากลวดเชื่อมที่เจือในเนื้อเชื่อมด้วย EDS line สแกน

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of JMR&T Vol. 9, No. 3, pp. 5174–1906, 5183, 2020

ตารางที่ 9.10 การละลายของโครเมียมและธาตุอื่น ๆ ในเฟส δเฟส γ ในเนื้อเชื่อม

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of JMR&T Vol. 9, No. 3, pp. 5174–1906, 5183, 2020

แนวเชื่อม	เฟสโครงสร้าง	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)		
		Cr	Ni	Mn
ลวดเชื่อม ER309L	δ–Ferrite	22.11	8.84	1.28
	γ –Austenite	18.27	11.63	4.42
ลวดเชื่อม ER309L	δ–Ferrite	21.48	7.08	1.41
	γ –Austenite	18.31	10.94	4.24

9.3 อิทธิพลของแก๊สเชื่อมปกคลุม (Effect of shielding gases)

การเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกสามารถเชื่อมได้กับทุกขบวนการเชื่อมเนื่องจากพื้นฐานของโลหะชนิดนี้เป็นโลหะเหล็กกล้า (Steel) โดยแก๊สที่ใช้สำหรับทำหน้าที่ปกคลุมแนวเชื่อมก็

เป็นไปตามชนิดขององค์ประกอบของขบวนการเชื่อมที่เลือกใช้ แก๊สปกคลุมนอกจากทำหน้าที่หลักในการป้องกันบ่อหลอมละลายจากบรรยากาศภายนอกแล้ว ยังส่งผลกระทบต่อสมบัติของแนวเชื่อม (Weld properties) คุณภาพของแนวเชื่อม (Weld quality) ส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อม (Weld chemistry) รวมถึงรูปร่างและสีของแนวเชื่อม (Weld color and shape) และผลกระทบด้านอื่น ๆ ที่อาจเกิดได้จากขบวนการเชื่อมแต่ละกรรมวิธี จากประสบการณ์ของผู้เขียนกับการศึกษางานวิจัยพบว่า แก๊สที่ใช้สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกมี 3 จำพวก คือ 1. จำพวกที่เป็นแก๊สเฉื่อย (Inert gas) ใช้ทำหน้าที่ปกป้องบ่อหลอมละลาย (Shielding gas) 2. แก๊สจำพวกแอคทีฟ (Active gas) ใช้ทำหน้าที่เพิ่มประสิทธิภาพของการเชื่อมบางประการตามวัตถุประสงค์ และ 3. แก๊สผสม (Mixtures gas) ที่ผสมกันระหว่าง แก๊สเฉื่อยกับแก๊สแอคทีฟ ซึ่งแก๊สผสมนี้จะทำหน้าที่ตามสมบัติเฉพาะตัวของแก๊สชนิดนั้น โดยการเลือกใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของขบวนการเชื่อมเป็นสำคัญ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. แก๊สเฉื่อย (Inert gas) – แก๊สอาร์กอน (Ar) กับ แก๊สฮีเลียม (He)

หน้าที่หลักคอยปกคลุมบ่อหลอมละลายขณะเชื่อม โดยแก๊สอาร์กอนจะเป็นที่นิยมมากกว่าด้วยเพราะสามารถควบคุมคุณภาพแนวเชื่อมได้ดี มีราคาที่ไม่แพงมากและมีจำหน่ายทั่วไป ส่วนแก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สเฉื่อยที่มีความสามารถเพิ่มค่าความร้อนจากการอาร์กได้สูงกว่าแก๊สอาร์กอน แต่ราคาต้นทุนสูง จะเหมาะกับการเชื่อมที่ต้องการเพิ่มความรวดเร็ว เพราะอาร์กง่ายและสร้างบ่อหลอมละลายได้รวดเร็ว แก๊สทั้งคู่นี้ส่วนใหญ่จะใช้กับขบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม (GTAW) เป็นสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 9.31 ที่ทำการทดลองเชิงเปรียบเทียบโดยการเชื่อมด้วยแก๊สปกคลุมอาร์กอน (Ar) ฮีเลียม (He) และแก๊สผสมทั้งคู่ (Ar + He) จะเห็นได้ว่าการเชื่อมด้วยแก๊สฮีเลียมจะอาร์กสร้างบ่อหลอมละลายได้กว้างและลึกมากกว่าการใช้แก๊สอาร์กอน ส่วนกรณีที่เป็นแก๊สผสมก็แสดงผลที่ชัดเจนว่าอยู่ในเกณฑ์กว้างและลึกปานกลางตามอิทธิพลของแก๊สทั้งคู่ จากผลการวิจัยทดลองสามารถสรุปได้ว่าการใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุมแนวเชื่อมสามารถเลือกใช้ได้ทั้งแบบชนิดบริสุทธิ์ (Pure inert gas) หรือแบบชนิดผสม (Mixture inert gas) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอื่นที่ต้องพิจารณาร่วม เช่น กรณีที่ต้องการเชื่อมโลหะที่มีความหนาต้องการความร้อนในการหลอมละลายลึก หรือกรณีการเชื่อมโลหะบางแต่ต้องการเพิ่มความเร็วในการเชื่อม (Welding speed) ก็ควรเลือกใช้แก๊สฮีเลียมปกคลุมแนวเชื่อม เป็นต้น

แก๊สเฉื่อยที่กล่าวมาข้างต้นจะใช้ในขบวนการเชื่อมที่ปกคลุมทั้งด้านหน้าของแนวเชื่อม (Face weld) และด้านรากของการเชื่อม (Root weld) โดยเฉพาะขบวนการเชื่อมทิกของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกต้องใช้แก๊สปกคลุมด้านรากที่เรียกว่า “Backing gas” ซึ่งสามารถเลือกใช้แก๊สปกคลุมชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกับด้านหน้าก็ได้ ส่วนใหญ่ใช้แก๊สอาร์กอนเพราะประหยัดและบ่อหลอมละลายด้านรากมีขนาดเล็กโอกาสที่อากาศภายนอกเข้าไปรวมตัวจะน้อยกว่า



(ก) แนวเชื่อมแก๊สอาร์กอน (Ar)



(ข) แนวเชื่อมแก๊สฮีเลียม (He)



(ค) แนวเชื่อมแก๊สผสม Ar + He

รูปที่ 9.31 ขนาดแนวเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกใช้แก๊สปกคลุมต่างกันด้วยขบวนการเชื่อมทิก (TIG)
ที่มา : I. Bitharas et al. Journal of Materials and Design Vol. 91, pp. 424–431, 2016

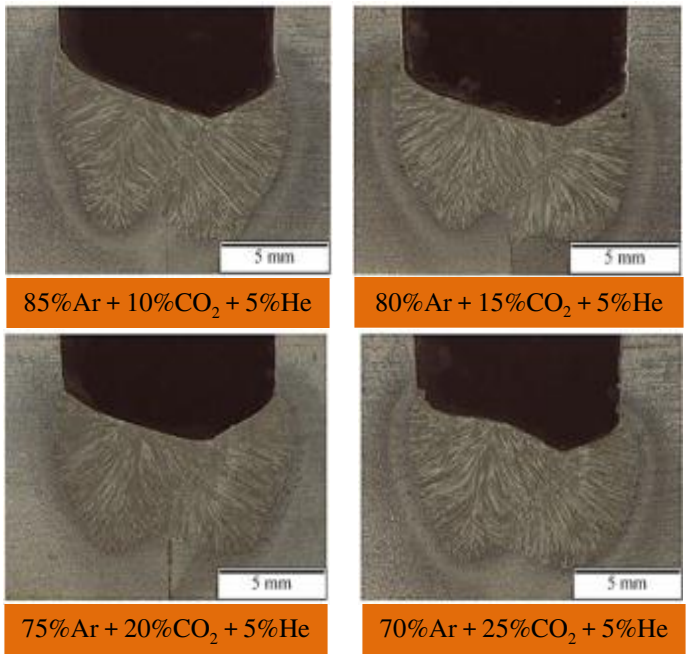
2. แก๊สแอคทีฟ (Active gas)– แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

ขบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW) โดยปกติใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทำหน้าที่เป็นแก๊สปกคลุมแนวเชื่อมจนมีการเรียกขบวนการเชื่อมนี้ว่า การเชื่อมแก๊ส CO_2 โดยสมบัติเฉพาะตัวของแก๊สชนิดนี้ที่ระดับอุณหภูมิห้องมีสภาพเป็นแก๊สเฉื่อย (Inert) ที่มีน้ำหนักมากกว่าอากาศประมาณ 1.5 เท่าจึงสามารถใช้ปกคลุมบ่อหลอมละลายได้ดี ในขณะเดียวกันก็เป็นแก๊สที่สมบัติที่เป็นแอคทีฟแก๊ส (Active) เมื่อได้รับความร้อนจากการอาร์ก จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า กรณีที่ใช้แก๊ส CO_2 ปกคลุมเพียงชนิดเดียวผิวของแนวเชื่อมมักเกิดออกไซด์มาก ด้วยเพราะตัวของแก๊ส CO_2 มีสมบัติที่ไม่ได้เป็นแก๊สเฉื่อยที่สมบูรณ์เหมือนกับแก๊สอาร์กอน โอกาสที่ออกซิเจนจากภายนอกจะเข้าไปก็ง่ายขึ้น ประจวบกับมีออกซิเจนที่แตกตัวออกมาจากแก๊ส CO_2 เองมาร่วมด้วยจึงเป็นเหตุผลที่ทำให้การเกิดออกซิเดชั่นง่ายมากขึ้น จึงต้องใช้เทคนิคการเลือกลวดเชื่อมที่มีธาตุลดออกซิเจนเพื่อเติมลงไปในแนวเชื่อม ลักษณะดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นกับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน ส่วนสำหรับกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเฉพาะประเภทออสเทนนิติกด้วยขบวนการเชื่อม MIG/MAG พบว่าไม่นิยมใช้แก๊ส CO_2 อย่างเดียวมักใช้ผสมกับแก๊สเฉื่อยอื่น ได้แก่ ($Ar + CO_2$) ($Ar + He + CO_2$) ($Ar + O + CO_2$) ($Ar + H + CO_2$) ($Ar + He + O + CO_2$) เป็นต้น ดังตัวอย่างผลการวิจัยของ Xiaoyu Cai et al. (2017) ที่ทำการพิสูจน์ถึงอิทธิพลของแก๊สฮีเลียมที่ผสมลงไปในแก๊สปกคลุมร่วมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สอาร์กอน ($Ar + CO_2 + He$) ดังแสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดของแนวเชื่อมในรูปที่ 9.32 ซึ่งพบว่าแก๊สฮีเลียมที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้ขนาดของแนวเชื่อมโตขึ้น แนวซึมลึกมากขึ้น แต่เมื่อสูงมากเกินไป (25%He) จะเกิดข้อบกพร่องแบบเป็นรอยกัดแหว่ง (Undercut) สำหรับแก๊สผสมปกคลุมแนวเชื่อมด้วยขบวนการเชื่อม MAG ซึ่งจากพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของแก๊สฮีเลียมก็เป็นไปตามเหตุผลที่ว่า แก๊สชนิดนี้ช่วยเพิ่มความร้อนแก่บ่อหลอมละลาย และยังได้ทดลอง

พิสูจน์ถึงอิทธิพลของแก๊ส CO_2 ที่ผสมในปริมาณต่าง ๆ ดังแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของแนวเชื่อมในรูปที่ 9.33 จะเห็นได้ว่าเมื่อผสมแก๊ส CO_2 เพิ่มเข้าไปมากขึ้น



รูปที่ 9.32 อิทธิพลของแก๊สฮีเลียมที่ผสมใน Ar + CO_2 + He ของขบวนการเชื่อม GMAW
ที่มา : Xiaoyu Cai et al. Journal of Materials Processing Technology Vol. 244, pp. 225–230, 2017



รูปที่ 9.33 อิทธิพลของแก๊ส CO_2 ที่ผสมใน Ar + CO_2 + He ของขบวนการเชื่อม GMAW
ที่มา : Xiaoyu Cai et al. Journal of Materials Processing Technology Vol. 244, pp. 225–230, 2017

ขนาดของแนวเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก (น้อยมากอย่างมีนัยสำคัญ) ซึ่งก็สอดคล้องกับทฤษฎีสมบัติของแก๊ส CO_2 ที่จัดอยู่ในกลุ่มที่เป็นแก๊สเฉื่อยมากกว่าที่จะเป็นกลุ่มแก๊สแอคทีฟ ดังนั้นการปล่อยแก๊ส CO_2 ออกมาปกคลุมแนวเชื่อมมากเกินไปหรือผสมเข้าไปมากเกินไปก็ไม่เกิดประโยชน์ในการสร้างความร้อนมากนักแต่จะเกิดประโยชน์ในการทำหน้าที่ปกป้องบ่อหลอมละลายจากบรรยากาศภายนอกได้ดีมากยิ่งขึ้น โดยแนะนำให้ควบคุมการไหลของแก๊สไม่ควรเกิน 25 ลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง

นอกจากนี้การผสมแก๊ส CO_2 กับแก๊สชนิดอื่นก็เพราะลำพังแก๊สชนิดนี้ไม่สามารถถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละอองได้ (Spray transfer) ซึ่งมีความจำเป็นสำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งแก๊สผสมที่นิยมใช้จะเป็นแก๊สที่ผสม Ar + O + CO_2 ที่เรียกกันว่า แก๊สผสม ยูนิเวอร์แซล (Universal mixture gas) ซึ่งสามารถเชื่อมที่ถ่ายโอนน้ำโลหะได้ทุกแบบ (แบบละออง แบบลัดวงจร แบบหยดขนาดใหญ่ และแบบพัลส์) โดยรูปแบบการถ่ายโอนน้ำโลหะจะสัมพันธ์กับแก๊สผสมที่ปกคลุมดังแสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 9.34 โดยเฉพาะกรณีที่ส่วนผสม Ar + 1–3%O + 5–10%CO_2 ตัวออกซิเจนเป็นตัวช่วยให้เกิดการอาร์กที่สม่ำเสมอและเกิดการถ่ายโอนเป็นแบบละอองได้เป็นอย่างดี

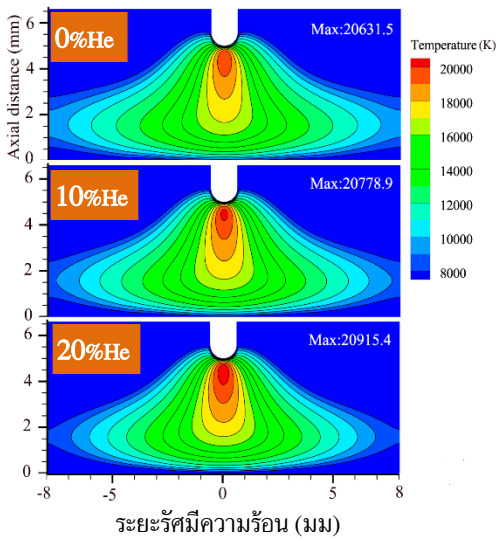


แบบลัดวงจร 100%CO_2 แบบละออง 90%Ar+10CO_2 แบบละออง 98%Ar+2O_2

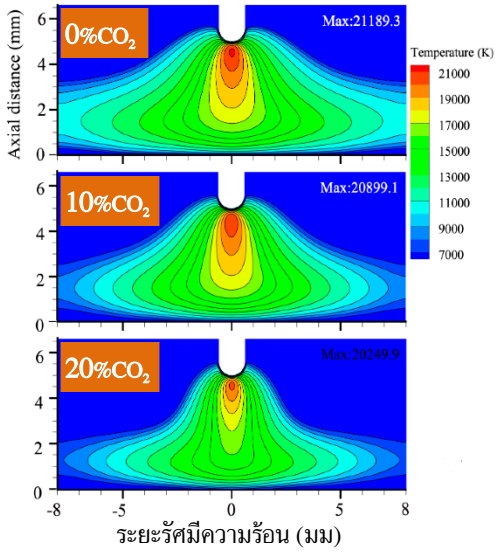
รูปที่ 9.34 ความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะกับแก๊สผสมในการเชื่อม GMAW

ที่มา : Australian Stainless Steel Development Association, 2012

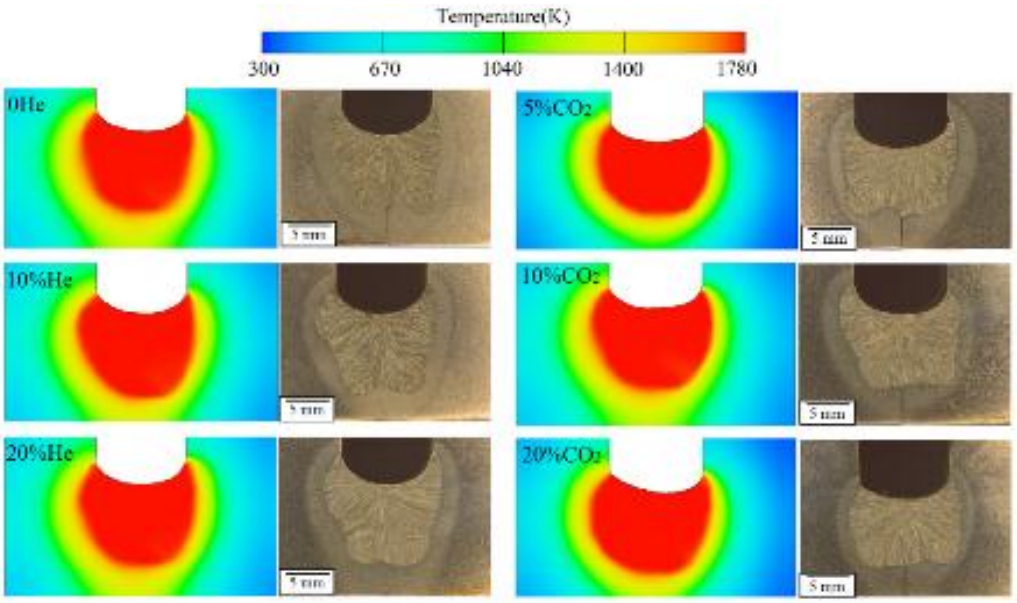
นอกจากเหตุผลของกลไกรูปแบบการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะของลวดเชื่อม ยังมีเหตุผลอื่น ๆ ที่ต้องผสมก็เพื่อวัตถุประสงค์บางประการในขบวนการเชื่อม เช่น เพิ่มประสิทธิภาพในการเชื่อม ควบคุมสมบัติของเนื้อเชื่อม รวมถึงการควบคุมการเกิดข้อบกพร่องของแนวเชื่อม ดังผลการวิจัยของ Xiaoyu Cai et al. (2019) ได้พิสูจน์ให้เห็นถึงรูปแบบการแพร่ของความร้อนที่เกิดจากอาร์กภายใต้แก๊สปกคลุมแบบผสมที่แตกต่างกัน โดยการเพิ่มปริมาณแก๊สฮีเลียมที่ผสมร่วมอยู่ภายในแก๊สปกคลุมกับคาร์บอนไดออกไซด์คงที่ (10%) และสมดุลด้วยแก๊สอาร์กอน (Ar + CO_2 + 0, 10, 20%He) ดังผลแสดงในรูปที่ 9.35 (ก) และได้เปรียบเทียบกับการปรับเพิ่มปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกันกับแก๊สฮีเลียมคงที่ (5%) และสมดุลด้วยแก๊สอาร์กอน (Ar + He + 0, 10, 20%CO_2) ดังผลแสดงในรูปที่ 9.35 (ข) ซึ่งเมื่อพิจารณาเชิงเปรียบเทียบเห็นได้ชัดเจนว่าชนิดและสัดส่วนของแก๊สผสมที่ใช้สำหรับการปกคลุมแนวเชื่อมมีอิทธิพลต่อขนาด รูปทรงและคุณภาพของแนวเชื่อม ดังแสดงผลการทดลองเชื่อมชิ้นงานจริงซึ่งได้ลักษณะของแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 9.35 (ค)



(ก) แก๊สผสม Ar + CO_2 + Heที่แตกต่าง



(ข) แก๊สผสม Ar + He + CO_2 ที่แตกต่าง



(ค) ลักษณะรูปทรงของบ่อหลอมละลายและขนาดของแนวเชื่อมจริง

รูปที่ 9.35 การแพร่ของความร้อนจากการอาร์กภายใต้แก๊สผสมปกคลุมที่แตกต่างกัน

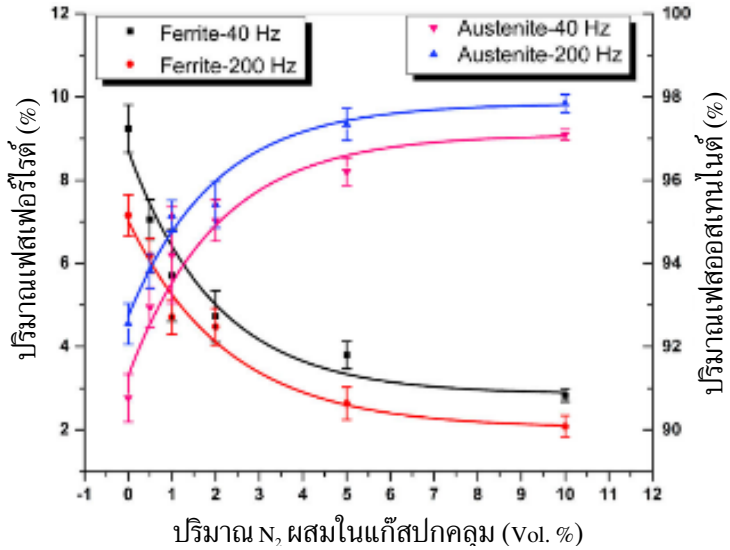
ที่มา : Xiaoyu Cai et al. Journal of MDPI–Materials Vol. 12, 1397, 2019

3. แก๊สแอคทีฟ (Active gas) – ไนโตรเจน (N_2) ไฮโดรเจน (H_2) และ ออกซิเจน (O_2)

แอคทีฟแก๊สกลุ่มนี้เป็นแก๊สที่จะนำไปผสม (Mixture) กับแก๊สเฉื่อยซึ่งอาจจะเป็น Ar หรือ He ที่มีทั้งแบบ 3 ชนิดแก๊สผสม และ 4 ชนิดแก๊สผสม โดยวิธีการผสมแก๊สสามารถใช้เครื่องผสมแก๊ส (Gas mixers) ในสถานที่เชื่อมวิธีนี้มีข้อดีที่สามารถปรับลดหรือเพิ่มสัดส่วนผสมของแก๊สได้ตามต้องการ แต่

แก๊สที่ผสมได้อาจไม่เป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอ ส่วนวิธีใช้แก๊สผสมแบบสำเร็จรูปที่ผ่านผสมเสร็จแล้วบรรจุถัง แก๊สถังผสมแบบนี้มีความเป็นเนื้อเดียวและสม่ำเสมอดีมากแต่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนส่วนผสมได้ตามต้องการ อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติก็สามารถสั่งผลิตแก๊สสำเร็จรูปได้ตามต้องการของผู้ใช้ได้ ซึ่งทั้งสองวิธีมีทั้งข้อดีและข้อด้อยการเลือกใช้ก็พิจารณาตามความเหมาะสมร่วมกับปัจจัยอื่น ๆ ในการเชื่อม

