บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

ในปัจจุบันเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่ใช้งานกันอยู่ได้แบ่งออกเป็น 4 เกรด คือ

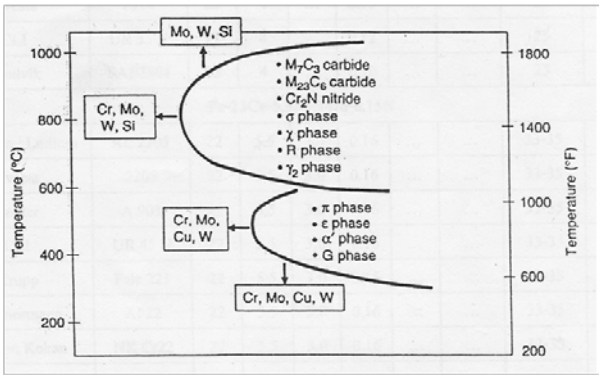
1. เกรด Fe-23Cr-4Ni-0.1N นิยมเรียก Alloy 2304
2. เกรด Fe-22Cr-5.5Ni-3Mo-0.15N นิยมเรียก Alloy 2205
3. เกรด Fe-25Cr-5Ni-2.5Mo-0.17N-Cu นิยมเรียก Alloy 2505
4. เกรด Fe-25Cr-7Ni-3.5Mo-0.25N-W-Cu นิยมเรียก Alloy 2507หรือซูเปอร์ดูเพล็กซ์ (Super Duplex)

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่ใช้งานอยู่ 4 เกรดนี้ จะสังเกตได้ว่าทั้ง 4 เกรด ก็มีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 2.1

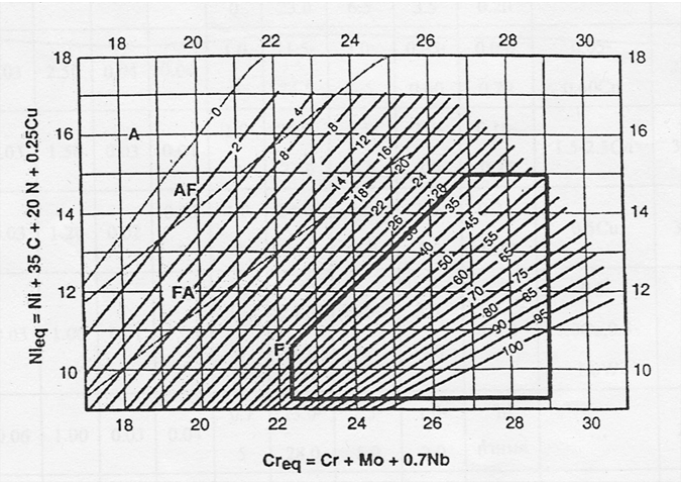
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงส่วนผสมทางเคมีและปริมาณสมมูลความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมบ่อ (PRE) ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [3]

เกรด UNS	ส่วนผสมทางเคมี (%ค่ามากที่สุด)										
	C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Mo	N	ธาตุอื่นๆ	ช่วงค่า PRE(1)
S31200	0.03	2.00	0.03	0.045	1.00	24.0-26.0	5.5-6.5	1.2-2.0	0.14-0.20	…	30.2-35.8
S31260	0.03	1.00	0.03	0.03	0.75	24.0-26.0	5.5-7.5	2.5-3.5	0.10-0.30	0.10-0.50W, 0.20-0.80Cu	33.9-42.4
S31500	0.03	1.2-2.00	0.03	0.03	1.4-2.0	18.0-19.0	4.25-5.25	2.5-3.0	0.05-0.10	…	27.1-30.5
S31803	0.03	2.00	0.02	0.03	1.00	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.08-0.20	…	27.1-30.5
S32304	0.03	2.50	0.04	0.04	1.00	21.5-24.5	3.0-5.5	0.05-0.60	0.05-0.20	0.05-0.06Cu	30.5-37.8
S32550	0.03	1.50	0.03	0.04	1.00	24.0-27.0	4.5-6.5	2.9-3.9	0.10-0.25	1.5-2.5Cu	22.5-29.7
S32750	0.03	1.20	0.02	0.035	1.00	24.0-26.0	6.0-8.0	3.0-5.0	0.24-0.32	0.5Cu	35.2-43.9