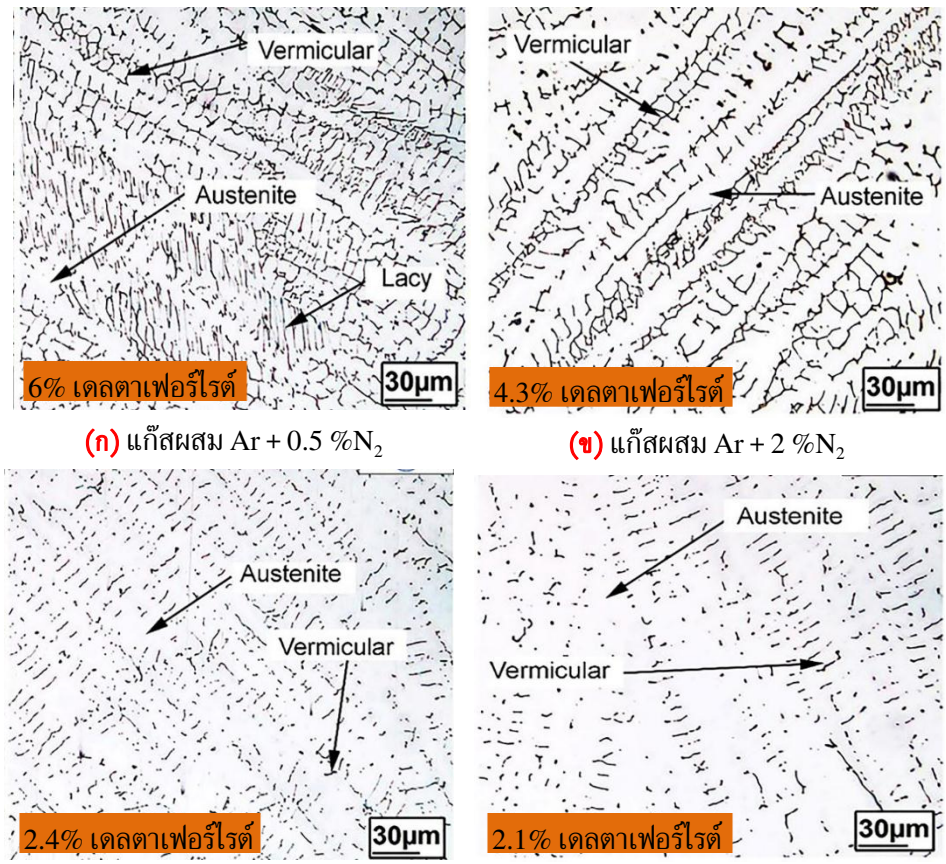
● แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen : N_2) เป็นแอคทีฟแก๊สที่ใช้ผสมร่วมกับแก๊สเฉื่อย เช่น ($Ar + N_2$) ($Ar + N_2 + H_2$) ($Ar + He + CO_2 + N_2$) สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกการผสมแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมมีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการควบคุมการเกิดปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ด้วยเหตุผลเพราะธาตุไนโตรเจนมีเสถียรภาพในการรวมกับระบบผลึก FCC ได้ดีกว่า BCC จึงเป็นตัวช่วยในการฟอร์มตัวเฟสออสเทนไนต์ได้มากขึ้นในขณะเย็นตัว ซึ่งก็เป็นการลดโอกาสของการเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อม โดยสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Wichan Chuaiphan et al. (2012) ที่ทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กับ AISI 316L ที่พบว่า การเพิ่มไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนสามารถช่วยลดปริมาณเดลตาเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการวิจัยพิสูจน์ของ Saeed Hosseinzadeh et al. (2021) ที่เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกเกรด AISI 304L หนา 4 มม. ด้วยขบวนการเชื่อมแบบทิกพัลส (TIG−Pulsed) พบว่าสัดส่วนการเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อปริมาณไนโตรเจนที่ละลายเข้าในในบ่อหลอมละลายได้มากขึ้น ดังแสดงสัดส่วนเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์กับเฟสออสเทนไนต์ที่เปลี่ยนแปลงจากอิทธิพลของการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สผสมปกคลุมในรูปที่ 9.36 และแสดงลักษณะของโครง



รูปที่ 9.36 การควบคุมของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ด้วยแก๊สไนโตรเจน

ที่มา : Saeed Hosseinzadeh et al. Journal of Trans. Indian Inst. Met.−IIM, 2021

สร้างจุลภาคที่มีสัดส่วนการลดลงของเดลตาเฟอร์ไรต์ในรูปที่ 9.37 โดยรูปทรงของเดลตาเฟอร์ไรต์เป็นแบบลักษณะเส้น ๆ จึงเรียกว่า “Vermicular” อยู่กระจายไปทั่ว และมีปริมาณที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อจำนวนของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมเพิ่มขึ้น ซึ่งพิจารณาโครงสร้างร่วมกับเส้นกราฟที่ลดลงในรูปที่ 3.36 เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อผสมไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมที่เพิ่มสูงขึ้นมากสัดส่วนการลดลงของเดลตาเฟอร์ไรต์มีแนวโน้มคงที่ เหตุผลเป็นเพราะในทางโลหะวิทยาไนโตรเจนสามารถละลายได้ในเนื้อโลหะเหล็กในปริมาณจำกัดและละลายได้ไม่มาก ดังนั้น เมื่อไนโตรเจนมีขอบเขตของการละลายที่จำกัด การควบคุมให้เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์หมดไปก็เป็นเรื่องที่มีขอบเขตที่จำกัดเช่นเดียวกัน ในทางปฏิบัติจึงควรผสมแก๊สไนโตรเจนเท่าที่น้ำโลหะของบ่อหลอมที่สามารถละลายได้ ผสมมากเกินไปก็ไม่เกิดประโยชน์ และยังอาจก่อให้เกิดข้อบกพร่องบางอย่างกับแนวเชื่อมได้



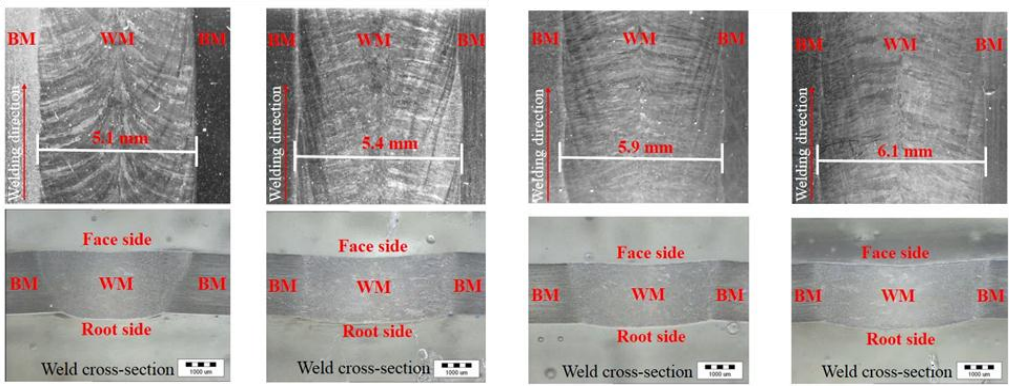
(ก) แก๊สผสม Ar + 0.5 %N_2 **(ข)** แก๊สผสม Ar + 2 %N_2

(ค) แก๊สผสม Ar + 5 %N_2 **(ง)** แก๊สผสม Ar + 10 %N_2

รูปที่ 9.37 ปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่ลดลงด้วยแก๊สไนโตรเจนจากแก๊สปกคลุม

ที่มา : Saeed Hosseinzadeh et al. Journal of Trans. Indian Inst. Met.–IIM, 2021

● แก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen : H_2) เป็นแอคทีฟแก๊สที่ใช้ผสมร่วมกับแก๊สเฉื่อยได้ทั้งแก๊สอาร์กอนและแก๊สฮีเลียม เช่น (Ar + H_2) (Ar + H_2 +CO_2) สมบัติเด่นของแก๊สไฮโดรเจนให้ความร้อนสูง จึงเหมาะที่จะผสมเพื่อเพิ่มความร้อนให้กับบ่อหลอมละลาย ช่วยให้น้ำโลหะไหลตัวได้ดี และเป็นแก๊สที่จับตัวกับออกซิเจนช่วยลดการเกิดออกไซด์ แต่มีน้ำหนักที่เบากว่าอากาศจึงต้องผสมร่วมกับแก๊สเฉื่อย สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกแก๊สไฮโดรเจนจะผสมกับแก๊สอาร์กอน ดังเช่น การวิจัยทดลองของ Wichan Chuaiphan et al. (2020) โดยมีจุดประสงค์ต้องการใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นตัวเสริมค่าความร้อนให้กับบ่อหลอมละลายขณะอาร์ก เพื่อต้องการเพิ่มความเร็วในการเชื่อม (Welding speed) ให้สูงขึ้น โดยทดลองผสมแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สอาร์กอนที่ปริมาณ 1 %H_2, 3%H_2 และ 5%H_2 พบว่า สามารถเพิ่มความเร็วในการเชื่อมได้สูงขึ้นตามปริมาณการเพิ่มของแก๊สไฮโดรเจน ที่ 3.0 มม/วินาที 3.5 มม/วินาที และ 4.0 มม/วินาที ตามลำดับ โดยที่ค่าความร้อนที่ป้อนเข้า (Heat input) ที่ได้จากจากการคำนวณซึ่งลดลงที่ 0.5 kJ/mm, 0.37 kJ/mm และ 0.26 kJ/mm ตามลำดับ ซึ่งสรุปได้ว่าแก๊สไฮโดรเจนที่ผสมอยู่ในแก๊สปกคลุมสามารถช่วยเพิ่มค่าพลังความร้อนให้แก่บ่อหลอมละลายได้เป็นอย่างดี แต่พบว่า เมื่อปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มสูงขึ้นบ่อหลอมละลายจะมีแรงดันอาร์กเกิดขึ้นจากอิทธิพลของไฮโดรเจนมีผลทำให้น้ำโลหะถูกดันสู่ด้านล่าง ผิวด้านบนของแนวเชื่อมจะยุบตัวเว้าลง ส่วนผิวแนวเชื่อมด้านล่างก็จะนูนออก ซึ่งในขณะเดียวกันแนวโน้มขนาดความกว้างแนวเชื่อมก็กว้างขึ้น ดังแสดงลักษณะของแนวเชื่อมในรูปที่ 9.38 ดังนั้นจึงต้องค่าปริมาณที่เหมาะสมของแก๊สผสมไฮโดรเจน



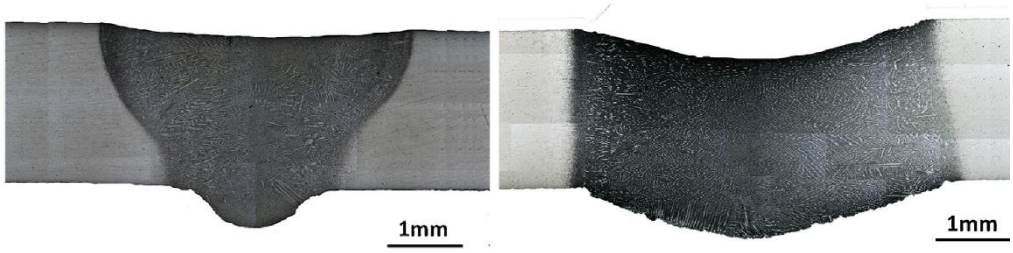
(ก) Ar + 0 %H_2 (ข) Ar + 1 %H_2 (ค) Ar + 3 %H_2 (ง) Ar + 5 %H_2

รูปที่ 9.38 ความกว้างที่เพิ่มขึ้นของแนวเชื่อมด้วยแก๊สไฮโดรเจนจากแก๊สปกคลุม

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Advanced Joining Processes, Vol. 1, 2020

นอกจากนี้ยังมีผลการวิจัยของ Anbarasan N. et al. (2019) ที่สอดคล้องกันกับผลวิจัยข้างต้นถึงอิทธิพลของแก๊สไฮโดรเจนที่มีผลต่อรูปทรงของแนวเชื่อม โดยได้ทดลองเปรียบเทียบเชื่อมโลหะเหล็กกล้าผสมโครเมียมสูงหนา 2 มม ระหว่างใช้แก๊สปกคลุม 100%Ar กับแก๊สผสม 95%Ar + 5% H_2

พบว่าแนวเชื่อมที่ใช้แก๊สผสมเกิดการเว้าของแนวเชื่อมด้านบนและนูนในแนวเชื่อมด้านล่างอย่างชัดเจน ดังแสดงภาพหน้าตัดของแนวเชื่อมในรูปที่ 9.39



(ก) แก๊สปกคลุม 100%Ar **(ข)** แก๊สปกคลุม 95%Ar + 5%H_2

รูปที่ 9.39 อิทธิพลของแก๊สไฮโดรเจนจากแก๊สปกคลุมต่อรูปร่างของแนวเชื่อม
ที่มา : Anbarasan N. et al. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 263, 2019

● แก๊สออกซิเจน (Oxygen : O_2) เป็นแก๊สประเภทแอคทีฟที่มีประโยชน์ต่อขบวนการเชื่อม โดยวิธีการใช้งานต้องนำไปผสมร่วมกับแก๊สเฉื่อยอื่น ๆ เพื่อนำไปเป็นแก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลายขณะเชื่อม สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมจะใช้แก๊สเฉื่อยอาร์กอนผสมเป็นหลัก เช่น Ar +O_2 และ Ar +CO_2 + O_2 โดยสัดส่วนผสมของแก๊สออกซิเจนที่ผสมจะขึ้นอยู่กับ ขบวนการเชื่อม ชนิดและความหนาของโลหะชิ้นงาน และที่สำคัญรูปแบบการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะของขบวนการเชื่อม GMAW ซึ่งบทบาทของแก๊สออกซิเจนที่ผสมร่วมอยู่กับแก๊สอาร์กอนในแก๊สปกคลุม ขึ้นอยู่กับระดับปริมาณที่ผสม กล่าวคือ ถ้าผสมในปริมาณที่น้อย จะช่วยให้การอาร์กสม่ำเสมอ ช่วยเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าในการอาร์ก ช่วยลดฟองอากาศ และควบคุมการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะให้สม่ำเสมอ แต่ถ้าผสมในสัดส่วนปริมาณที่มากขึ้นก็จะเกิดข้อดีบางประการและมีข้อด้อยเพิ่มขึ้น เช่น 95%Ar + 5%O_2 ช่วยให้น้ำโลหะไหลตัวดี สร้างบ่อหลอมได้ง่าย เชื่อมได้รวดเร็ว แต่กระแสไฟฟ้าของการถ่ายโอนน้ำโลหะต่ำลง เหมาะสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนแต่ไม่เหมาะกับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมจะผสมที่ 99%Ar + 1%O_2 หรือ 98%Ar + 2%O_2 เป็นต้น

นอกจากนี้แก๊สออกซิเจนมักพบในรูปแบบที่ผสมแบบแก๊สสามชนิด คือผสมระหว่าง Ar + O_2 + CO_2 แก๊สผสมสูตรนี้มีความโดดเด่นด้านการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะ ซึ่งสามารถถ่ายโอนได้ทั้งแบบละอองแบบลัดวงจร แบบหยดขนาดใหญ่ และแบบพัลส์ ตัวอย่างเช่น Ar + 1–3%O_2 + 5–10%CO_2 สูตรผสมนี้เหมาะสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าทุกชนิด โดยเฉพาะเหล็กกล้าไร้สนิมเพราะสามารถสร้างรูปแบบการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละอองได้ดี ในบางครั้งก็มีแก๊สผสมพิเศษสำหรับการเชื่อมผอกผิวเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิมจะใช้แก๊สผสม Ar + He + O_2 หรือบางครั้งที่เชื่อมโลหะหนาต้องการเติมเนื้อลวดเชื่อมในปริมาณมากจะใช้แก๊สผสมแบบแก๊สสี่ชนิด คือ ผสมระหว่าง Ar + He + O_2 + CO_2 ซึ่งมักเรียกแก๊สผสมแบบนี้ว่า “Quad Mixture” เหมาะทั้งเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำ

9.4 สมบัติทางกลของแนวเชื่อม (Mechanical properties of weldmemts)

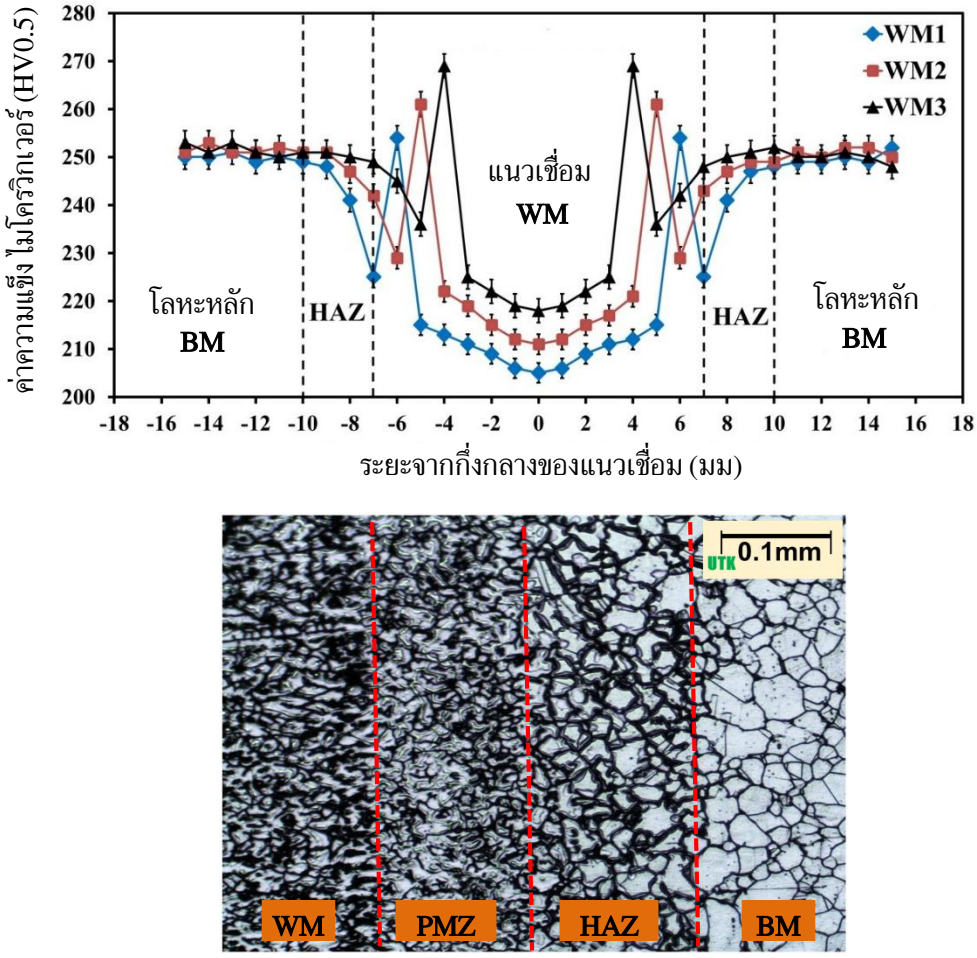
การเชื่อมแบบหลอมละลายเปรียบได้กับการหล่อโลหะ (Metal casting) ที่เป็นการทำให้โลหะหลอมละลายเป็นของเหลวแล้วปล่อยให้เย็นตัวกลับสู่สภาพเดิม ขบวนการเย็นตัวทำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ไม่เหมือนเดิม หรืออาจจะเรียกว่าเกิดเป็นโครงสร้างใหม่ ซึ่งสมบัติก็แตกต่างไปจากเดิมโดยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของการเชื่อม การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกก็เช่นเดียวกัน เนื้อเชื่อมที่ได้หลังจากการเชื่อมก็จะแตกต่างกันบนพื้นฐานปัจจัยที่ต่างกัน โดยเฉพาะสมบัติทางกลที่สำคัญมากสำหรับการประกอบโลหะด้วยขบวนการเชื่อม ดังที่จะได้กล่าวถึงในแต่ละด้านดังนี้

1. สมบัติด้านความแข็ง (Hardness properties) เป็นสมบัติทางกลพื้นฐานที่ต้องทดสอบหาค่าความแข็งเพราะมีผลกระทบโดยตรงต่อความสามารถรับแรงของแนวเชื่อม ในทางปฏิบัติจะทำการตรวจวัดบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการเชื่อมจะประกอบด้วย 3 บริเวณที่สำคัญ คือ บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Metal : WM) บริเวณเนื้อเชื่อมหลอมละลายบางส่วน (Partially Melting Zone : PMZ) บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) และ บริเวณเนื้อโลหะหลัก (Base Metal : WM) โดยบริเวณเหล่านี้จะอยู่ชิดติดกัน โดยปกติแนวเชื่อมที่สมมาตรกัน (Similar welding) สมบัติของแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นทุกบริเวณ (Zone) จะเหมือนกัน แต่ในกรณีที่เชื่อมโลหะต่างชนิดกัน (Dissimilar welding) สมบัติของแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นทุกบริเวณ (Zone) ของทั้งสองข้างจะไม่เหมือนกัน ซึ่งผู้เขียนจะนำผลการวิจัยเชิงทดลองมาแสดงเพื่อพิสูจน์ของการเชื่อมทั้งสองแบบดังนี้

● กรณีการเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน (Similar welding) โดยปกติสมบัติความแข็งของทั้งสองข้างจะต้องเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งพิสูจน์ได้จากผลการวิจัยของ Wichan Chuaiphan et al. (2020) ที่เชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกซีรีย์ 200 เกรด 216 โดยใช้ปริมาณความร้อนป้อนเข้า (Heat input) ต่างกัน ได้ค่าความแข็งของแต่ละบริเวณดังแสดงในรูปที่ 9.40 เมื่อพิจารณาถึงค่าความแข็งที่แบ่งครึ่งแนวเชื่อมจากกึ่งกลางแนวจะเห็นได้ว่ากลไกการเปลี่ยนแปลงความแข็งสมมาตรกันทั้งสองข้าง โดยที่บริเวณแนวเชื่อม (WM) มีค่าความแข็งที่ต่ำกว่าโลหะหลักเหตุผลเพราะเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ขึ้นในเนื้อเชื่อมซึ่งเฟสโครงสร้างนี้มีค่าความแข็งที่ต่ำ แต่บริเวณที่หลอมละลายบางส่วน (PMZ) และบริเวณกระทบร้อน (HAZ) กลับมีค่าความแข็งที่สูงขึ้นเหตุผลเพราะบริเวณนี้มีการตกผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์ ($Cr_{23}C_6$) ในระหว่างการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายแนวเชื่อม

จากผลการทดลองในรูปที่ 9.40 ที่เชื่อมด้วยความเร็วต่างกัน (WM1=1.6, WM2 = 2.7 และ WM3 = 3.9 mm/s) พบว่าเมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้นค่าความแข็งของทุกบริเวณเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เหตุผลที่สนับสนุนผลการทดลองนี้ก็เพราะเมื่อความเร็วเชื่อมสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่าปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าลดลง ที่ 0.78, 0.52 และ 0.39 kJ/mm ส่งผลให้บ่อหลอมละลายเย็นตัวได้เร็วไม่มีเวลามากพอที่เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์จะฟอร์มตัวได้ทัน จึงเกิดสัดส่วนปริมาณเฟอร์ไรต์ในเฟสออสเทนไนต์น้อย ค่าความแข็งที่ได้จึงสูงขึ้น ผลการทดลองนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 201 ด้วยขบวนการเชื่อมทิก แบบวิธีไม่เติมลวดเชื่อม (Autogenous welding)

ของ Wichan Chuaiphan et al. (2014) ที่ต้องการหาขีดความสามารถในการเชื่อมที่ความเร็วสูงสุด ก็พบว่าผลการทดลองของค่าความแข็งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อมดังที่กล่าวมา

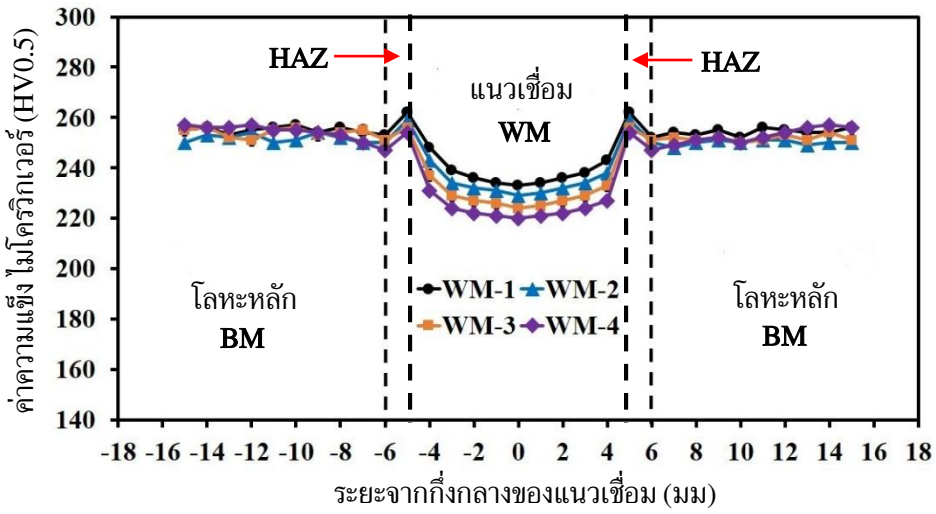


รูปที่ 9.40 ค่าความแข็งแนวเชื่อมของการเชื่อมแบบโลหะชนิดเดียวกัน (Similar welding)

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Advance Joining Processes, Vol. 2, 2020

นอกจากนี้ Wicahn Chuaiphan et al. (2020) ยังได้ทำการพิสูจน์ถึงอิทธิพลของแก๊สปกคลุมที่มีต่อสมบัติทางกลด้านค่าความแข็งของแนวเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมซีรีย์ 200 เกรด 201 ด้วยการประยุกต์ใช้แก๊สผสม Ar + He ปกคลุมแนวเชื่อม โดยพบว่ากลไกของค่าความแข็งแต่ละบริเวณ (Zone) มีรูปแบบของการเกิดคล้ายกันหรือเหมือนกันก็ว่าได้ โดยมีความแตกต่างที่ขนาดของบริเวณหลอมละลายบางส่วน (PMZ) กับบริเวณกระทบร้อน (HAZ) จะแคบและเล็ก ด้วยเป็นเพราะบทบาทของแก๊สฮีเลียมที่สร้างความร้อนให้กับการอาร์กละลายได้สูงและรวดเร็ว ทำให้ความร้อนสะสมในน้ำโลหะเหลว

ต่ำ ไม่ส่งผลกระทบต่อบริเวณกระทบร้อน และที่สำคัญเป็นการลดโอกาสที่จะเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรนได้มาก (อุณหภูมิไม่มากเพียงพอ) ซึ่งสอดรับกับผลการทดสอบที่ค่าความแข็งบริเวณที่จะเกิดโครเมียมคาร์ไบด์สูงกว่ากว่าค่าความแข็งของโลหะหลักเพียงเล็กน้อย ดังแสดงใน รูปที่ 9.41 โดยที่เส้นกราฟความแข็ง WM1=100%Ar, WM2=1%He, WM3=3%He, WM4=5%He



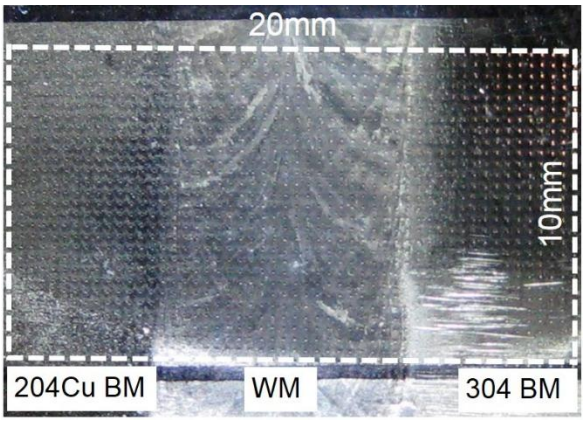
รูปที่ 9.41 ค่าความแข็งแนวเชื่อมที่ใช้แก๊สฮีเลียมช่วยสร้างความร้อนในการอาร์กเชื่อม

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Advance Joining Processes, Vol. 1, 2020

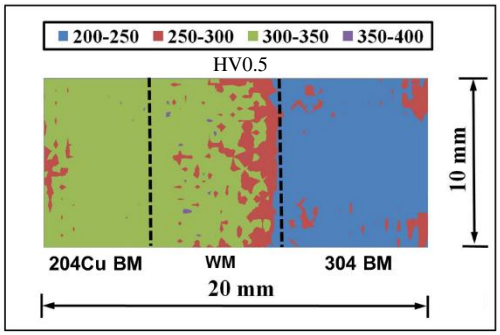
● กรณีการเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน (Dissimilar welding) การเชื่อมโลหะต่างชนิดเป็นการเชื่อมการเชื่อมที่ไม่พึงประสงค์ในขบวนการเชื่อมต่อโลหะ เพราะเป็นการเชื่อมที่ต้องพิจาณาถึงปัจจัยการเชื่อมหลายแง่มุมของโลหะทั้งคู่ที่ต่างชนิดกัน ซึ่งโอกาสที่จะเกิดความไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่องของแนวเชื่อมมีสูงมากแต่ด้วยเพราะเป็นสภาวะที่สามารถหลีกเลี่ยงได้ด้วยเหตุผลต่าง ๆ ของการเชื่อม และด้วยปัจจุบันได้มีการพัฒนาวัสดุโลหะชนิดใหม่ ๆ ออกมาให้เลือกใช้งานที่มากขึ้น ดังนั้นโอกาสที่จะต้องเชื่อมต่อกันของโลหะต่างชนิดก็มีมากขึ้น โดยเฉพาะกลุ่มของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ซีรีย์ 300 ที่ได้มีการพัฒนา ซีรีย์ 200 ขึ้นมาแทนที่กับงานบางประเภทที่สามารถทดแทนกันได้ ซึ่งซีรีย์ 200 มีราคาที่ถูกกว่ามากและเหมาะกับการนำไปใช้งานในอาคาร (In door) ไม่เหมาะกับลักษณะงานภายนอกอาคาร (Out door) ด้วยเพราะมั้งคู่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทเดียวกันและทดแทนกันได้จึงมีลักษณะงานจำนวนมากที่ต้องเชื่อมโลหะคู่นี้เข้าด้วยกัน ผู้เขียนเล็งเห็นว่าการวิจัยทดลองหาความสามารถในการเชื่อมของโลหะต่างชนิดคู่นี้มีความสำคัญและจำเป็น จึงมีความสนใจและได้ทำการวิจัยเชิงทดลองในการเชื่อมบนพื้นฐานของปัจจัยการเชื่อมต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ของแนวเชื่อม

สมบัติทางกลด้านความแข็งของการเชื่อมโลหะต่างชนิดมีมิติที่น่าสนใจ เพราะค่าความแข็งของทั้งสองด้านจะแตกต่างกันบนพื้นฐานที่โลหะหลักต่างชนิดกัน (Dissimilar base metal) ดังงานวิจัยที่

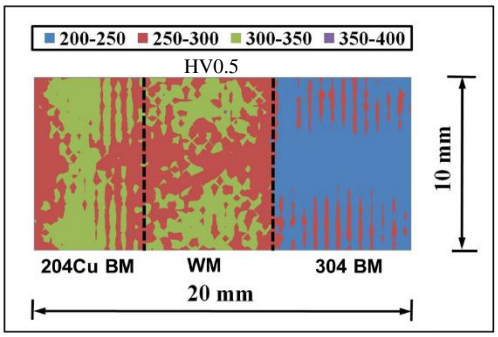
แผยแผร่ของ Wichan Chuaiphan et al. (2020) ที่ทำการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 204Cu กับ เกรด 304 ด้วยการเลือกใช้ลวดเชื่อมที่เน้นคาร์บอนต่ำ คือ ER309L กับ ER316L ทำการวัดค่าความแข็ง ด้วยวิธีแบบแผนที่ (Micro–hardness mapping) ดังแสดงในรูปที่ 9.42 ซึ่งเป็นวิธีการวัดความแข็งที่สามารถเห็นถึงการกระจายตัวของความแข็งแต่ละพื้นที่อย่างละเอียด เหมาะสำหรับการทดสอบแนวเชื่อมที่ต่างชนิด โดยเฉพาะการหลอมละลายที่ผสมผสานกันของส่วนผสมทางเคมีที่สามารถเห็นได้จากผลความแข็งแบบแผนที่ จากผลการทดสอบบริเวณเนื้อเชื่อม (WM) พบว่าค่าความแข็งไม่สม่ำเสมอเท่ากันทุกบริเวณ โดยค่าความแข็งจะได้รับอิทธิพลจากส่วนผสมทางเคมีของโลหะหลักด้านนั้น ๆ เป็นสำคัญ ซึ่งก็เป็นปรากฏการณ์ที่ปกติเพราะเนื้อเชื่อมก็จะละลายออกมาจากโลหะของทั้งสองฝั่ง อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถใช้เทคนิคการส่ายหัวเชื่อมเพื่อสร้างกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำโลหะเหลวทั้งสองฝั่งให้ผสมสผานกัน หรือเทคนิคการเชื่อมใด ๆ ที่สามารถกวนน้ำโลหะให้กลมกลืนเป็นเนื้อเดียวกันได้ก้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการเพิ่ม % Dilution ของเนื้อเชื่อมโลหะแบบต่างชนิด



(ก) การวัดค่าความแข็งแบบ Mapping



(ข) ค่าความแข็ง Mapping ER309L

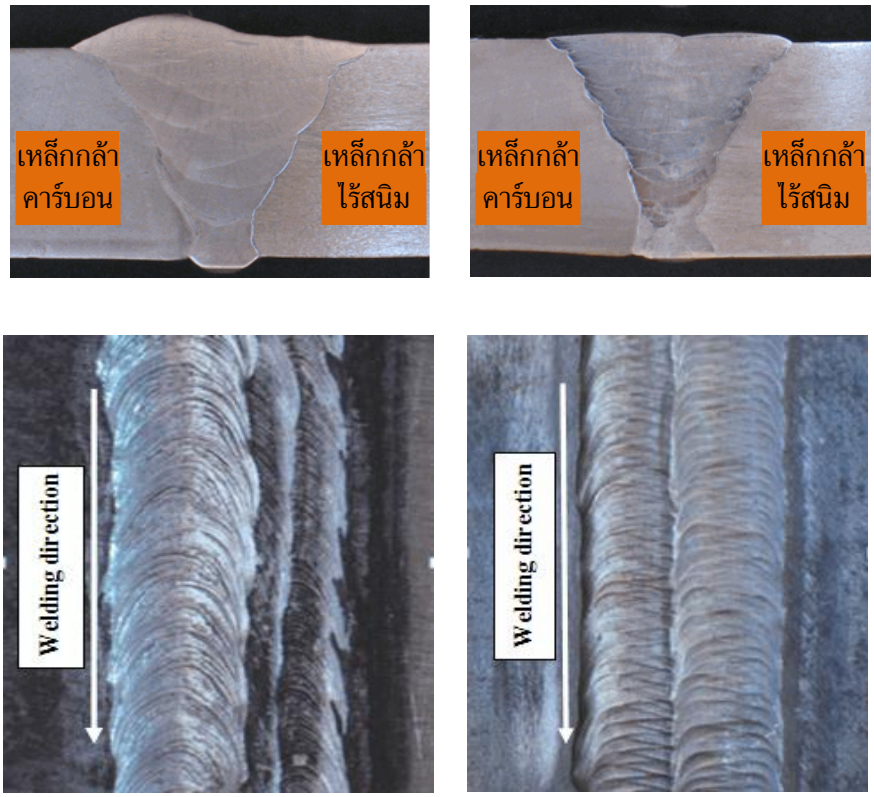


(ค) ค่าความแข็ง Mapping ER316L

รูปที่ 9.42 ค่าความแข็งแนวเชื่อมของการเชื่อมโลหะต่างชนิด (Dissimilar welding)

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of JMR&T, Vol. 9, No. 3, pp. 5174–5183, 2020

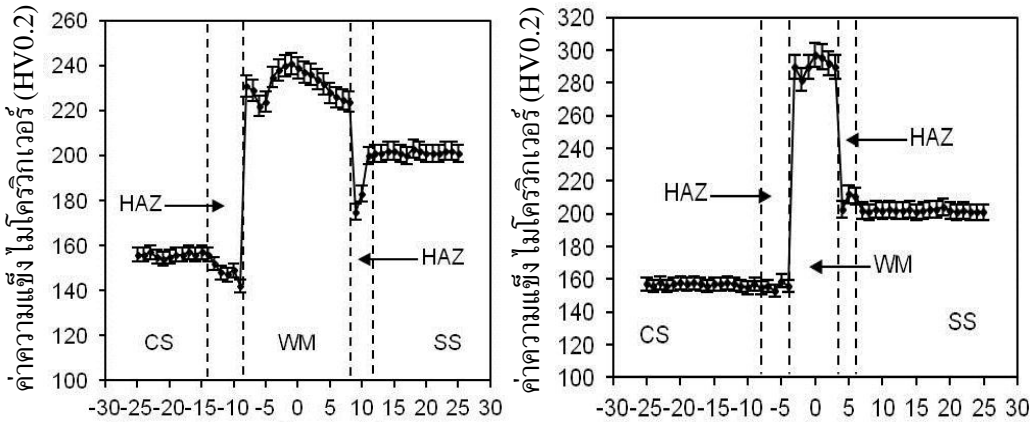
สำหรับกรณีการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic stainless steel) กับเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) เป็นการเชื่อมโลหะต่างชนิดที่มีความแตกต่างกันของส่วนผสมทางเคมี แต่มีพื้นฐานที่เป็นเหล็กล้าเหมือนกันเบื้องต้นจึงสามารถเชื่อมต่อกันได้ จึงมีลักษณะงานที่จำเป็นที่จำต้องเชื่อมโลหะเหล็กคู่นี้เข้าด้วยกันอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จึงได้วิจัยทดลองถึงปัจจัยการเชื่อมเหมาะสม โดย Wichan Chuaiphan et al. (2012) ได้ทำการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กับเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1020 โดยเลือกใช้ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ER316L เพื่อต้องการให้เนื้อเชื่อมเมื่อเย็นตัวจะได้แนวเชื่อมเป็นเหล็กล้าไร้สนิมออสเทนนิติก พร้อมกับการทดลองเปรียบเทียบระหว่างขบวนการเชื่อมที่แต่งกันระหว่างขบวนการเชื่อม SMAW กับ GTAW เพื่อหาความสามารถในเชิงเทคนิคการเชื่อม จากผลการทดลองพบว่าลักษณะกายภาพภายนอกแนวเชื่อมมีลักษณะเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมตลอดทั้งแนวเชื่อมและสามารถเชื่อมได้อย่างสมบูรณ์ของทั้งสองขบวนการเชื่อม โดยมีความแตกต่างกันของรูปร่างแนวเชื่อมซึ่งเป็นไปตามลักษณะเฉพาะของแต่ละขบวนการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 9.43



(ก) ขบวนการเชื่อม SMAW (ข) ขบวนการเชื่อม GTAW

รูปที่ 9.43 รูปร่างแนวเชื่อมของโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน
ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Applied Mechanics and Materials, Vol. 268–270, 2012

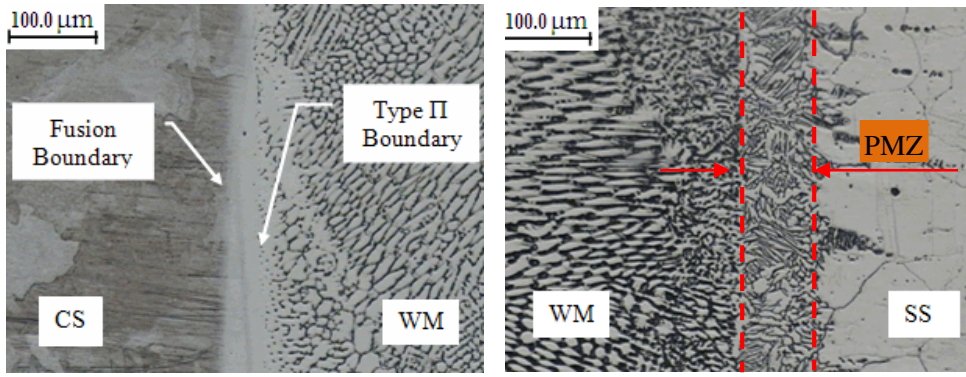
เมื่อทดสอบค่าความแข็งของแนวเชื่อมแบบเปรียบเทียบของแต่ละบริเวณ (Transverse section hardness) ดังแสดงในรูปที่ 9.44 เป็นผลของค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยขบวนการเชื่อม GTAW ซึ่งมีรูปแบบที่เหมือนกันกับขบวนการเชื่อม SMAW พบว่าค่าความแข็งของบริเวณเนื้อเชื่อมสูงกว่าโลหะหลักทั้งคู่ทั้งด้านหน้าและด้านรากของแนวเชื่อม โดยจะสูงกว่าโลหะหลักด้านเหล็กกล้าคาร์บอนค่อนข้างมาก เหตุผลเพราะโครงสร้างเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นเฟสเฟอร์ไรต์ (Low hardness) ส่วนด้านเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเฟสออสเทนไนต์ (High hardness) ความแข็งสูงที่บริเวณเนื้อเชื่อมเพราะเกิดการเย็นตัวของน้ำโลหะที่มีรวดเร็วเกิดเป็นเกรนขนาดเล็กที่ผสมผสานกันระหว่างเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ บนโครงสร้างพื้นฐานของเฟสออสเทนไนต์และมีเฟสซีเมนไทต์ร่วมด้วย ส่วนความแข็งของบริเวณกระทบร้อนจะต่ำกว่าความแข็งของโลหะหลักทั้งสองด้าน โดยด้านโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนบริเวณ HAZ กว้างกว่าด้านโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม โดยเฉพาะบริเวณที่มีการหลอมละลายบางส่วน (PMZ) มีรูปแบบที่แตกต่างกันมากและมีผลต่อค่าความแข็งดังแสดงในรูปที่ 9.45 เหตุผลเกิดจากค่าการเป็นตัวนำความร้อน (Thermal conductivity) ของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมที่สูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งบทบาทของกลไกการถ่ายโอนความร้อนออกไปจากบ่อหลอมละลายผ่านโลหะหลัก มีผลกระทบต่อการรูปแบบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของการเชื่อมโลหะต่างชนิดเป็นอย่างยิ่ง เพราะหมายถึงค่าปริมาณความร้อนสะสมในแต่ละบริเวณของการเชื่อม ถ้าโลหะคู่ที่นำมาเชื่อมมีค่าการนำความร้อนต่างกัน จุดหลอมเหลวเมื่อทำการอาร์กก็ต่างกัน ส่งผลให้อัตราการเย็นตัวก็ต่างกัน โครงสร้างสุดท้ายที่ได้ก็ต่างกัน สมบัติของเนื้อก็ต่างกัน ดังนั้นการที่จะต้องเชื่อมโลหะต่างชนิดกันไม่ใช่เรื่องยาก แต่ต้องศึกษาสมบัติโดยพื้นฐานของโลหะคู่เชื่อม หาค่าปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสมก็สามารถสร้างแนวเชื่อมที่มีประสิทธิภาพได้



(ก) ค่าความแข็งด้าน Face weld **(ข)** ค่าความแข็งด้าน Root weld

รูปที่ 9.44 ค่าความแข็งแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม (SS) กับเหล็กกล้าคาร์บอน (CS)

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Applied Mechanics and Materials, Vol. 268–270, 2012

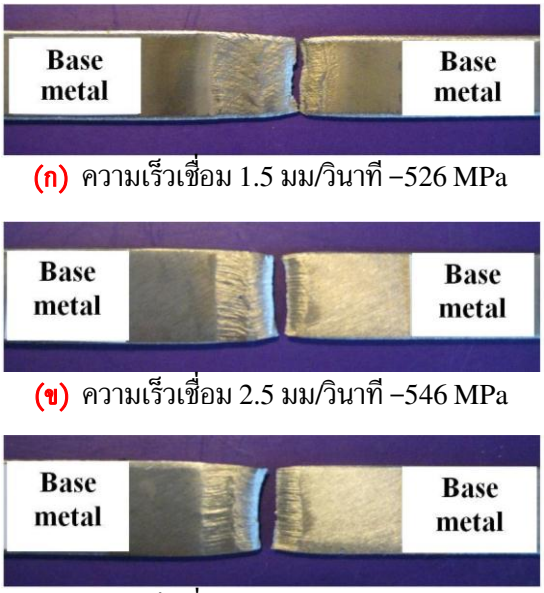


รูปที่ 9.45 บริเวณ PMZ ของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม (SS) กับเหล็กกล้าคาร์บอน (CS)
ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Applied Mechanics and Materials, Vol. 268–270, 2012

2. สมบัติด้านความแข็งแรง (Strength properties) เป็นสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ซึ่งในการทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่แบบทอมตามมาตรฐานมีทั้งดสอบตามยาวของแนวเชื่อมที่เรียกว่า " Longitudinal tensile test" กับ ทดสอบแบบตามขวางของแนวเชื่อมที่เรียกว่า " Transverse tensile test" โดยทั้งสองแบบจะประมวลผลให้ค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมผ่านกราฟความเค้น–ความเครียด (Stress – Strain Curve) และยังสามารถนำผลของรอยขาด (Fracture) ของชิ้นทดสอบมาตรวจสอบและวิเคราะห์ร่วมได้ด้วย โดยเฉพาะการทดสอบแนวเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมโลหะต่างชนิด ซึ่งแนวเชื่อมที่ได้เกิดจากความแตกต่างของโลหะที่นำมาเชื่อมเข้าด้วยกัน แนวโน้มของการที่แนวเชื่อมจะเกิดความไม่สมดุลในแงมุมต่าง ๆ ก็มีมาก จึงต้องมีการตรวจสอบหาสมบัติในหลายด้าน ในที่นี้จะกล่าวถึงความแข็งแรงของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่ผ่านการเชื่อมแบบโลหะชนิดเดียวกัน และเชื่อมแบบโลหะต่างขนิดกัน ทั้งแบบเติมลวดเชื่อมและไม่เติมลวดเชื่อม ดังนี้

● กรณีการเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน (Similar welding) เป็นที่ทราบกันดีว่าการเชื่อมโลหะคู่ที่เป็นชนิดเดียวกันแนวเชื่อมที่ได้จะค่อนข้างเป็นเนื้อเดียวกันทั้งแนวเชื่อม ดังนั้นค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมชนิดนี้ค่อนข้างที่จะเป็นค่าความแข็งที่แท้จริงของเนื้อเชื่อม เพราะเนื้อเชื่อมมีความเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่าเสมอ (Homogeneous weldment) โดยเฉพาะการกระจายตัวของเฟสโครงสร้าง การกระจายตัวของส่วนผสมทางเคมี และความสมดุลของการเย็นตัว ดังผลการวิจัยที่ทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ซีรีย์ 200 เกรด AISI 201 แบบไม่เติมลวดเชื่อม โดยเลือกใช้ความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้น ของทีมวิจัย Wichan Chuaiphan et al. (2014) โดยได้แสดงผลการทดลองไว้ว่า ค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการเชื่อมเร็วขึ้น เหตุผลเพราะบทบาทของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่เกิดในเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ที่เป็นตัวบ่งชี้ค่าความแข็งแรง กล่าวคือ เมื่อความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้นบ่อหลอมละลายเย็นตัวเร็ว เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในออสเทนไนต์เกิดได้น้อย สัดส่วนของเฟสโครงสร้างจึงเป็นออสเทนไนต์ที่มีความแข็งและความแข็งแรงสูงกว่าเฟสเฟอร์ไรต์ และ

รอยแตกหักของชิ้นทดสอบเกิดที่บริเวณเนื้อเชื่อม เพราะเนื้อเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกมีพฤติกรรมที่ค่าความแข็งต่ำกว่าโลหะหลักโดยปกติ จึงส่งผลต่อค่าความต้านแรงดึงที่ต่ำ ดังแสดงลักษณะของรอยแตกหักที่เกิดในบริเวณเนื้อเชื่อม (Fusion zone) ในรูปที่ 9.46



(ก) ความเร็วเชื่อม 1.5 มม/วินาที −526 MPa

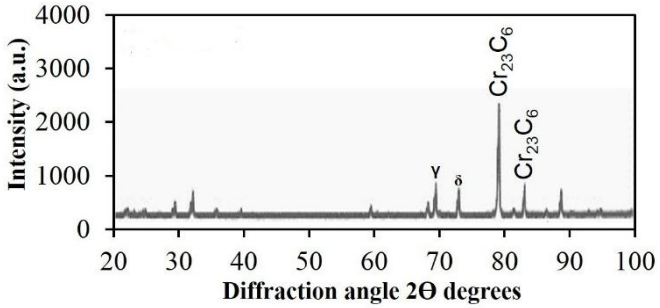
(ข) ความเร็วเชื่อม 2.5 มม/วินาที −546 MPa

(ค) ความเร็วเชื่อม 3.5 มม/วินาที−565 MPa

รูปที่ 9.46 รอยแตกหักของรอยเชื่อมแบบไม่เติมลวดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิตก ซีรีย์ 200 เกรด AISI 201 *ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 214, pp. 402−408, 2014*

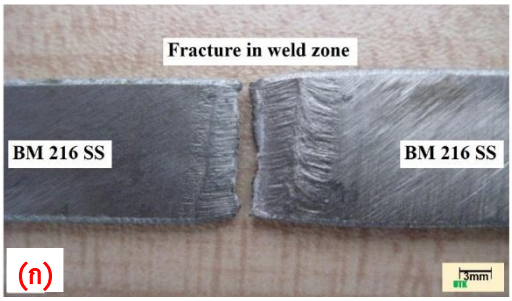
นอกจากผลการทดลองที่กล่าวมา Wichan Chuaiphan et al. (2020) ยังได้ทำการทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ซีรีย์ 200 เกรด AISI 216 ด้วยวิธีการเติมเนื้อลวดเชื่อมเพื่อประเมินผลค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมเพื่อเปรียบเทียบกับแบบไม่เติมลวดเชื่อม พบว่าพฤติกรรมการต้านแรงดึงของแนวเชื่อมเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ เกิดการแตกหักของชิ้นทดสอบที่บริเวณเนื้อเชื่อม ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความแข็งของแนวเชื่อมที่ต่ำกว่าโลหะหลัก และพบว่าค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อมมีค่าความแข็งแรงที่สูงกว่าแบบไม่เติมลวดอย่างชัดเจน เหตุผลเพราะปริมาณของเนื้อเชื่อมมีมากกว่า และยังมีการเติมส่วนผสมทางเคมีเข้าไปโดยเฉพาะธาตุโครเมียมที่เพิ่มมากขึ้นจนเกิดการฟอร์มตัวเป็นโครเมียมคาร์ไบด์มากขึ้นเสริมสมบัติด้านความแข็ง (Hardness) และความแข็งแรงของแนวเชื่อม ดังแสดงผลการตรวจหาเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ ($Cr_{23}C_6$) ด้วยวิธี X−ray diffraction ในรูปที่ 9.47 ที่เกิดขึ้นที่บริเวณหลอมละลายบางส่วน (PMZ) ที่อยู่ติดกับส่วนหลอมละลาย (Fusion area) ซึ่งบริเวณนี้มีเฟสที่ร่วมกันอยู่ของเฟสแกรมมา (γ –Iron) เฟสเดลตา (δ−Iron) โครเมียมคาร์ไบด์ที่ตกผลึกผสมผสานกันส่งผลให้เนื้อโลหะบริเวณนี้ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non−homogeous) โดยมีทั้งเฟสที่แข็งมากและอ่อนมาก ดังนั้นเมื่อได้รับแรงดึงจึงต้านได้น้อย เนื้อโลหะเริ่มเกิดการเคลื่อนตัว บริเวณนี้จึงเป็นจุดเริ่มต้นของการเสียรูปและเกิดการแตกหัก ซึ่งสอดรับกับรอยแตกหักของชิ้นทดสอบที่เกิดบริเวณ

แนวเชื่อมชิดกับแนว PMZ ดังในรูปที่ 9.48 ของทุกระดับความเร็วในการเชื่อมไม่แตกต่างกัน จะมีที่ต่างกันเพียงเฉพาะความกว้างรอยเชื่อมยืดออก กล่าวคือ

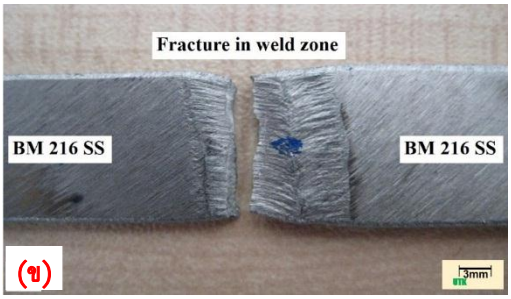


รูปที่ 9.47 การเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิตก ซีรีย์ 200 เกรด AISI 216 ด้วยลวดเชื่อม AISI 316

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Advanced Joining Processes, Vol. 2, 2020



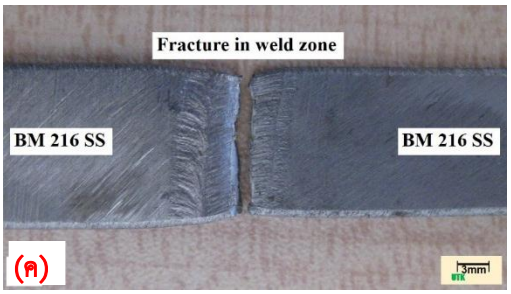
ความเร็วเชื่อม 1.6 มม/วินาที –670 MPa



ความเร็วเชื่อม 2.7 มม/วินาที –684MPa

รูปที่ 9.48 การแตกหักของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิตก ซีรีย์ 200 เกรด AISI 216 ด้วยลวดเชื่อม AISI 316

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Advanced Joining Processes, Vol. 2, 2020

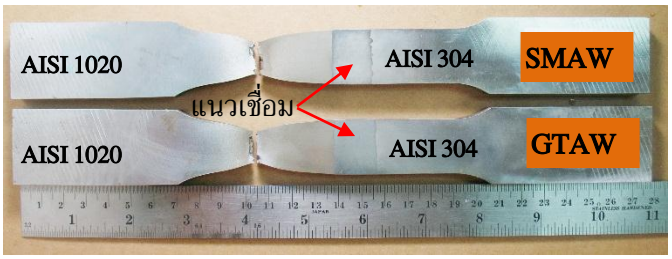


ความเร็วเชื่อม 3.9 มม/วินาที –703 MPa

● กรณีการเชื่อมโลหะต่างชนิด (Dissimilar welding) ความแข็งแรงของแนวเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมวัสดุโลหะต่างชนิดหรือต่างเกรด เป็นความแข็งแรงที่เกิดจากการหลอมรวมของเนื้อโลหะทั้งคู่ ซึ่งประสิทธิภาพของการหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมนั้น ในทางปฏิบัติต้องพิจาณาถึงค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่จะสามารถทำการเชื่อมโลหะทั้งคู่ให้หลอมเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งทำได้ค่อนข้างยาก ยิ่งไปกว่านั้นถ้าโลหะคู่ที่นำมาเชื่อมมีความแตกต่างกันในทางโลหะวิทยา

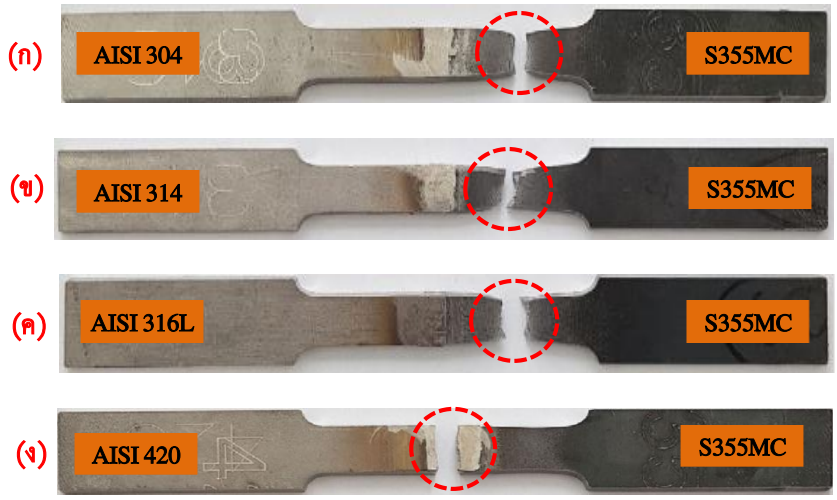
ก็จะยากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงได้มีงานวิจัยเชิงทดลองจำนวนไม่น้อยที่พยายามวิจัยเพื่อสรุปผลออกมาเป็นแนวทางในการกำหนดปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสม โดยจะอธิบายแยกเป็น 2 กรณี ดังนี้

1. กรณีของการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก กับเหล็กกล้าคาร์บอน ดังงานวิจัยเชิงทดลองของ Wichan Chauiphan et al. (2012) ได้ทำการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 กับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1020 ด้วยขบวนการเชื่อม SMAW กับขบวนการเชื่อม GTAW โดยเมื่อนำไปทดสอบรับแรงเค้นดึงเพื่อตรวจสอบระดับค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อม พบว่าชิ้นทดสอบเกิดการแตกหักที่ตำแหน่งของเนื้อโลหะหลักด้านเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งค่าความแข็งแรงที่ได้ไม่ใช่ค่าความแข็งแรงของเนื้อเชื่อม แต่เป็นค่าความแข็งแรงของโลหะหลักเหล็กกล้าคาร์บอน ดังแสดงตำแหน่งรอยแตกหักในรูปที่ 9.49 ผลรอยแตกหักจากการทดสองแรงดึงนี้สอดคล้องกับผลของการวัดค่าความแข็ง (Hardness) ที่แนวเชื่อมมีค่าความแข็งสูงกว่าโลหะหลักเหล็กกล้าคาร์บอน และยังสอดรับกับค่าความแข็งแรง (Ulitmate tensile strength) ของโลหะหลักสภาพจำหน่ายของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ต่ำกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมที่ 262 MPa และ 505 MPa ตามลำดับ ผลการวิจัยทดลองนี้ไม่ใช่ความผิดผลาดของการเลือกปัจจัยการเชื่อมแต่เป็นปรากฏการณ์จริงที่เป็นขีดจำกัดของทดสอบแรงดึงแบบตามขวางแนวเชื่อม (Transverse tensile test)



รูปที่ 9.49 รอยแตกหักชิ้นงานทดสอบการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน *ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Applied Mechanics and Materials, Vol. 268–270, 2012*

นอกจากนี้ยังมีผลการวิจัยของ Saulius Baskutis et al. (2021) ที่ทำการทดลองเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเนนิติกเกรด AISI 304 เกรดAISI 314 และเกรด AISI 316L กับเหล็กกล้าผสม S355MC ด้วยขบวนการเชื่อม MIG ผลการทดสอบแรงดึงเพื่อตรวจสอบวัดค่าความแข็งแรงพบว่า ชิ้นทดสอบของทุกเกรดเหล็กกล้าไร้สนิมที่นำมาเชื่อมเกิดการแตกหักที่บริเวณเนื้อโลหะหลักของด้านเหล็กกล้าคาร์บอนเหมือนกันทุกชิ้น ดังแสดงลักษณะของรอยแตกหักของชิ้นทดสอบในรูปที่ 9.50 ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้เหตุผลอธิบายสนับสนุนผลการทดลองนี้ว่า เกิดจากอิทธิพลด้านสมบัติความแข็งแรงของบริเวณแนวเชื่อม (Weld metals) และบริเวณของโลหะหลักเหล็กกล้าไร้สนิม (ASS base metals) ที่สูงกว่าบริเวณของเหล็กกล้าคาร์บอน เป็นเหตุให้เกิดแตกหักที่ตำแหน่งค่าความแข็งแรงที่ต่ำกว่า ซึ่งเหตุผลและผลการทดลองนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับเหตุผลของการวิเคราะห์ผลการวิจัยทดลองของ Wichan Chuaiphan et al. (2012) ดังนั้นการเชื่อมโลหะต่างชนิดในรูปแบบดังกล่าวต้องใช้วิธีการทดสอบแรงดึงแบบตามยาวของแนวเชื่อม (Longitudinal tensile test)

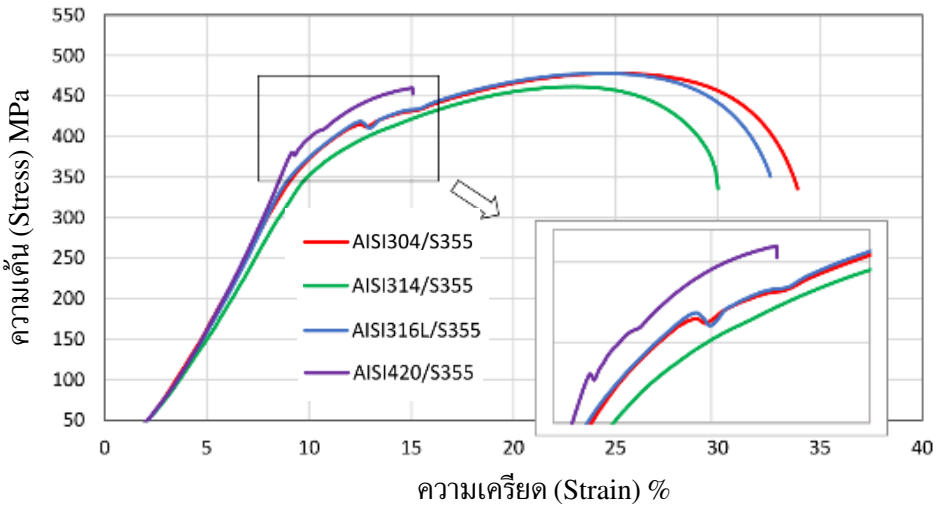


รูปที่ 9.50 รอยแตกหักชิ้นงานทดสอบการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าผสม

ที่มา : Saulius Baskutis et al. Journal of MDPI–Materials. Vol. 14, 6180, 2021

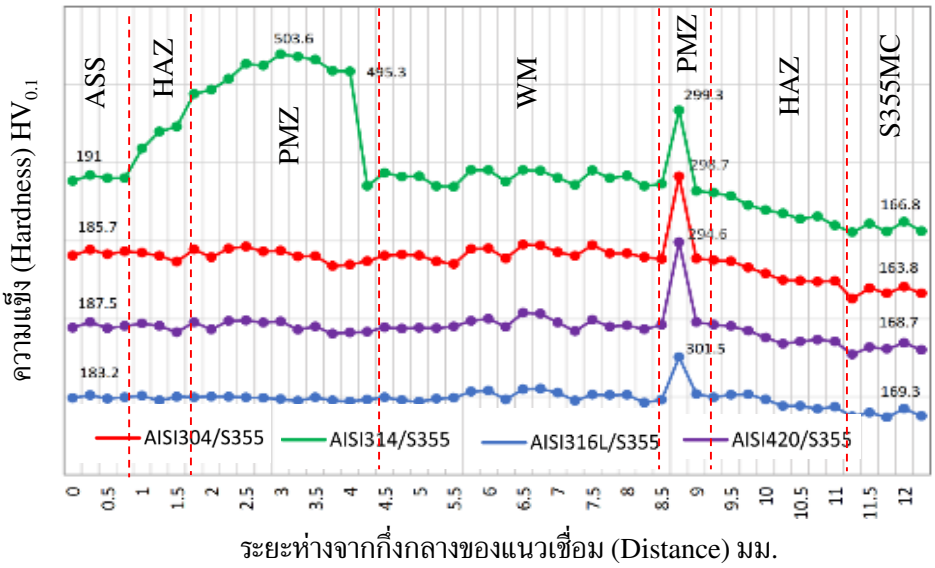
จากผลการทดลองที่เกิดการแตกหักของชิ้นทดสอบบนโลหะหลักด้านที่มีความแข็งแรงต่ำกว่าแนวเชื่อม Saulius Baskutis et al. (2021) ได้ทำการวิจัยทดลองเปรียบเทียบเพิ่มเติมโดยการเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก AISI 420 เชื่อมกับ S355MC แทนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เจตนาต้องการสร้างแนวเชื่อมที่มีความแข็งที่สูงมากขึ้น โดยค่าความแข็งสูงสุดอยู่ที่บริเวณ PMZ ของด้านโลหะหลัก AISI 420 ที่ 500 HV เทียบกับบริเวณเนื้อเชื่อมที่ 191 HV ซึ่งสูงกว่าโลหะหลักเหล็กกล้าผสมที่ความแข็ง 166 HV ผลการทดสอบแรงดึงพบว่าเกิดการแตกหักที่บริเวณแนวเชื่อมที่ชิดติดกับขอบของเนื้อโลหะหลักด้านเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก ซึ่งก็คือบริเวณ PMZ ดังแสดงรูปรอยแตกหักจากการดึงในรูปที่ 9. 50 (ง) เหตุผลเพราะเป็นบริเวณรอยต่อของค่าความที่แตกต่างกันมาก เกิดความไม่สมดุลของการยืดตัวเมื่อรับรับแรงดึง กล่าวคือ จุดที่เนื้อเชื่อมมีความแข็งต่ำจะเคลื่อนตัวได้มาก แต่จุดที่มีความแข็งสูงจะเคลื่อนตัวได้น้อย ความไม่สมดุลหรือความแตกต่างดังกล่าวเป็นบ่อเกิดของจุดเริ่มต้นของรอยแตกร้าวได้ง่าย ดังแสดงเปรียบเทียบกราฟทดสอบแรงดึงในรูปที่ 9.51 ซึ่งแสดงผลที่ชัดเจนว่าเส้นกราฟความเค้น–ความเครียดไม่แตกต่างกัน ของกรณีที่ชิ้นงานทดสอบเกิดการแตกหักที่โลหะหลักเหล็กกล้าความแข็งต่ำ S335MC แต่มีความแตกต่างกรณีชิ้นงานแตกหักที่บริเวณแนวเชื่อม ซึ่งเหตุผลของตำแหน่งที่เกิดรอยแตกหักจะสัมพันธ์กับค่าความแข็งของชิ้นทดสอบ ดังแสดงผลของความแข็งของแต่ละบริเวณดังแสดงในรูปที่ 9.52

จากการนำเสนอตัวอย่างผลการวิจัยการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก กับเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยเหตุเพราะการเชื่อมต่อของโลหะคู่นี้มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแนวเชื่อมค่อนข้างมาก เพื่อเป็นข้อมูลและข้อสังเกตของผู้ปฏิบัติงานการเชื่อมที่ต้องพิจาณาให้ความสำคัญไม่เช่นนั้นจะเกิดความผิดพลาดเสียหายต่อโครงสร้างงานเชื่อมได้



รูปที่ 9.51 กราฟทดสอบแรงดึงแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าผสม

ที่มา : Saulius Baskutis et al. Journal of MDPI–Materials. Vol. 14, 6180, 2021



รูปที่ 9.52 กราฟทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าผสม

ที่มา : Saulius Baskutis et al. Journal of MDPI–Materials. Vol. 14, 6180, 2021

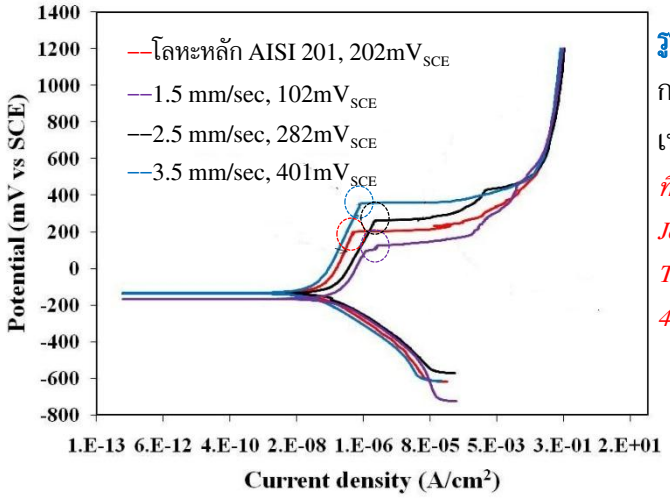
9.5 สมบัติต้านทานการกัดกร่อนของแนวเชื่อม (Corrosion resistance of weldmemts)

โลหะเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นกลุ่มโลหะตระกูลเหล็กที่มีความโดดเด่นด้านความต้านทานต่อการกัดกร่อนหรือทนต่อการเกิดสนิม (Oxide) จึงเป็นวัสดุตัวเลือกที่นิยมเลือกใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ต้องต้านทานต่อการเกิดการกัดกร่อนได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่มีสมบัติพิเศษที่ไม่ดูดติดแม่เหล็ก (Non–Magnetic) ทั้ง ๆ ที่เป็นโลหะกลุ่มเหล็ก จากความสามารถที่ทนต่อการกัดกร่อนและไม่มีปฏิกิริยากับแม่เหล็กของโลหะเหล็กชนิดนี้ จึงมีการใช้งานกันมากมายหลายรูปแบบ