เพื่อที่จะได้ครอบคลุมการใช้งานให้มากที่สุด โดยที่ธาตุผสมหลักๆเหล่านี้จะไปช่วยเพิ่มเสถียรภาพของโครงสร้างและคุณสมบัติทางกลบางอย่างของเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละเกรด ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละเกรดมีจุดเด่นที่ต่างกันออกไป เช่น ธาตุโครเมียมและโมลิดีนัม จะทำให้เกิดโครงสร้างเฟอร์ไรท์ ขณะที่ธาตุนิกเกิล คาร์บอน และทองแดง ช่วยทำให้เกิดโครงสร้างออสเทนไนท์ และธาตุผสมต่างๆเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ยังมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการตกผลึกของธาตุผสมดังรูปที่ 2.1 และในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เพื่อให้ได้ปริมาณโครงสร้างจุลภาคของโลหะฐานและเนื้อเชื่อมที่สมดุลจะสามารถใช้แผนภูมิ WRC-1992 ทำนายปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรท์ในเนื้อเชื่อมได้ และเพื่อนำมาพัฒนาส่วนผสมทางเคมีของโลหะฐานให้เกิดความเหมาะสมยิ่งขึ้น [3] ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมการเปลี่ยนแปลงเวลา-อุณหภูมิ (TTT-Diagram) ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการตกผลึกของธาตุผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [3]

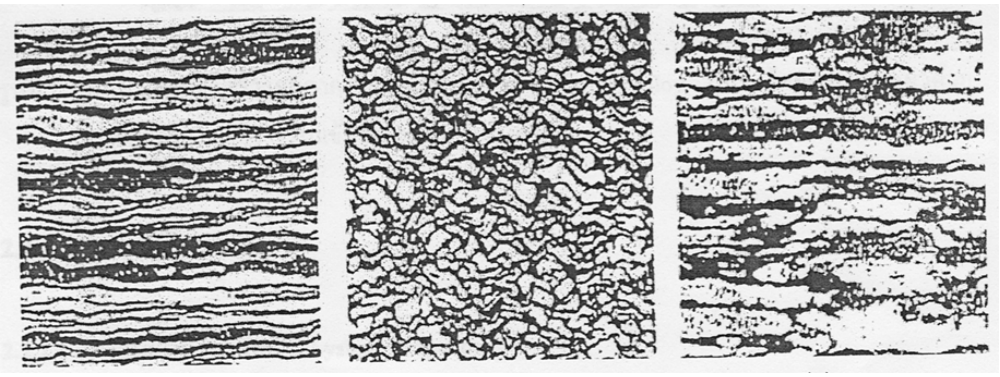


รูปที่ 2.2 แผนภูมิ WRC-1992 สำหรับทำนายปริมาณเฟอร์ไรท์ในเหล็กกล้าไร้สนิม [3]

2.2 โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

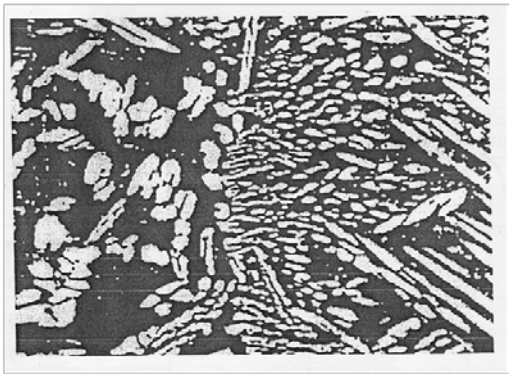
2.2.1 โครงสร้างจุลภาค

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ถูกออกแบบให้มีโครงสร้างเฟอร์ไรท์และออสเทนไนท์อย่างละ 50% โดยประมาณ โดยมีพื้นที่เป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์และออสเทนไนท์มีลักษณะเป็นก้อนเกาะ ซึ่งลักษณะรูปร่างและทิศทางของโครงสร้างจุลภาคจะแตกต่างกันออกไปตามภาคตัดขวางของแนวรีดและกรรมวิธีการผลิตโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 2.3 ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรด Alloy 2205 โดยทำการกัดผิวด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ (ก) ลักษณะโครงสร้างในทิศทางขนานกับแนวรีด (ข) ลักษณะโครงสร้างในทิศทางขวางกับแนวรีด (ค) ลักษณะโครงสร้างทิศในทางขนานกับแนวรีด ซึ่งถ่ายโดยกำลังขยายสูงกว่ารูปที่ 2.1 (ก) [3]



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อดูเพล็กซ์เกรด Alloy 2205 โดยทำการกัดผิวด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ [3]

2.2.2 คุณสมบัติทางกล

2.2.2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอน ทำให้รอยเชื่อมมีการขยายตัวน้อย ส่งผลให้เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์สามารถคืนตัวได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ยังมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก โดยจะแสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [4]

คุณสมบัติ	เกรด		
	UNS S32750	**UNS S32550**	**UNS S31803**
ความหนาแน่น g/cm^3 (Ib/in^3)	7.8 (0.28)	7.8 (0.28)	7.8 (0.28)
ความจุความร้อนจำเพาะ ที่อุณหภูมิ 20 °c ,J/kg.K	470	475	450

2.2.2.2 ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งของโลหะฐานในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ มีความน่าสนใจเป็นพิเศษเนื่องจากข้อกำหนดของสมาคมวิศวกรการกัดกร่อนแห่งปีประเทศสหรัฐอเมริกา (National Association Corrosion Engineer: NACE MR-01-75) ได้กำหนดค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่นำไปใช้งานในบริเวณที่มีความเปรี้ยว (Sour service) ว่าควรมีค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 28 ถึง 34 ร็อกเวลสเกลซี (HRC) ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

2.2.2.3 ความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Strength Properties)

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์มีค่าการดูดซับพลังงานถึง 100 จูล ที่อุณหภูมิ -100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าการดูดซับพลังงานที่อยู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอริติก กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก ซึ่งในการนำเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ไปใช้สร้างภาชนะรับแรงดังนั้น ตามมาตรฐานนานาชาติ เช่น มาตรฐานสมาคมวิศวกรรมเครื่องกลประเทศสหรัฐอเมริกา (ASME) ได้มีการพิจารณาถึงข้อกำหนดด้านการรับแรงกระแทกของวัสดุในการสร้างภาชนะรับแรงดันในการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำไว้ โดยจะพิจารณาตามความหนาของโลหะฐานที่นำมาสร้างภาชนะรับแรงดัน [4]

2.3 การประยุกต์ใช้งาน

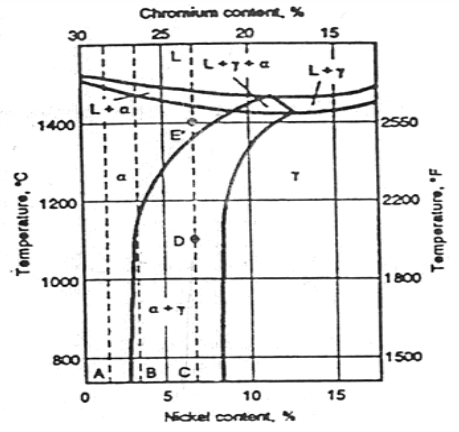
เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เช่น อุตสาหกรรมก๊าซธรรมชาติและน้ำมัน อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมกระดาษ และอุตสาหกรรมการควบคุมมลภาวะ โดยทั่วไปจะนำไปใช้งานในสิ่งแวดล้อมที่เป็นสารละลายพวกคลอไรด์ โดยนำไปใช้แทนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติกที่ได้รับความเสียหาย เพราะเกิดรอยแตกร้าวจากการกัดกร่อนแบบหลุมบ่อในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรดสูง ที่เรียกว่าซุปเปอร์ดูเพล็กซ์จะมีความต้านทานต่อสารละลายออกซิเจนเนตและคลอไรด์เนตในน้ำทะเลอีกด้วย โดยรายละเอียดของการนำไปใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรดต่างๆจะแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 การประยุกต์ใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [5]

เกรด	การนำไปใช้งาน
S31803 ,S32760 S32750, S32550	ท่อสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในโรงกลั่นน้ำมัน อุตสาหกรรมเคมีและอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่ใช้ในน้ำเป็นสารหล่อเย็น อุปกรณ์ย่อยกระดาษ
ทุกเกรด	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ถังบรรจุสารเคมี ภาชนะทำปฏิกิริยาเคมี ตัวกรองก๊าซ ระบบขนถ่ายกรดอะซีติกและฟอสเฟอริก อุปกรณ์ในอุตสาหกรรมก๊าซธรรมชาติ และน้ำมัน (ระบบท่อส่งของไหลแบบหลายเฟส)
S32304	อุปกรณ์ทำน้ำร้อนในครัวเรือนที่ต้องการความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม
S32750, S32760 ,S32550	ท่อสำหรับการขนถ่ายน้ำทะเล อุปกรณ์ในการแยกก๊าซธรรมชาติและน้ำมัน อุปกรณ์ในการทำให้เป็นไอของเกลือ

2.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค

ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ สามารถอธิบายโดยใช้สมมติฐานที่ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ประกอบด้วย เหล็ก 68% และส่วนผสมของธาตุอื่น ๆ อีก 32 % (ธาตุที่ผสมหลักคือ โครเมียม และนิกเกิล) และสามารถนำแผนภาพกึ่งสมดุลการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก-โครเมียม-นิกเกิล มาอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นขณะที่รับความร้อนและในขณะที่เย็นตัวลงได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนภาพกึ่งสมดุลการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก-โครเมียม-นิกเกิล (ส่วนผสมของธาตุเหล็ก 68% โดยน้ำหนัก) [6]