ซึ่งจำนวนงานไม่น้อยที่ต้องนำมาประกอบกันด้วยขบวนการเชื่อม โดยเฉพาะการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าการเชื่อมเป็นการสร้างเนื้อโลหะขึ้นมาใหม่หลังการอาร์กหลอมละลาย และเนื้อโลหะที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไปจากเนื้อโลหะเดิม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงส่งผลกระทบต่อสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม โดยสมบัติที่เป็นปัญหาให้พบเจออยู่เสมอคือ สมบัติความต้านทานการกัดกร่อนที่ลดลง ดังนั้น การเชื่อมเหล็กไร้สนิมออสเทนนิติกจึงให้ความสำคัญกับสมบัติด้านการกัดกร่อนและสมบัติความเป็นแม่เหล็กของแนวเชื่อม จึงได้เกิดการวิจัยทดลองเพื่อพิสูจน์หรือพยากรณ์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะชนิดนี้กันมากมายหลายแง่มุม เช่น แง่มุมของขบวนการเชื่อม ปัจจัยของการเชื่อม วัสดุลวดเชื่อม และองค์ประกอบของการเชื่อมด้านอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง และจากงานวิจัยทดลองของผู้เขียนและคณะได้ทำการศึกษาหาข้อสรุปถึงความแตกต่างของการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกแบบที่เชื่อมโลหะชนิดเดียวกันและแบบที่เชื่อมโลหะต่างชนิดกัน ในสมบัติของออกไซด์ฟิล์ม (Oxide film) ที่สามารถต้านทานต่อการเกิดกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) ดังผลตัวอย่างรายงานการวิจัยของแต่ละชนิดแนวเชื่อมดังต่อไปนี้

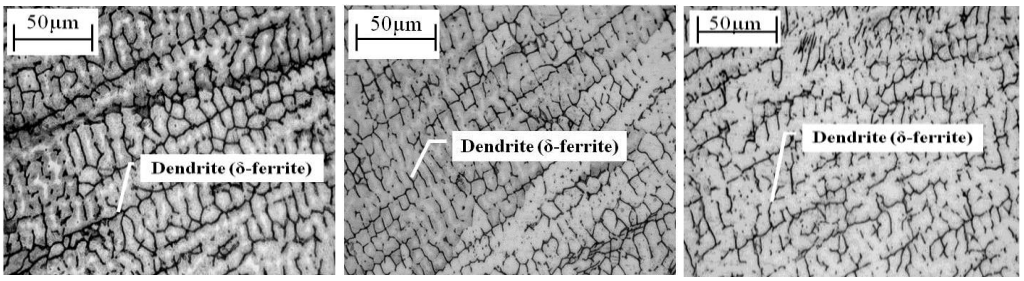
1. การกัดกร่อนของแนวเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน (Corrosion of similar weldment) แนวเชื่อมที่เกิดจากการหลอมละลายของโลหะชนิดเดียวกันถือได้ว่าเป็นแนวเชื่อมที่มีปัญหาน้อย ด้วยเพราะวัสดุที่เชื่อมเหมือนกันทุกประการ แต่อย่างไรก็ตามโอกาสที่จะได้เนื้อเชื่อมที่เหมือนกับโลหะหลักคงเป็นไปไม่ได้ เพราะเนื้อเชื่อมเป็นของแข็งใหม่จากการเย็นตัวของน้ำโลหะหลังการเชื่อม จึงจำเป็นต้องทดสอบเพื่อหาค่าความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนที่แท้จริงของเนื้อเชื่อม ดังตัวอย่างผลงานวิจัยทดลองของ Wichan Chuaiphan et al. (2014) ที่ทำการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทซีรีย์ 200 เกรด AISI 201 แบบไม่เติมลวดเชื่อมโดยใช้ความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้น เพื่อต้องการหาค่าความสามารถด้านการกัดกร่อนที่ทดสอบด้วยวิธีเซลล์ไฟฟ้าเคมี Potentiodynamic ในสารละลาย NaCl 3.5 wt% ตามมาตรฐาน ASTM D1141 พบว่า ประสิทธิภาพความทนทานต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting) ของเนื้อเชื่อม แปรเปลี่ยนไปตามปริมาณและรูปทรงของการเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในแนวเชื่อม โดยถ้าปริมาณเดลตาเฟอร์ไรต์มากความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มต่ำลง เพราะจุดเริ่มต้นของการกัดกร่อนจะเกิดที่ตำแหน่งขอบรอยต่อระหว่างเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์กับออสเทนไนต์ (δ/γ) ดังนั้นเมื่อสัดส่วนเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในออสเทนไนต์มากขึ้นก็เป็นการสร้างโอกาสให้เกิดจุดเริ่มกัดกร่อนมากขึ้น และการเชื่อมที่ความเร็วสูงจะเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่ต่ำ เพราะมีอัตราการเย็นตัวรวดเร็วเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ฟอร์มตัวไม่ทัน ดังแสดงเปรียบเทียบเส้นกราฟ Potentiodynamic ของจุด Pited ในรูปที่ 9.53 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ของเนื้อเชื่อมที่แตกต่างกันเพราะความเร็วเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 9.54 จากเหตุผลความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกขึ้นอยู่กับปริมาณของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่ได้หลังจากการเย็นตัวของน้ำโลหะและปริมาณเดลตาเฟอร์ไรต์ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวของบ่อหลอมละลาย ดังนั้น การควบคุมให้เนื้อเชื่อมมีปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์น้อยก็เป็นการเพิ่มความสามารถในการ

ต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มได้มากขึ้น ดังแสดงลักษณะของการเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่ขอบรอยต่อระหว่างเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์กับออสเทนไนต์ในรูปที่ 9.55



รูปที่ 9.53 กราฟทดสอบการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 201

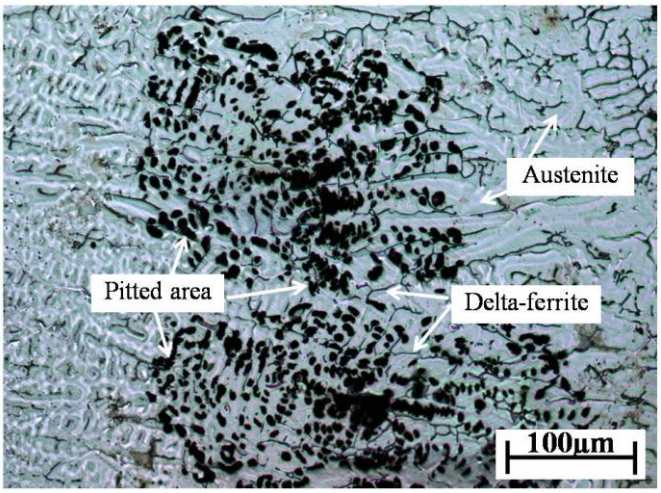
ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 214, pp. 402–408, 2020



ความเร็วเชื่อม 1.5 มม/วินาที ความเร็วเชื่อม 2.5 มม/วินาที ความเร็วเชื่อม 3.5 มม/วินาที

รูปที่ 9.54 เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 201

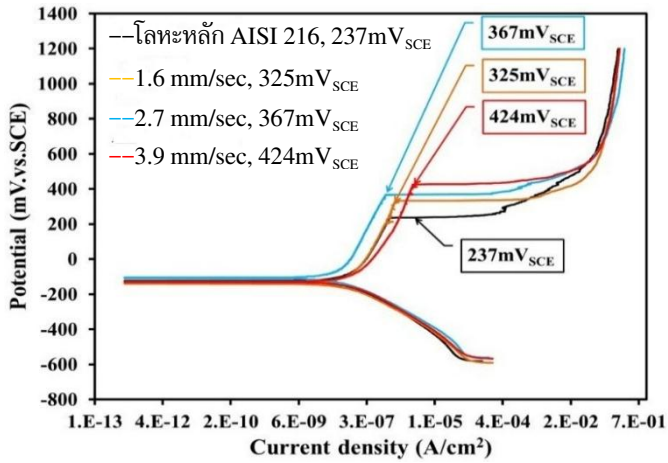
ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Materials Process Technolo, Vol. 214, pp. 402–408, 2020



รูปที่ 9.55 รูปแบบกลไกการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 201

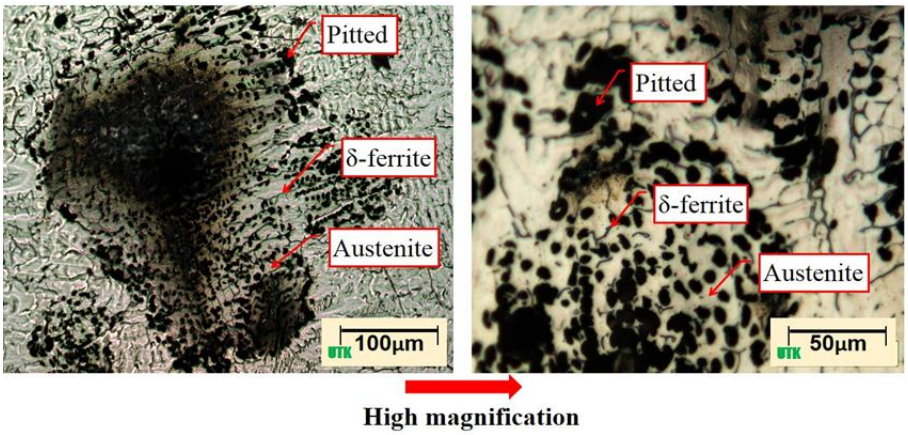
ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 214, pp. 402–408, 2020

จากตัวอย่างผลการวิจัยทดลองที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นการทดลองเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม ซึ่งเป็นการหลอมละลายโลหะชนิดเดียวกันเป็นเนื้อเชื่อม ซึ่งการเกิดของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมแบบนี้ถูกกำหนดด้วยอัตราการเย็นตัวของความเร็วในการเชื่อมเป็นสำคัญ และจากพฤติกรรมรูปแบบการกัดกร่อนแบบรูเข็มดังที่แสดงในรูปที่ 9.55 สังเกตได้ว่าจุดเริ่มต้นของการกัดกร่อนเกิดที่ตำแหน่งเขตรอยต่อระหว่างเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์กับเฟสออสเทนไนต์ จากนั้นการกัดกร่อนก็ลุกลามไปในทิศทางด้านของเฟสออสเทนไนต์ และขณะเดียวกันก็จะขยายการกัดกร่อนไปตามขอบระหว่างเฟสอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น การลดปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ให้น้อยเป็นการลดจุดเริ่มต้นของการกัดก่อน เป็นการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนได้ดี นอกจากนี้ ก็เป็นที่ทราบกันดีว่าเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มซีรีย์ 200 มีขีดความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนที่ไม่ดีทัดเทียมเท่าซีรีย์ 300 อาจมีความเป็นได้ว่าการเชื่อมแบบไม่เติมลวดเกิดการพร่องของโครเมียมที่หายไปกับอิทธิพลของความร้อนเชื่อม โดย Wichan Chuaiphan et al. (2020) จึงเกิดแนวคิดทดลองเพิ่มปริมาณโครเมียมจากโลหะลวดเชื่อมเติมเข้าไปในเนื้อเชื่อมเพื่อเพิ่มปริมาณโครเมียมให้มากพอในการสร้างฟิล์มที่แข็งแรงในจุดที่เกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ ซึ่งได้ทำการทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมซีรีย์ 200 เกรด AISI 216 ที่ผสม 17.85% Cr และ 7.21%Ni ด้วยลวเชื่อม ER 316 ที่ผสม 18.40% Cr และ 12.13%Ni และยังทดลองควบคู่กับปัจจัยของความเร็วในการเชื่อม เพื่อหาความสัมพันธ์กับปริมาณการเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ ผลการทดลองได้ข้อสรุปว่าการเชื่อมด้วยวิธีการเติมเนื้อโลหะลวดเชื่อมมีแนวโน้มทำให้ประสิทธิภาพของความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกซีรีย์ 200 เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับโลหะหลัก และเมื่อทดลองใช้ความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นผลปรากฏว่า ค่าของ Cr_{eq}/Ni_{eq} เพิ่มสูงขึ้น สอดรับกับผลการทดสอบที่เห็นได้ชัดเจนว่าที่ระดับความเร็วเพิ่มขึ้นความสามารถต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มตาม ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 9.56 ซึ่งผลที่แนวเชื่อมมีความต้านทานการกัดกร่อนที่สูงขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลของอิทธิพลปริมาณโครเมียมที่เพิ่มขึ้นในเนื้อเชื่อม แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 9.57 ปริมาณเดลตาเฟอร์ไรต์เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้น แต่เป็นเดลตาเฟอร์ไรต์ที่เป็นแบบต่อเนื่อง (Continuity) เสมือนหนึ่งว่าปริมาณของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมลดลง

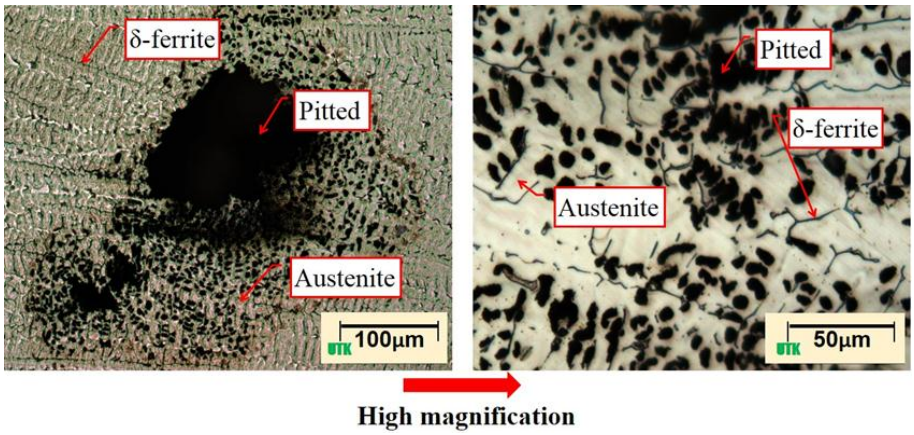


รูปที่ 9.56 กราฟทดสอบการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 216 ด้วยลวดเชื่อม ER316

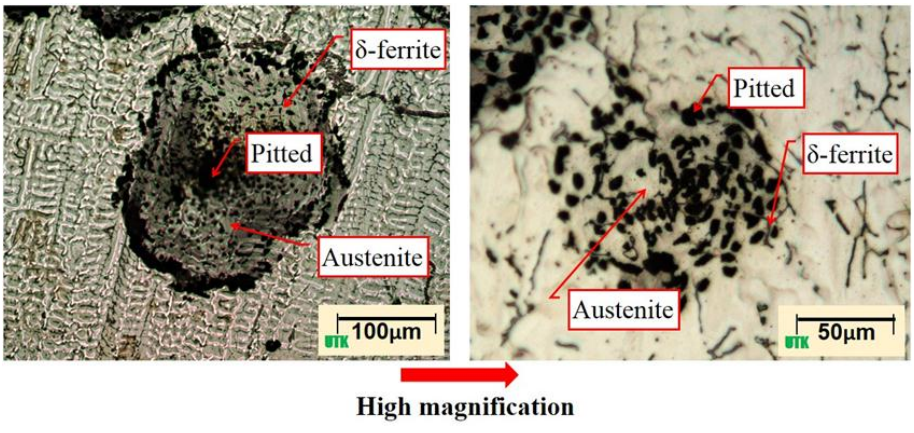
ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Advanced Joining Processing Technology, Vol. 2, (100027), 2020



(ก) ความเร็วในการเชื่อม 1.6 มม/วินาที



(ข) ความเร็วในการเชื่อม 2.7 มม/วินาที



(ง) ความเร็วในการเชื่อม 3.9 มม/วินาที

รูปที่ 9.57 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting) ของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 216

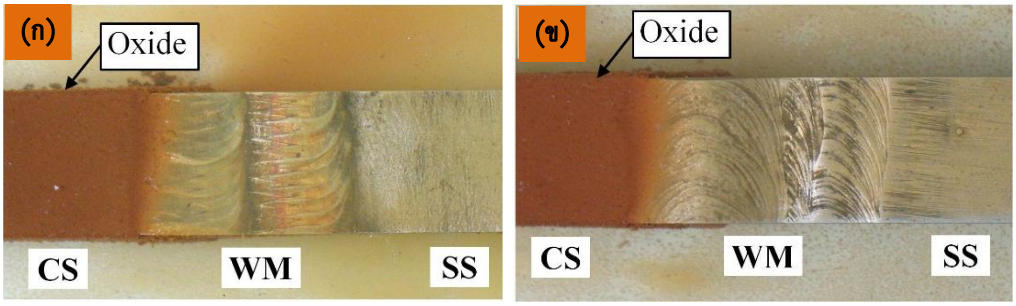
ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Advanced Joining Process. Techno. Vol. 2, (100027), 2020

2. การกัดกร่อนของแนวเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน (Corrosion of dissimilar weldment) แนวเชื่อมที่ได้จากการนำโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกต่างชนิดมาทำการเชื่อมต่อกัน เนื้อเชื่อมจะมีองค์ประกอบภายในที่มีความแตกต่างกับการเชื่อมแบบโลหะชนิดเดียวกัน ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างต้น ความหลากหลายของการเชื่อมต่อโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกกับโลหะเหล็กกล้าอื่น ๆ ยิ่งโลหะที่มีสมบัติพื้นฐานแตกต่างกันมากก็ยิ่งทำให้เนื้อเชื่อมมีความแตกต่างกันมากขึ้น โดยเฉพาะสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อม

● การกัดกร่อนของแนวเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน (Dissimilar welding austenitic stainless steel and crabon steel) ผลการวิจัยเชิงทดลองของ Wichan Chuaiphan et al. (2012) ที่ทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกกับเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งก็เป็นที่ทราบกันดีว่าโลหะคู่นี้ต่างก็เป็นโลหะกลุ่มเหล็ก ดังนั้น เนื้อโลหะโดยพื้นฐานเป็นโลหะเหล็ก (Ferrous metal) โดยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกจะต่างกันที่ส่วนผสมเพิ่มเติมที่ต้องการสมบัติบางประการ ได้แก่ การเติมธาตุโครเมียม (Cr) เพื่อต้องการความต้านทานการกัดกร่อน เติมธาตุนิกเกิล (Ni) หรือแมงกานีส (Mn) เพื่อสร้างสมบัติความไม่เป็นแม่เหล็กและธาตุอื่น ๆ ตามจุดประสงค์ เป็นต้น ดังนั้น เมื่อนำมาเชื่อมเข้าด้วยกันเนื้อโลหะทั้งสองหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ก็เกิดการเจือจาง (Dilution) ของส่วนผสมโดยธาตุโครเมียมจากเหล็กกล้าไร้สนิมแพร่ไปยังเหล็กกล้าคาร์บอน ทำให้ปริมาณของโครเมียมผสมโดยรวมไม่มากพอที่จะมีสมบัติในการสร้างฟิล์มเพื่อป้องกันการกัดกร่อนได้ แต่ลักษณะกายภาพภายนอกของแนวเชื่อมเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ทนการกัดกร่อนแบบ Unifrom ได้เมื่อเทียบกับด้านเหล็กกล้าคาร์บอน ดังแสดงการผลการทดสอบแช่ในสารละลายเกลือแกง 3.5 % ไม่เกิดออกไซด์หรือสนิมแดงที่ผิวบริเวณของแนวเชื่อม แต่มีออกไซด์ขึ้นที่บริเวณผิวของพื้นที่นอกแนวเชื่อมด้านโลหะหลักเหล็กกล้าคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 9.58 ซึ่งเหมือนกันของทั้งขบวนการเชื่อม GTAW และขบวนการเชื่อม SMAW ซึ่งผลของการเกิดออกไซด์ที่ผิวสรุปได้ว่าการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกกับเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกสามารถเชื่อมได้

สำหรับความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มซึ่งมีความสำคัญของเหล็กกล้าไร้สนิม จึงได้ทำการทดสอบหาระดับความแข็งแรงของฟิล์มออกไซด์ (Pitting corrosion) พบว่า ค่าความต้านทานของฟิล์มออกไซด์ในเนื้อเชื่อมต่ำกว่าโลหะหลักเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 (432 mV_{SCE}) และเนื้อเชื่อมของขบวนการเชื่อม GTAW(385 mV_{SCE}) สูงกว่าขบวนการเชื่อม SMAW(245 mV_{SCE}) ดังแสดงเส้นกราฟการกัดกร่อนในรูปที่ 9.59 เหตุผลที่โลหะหลักมีความต้านทานการกัดกร่อนที่สูงกว่าเนื้อเชื่อมก็เป็นเพราะเนื้อโลหะไม่เกิดการหลอมละลายส่วนผสมของโครเมียมปริมาณมากเพียงพอ แต่เมื่อนำมาเชื่อมต่อกันปริมาณโครเมียมลดลงจากการที่เจือจางส่วนผสมขณะหลอมละลาย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับขบวนการเชื่อมที่แตกต่างกันพบว่าแนวเชื่อมจากการเชื่อมแบบ GTAW มีเนื้อเชื่อมที่มีเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์น้อยกว่า มีโอกาศเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มยากกว่าแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมแบบ SMAW

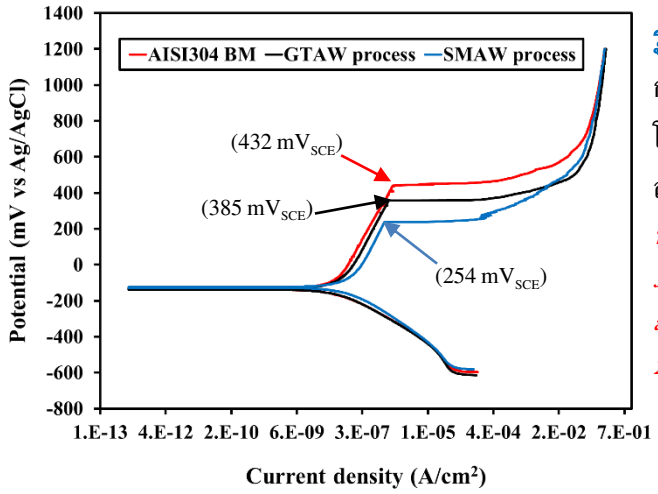
เหตุผลหลักมาจากอัตราเร็วของการเย็นของเนื้อเชื่อมที่ต่างกัน โดยการเชื่อมแบบ GTAW ความร้อนบ่อหลอมต่ำกว่า โดยมีรูปแบบผลของรอยกัดกร่อนแบบรูเข็มจากการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 9.60



(ก) ขบวนการเชื่อม GTAW (ข) ขบวนการเชื่อม SMAW

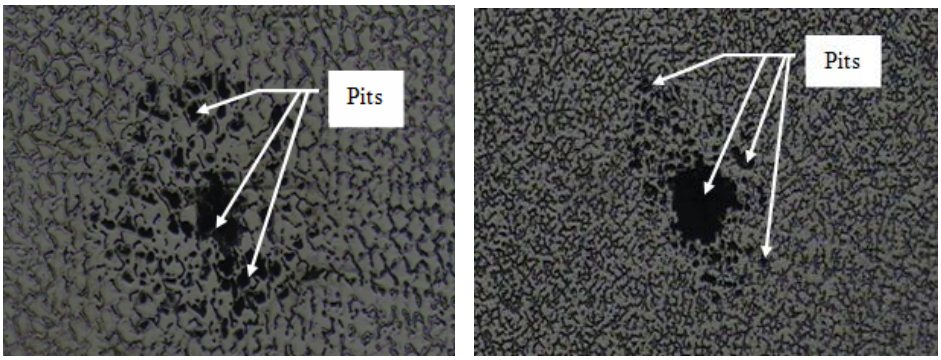
รูปที่ 9.58 การเกิดออกไซด์ของแนวเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Applied mechanics and Material. Vol. 238–270 29, 2012