ที่ส่วนผสมทางเคมีของธาตุโครเมียม 30 % และนิกเกิล 2% โดยประมาณ (เส้นประA) เหล็กกล้าไร้สนิมจะแข็งตัวเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิห้อง ส่วนที่ปริมาณส่วนผสมของธาตุโครเมียมลดลงและปริมาณธาตุนิกเกิลเพิ่มขึ้น ซึ่งในช่วงนี้ส่วนผสมทางเคมีประกอบด้วย ธาตุโครเมียม 28% และธาตุนิกเกิล 4 % (เส้นประ B) โดยจะเย็นตัวลงมาและแข็งตัวเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์ อย่างเต็มที่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 1200 ถึง 1300 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเย็นตัวลงมาก็เข้าสู่บริเวณส่องโครงสร้าง (บริเวณโครงสร้าง $\alpha+\gamma$) ซึ่งทั้งสองโครงสร้างนี้จะพัฒนาขึ้นและคงไว้จนถึงอุณหภูมิห้อง โดยโครงสร้างที่อยู่ห่างออกไปทางซ้ายของเส้นประ B ที่อยู่ในบริเวณสองโครงสร้าง (บริเวณโครงสร้าง $\alpha+\gamma$) ก็จะเต็มไปด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรท์ สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันก็จะมีส่วนผสมทางเคมีประกอบด้วยธาตุโครเมียม 25% และธาตุนิกเกิล 7% (เส้นประ C) จะมีการเย็นตัวเข้าสู่บริเวณสองโครงสร้างที่อุณหภูมิสูงมาก ดังนั้นจึงมีเวลาในการแพร่ของธาตุผสมในการเปลี่ยนรูป ในสภาวะของแข็ง (Solid State Transformation) จากโครงสร้างเฟอร์ไรท์ ไปเป็นโครงสร้างออสเทนไนท์นาน เนื่องจากส่วนผสมของโลหะผสมตามแนวเส้นประ C จะเริ่มแข็งตัวเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์จนเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์เต็มที่ ในช่วงอุณหภูมิแคบๆที่อุณหภูมิสูงก่อนจะเข้าสู่บริเวณสองโครงสร้าง (บริเวณโครงสร้าง $\alpha+\gamma$) ซึ่งจะเห็นว่าโลหะผสมที่เส้นประ A,B และ C จะแข็งตัวในรูปของโครงสร้างเฟอร์ไรท์ก่อนทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์มีโครงสร้างพื้นเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์ (Ferritic Matrices) ซึ่งลำดับของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ตามการเย็นตัว ที่แสดงในรูปที่ 2.5 เป็นดังนี้

ของเหลว ⇨ ของเหลว+ เฟอร์ไรท์ ⇨ เฟอร์ไรท์ ⇨ เฟอร์ไรท์+ออสเทนไนท์

ในการเปลี่ยนโครงสร้างในสภาวะของแข็งจากโครงสร้างเฟอร์ไรท์เป็นโครงสร้างออสเทนไนท์ จะพิจารณาเรื่องของการแพร่ โดยมีผลมาจากความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง การเย็นตัวที่อุณหภูมิสูงอย่างรวดเร็วของเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างเฟอร์ไรท์เต็มที่ จะมีผลทำให้การเปลี่ยนจากโครงสร้างเฟอร์ไรท์ไปเป็นออสเทนไนท์ไม่ทัน จึงยังคงเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์อยู่มาก ซึ่งอย่างไรก็ตาม ในช่วงอุณหภูมิสูงจะเกิดการเปลี่ยนจากโครงสร้างเฟอร์ไรท์ เป็นโครงสร้างออสเทนไนท์ขึ้นสูงกว่ากันหรือไม่ ก็จะมีผลมาจากส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์แต่ละเกรดด้วยเช่นกัน โดยตัวอย่างอัตราการเย็นตัวช่วงอุณหภูมิ 1200 ถึง 800 องศาเซลเซียส หรือที่เรียกกันว่าอุณหภูมิช่วงวิกฤติ ($\Delta T_{12\text{-}8}$) ในช่วงนี้จึงใช้เป็นตัวกำหนดวัฏจักรทางความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ถ้าอัตราการเย็นตัวในช่วงอุณหภูมินี้ใช้เวลานาน การเปลี่ยนรูปจากโครงสร้างเฟอร์ไรท์ไปเป็นโครงสร้างออสเทนไนท์ก็จะมีมากขึ้นตามเช่นกัน โดยในการเชื่อมชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีความหนามาก ชิ้นงานจะได้รับความร้อนสูงจะทำให้มีอุณหภูมิช่วงวิกฤติ ($\Delta T_{12\text{-}8}$) นาน เพื่อใช้ประโยชน์จากช่วงอุณหภูมิวิกฤติ ($\Delta T_{12\text{-}8}$) นี้ในการควบคุมให้เกิดปริมาณโครงสร้างออสเทนไนท์ขึ้นในปริมาณที่เหมาะสม ในบริเวณเนื้อเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน เพื่อจะทำให้ได้รับสมบัติทางกลและความต้านทานการกัดกร่อนตามต้องการ ช่วงอุณหภูมิช่วงอุณหภูมิวิกฤติ ($\Delta T_{12\text{-}8}$) ของการเย็นตัวนี้จะไม่ขึ้นกับความหนาของวัสดุชิ้นงาน ไม่เหมือนกับพลังงานความร้อนที่ให้แก่แนวเชื่อม (Heat Input) แต่ช่วงอุณหภูมิวิกฤติ ($\Delta T_{12\text{-}8}$) จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เป็นสำคัญ วัฏจักรความร้อนที่อุณหภูมิจะไม่มีผลต่อความสมดุลของปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรท์กับโครงสร้างออสเทนไนท์ แต่จำเป็นต้องมีการควบคุมขอบเขตการขยายตัว ในการเกิดการตกผลึกของสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Phase) โดยทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มน้ำ เพื่อให้ผ่านช่วงอุณหภูมิที่ไวต่อการตกผลึกของสารประกอบโลหะอย่างรวดเร็ว ให้ได้สมบัติที่เหมาสมต่อการใช้งาน ซึ่งสำหรับการเชื่อมในปกติจะไม่จำเป็นต้องใช้วิธีการจุ่มน้ำ แต่ในบางครั้งการบังคับให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะเป็นผลดีในด้านคุณภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเชื่อมซ้อนหลายแนว ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดสูง (High Alloy Grade) โดยการทำให้ได้โครงสร้างจุลภาคเป็นสองโครงสร้างด้วยกรรมวิธีการทางความร้อน (Heat Treatment) ที่อุณหภูมิประมาณ 1550-1100 องศาเซลเซียส หรือที่จุด D ในรูปที่ 2.5 แล้วทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มน้ำ เพื่อหลีกเลี่ยงการตกผลึกของสารประกอบ (Intermetallic Phase) การตกผลึกหรือการตกตะกอนของสารประกอบโลหะจะมีผลต่อความต้านทางการกัดกร่อนสูง ทำให้ความต้านทานแรงกระแทกลดลง โดยปกติการค้นหาการตกตะกอน หรือ การตกผลึกของสารประกอบในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เป็นการค้นหาซิกมาเฟส (σ Phase) และการตกตะกอนของสารประกอบโลหะ พวกธาตุเหล็ก ธาตุโครเมียม และธาตุโมลิบดินั่ม เป็นต้น ซึ่งมักจะเกิดขึ้นตามขอบเกรน โครงสร้างเฟอร์ไรท์จะมีการขยายเข้าไปในโครงสร้างเฟอร์ไรท์ที่มีปริมาณของธาตุโครเมียม และธาตุโมลิดินั่มอยู่มาก ซึ่งการตกผลึกดังกล่าวแม้จะเกิดขึ้น