รูปที่ 9.59 กราฟทดสอบการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อมโลหะต่างชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Applied mechanics and Material. Vol. 238–270 29, 2012

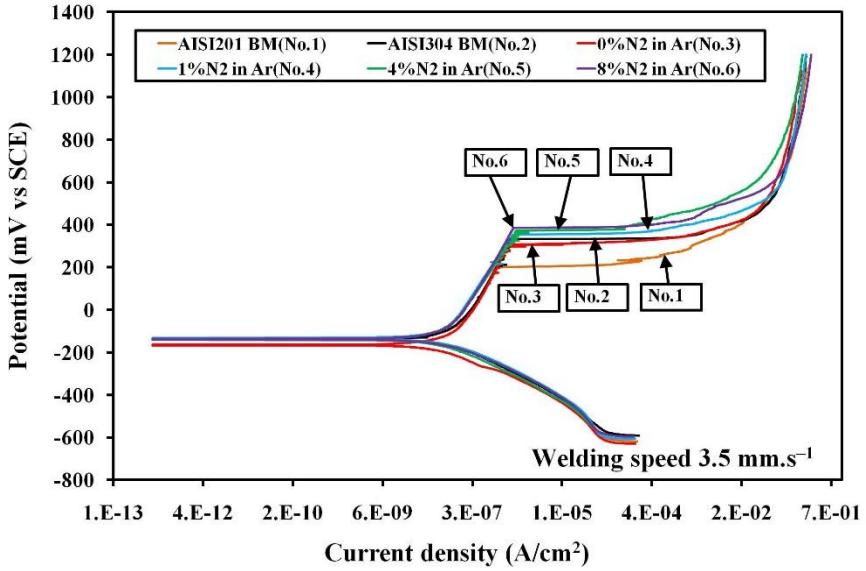


(ก) ขบวนการเชื่อม GTAW (ข) ขบวนการเชื่อม SMAW

รูปที่ 9.60 ลักษณะการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อมโลหะต่างชนิด SS กับ CS

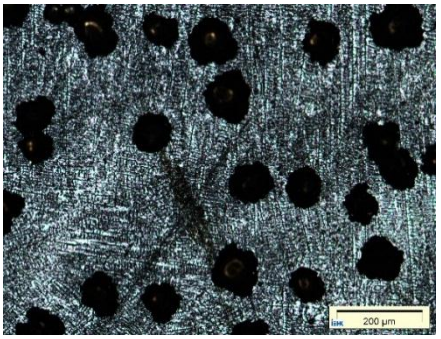
ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Applied mechanics and Material. Vol. 238–270 29, 2012

● การกัดกร่อนของแนวเชื่อมโลหะต่างชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่เกรดต่างกัน (Dissimilar welding austenitic stainless steel different grade) เป็นการกัดกร่อนของแนวเชื่อมในกรณีที่ทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกทั้งคู่แต่ต่างเกรด ซึ่งแนวเชื่อมของโลหะต่างชนิดลักษณะนี้มีโครงสร้างพื้นฐานที่ใกล้เคียงกัน แต่ก็มีส่วนที่แตกต่างกันบางอย่างที่เป็นสมบัติที่โดดเด่นเฉพาะด้านของเกรดนั้น ๆ สำหรับสมบัติความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นหลังการเปลี่ยนแปลงเมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมผ่านขบวนการเชื่อมแบบหลอมละลายมีความแตกต่างไปจากเดิมแน่นอน เพราะต่างเกรดก็จะต่างส่วนผสมทางเคมีเป็นสำคัญ และเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติกมีทั้งกลุ่มซีรีย์ 200 และ ซีรีย์ 300 ค่อนข้างนิยมนำมาใช้งานร่วมกันในหลายลักษณะงาน จึงมีการเชื่อมต่อกันแบบโลหะต่างชนิดเกิดขึ้น ซึ่งโดยสมบัติพื้นฐานของโลหะทั้งคู่มีความสามารถในการเชื่อมต่อกันได้ดี และผลของแนวเชื่อมในด้านทางกายภาพค่อนข้างอย่างสมบูรณ์ ไม่ค่อยพบข้อบกพร่องของแนวเชื่อมมากนักแต่ก็มีบ้างในบางคู่ของโลหะที่เชื่อม เช่น มีค่าความสามารถในการนำความร้อนต่างกันที่นำความร้อนได้ดีจะมีส่วนที่หลอมละลายได้มากกว่าก็จะทำให้บ่อหลอมละลายไม่สมมาตรกัน เมื่อน้ำโลหะแข็งตัวก็ได้รูปร่างของแนวเชื่อมที่ไม่สมดุลทั้งสองข้าง เป็นต้น ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้เทคนิคการเชื่อมเข้ามาปรับมุมเอียงของหัวเชื่อมเพื่อกำหนดทิศทางของการหลอมละลายของบ่อหลอม หรือสามารถใช้เทคนิคการส่ายหัวเชื่อมหรือเทคนิคการเติมลวดเชื่อมก็สามารถนำมาประยุกต์แก้ปัญหาได้ แต่สำหรับสมบัติทางกลและสมบัติทางเคมีค่อนข้างมีความแตกต่างกันมาก ด้วยเพราะอิทธิพลของธาตุแต่ละชนิด และรวมถึงระดับปริมาณของส่วนผสมทางเคมีของแต่ละเกรดจะมีความแตกต่างกัน จึงได้มีการวิจัยทดลองเชื่อมโลหะต่างชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกกันหลากหลาย ดังงานวิจัยของ Wichan chuaiphan et al. (2019) ที่ทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกซีรีย์ 200 เกรด201 กับซีรีย์ 300 เกรด304 ด้วยขบวนการเชื่อม TIG แบบไม่เติมลวดเชื่อม โดยใช้แก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สอาร์กอนสำหรับปกคลุมแนวเชื่อมเพื่อต้องการควบคุมการเกิดปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมสามารถควบคุมให้เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ลดลงได้ ซึ่งเป็นผลดีต่อความต้านทานการกัดที่สูงขึ้น ดังแสดงเปรียบเทียบผลการทดสอบหาจุดแตกของฟิล์มออกไซด์ (Pitting) เส้นกราฟโพเทนทิโอไดนามิก (Potentiodynamic) ในรูปที่ 9.61 โดยความสามารถในการต้านทานทานการกัดกร่อนสูงขึ้นเมื่อปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมต่ำลง ซึ่งก็สอดคล้องกับผลการวิจัยของเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกของหลาย ๆ นักวิจัยที่ได้เผยแพร่ไว้ และในรูปที่ 9.62 เป็นตัวอย่างของลักษณะรอยกัดกร่อนแบบรูเข็มที่ปริมาณไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนที่ต่างกัน จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่ปริมาณไนโตรเจนผสมต่ำจำนวนตำแหน่งที่เกิดการกัดกร่อนมีจำนวนมากจุด โดยจำนวนจุดที่เกิดจะมากตามปริมาณของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่สูง และเมื่อผสมไนโตรเจนมากขึ้นปริมาณเดลตาเฟอร์ไรต์ลดลง ส่งผลทำให้จุดที่เกิดการกัดกร่อนลดลงตามไปด้วยซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 9.62 (ก) (ข) (ค) และ (ง) ที่มีสัดส่วนผสมของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนที่มากขึ้นตามลำดับ

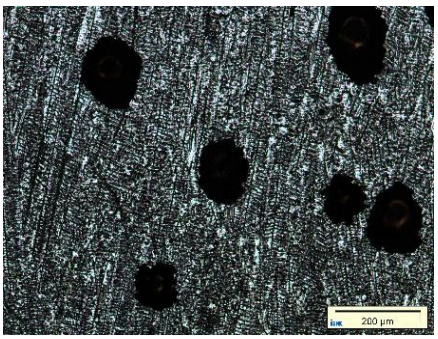


รูปที่ 9.61 กราฟการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อมโลหะต่างชนิดซีรีย์ 200 กับซีรีย์ 300

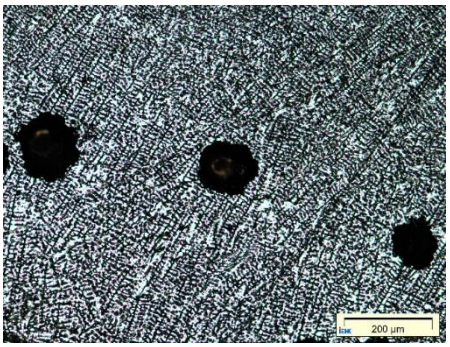
ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Defence Technology. Vol. 15, pp. 170–178, 2019



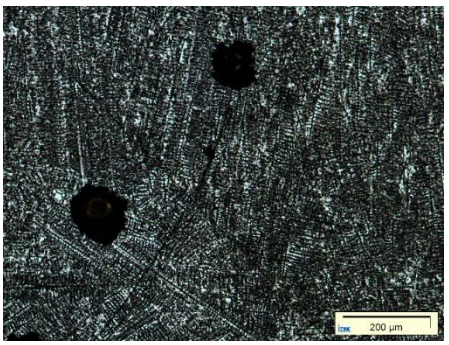
(ก) 0%N_2 + 100%Ar



(ข) 1%N_2 + 99%Ar



(ค) 4%N_2 + 96%Ar



(ง) 8%N_2 + 92%Ar

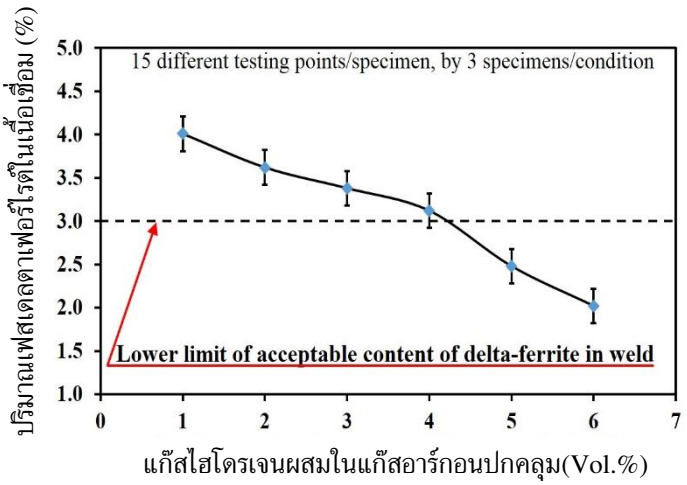
รูปที่ 9.62 รอยการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อมโลหะต่างชนิดซีรีย์ 200 กับซีรีย์ 300

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Defence Technology. Vol. 15, pp. 170–178, 2019

นอกจากคู่โลหะต่างชนิดที่กล่าวมาแล้วนั้น Wichan Chuaiphan และคณะยังได้มีการวิจัยทดลองเชื่อมโลหะต่างชนิดของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมซีรีย์ 200 เกรด AISI 204Cu กับซีรีย์ 300 เกรด AISI 304 ด้วยขบวนการเชื่อมทิกแบบวิธีการเติมลวดเชื่อมผลการวิจัยพบว่า แนวเชื่อมที่เติมเนื้อด้วยลวดเชื่อมช่วยเพื่อเพิ่มธาตุผสมหลัก ๆ ที่สำคัญเพิ่มมากขึ้น เช่น ธาตุโครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) หรือแมงกานีส ที่ช่วยรักษาสมบัติความเป็นโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกของเนื้อโลหะที่ผ่านการหลอมละลายใหม่ด้วยกระบวนการเชื่อมให้คงอยู่ใกล้เคียงหรือเหมือนกับโลหะหลักมากที่สุด โดยเฉพาะเทคนิคการเลือกลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของโครเมียมสูง มีประโยชน์มากต่อการเสริมโครเมียมในเนื้อเชื่อมที่โดนเจือจางจากการเชื่อมโลหะที่ผสมโครเมียมต่างกัน และชดเชยโครเมียมบางส่วนที่ลดลงจากการไปรวมตัวกับคาร์บอนเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ ($Cr_{23}C_6$) แล้วตกผลึกอยู่ตามขอบเกรน ดังนั้น เมื่อปริมาณของโครเมียมที่เหลืออยู่ในเนื้อเชื่อมมากขึ้นและมากพอที่สามารถสร้างฟิล์มออกไซด์ที่แข็งแรงได้ ก็ส่งผลต่อการเพิ่มขีดความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มมากขึ้น ส่วนรูปแบบกลไกการกัดกร่อนก็เป็นไปในลักษณะรูปแบบที่เริ่มต้นเกิดที่เฟสของเดลตาเฟอร์ไรต์แล้วลุกลามเข้าไปตามเส้นแนวของเฟอร์ไรต์ที่เป็นแบบเส้นยาวที่เรียกกันว่า Vermicular ferrite ซึ่งได้อธิบายผ่านมาแล้ว จากการทดลองนี้สามารถนำมาใช้เป็นสรุปได้ว่าการเชื่อมโลหะต่างชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก กรณีเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อมแนะนำว่าต้องพิจารณาถึงปริมาณของโครเมียมที่ผสมในลวดเชื่อมเป็นสำคัญซึ่งมีอิทธิพลต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion resistance) โดยตรง

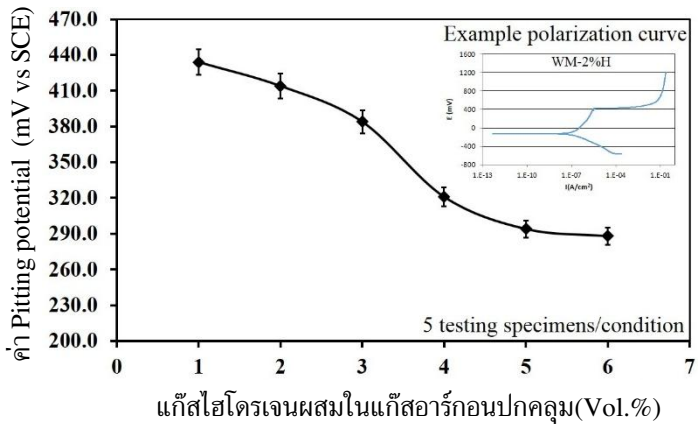
นอกจากนี้ Wichan Chuaiphan et al. (2020) ยังได้ทำการทดลองวิจัยการเชื่อมโลหะต่างชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกซีรีย์ 200 ต่างเกรดที่ต่างส่วนผสมหลายคู่ เช่น การเชื่อมเกรด AISI 205 กับ AISI 216 โดยใช้แก๊สปกคลุมแนวเชื่อมที่ผสมแก๊สไฮโดรเจนที่ปริมาณ 1–6 %Vol. และเลือกใช้ลวดเชื่อมเติม ER307 ที่มีโครเมียม 18.61% และนิกเกิล 8.14% ผลการทดลองพบว่า ด้วยปัจจัยการเชื่อมหลัก ๆ ที่กล่าวมาเนื้อเชื่อมที่ได้มีการเติมธาตุผสมที่สัดส่วน Cr_{eq}/Ni_{eq} ที่ต่ำกว่า 1.95 การแข็งตัวของเนื้อเชื่อมเป็น Mode Ferrrite Austenite (FA Mode) พบว่าปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ลดลงเมื่อปริมาณการใช้แก๊สไฮโดรเจนผสมในแก๊สปกคลุมที่มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9.63 เป็นผลมาจากอิทธิพลของแก๊สไฮโดรเจนที่ช่วยสร้างความร้อนให้แก่บ่อหลอมละลาย สามารถเชื่อมได้ด้วยความเร็วที่สูงขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อปริมาณความร้อนสะสมที่ต่ำ บริบทแบบนี้อัตราการเย็นตัวจะสูงเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์เกิดได้ยาก ซึ่งโดยปกติการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่ต่ำจะมีความต้านทานการกัดกร่อนที่สูง แต่เมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบการกัดกร่อนแบบรูเข็มในรูปที่ 9.64 กลับต่ำลง เหตุผลเพราะเนื้อเชื่อมเกิดจากการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมซีรีย์ 200 ที่มีโครเมียมต่ำทั้งคู่ และในลวดเชื่อมก็มีไม่มาก ดังนั้นโครงสร้างจุลภาคจึงมีสัดส่วนของธาตุผสมโครเมียมที่ต่ำทำให้ปัจจัยด้านความแข็งแรงของออกไซด์ฟิล์มลดลงและมีความไวต่อการต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่มากว่ากว่าปัจจัยของปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อม ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าค่าความต้านทานการกัดกร่อนการการเชื่อมโลหะคู่นี้และด้วยปัจจัยการเชื่อมนี้ ค่าความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

(Pitting potential) เกิดจากอิทธิพลของปริมาณโครเมียมที่ผสมมากกว่าบทบาทปริมาณของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่ลดลง ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองที่ Wichan Chuaiphan et al. (2020) ได้ทดลองเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ซีรีย์ 200 เกรด 201 โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนผสมในแก๊สอาร์กอน ซึ่งพบว่า แก๊สไฮโดรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนเพิ่มขึ้นความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนสูงขึ้นตาม ซึ่งได้รับอิทธิพลโดยตรงจากปริมาณของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่อยู่ในเนื้อเชื่อม อย่างไรก็ตาม กลไกของจุดเริ่มต้นการกัดกร่อนแบบรูเข็มยังคงเริ่มที่รอยต่อระหว่างเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์กับเฟสออสเทนไนต์ซึ่งเป็นพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่มีเฟสโครงสร้างออสเทนไนต์ผสมอยู่ในโครงสร้างจุลภาคพื้นฐาน



รูปที่ 9.63 อิทธิพลของไฮโดรเจนต่อการเกิดเดลตาเฟอร์ไรต์แนวเชื่อมโลหะต่างชนิดซีรีย์ 200

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Manufacturing processes. Vol.58, pp. 163–178, 2020

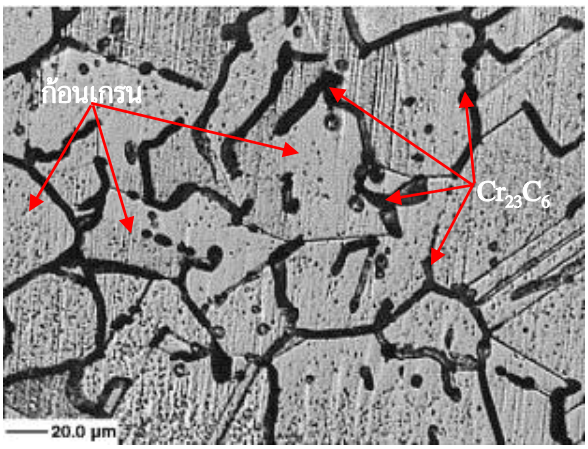


รูปที่ 9.64 อิทธิพลของไฮโดรเจนต่อการกัดกร่อนรูเข็มแนวเชื่อมโลหะต่างชนิดซีรีย์ 200

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Manufacturing Processes. Vol.58, pp. 163–178, 2020

9.6 การกัดกร่อนตามขอบเกรนของแนวเชื่อม (Intergranular corrosion of weldmemts)

การเชื่อมโลหะแบบหลอมละลายของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะมีโอกาสเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนขึ้นที่บริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone : HAZ) เพราะขบวนการเชื่อมที่ต้องใช้ความร้อนในการหลอมละลายให้โลหะติดกัน ต้นเหตุของการกัดกร่อนรูปแบบนี้เกิดจากความพร่องของปริมาณโครเมียมในเนื้อโลหะที่หายไปบางส่วน ซึ่งที่ยังคงเหลืออยู่ก็ไม่มากเพียงพอต่อการสร้างออกไซด์ฟิล์มเพื่อป้องกันการกัดกร่อน โดยโครเมียมที่หายไปจะไปรวมตัวกับคาร์บอนอยู่ในรูปของสารประกอบโครเมียมคาร์ไบด์ ($Cr_{23}C_6$) และตกผลึกอยู่ตามขอบเกรน (Grainboundry) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนเชื่อมแต่ไม่หลอมละลายมีโอกาสเกิดขึ้นได้ง่าย เพราะกลไกการตกผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์เกิดได้ง่ายที่ช่วงอุณหภูมิสูงประมาณ 415–850 ^{o}C ซึ่งช่วงอุณหภูมินี้ก็คือบริเวณ HAZ ของแนวเชื่อม ดังแสดงลักษณะของโครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ ที่เกิดการตกผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรนของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 ในรูปที่ 9.65

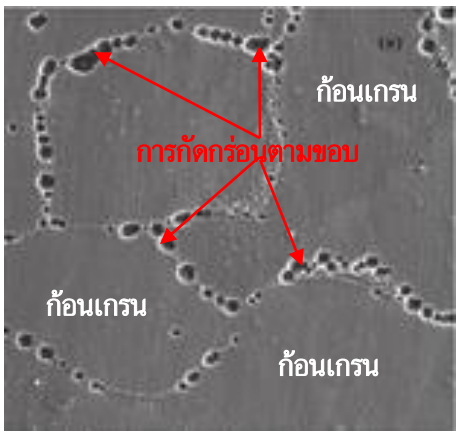


รูปที่ 9.65 การเกิดโครมียมคาร์ไบด์ตกผลึกตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

ที่มา : A. Yae Kina et al. Journal of Materials Characterization. Vol.59, Issue 5, pp. 651–655, 2008

กลไกของการกัดกร่อนตามขอบเกรนที่เรียกกันว่า “Intergranular corrosion” นี้เป็นรูปแบบของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบริเวณที่ผิวของชิ้นงานโลหะแล้วลุกลามเข้าไปภายในเนื้อโลหะลึกลงไปตามขอบของก้อนเกรน โดยเป็นปฏิกิริยาคาโทดิกที่เกิดสภาพขั้วไฟฟ้าคาโทด (Cathode) ที่เนื้อก้อนเกรนและเกิดสภาพขั้วไฟฟ้าอาโนด (Anode) ที่ขอบเกรน จุดเริ่มต้นของการกัดกร่อนเป็นการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting) ที่เกิดจากฟิล์มออกไซด์ที่บริเวณผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมแตก (Passive film fracture) สร้างรูเล็กขึ้นที่ฟิล์มออกไซด์จากนั้นก็กัดลึกลงในเนื้อโลหะ ซึ่งบริเวณที่ฟิล์มแตกจะเป็นตำแหน่งที่มีโครเมียมพร่องหายไปที่กลายไปเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ ก็คือตำแหน่งของขอบเกรนและประจวบเหมาะกับบริเวณขอบเกรนที่มีสภาพขั้วเป็นอาโนดมีสมบัติพร้อมสูญเสียเนื้อโลหะได้ง่ายจึงสอดรับกับการลุกลามการกัดกร่อนตามขอบเกรนได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น และถ้าเนื้อโลหะแนวเชื่อมมีการตกผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์ที่ปริมาณมาก การสูญเสียของโครเมียมก็จะสูงขึ้นขอบเกรนที่จะเป็นขั้วอาโนดก็มาก