ในปริมาณน้อย แต่ก็มีผลทำให้คุณสมบัติทางกลและความต้านทางการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ลดลงพอสมควร ลักษณะของโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่ผ่านกระบวนการการรีด จะมีลักษณะทิศทางของโครงสร้างออสเทนไนท์ที่เป็นลักษณะก้อนบนพื้นโครงสร้างเฟอร์ไรท์ ทั้งในทิศทางขนานหรือตัดขวางกับทิศทางของแนวรีด ขณะที่การขึ้นรูปร้อนหรือการขึ้นรูปเย็น เป็นขบวนการตามหลังขบวนการหล่อ โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่ผ่านกรรมวิธีการหล่อ และผ่านกระบวนการรีดหลังจากกรรมวิธีการหล่อ มีความแตกต่างกันมาก ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อมและบริเวณที่ได้ผลกระทบทางความร้อนของแนวเชื่อม ระหว่างที่เกิดวัฏจักรทางความร้อนในการเชื่อม บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนที่อยู่ติดกับเส้นหลอมละลายจะมีอุณหภูมิสูงที่เหนือบริเวณสองโครงสร้าง (จุดE) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างออสเทนไนท์ ไปเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์ทั้งหมด ที่มีลักษณะเกรนหยาบ ซึ่งไม่เกี่ยวกับการแผ่ขยายบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนท์หลังการเย็นตัว และเมื่อมีการเย็นตัวลง ก็จะมีโครงสร้างออสเทนไนท์เริ่มเกิดขึ้นตามขอบเกรนของโครงสร้างเฟอร์ไรท์ ในขณะนั้นเองภายในเกรนโครงสร้างเฟอร์ไรท์จะมีการเรียงตัวตามระนาบของผลึกคล้ายงานหล่อ ซึ่งในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนของแนวเชื่อมจะมีปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรท์สูง ลักษณะโครงสร้างเช่นนี้จะทำให้คุณสมบัติด้านความเหนียวลดลง และความต้านทานการกัดกร่อนลดลงด้วย ซึ่งระดับของไนโตรเจนในโลหะฐานจะช่วยเพิ่มความสามารถในการเชื่อม และความต้านทานการกัดกร่อนได้ ในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์บางประเภทมีปริมาณไนโตรเจนมากถึง 0.35 % โดยระดับไนโตรเจนในโลหะฐานจะช่วยเพิ่มอุณหภูมิการเปลี่ยนรูปจากโครงสร้างเฟอร์ไรท์ไปเป็นโครงสร้างออสเทนไนท์ในระหว่างการเย็นตัวให้สูงขึ้น จึงทำให้ช่วงอุณหภูมิที่เป็นช่วงโครงสร้างเฟอร์ไรท์เต็มที่แคบลง นอกจากนี้ยังสนับสนุนให้เกิดการฟอร์มตัวของโครงสร้างออสเทนไนท์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ความกว้างของพื้นที่บริเวณผลกระทบทางความร้อนลดลง ขั้นตอนการเปลี่ยนโครงสร้างในเนื้อเชื่อม ก็เป็นเช่นเดียวกับบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน แต่รูปแบบการแข็งตัวแตกต่างกัน โดยที่เกรนในบริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์มีลักษณะการแข็งตัวเป็นแบบกิ่งไม้ (Columnar Grain) การเจริญเติบโตของเกรนในเนื้อเชื่อมจะโตมาก เนื่องจากมีการเย็นตัวที่รวดเร็ว เติบโตในทิศทางที่แน่นอน และในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ส่วนมากเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์อยู่ก่อน จึงเป็นตัวกำหนดขนาด และทิศทางโครงสร้างในเนื้อเชื่อม โดยโครงสร้างออสเทนไนท์จะเริ่มเกิดขึ้นตามขอบของเฟอร์ไรท์ และเกิดการผ่าเกรนตามระนาบผลึกในขณะเย็นตัวของเนื้อเชื่อม

2.5 ความสามารถในการเชื่อม

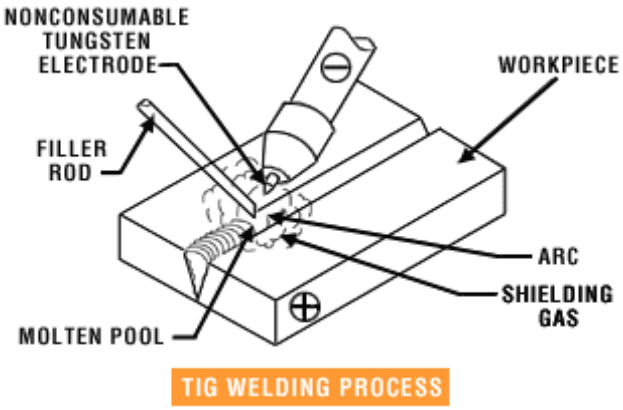
เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์มีความสามารถในการเชื่อมที่ดี ถึงแม้ว่าจะมีความสามารถไม่ดีเท่ากับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก ซึ่งโดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบันจะมีส่วนผสมของธาตุคาร์บอนต่ำ น้อยกว่า 0.03 % โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เพื่อป้องกันการกัดกร่อนระหว่างเกรน เนื่องจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ ในโลหะฐานหรือโลหะเติมจะมีปริมาณของธาตุซัลเฟอร์ และฟอสฟอรัสต่ำ ซึ่งน้อยกว่า 0.03 % โดยน้ำหนัก เพื่อลดปัญหารอยแตกร้าวขณะแข็งตัว (Hot Crack) ในขณะที่กำลังเปลี่ยนเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์ และมีความต้านทางการแตกร้าวจากการแพร่ของไฮโดรเจนได้ดี เนื่องจากธาตุไฮโดรเจนมีความสามารถในการละลายในโครงสร้างออสเทนไนท์ได้ดี อย่างไรก็ตามการแตกร้าวขณะแข็งตัวและการแตกร้าวเนื่องจากการแพร่ของก๊าซไฮโดรเจน ก็ยังมีโอกาสเกิดขึ้นได้ในงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ จึงจำเป็นต้องระมัดระวังและป้องกันในการเชื่อมเป็นอย่างดี โดยทั่วไปกระบวนการที่ใช้เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ได้แก่ กระบวนการเชื่อมด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ (SMAW) กระบวนการเชื่อมทิก (GTAW) กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม (GMAW) กระบวนการเชื่อมอาร์คใต้ผงฟลักซ์ (SAW) กระบวนการเชื่อมอาร์คไส้ฟลักซ์ (FCAW) และกระบวนการเชื่อมอาร์คพลาสม่า โดยการเลือกกระบวนการเชื่อมใดขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุ ประเภทของรอยต่อ อีกทั้งปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องในด้านการออกแบบและความประหยัดในการเชื่อม [6]

2.6 การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยระบบทิก (Welding Stalnless Steels with the Gas Tungsten – Arc Process)

TIG เป็นคำย่อมาจาก Tungsten Innert Gas Arc Welding หรือในบางแห่งใช้คำว่า GasTungsten – Arc Welding (G.T.A.W.) เป็นกรรมวิธีในการเชื่อมโลหะที่ทันสมัยวิธีหนึ่ง นำมาใช้ครั้งแรกในอุตสาหกรรมสร้างเครื่องบิน ในราวปี ค.ศ. 1940 ในปัจจุบันจะใช้กันอย่างแพร่หลายในการเชื่อมโลหะที่มีความบางหรือเบา เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม อะลูมิเนียม แมกนีเซียม หรือโลหะผสมอื่น ๆ กรรมวิธีการเชื่อมแบบนี้ในช่วงสงครามโลกครั้งที่2ได้ใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สปกคลุมในการเชื่อมต่อโลหะแมกนีเซียมมีชื่อเรียกว่า Heliarc (Linde) หรือ Heliwelding (Airco) ซึ่งชื่อทั้งสองเป็นชื่อทางการค้าของบริษัทผู้ผลิตเครื่องเชื่อมทิก สามารถใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมทั่วๆ ไป เช่น ใช้เชื่อมพิมพ์หล่อยางภาชนะบรรจุของเหลวและแก๊ส งานประกอบโครงสร้างที่ต้องการความเที่ยงตรงและความแข็งแรง ของรอยเชื่อมเป็นพิเศษ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมได้ทั้งโลหะประเภทเหล็ก (Ferrous Metals) และที่ไม่ใช่เหล็ก (Non FerrousMetals) ที่มีความหนาต่างๆ กัน โดยเฉพาะความสามารถเชื่อมโลหะแผ่นที่มีความบางถึง 0.25มิลลิเมตร (0.01”) [7]

2.6.1 กระบวนการเชื่อมแบบ TIG (TIG Welding)

กระบวนการเชื่อมแบบ TIG ดังภาพที่ 2.6 เป็นกระบวนการเชื่อมด้วยไฟฟ้า การอาร์กซึ่งทำให้เกิดความร้อนอย่างรุนแรง เกิดจากแท่งอิเล็กโทรดทังสเตนที่ไม่หลอมละลาย (Non – Consumable Tungsten Electrode) กับโลหะชิ้นงาน



รูปที่ 2.6 แสดงกระบวนการเชื่อมแบบทิก (TIG Welding) [7]

จากภาพที่ 2.6 บริเวณการอาร์ก ซึ่งมีบ่อหลอมละลายจะถูกปกคลุมด้วยแก๊สเฉื่อยเพื่อป้องกันไม่ให้บรรยากาศภายนอกเข้ามาทำปฏิกิริยากับแท่งทังสเตน และน้ำโลหะแนวเชื่อม และทำให้การอาร์กสม่ำเสมอ เนื่องจากอิเล็กโทรดมิใช่ลวดเชื่อม แต่มีหน้าที่ทำให้เกิดการอาร์กเพื่อให้เกิดความร้อนเท่านั้น ถ้าต้องการเติมเนื้อโลหะแนวเชื่อม ก็ต้องใช้โลหะเติมหรือเรียกว่าลวดเชื่อมซึ่งลวดเชื่อมนี้จะใช้ หรือไม่ใช้ก็ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะงาน ซึ่งจะคล้ายกับการเชื่อมด้วยแก๊สออกซิเจน-อะเซติลีน (ดังในภาพที่ 2.6) ก่อนหน้านี้กระบวนการเชื่อมทิกถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อเชื่อมโลหะต่างๆที่เชื่อมได้ยาก เช่น อะลูมิเนียม แมกนีเซียม เหล็กกล้าไร้สนิม ทองแดง และโลหะอื่นๆ แต่ในปัจจุบันนี้กระบวนการเชื่อมทิกเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมีการพัฒนาเครื่องเชื่อมและวิธีการเชื่อมใหม่ๆ ขึ้น ให้สามารถเชื่อมต่อโลหะได้เกือบทุกชนิด รวมทั้งโลหะผสม เหล็กกล้าไร้สนิม อะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม ทองแดงและทองแดงผสม เป็นต้น