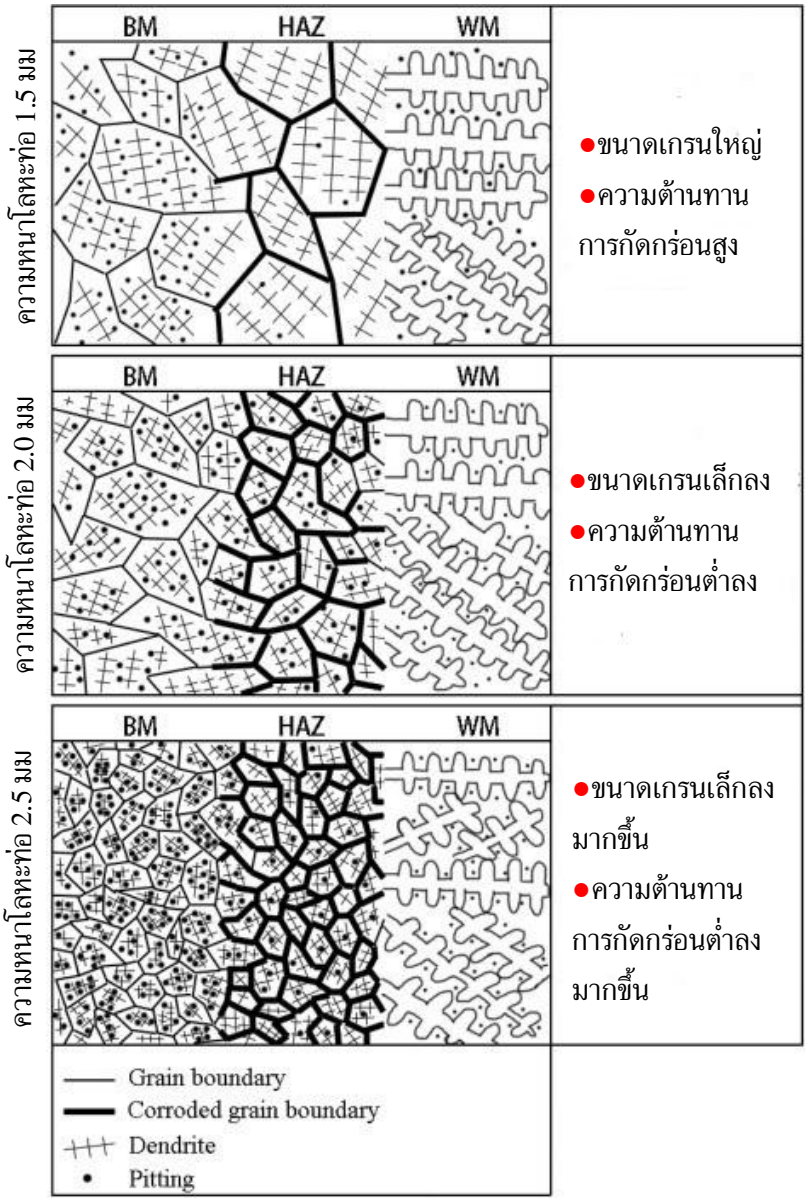
ขึ้น ดังนั้น โอกาสของการที่เกิดกัดกร่อนตามขอบเกรนก็รุนแรงมากขึ้น ดังแสดงลักษณะรูปแบบของการกัดกร่อนตามขอบเกรนในรูปที่ 9.66



รูปที่ 9.66 การกัดกร่อนตามขอบเกรนที่มีโครมียมคาร์ไบด์ตกผลึกตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

ที่มา : A. Yae Kina et al. Journal of Materials Characterization. Vol.59, Issue 5, pp. 651–655, 2008

ขนาดของก้อนเกรน (Grain size) มีอิธทิพลต่อความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion resistance) ที่เกิดขึ้นตามขอบเกรน โดยจากผลการวิจัยทดลองของ Lianyong Xu et al. (2019) ที่เชื่อมโลหะท่อที่มีโครเมียมผสมสูงโดยที่ความหนาของท่อต่างกัน ได้รายงานผลการทดลองไว้ว่าแนวเชื่อมของท่อที่บาง (1.5 มม) บริเวณกระทบร้อน (HAZ) มีขนาดก้อนเกรนที่ใหญ่ (Lage grain size) มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้สูง และเมื่อเปรียบกับแนวเชื่อมของท่อที่หนาขึ้น (2.0 มม) พบว่า ขนาดของก้อนเกรนกลับมีขนาดที่เล็กลง และความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนก็ลดต่ำลง และที่แนวเชื่อมของท่อที่หนาเพิ่มมากขึ้น (2.5 มม) ขนาดของก้อนเกรนมีขนาดที่เล็กลงมากขึ้น ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนก็จะยิ่งลดต่ำลง ดังแสดงผลการทดลองที่เขียนเป็นโมเดลแสดงขนาดของเกรนของแต่ละบริเวณของแนวเชื่อม พร้อมแสดงพื้นที่ของบริเวณที่จะเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนที่บริเวณกระทบร้อน และแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่จะเกิดในเนื้อเกรนที่ชิดกับขอบเกรนที่โครเมียมลดลง (Chromium depleted zone) ดังในรูปที่ 9.67 ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าว สามารถอธิบายได้บนเหตุผลเป็นเพราะอิทธิพลของจำนวนขอบเกรนกล่าวคือ กรณีที่ก้อนเกรนมีขนาดใหญ่ทำให้จำนวนพื้นที่ของขอบเกรนน้อย โอกาสที่จะเกิดตำแหน่งให้กัดกร่อนก็น้อยลงความต้านทานการกัดกร่อนก็ย่อมสูงขึ้น และในทางตรงกันข้ามถ้าขนาดเกรนเล็กจำนวนพื้นที่ของขอบเกรนก็มีมากขึ้นโอกาสที่จะเกิดกัดกร่อนตามขอบเกรนก็มากขึ้นตาม ความต้านทานการกัดกร่อนก็ต้องลดลง ดังนั้น การควบคุมโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมที่บริเวณกระทบร้อนให้มีขนาดของก้อนเกรนที่ใหญ่สามารถช่วยในการเพิ่มค่าความต้านทานการกัดกร่อนตามขอบเกรนได้สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การกัดกร่อนตามขอบเกรนนี้ยังมีปัจจัยอื่นร่วมด้วยที่มีผลต่อการกัดกร่อน เพราะเป็นที่ทราบกันดีว่าตำแหน่งขอบเกรนเป็นที่รวมของสารประกอบอื่น ๆ หรือสารมลทินอื่น ๆ ที่ถูกผลักออกมาจากก้อนเกรนและมารวมกันอยู่แบบไม่เป็นเนื้อเดียวกันจึงเป็นตัวลดความต้านทานการกัดกร่อนได้เช่นกัน



รูปที่ 9.66 ขนาดของก้อนเกรนที่มีผลต่อกลไกการกัดกร่อนตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิม

ที่มา : Lianyong Xu et al. Journal of Corrosion Science. Vol.160, 108164, 2019

จากหลักการและผลการวิจัยที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ของขบวนการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมหรือเหล็กกล้าผสมโครเมียมสูงมีโอกาสเกิดขึ้นเสมอ เพราะผลกระทบของความร้อนจากขบวนการเชื่อมแบบอาร์กหลอมละลายอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ แต่สามารถปรับปรุงแก้ไขได้ด้วยขบวนการทางความร้อน (Solution annealing) โดยการอบเพื่อสลายโครเมียมคาร์ไบด์ให้หมดไปนำโครเมียมคืนสู่เนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมออสนเทนนิติก ซึ่งเป็นการขจัดต้นตอของการกัดกร่อนตามขอบเกรนหรือจะเรียกว่า “ตัดไฟแต่ต้นลม”

ดัชนีคำศัพท์บทที่ 9

Active gas – แก๊สปกคลุมที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเมื่อสัมผัสความร้อน

Aging treatment – ขบวนการทางความร้อนด้วยวิธีบ่ม

Alternative stainless steel – เหล็กกล้าไร้สนิมเกรดทางเลือกที่มีราตาถูกนำมาใช้งานทดแทน

Asymmetric – แนวเชื่อมที่ไม่สมมาตรกันทั้งสองข้าง

Austenitic stainless steel – เหล็กกล้าไร้สนิมโครงสร้างพื้นออสเทนไนต์

Autogenously welding – เทคนิคการเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม

Backing gas – แก๊สปกคลุมด้านหลังแนวเชื่อม (Root side)

Base metal – โลหะหลักที่นำมาเชื่อมต่อกัน

Chromium carbide – สารประกอบของธาตุโครเมียมกับคาร์บอน ($Cr_{23}C_6$)

Chromium depletion zone – บริเวณที่เกิดการลดลงของธาตุโครเมียม

Cold crack – การแตกร้าวในขณะที่แนวเชื่อมเย็นตัวไปแล้ว

Corrosion of dissimilar weldment – การกัดกร่อนของแนวเชื่อมโลหะต่างชนิด

Delta ferrite – เฟสโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่เกิดหลังการเย็นตัวของเนื้อชื่อม

Differrent composion – ส่วนผสมที่ต่างกันของโลหะที่นำมาเชื่อม

Diffusion – การกระจายตัวของธาตุผสมแบบแพร่ซึม

Dilution – การละลายเจือจางของธาตุผสมในแนวเชื่อม

Dissimilar welding – การเชื่อมต่อกันของโลหะต่างชนิดหรือต่างเกรด

Duplex stainless steel – เหล็กกล้าไร้สนิมโครงสร้างพื้นผสมออสเทนไนต์–เฟอร์ไรต์

Ferrite stabilizer – มีความไวต่อการเกิดเฟสโครงสร้างเฟอร์ไรต์

Ferritic stainless steel – เหล็กกล้าไร้สนิมโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์

Fine grain – โครงสร้างเกรนที่มีความละเอียดหรือขนาดเล็ก

Fusion area – บริเวณพื้นที่ของส่วนที่หลอมละลาย

Fusion welding – การเชื่อมโลหะแบบโลหะหลักหลอมละลาย

Fusion zone width – ความกว้างของรอยเชื่อม

Grain boundary – ขอบรอยต่อระหว่างก้อนเกรน

Grain size – ขนาดของก้อนเกรน

Heat affecter zone – บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนเชื่อม

Heat conductivity – สมบัติค่าการนำความร้อนของโลหะที่นำมาเชื่อม

Heat input – ความร้อนที่ป้อนเข้าไปในการอาร์กหลอมละลาย

Homogeneous weldment – แนวเชื่อมที่มีโลหะเป็นเนื้อเดียวกัน

Hot crack – การแตกร้าวในขณะที่แนวเชื่อมกำลังร้อน

Inert gas – แก๊สปกคลุมที่ไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา

Interface zone – บริเวณรอยต่อระหว่างส่วนที่หลอมกับไม่หลอมละลาย

Intergranular corrosion – การกัดกร่อนตามขอบเกรนที่พร่องโครเมียม

Longitudinal tensile test – การทดสอบแรงดึงตามแนวยาวของแนวเชื่อม

Martensitic stainless steel – เหล็กกล้าไร้สนิมโครงสร้างพื้นมาร์เทนไซต์

Matrix structure – โครงสร้างพื้นหรือโครงสร้างหลักของเนื้อโลหะชนิดนั้น

Micro–hardness mapping – การวัดค่าความแข็งแบบแผนที่

Mixtures gas – แก๊สผสมสำหรับใช้ปกคลุมบ่อหลอมละลาย

Non–dissolved carbide – เฟสคาร์ไบด์ที่ไม่สลายตัว

Non–fusion welding – การเชื่อมโลหะแบบโลหะหลักไม่หลอมลาย

Non–magnetic structure – โครงสร้างที่มีสมบัติไม่ดูดติดแม่เหล็ก

Optimization – ปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสม

Oxide film – ผิวเคลือบที่เกิดจากออกไซด์ของโครเมียมของเหล็กกล้าไร้สนิม

Pitting corrosion – การกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือแบบหลุม

PMZ – เป็นคำย่อที่แสดงถึงบริเวณที่หลอมละลายบางส่วน (Partially melted zone)

Potentiodynamic – วิธีการทดสอบการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting test)

Precipitation hardening – การเพิ่มความแข็งด้วยวิธีการตกผลึกของธาตุผสม

Precipitation hardening stainless steel – เหล็กกล้าไร้สนิมโครงสร้างชุบแข็งโดยการตกผลึก

Pure inert gas – แก๊สเฉื่อยที่มีความบริสุทธิ์สูง (99.999%)

Schaeffler diagram – แผนภาพทำนายโครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิม

Sensitized zone : SZ – บริเวณที่เกิดสารประกอบโครเมียมคาร์ไบด์

Series 200 – เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติกที่ผสมธาตุ Cr + Mn เป็นหลัก

Series 300 – เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติกที่ผสมธาตุ Cr + Ni เป็นหลัก

Shielding gas – แก๊สที่ใช้สำหรับปกคลุมบ่อหลอมละลาย

Similar welding – การเชื่อมต่อโลหะชนิดเดียวกันหรือเกรดเดียวกัน

Solidification of metal – กลไกการแข็งตัวของน้ำโลหะเชื่อม

Solution heat treatment : SHT – การอบด้วยความร้อนเพื่อสลายเฟสให้เป็นเนื้อเดียวกัน

Spray transfer – การถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบละออง

Stainless steel – เหล็กกล้าไร้สนิมทนการกัดกร่อน

Thermal expansion – ค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนจากการเชื่อม

Transverse section hardness – การวัดค่าความแข็งตามแนวขวางของแนวเชื่อม

Uniform corrosion – การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอทั่วผิวหน้า

Vermicular ferrite – รูปทรงของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่เป็นเส้น ๆ

Volumetric heat capacities – สมบัติด้านค่าความจุความร้อน

Weld bead shape – รูปร่างหรือรูปทรงของแนวเชื่อม

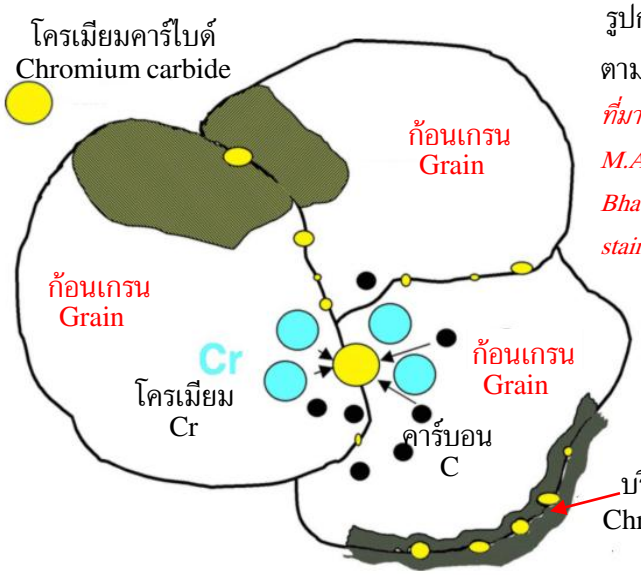
Welding speed – ความเร็วของการเดินหัวเชื่อม

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 9

ข้อที่ 1. จงบอกถึงข้อเด่น–ข้อด้อยของเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละชนิด (ควรเขียนเป็นตาราง)

ข้อที่ 2. จงอธิบายความแตกต่างของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกซีรีย์ 200 กับซีรีย์ 300

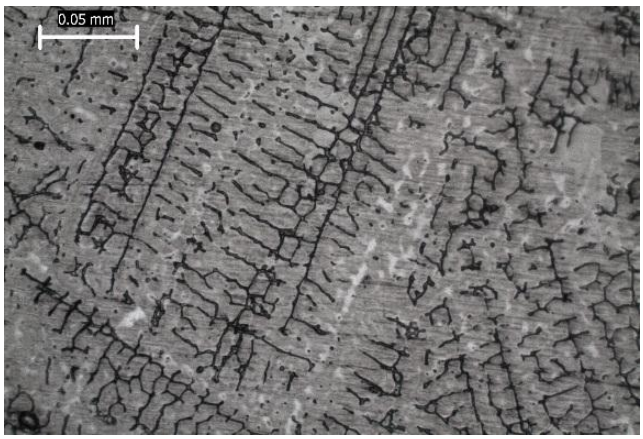
ข้อที่ 3. จากรูปข้างล่างนี้ จึงอธิบายกลการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรน



รูปกลไกการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามบริเวณขอบเกรน

ที่มา : M. Suresh Kumar, M. Sujata, M.A. Venkataswamy, S.K. Bhaumik, Failure analysis of a stainless steel pipeline, 2008

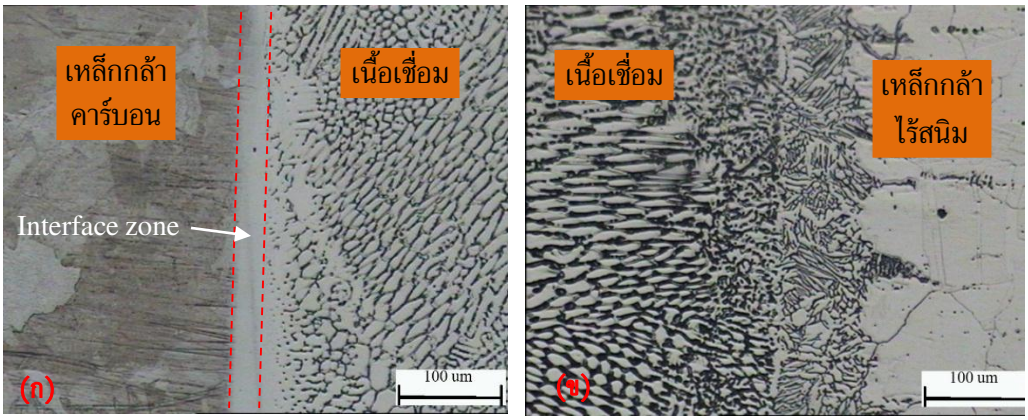
ข้อที่ 4. จากรูปโครงสร้างจุลภาคของนื้อเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ที่ประกอบด้วยโครงสร้างเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในโครงสร้างพื้นออสเทนไนต์ จงอธิบายถึงกลไกของการเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์มาให้เข้าใจ



รูปเนื้อเชื่อมที่แสดงเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในโครงสร้างพื้นออสเทนไนต์ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

ที่มา : Wichan Chuaiphan, et al., Journal of Materials Processing Technology, Vol. 214, 2014

ข้อที่ 5. จงอธิบายเหตุผลของความแตกต่างของตำแหน่ง Interface zone ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกกับเหล็กกล้าคาร์บอน อ้างอิงจากรูปข้างล่างนี้



รูป Interface zone ของแนวเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน

ที่มา : Wichan Chuaiphan, et al., Journal of Advanced Joining Processes. Vol. 2, 2020

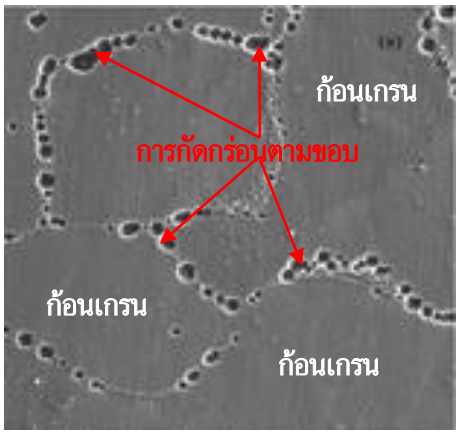
ข้อที่ 6. จงอธิบายถึงความแตกต่างของ Inert gas กับ Active gas สำหรับแก๊สปกคลุมแนวเชื่อม

ข้อที่ 7. จงบอกถึงพฤติกรรมของแก๊สไนโตรเจน (N_2) กับแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ที่มีต่อขบวนการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

ข้อที่ 8. จงอธิบายกลไกการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาพอเข้าใจ (โดยวาดภาพประกอบคำอธิบาย)

ข้อที่ 9. จงอธิบายความสัมพันธ์ของปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ต่อความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

ข้อที่ 10. จงอธิบายถึงกลไกของการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion) ของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก โดยอ้างอิงภาพข้างล่างนี้ในการอธิบาย



รูปการกัดกร่อนตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

ที่มา : A. Yae Kina et al. Journal of Materials Characterization. Vol.59, Issue 5, pp. 651–655, 2008

บรรณานุกรมบทที่ 9

มนูญ เลิศวิจิตรพันธุ์ *การกัดกร่อน SCC ของงานเชื่อมเหล็กกล้าออสเทนนิติกสเตนเลส AISI 304 (Stress Corrosion Cracking of Welded AISI 304 Austenitic Stainless Steel* วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ 2 ฉบับพิเศษ สิงหาคม 2549

A. Durgutlu. *Experimental Investigation of the Effect of Hydrogen in Argon as a Shielding Gas on TIG Welding of Austenitic Stainless Steel*. Journal of Materials Design. Vol. 25, pp. 19−23, 2015.

Anbarasan N., Jerome S., Arivazhagan N. *Argon and Argon−hydrogen Shielding Gas Effects on the Laves Phase formation and Corrosion behavior of Inconel 718 Gas Tungsten Arc Welds*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 263, pp. 374−384, 2019.

A.V. Bansod, A.P. Patil and S. Shukla. *Effect of Heat on Microstructure, Mechanical and Electrochemical Evaluation of Tungsten Inert Gas Welding of Low−Nickel ASS*. Journal of Anti−Corr. Met. Mater, Vol. 65, pp. 605−615, 2018.

A. Yae Kina, V.M. Souza, S.S.M. Tavares, J.M. Pardal and J.A. Souza. *Microstructure and Intergranular Corrosion Resistance Evaluation of AISI 304 Steel for High Temperature Service*. Journal of Materials Characterization, Vol. 59, Issue 5, pp. 651−655, 2008.

C. Lerone and H. W. Kerr. *The Ferrite to Austenite Transformation in Stainless Steel*. Journal of Materials Science, ID: 150381707, 2013.

Erica Marcelino Freitas de Souza Silva, Glaucio Soares da Fonseca and Elivelton Alves Ferreiar. *Microstructure and Selective Dissolution Analysis of 316L Austenitic Stainless Steel.* Journal of Materilas Research and Technology, Vol. 15, pp. 4317−4329, 2021.

Himanshu Vashishtha and Rajesh K. Khatirkar. *Welding Behavior of Low Nickel Chrome – Manganese Stainless Steel*. ISIJ International, Vol. 54, No.6, pp. 1361−1367, 2014.

H.M. Soltani and M.Tayebi. *Comparative Study of AISI 304L to AISI 316L Stainless Steel Joints by TIG and Nd:YAG Laser Welding*. Journal of Alloy. Compd. Vol. 767, pp. 112−121, 2018.

H. Naffakh, M. Shamanian and F. Ashrafizadeh. *Dissimilar welding of AISI 301 Austenitic Stainless Steel to Nickel−Based Alloy Inconel*. Journal of Material Processing Technology, Vol. 209, pp. 3628−3639, 2009.

H. Vashishtha, R.V. Taiwade, S. Sharma and A.P. Patil. *Effect of Welding Processes on Microstructural and Mechanical properties of Dissimilar Weldments between Conventional Austenitic Stainless Steels*. Journal of Manufacturing Processes, Vol. 25, pp. 49−59, 2017.

I. Bitharas, S.W. Campbell, A.M. Galloway, N.A. McPherson and A.J. Moore. *Visualization of Alternating Shielding Gas Flow in GTAW*. Journal of Materials and Design, Vol. 91, pp. 424−431, 2016.

ISSF : *International Stainless Steel Forum. Stainless Steel in Figures*. Published by ISSF, 2020.

Jeng SL, Lee HT, Weirich TE and Rebach WP. *Microstructual Study of the Dissmilar Joints of Alloy 690 and SUS 304L Stainless Steel*. Journal of Materials Trans. Vol. 48, pp. 481−489, 2017.

J. Verma and R.V. Taiwade. *Dissimilar Welding Behavior of 22% Cr Series Stainless Steel with 316L and its Corrosion Resistance in Modified Aggressive Environment*. Journal of Manufacturing Processes. Vol. 24, pp. 1−10, 2016.

J. W. Fu, Y.S. Yang, J.J. Guo and W.H. Tong. *Effect of Cooling Rate on Solidification Microstructure in AISI 304 Stainless Steel.* Journal of Materials Science and Technology. Vol. 24, Issue 8, 2013.

Lian−Fu Li, Zhou−Hua Jiang, Yves Riquier. *High Temperature Oxidation of Duplex Stainless Steel in Air and Mixed Gas of Air and CH4*. Journal of Corrosion Science, Vol. 47(1) pp. 57−68, 2005.

Lianyong Xu, Jianyang Zhang, Yongdian Han, Lei Zhao and Hongyang Jing. *Insights into the Intergranular Corrosion of Overlay Welded Joints of X65−Inconel 625 Clad Pipe and Its Relationship to Damage Penetration*. Journal of Corrosion Science. Vol. 160, 2019.

Mehdi Safari, Hossein Mostaan and Ebrahim Derakhshan. *Microstructual and Mechanical Studies of the Dissimilar Tabular Joints of Incoloy Alloy 825 and AISI 316 Stainless Steel*. Journal of Marine Engineering & Technology, 2018.

Mortezaie A. and Shamanian M. *An Assessment of Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Reisitance of Dissimilar Welds between Inconel 718 and 301S Austenitic Stainless Steel*. International Press Vessels Piping, 116, pp. 37−46.

M.P. Prabakaran and G.R. Kannan. *Optimization of Laser Welding Process Parameters in Dissimilar Joint of Stainless Steel AISI316 and AISI1018 Low Carbon Steel to Attain the Maximum Level of Mechanical Properties Through PWHT*. Journal of Optical Laser Technology, Vol. 112, pp. 314–322, 2019.

M. Sadeghian, M. Shamanian and A. Shafyei. *Effect of Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Joints between Super duplex Stainless steel and High Strength Low Alloy Steel*. Journal of Materials & Design, Vol. 60, pp. 678–684, 2014.

M. Shimada, H. Kokawa, Z.J. Wang, Y.S. Sato and I. Karibe. *Optimazation of Grain Boundary Character Distribution for Intergranular Corrosion Resistant 304 Stainless Steel by Twin–induced Grain Boundary Engineering*. Acta Materialia Vol. 50, pp. 2331–2341, 2002.

N. Arivazhagan, S. Singh, S. Prakash and G.M. Reddy. *Investigation on AISI 304 Austenitic Stainless Steel to AISI 4140 Low Alloy Steel Dissimilar Joints by Gas Tungsten Arc, Electron Beam and Friction Welding*. Journal of Materials Design. Vol. 32, pp. 3036–3050, 2011.

Ramkumar KD, Mithilesh P, Varun D, Reddy ARG, Arivazhagan N, Narayanan S and Kumar KG. *Characterization of Microstructure and Mechanical Propertise of Inconel 625 and AISI 304 Dissimilar Weldments*. ISIJ International, Vol. 54, pp. 900–908. 2014.

Ramkumar T, Selvakumar M, Narayanasamy P, Begam AA, Mathavan P and Raj AA. *Studies on the Structure properties, Mechanical Relationships and Corrosion Behaviour of Inconel 718 and SS 316L Dissimilar Joints by TIG Welding without Using Activated Flux*. Journal of Manufacturing Processes. Vol. 30, pp. 290–298, 2017

R. Ghasemi, B. Beidokhti and M. Fazel–Najafabadi. *Effect of Delta Ferrite on the Mechanical Properties of Dissimilar Ferritic –Austenitic Stainless Steel Welds*. Arch. Metall. Mater. 63, No. 1, pp. 437–443.

Saeed Hosseinzadeh and Massoud Goodarzi. *Influence of Shielding Gas Composition and Pulsed Current Frequency on the Microstructure of Austenitic Stainless Steel Welded by Pulsed Current GTA W*. Trans Indian Inst. Met. IIM, 2021.

Saulius Baskutis, Jolanta Baskutiene, Regita Bendikiene, Antanas Ciuplys and Karolis Dutkus. *Comparative Research of Microstructure and Mechanical Properties of Stainless steel Dissimilar Welds*. Journal of MDPI–Materials, Vol. 14, 6180, 2021.

Schaeffler, A.L. *Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metal*. Metal Progress 56 (11) : 680−680B. 1949.

SEAISI : *South East Asia Iron and Steel Institute. ASEAN Steel Industry : Steel Market Developments, Steel Committee Meeting, OECD*. By Yeoh Wee Jin Secretary General, March 19, 2021.

T. Masumura, N. Nakada, T. Tsuchiyama, S. Takaki, T. Koyano and K. Adachi. *The Different in Thermal and Mechanical Stabilities of Austenite between Carbon – and Nitrogen−Added Matastable Austenitic Stainless Steels*. Journal of Acta Mater. Vol. 84, pp. 330−388, 2015.

Vipin Tandon, Manish A. Thombre, Awanikumar P. Patil, Ravindra V. Taiwade and Himanshu Vashishtha. *Effect of Heat Input on the Microstructure, Mechanical, and Corrosion Properties of Dissimilar Weldment of Conventional Austenitic Stainless Steel and Low –Nickel Stainless Steel*. Journal of Metallography, Microstructure and Analysis. Vol. 9, pp. 668−677, 2020.

Wang W., Lu Y, Ding X. and Shoji T. *Microstructures amd Microhardness at Fusion Boundary of 316 Stainless Steel/Inconel 182 in High Temperature and High Pressure Water.* Journal of Materilas Characteritic, Vol. 131, pp. 339−347, 2017.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Microstructure, Mechanical Properties and Pitting Corrosion of TIG Weld Joints Alternative Low Cost Austenitic Stainless Steel Grade 216*. Journal of Advance Joining processes Vol. 2,100027, 2020.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Optimization of TIG Welding Parameter in Dissimilar Joints of Low Nickel Stainless Steel AISI 205 and AISI 216*. Journal of Manufacturing Processes. Vol. 58, pp. 163−178, 2020.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Effect of Hydrogen in Argon Shielding Gas for Welding Stainless Steel Grade SUS 201 by GTAW Welding Processes*. Journal of Advance Joining Processes Vol.1, 1000016, 2020.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Optimization of Gas Tungsten Arc Welding Parameters for the Dissimilar Welding Between AISI 304 and AISI 201 Stainless Steels.* Journal of Defence Technology, Vol.15, pp. 170−178.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Evaluation of Microstructure, Mechanical Properties and Pitting Corrosion in Dissimilar of Alternative Low Cost Stainless Steel Grade 204CU and 304 by GTA Welding Joint*. Journal of Materials Research and Technology, Vol. 9(3), pp. 5147−5183, 2020.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Heat Input and Shielding Gas Effects on the Microstructure, Mechanical Properties and Pitting Corrosion of Alternative Low Cost Stainless Steel Grade 202*. Journal of Result in Materials, Vol. 7, 100111, 2020.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Effect of Welding Speed on Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of GTA−Welded AISI 201 Stainless Steel Sheets.* Journal of Material Processing Technology, Vol. 214, pp. 402−408, 2014.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Effect of Filler Alloy on Microstructure, Mechanical and Corrosion Behavior of Dissimilar Weldment between AISI 201 Stainless Steel and Low Carbon Steel Sheets Produced by A Gas Tungsten Arc Welding*. Journal of Advance Materials Research, Vol. 581−582, pp. 808−816, 2012.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *The Behavior of Nitrogen on the Welding Parameter of the Dissimilar Weld Joints between AISI 304 and AISI 316L Austenitic Stainless Steel Produced by Gas Tungsten Arc Welding*. Journal of Applied Mechanic and Materials, Vol. 248, pp. 365−410, 2012.

Wichan Chuaiphan, Chandra Ambhorn Somrerk, Satian Niltawach and Banleng Sornil. *Dissimilar Welding between AISI 304 Stainless Steel and AISI 1020 Carbon Steel Plates*. Journal of Applied Mechanics and Materials, Vol. 238−270, pp. 283−290.

Wichan Chuaiphan, Chandra Ambhorn Somrerk, Banleng Sornil and Wolfgang Bleck. *Microstructure, Mechanical and Corrosion Behavior of Dissimilar Weldments between AISI 304 Stainless Steel and AISI 1020 Carbon Steel Produced by Gas Tungsten Arc Welding Using Different Consumables*. Journal of Key Engineering Materials, Vol. 410−411, pp. 533−541, 2009.

Xiaoyu Cai, Chenglei Fan, Sanbao Lin, Xiangru Ji, Chunli Yang and Wenxuan Guo. *Effect of Shielding Gas Composition on Arc properties and Wire Melting Characteristics in Narrow Gap MAG Welding*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 244, pp. 225−230, 2017.

Xiaoyu Cai, Bolun Dong, Sanbao Lin, Anthony B. Murphy, Chenglei Fan and Chunli Yang. *Heat Source Charateristics of Ternary−Gas−Shielded Tandem Narrow− Gap GMAW*. Journal of MDPI−Materials, 29 April 2019.

Y. Fu, X. Wu, E.N. Han, W. Ke, K. Yang and Z. Jiang. *Effects of Nitrogen on the Passivation of Nickel−Free High Nitrogen and Manganese Stainless Steels in Acidic Chloride Solution*. Journal of Electrochim. Acta, Vol. 54, pp. 4005−1014, 2009.



ประวัติผู้เขียน

รองศาสตราจารย์ ดร. วิชาญ ช่วยพันธ์ : D. Eng.

International Welding Engineering (IWE−0069)

วิศวกร สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ หมายเลข ภอ. 10638

Certificate Ultrasonic Testing Level 3 (WIT−UT3−0447)

Examination bode : Welding Institute of Thailand (WIT)

ประวัติการศึกษาและการฝึกอบรม

- ปริญญาเอก Doctor of Engineering in Mechanical Engineering (Materials and Metallurgical Engineering − International Program)
  สถานศึกษา The Sirindhorn International Thai−German Graduate School of Engineering (TGGS) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ
  สถานศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- ปริญญาตรี ครุศาสตรอุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ−เชื่อมประกอบ
  สถานศึกษา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
- ฝึกอบรมเรื่อง Ultrasonic Testing Level 3 According to ISO 9712 and EN 473 Certificate No. WIT−UT3−0447 สถานที่ ศูนย์วิศวกรรมงานเชื่อมไทย−ฝรั่งเศส
- ฝึกอบรมเรื่อง International Welding Engineering Certificate No.(TH−IWE−0069)
  สถานที่ ศูนย์วิศวกรรมงานเชื่อมไทย−ฝรั่งเศส
- ฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการเรื่อง ขบวนการเชื่อม GAS Tungsten Arc Welding
  สถานที่ พัฒนาฝีมือแรงงาน
- ฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการเรื่อง ขบวนการเชื่อม Plasma Arc Welding
  สถานที่ กรมพัฒนาฝีมือแรงงาน

ประวัติการทำงาน

- 2565–ปัจจุบัน ผู้ช่วยอธิการบดีด้านบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
- 2563–ปัจจุบัน ประธานหลักสูตรระดับปริญญาเอก ปรัชญาดุษฎีบันฑิต สาขาการจัดการวิศวกรรมและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
- 2563–ปัจจุบัน ผู้ช่วยคณบดีฝ่ายวิชาการด้านระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

- 2562–ปัจจุบัน กรรมการหลักสูตรระดับปริญญาเอก ปรัชญาดุษฎีบันฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
- 2562–ปัจจุบัน หัวหน้าสำนักงานบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
- 2556– 2559 ผู้ช่วยคณบดีฝ่ายกิจการนักศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
- 2555–2561 อาจารย์รับผิดชอบหลักสูตรระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
- 2555– 2558 หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
- 2548–ปัจจุบัน อาจารย์สอนประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
- 2542–2554 อาจารย์รับผิดชอบหลักสูตรระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
- 2538–2548 อาจารย์ประจำแผนกวิชาโลหะวิทยา คณะวิชาช่างกล สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ

ความเชี่ยวชาญและงานสอน

- โลหะวิทยางานเชื่อม (Welding Metallurgy)
- วิศวกรรมการเชื่อม (Welding Engineering)
- การผลิตวัสดุโลหะเหล็ก (Steel Making)
- เทคโนโลยีโลหะการกายภาพ (Physical Metallurgy Technology)
- เทคโนโลยีการหล่อโลหะ (Foundry Technology)
- เทคโนโลยีการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment Technology of Metals)
- การตรวจสอบวัสดุโลหะและทดสอบคุณภาพงานเชื่อม (Inspection Metal Materials and Testing Weld Metals)

ผลงานวิจัยตีพิมพ์ระดับนานาชาติ

- **Wichan Chuaiphan** and Loeshpahn Srijaroenpramong. Optimization of TIG Welding Parameter in Dissimilar Joints of Low Nickel Stainless Steel AISI 205 and AISI 216. Science Direct, Journal of Manufacturing Processes, Vol. 58, pp. 163–178, 2020.

❖ **Wichan Chuaiphan** and Loeshpahn Srijaroenpramong. Evaluation of Microstructure, Mechanical Properties and Pitting Corrosion in Dissimilar of Alternative Low Cost Stainless Steel Grade 204Cu and 304 by GTA Welding Joint. Science Direct, Journal of Materials Research and Technology, Vol. 9(3), pp. 5147−5183, 2020.

❖ **Wichan Chuaiphan** and Loeshpahn Srijaroenpramong. Microstructure, Mechanical Properties and Pitting Corrosion of GTAW Weld Joints Alternative Low Cost Austenitic Stainless Steel Grade 216. Science Direct, Journal of Advance Joining processes, Vol. 2, 100027, 2020.

❖ **Wichan Chuaiphan** and Loeshpahn Srijaroenpramong. Effect of Hydrogen in Argon Shielding Gas for Welding Stainless Steel Grade SUS 201 by GTAW Welding Processes. Science Direct, Journal of Advance Joining Processes, Vol.1, 1000016, 2020.

❖ **Wichan Chuaiphan** and Loeshpahn Srijaroenpramong. Heat Input and Shielding Gas Effects on the Microstructure, Mechanical Properties and Pitting Corrosion of Alternative Low Cost Stainless Steel Grade 202. Science Direct, Journal of Result in Materials, Vol. 7, 100111, 2020.

❖ **Wichan Chuaiphan** and Loeshpahn Srijaroenpramong. Optimization of Gas Tungsten Arc Welding Parameters for the Dissimilar Welding between AISI 304 and AISI 201 Stainless Steels. Science Direct, Journal of Defence Technology, Vol.15, pp. 170−178, 2019

❖ **Wichan Chuaiphan**, Koson Mosakopas and Nut Kaewsakul. Microstructure, Mechanical Properties and Pitting Corrosion of Dissimilar Welding AISI 201 and AISI 202 Austenitic Stainless Steels. Proceeding of The 8th Asia−Pacific IIW International Congress, March 20−22, Bangkok, Thailand, pp. 101−107, 2019.

❖ **Wichan Chuaiphan** and Loeshpahn Srijaroenpramong. Effect of Welding Speed on Microstructures, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of GTA−Welded Grade AISI 201 Stainless Steel Sheets. Science Direct, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 214 pp. 402– 408, 2014

❖ **Wichan Chuaiphan** and Loeshpahn Srijaroenpramong. The Behaviors of Nitrogen on the Welding Parameters of the Dissimilar Weld joints between AISI 304 and AISI 316L Austenitic Stainless Steels Produced by Gas Tungsten Arc Welding. Applied Mechanics and Materials, Vol. 248, pp. 395−401, 2013.

❖ **Wichan Chuaiphan**, Somrerk Chandraambhorn, Satian Niltawach and Banleng Sornil Dissimilar Welding between AISI 304 Stainless Steel and AISI 1020 Carbon Steel Plates. Applied Mechanics and Materials, Vol. 268−270, pp. 283−290, 2013.

❖ **W. Chuaiphan**, L. Srijaroenpramong and D. Pinpradub. The Effect of Tin and Heat Treatment in Brass on Microstructure and Mechanical Properties for Solving the Cracking of Nut and Bolt. Applied Mechanics and Materials, Vol. 389, pp. 237−244, 2013.

❖ **W. Chuaiphan**, L. Srijaroenpramong and D. Pinpradub The Effects of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of AISI 4140 for Base Cutter Cane Harvester, Advanced Materials Research, Vols. 774−776, pp. 1059−1067, 2013.

❖ **W. Chuaiphan**, L. Srijaroenpramong, D. Pinpradub and S. Piyaphan. Effect of Shielding Gases on Corrosion of Austenitic Stainless Steel Grade AISI 201 Produced by Plasma Arc Welding. The 1st International Conference on Creative Technology, CreTech, August 21−23, 2013.

❖ **W. Chuaiphan** and L. Srijaroenpramong. Effect of Filler Alloy on Microstructure, Mechanical and Corrosion Behaviors of Dissimilar Weldment AISI 201 Stainless Steel and Low Carbon Steel Sheets Produced by A Gas Tungsten Arc Welding. Journal Advanced Materials Research, Vol. 581−582, pp. 808−816, 2012.

❖ Somrerk Chandraambhorn, **Wichan Chauiphan**, Nich−chanuch Sukwattana, Narin Pudkhunthod and Sakarat Komkham. Plasma Arc Welding between AISI 304 and AISI 201 Stainless Steels Using a Technique of Mixing Nitrogen in Shielding Gas. Journal Advanced Materials Research, Vol. 538−541, pp. 1464−1468, 2012.

❖ **Wichan Chuaiphan** The Behavior of Nitrogen on Dissimilar Weldment between Grade AISI 304 and AISI 316L Stainless Steels Produced by Gas Tungsten Arc Welding. The International Institute of Welding International Congress 2010, Bangkok, Thailand, February 25−26, 2010.

❖ **W. Chuaiphan**, S. Chandraambhorn and S. Niltawach. Optimization of Gas Tungsten Arc Welding Parameters for the Dissimilar Welding between AISI 304 and AISI 201 Stainless Steels. The 4th Thailand Metallurgical Conference. Nakhon Ratchasima, Thailand, 17−19 November, 2009.

❖ L.Srijaroenpramong, **W. Chuaiphan** and S. Chandraambhorn. Effect of Filler Alloy on Microstructure, Mechanical and Corrosion Behaviors of the Dissimilar Weldment between AISI 304 Stainless Steel and AISI 1020 Carbon Steel Sheets Produced by A Gas Tungsten Arc Welding. The International Conference on Welding Technologies' 09 (ICWET' 09), Ankara, Turkey. June 11−13, 2009.

❖ **W. Chuaiphan** and S. Chandraambhorn. Effect of Filler Alloys on a Gas Tungsten Arc Dissimilar Weldment between AISI 304 Stainless Steel and AISI 1020 Carbon Steel in NaCl and H_2SO_4 Solutions. The Third International Conference on Processing Materials for Properties (PMP−III' 2009), Bangkok, Thailand, 2009.

❖ **W. Chuaiphan,** S. Chandraambhorn, B. Sornil and W. Bleck. Microstructure and Corrosion Behaviors of the Dissimilar Weldment between AISI 304 Stainless Steel and AISI 1020 Carbon Steel Sheets Produced by A Gas Tungsten Arc Welding Using Different Consumables. Key Engineering Materials, 410−411, pp. 533−541, 2009.

❖ **W. Chuaiphan**, S. Chandraambhorn, B. Sornil and U. Dilthey. Effect of Filler Alloys on the Corrosion Behaviors of Gas Tungsten Dissimilar Arc Weldments between Stainless Steel and Carbon Steel. The 13th International Institute of Welding International Congress, 2008 (IIW−IC 2008), pp. 689−695. 2008.

ผลงานเขียนตำราเรียน

❖ **วิชาญ ช่วยพันธ์** ตำราเรียน การอบชุบโลหะด้วยความร้อน (Heat Treatment of Metals) พิมพ์ครั้งแรก มีนาคม 2548 ศูนย์เอกสารการพิมพ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

❖ **วิชาญ ช่วยพันธ์** ตำราเรียน โลหการวิศวกรรม (Engineering Metallurgy) พิมพ์ครั้งแรก ตุลาคม 2560 ศูนย์ผลิตตำราเรียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เทคโนโลยีการเชื่อม
WELDING TECHNOLOGY

สำหรับวิศวกรปฏิบัติการ

ตำราวิชาการ เทคโนโลยีการเชื่อม (Welding Technology) เล่มนี้เขียนขึ้นด้วยจุดประสงค์หลักเพื่อใช้เป็นส่วนหลักในการเรียนรู้เน้นเชิงปฏิบัติการ ของขบวนการเรียนการสอนกลุ่มรายวิชาที่มีเนื้อหาสาระเกี่ยวข้องกับองค์ความรู้ศาสตร์ด้านเทคโนโลยีการเชื่อมโลหะของนักศึกษาในระดับปริญญาตรีและปริญญาโท ทั้งในกลุ่มสายวิชาวิศวกรรมศาสตร์ อุตสาหกรรมศาสตร์ และครุศาสตร์อุตสาหกรรม โดยผู้เขียนมีเจตนามุ่งเน้นอธิบายและนำเสนอด้วยภาษาสื่อสารแนวนักปฏิบัติการ เพื่อเป็นเครื่องมือประกอบการเรียนรู้ที่ง่ายและเข้าใจได้รวดเร็วขึ้นเหมาะแก่การนำไปเสริมสร้างทักษะปฏิบัติการเชื่อมได้ดี พร้อมกันนี้ยังมีดัชนีความหมายของคำสำคัญในทางเทคโนโลยีการเชื่อมเพื่อเสริมสร้างความเข้าใจให้ลึกซึ้งมากยิ่งขึ้น และยังเสริมเติมด้วยคำถามแบบฝึกหัดท้ายบทสำหรับการตรวจสอบระดับความรู้ความเข้าใจด้วยตนเองได้อย่างครบถ้วน ซึ่งเนื้อหาสาระและประสบการณ์ตรงพร้อมองค์ความรู้ที่รวบรวมไว้อย่างเปี่ยมล้น ภายในตำราวิชาเทคโนโลยีการเชื่อมเล่มนี้ประกอบด้วย

- *บทที่ 1 ความปลอดภัยในงานเชื่อม*
- *บทที่ 2 กรรมวิธีการตัดและการเซาะร่อง*
- *บทที่ 3 กรรมวิธีการเชื่อม : กลุ่มเติมลวดเชื่อม*
- *บทที่ 4 กรรมวิธีการเชื่อม : กลุ่มไม่เติมลวดเชื่อม*
- *บทที่ 5 องค์ประกอบหรือปัจจัยการเชื่อม*
- *บทที่ 6 โลหะวิทยาในการเชื่อม*
- *บทที่ 7 ลวดเชื่อมและมาตรฐานลวดเชื่อม*
- *บทที่ 8 ข้อบกพร่องงานเชื่อมและการป้องกัน*
- *บทที่ 9 กรณีศึกษา : การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก*

ตำราเล่มนี้ยังเหมาะสำหรับผู้ประกอบการด้านอุตสาหกรรมการเชื่อมโลหะ วิศวกรการเชื่อม และบุคคลทั่วไปที่ต้องการองค์ความรู้และมีความสนใจในศาสตร์เชิงปฏิบัติการด้านเทคโนโลยีการเชื่อม

รองศาสตราจารย์ ดร. วิชาญ ช่วยพันธ์ : D.Eng.