2.6.2 ข้อดีของการเชื่อมแบบ TIG (Advantages of TIG Welding)

2.6.2.1 แนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมแบบ TIG มีส่วนผสมทางเคมีเหมือนกับชิ้นงานเชื่อมเพราะแก๊สเฉื่อยที่ปกคลุมการอาร์ก จะไม่รวมตัวหรือทำปฏิกิริยากับโลหะแนวเชื่อม จึงได้แนวเชื่อมที่แข็งแรง

ทนต่อการกัดกร่อน (More Resistant to Corrosion) และความเหนียว (More Ductile) กว่ารอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระบวนการอื่นๆ

2.6.2.2 ขณะที่ทำการเชื่อมจะปราศจากสะเก็ด ประกายไฟ และควัน

2.6.2.3 การเชื่อมไม่ต้องใช้ฟลักซ์ แนวเชื่อมจึงสะอาดไม่มีสแลก

2.6.2.4 ขณะทำการเชื่อม สามารถมองเห็นระยะอาร์กและบ่อหลอมละลายได้ชัดเจนเพราะไม่มีเขม่าควัน และสแลกปกคลุม ทำให้ควบคุมการเชื่อมได้ตามต้องการ

2.6.2.5 การบิดงอผิดรูป (Distortion) ของชิ้นงานใกล้แนวเชื่อม และเขม่าเกิดขึ้นน้อยมากเนื่องจากการเชื่อมใช้ความร้อนสูง และมีการกระจายความร้อนเป็นบริเวณแคบ

2.6.2.6 การเชื่อมจะไม่ส่งถ่ายน้ำโลหะ (Metal Transfer) จากปลายลวดเชื่อมข้ามผ่านบริเวณการอาร์กสู่บ่อหลอมละลาย จึงไม่มีเม็ดโลหะกระเด็นติดบริเวณขอบแนวเชื่อม (Spatter)

2.6.2.7 สามารถเชื่อมโลหะชิ้นงานได้เกือบทุกชนิด โดยเฉพาะโลหะต่างๆ ดังต่อไปนี้อะลูมิเนียม แมกนีเซียม เหล็กกล้าไร้สนิม ซิลิคอนบรอนซ์ เงิน ทองแดงและทองแดงผสมเหล็กหล่อ และเหล็กกล้าละมุน เป็นต้น

2.6.2.8 สมารถเชื่อมได้ทุกตำแหน่งในท่าเชื่อม

2.6.2.9 สามารถทำงานได้รวดเร็วและประหยัด

2.6.3 ข้อเสียของการเชื่อมโลหะแบบ TIG

2.6.3.1 ความเร็วในการเชื่อมจะช้ากว่าวิธีอื่นๆ

2.6.3.2 ช่างเชื่อมจะต้องมีทักษะที่ดี มือและสายตาจะต้องมีความสัมพันธ์กัน

2.6.3.3 รังสียูวีจากการเชื่อมจะมีความสว่างและแรงกว่าเครื่องเชื่อมอื่น ๆ

2.6.3.4 เครื่องเชื่อมและอุปกรณ์มีราคาแพง

2.6.4 หลักของวิธีการเชื่อมโลหะแบบ TIG

หลักการทั่วไปคล้ายกับการเชื่อมโลหะด้วยไฟฟ้า คือการให้ความร้อนทำให้โลหะหลอมละลายนั้นเกิดจากการอาร์กระหว่างอิเล็กโทรด (Tungsten Electrode) กับชิ้นงาน ขณะเดียวกันบริเวณที่เกิดการเชื่อมจะมีแก๊สเฉื่อย (Inert Gas) ปกคลุมบริเวณนั้น ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้แก๊สอาร์กอนเพื่อป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (Oxidation) คือ ออกซิเจน ไนโตรเจน และความชื้นในอากาศเข้ามารวมกับโลหะที่กำลังหลอมละลาย เมื่อเกิดความร้อนจากการเชื่อมชิ้นงานจะหลอมละลายจนเกิดเป็นบ่อหลอมละลาย (Puddle) ขึ้น เมื่อบ่อหลอมละลายเกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อใดๆ ก็จะทำให้ขอบของชิ้นงานนั้นหลอมละลายติดกัน แต่เนื่องจากทังสเตนอิเล็กโทรดเป็นวัสดุที่ไม่ละลายหรือสิ้นเปลือง (Non Consumable Electrode) จึงจำเป็นที่จะต้องเติมลวดเชื่อม (Filler Metal) ลงไปในบ่อหลอมละลายนั้นด้วยแต่ในกรณีที่ทำการเชื่อมโลหะบางๆ จะไม่เติมลวดลงในบ่อหลอมละลายเลยก็ได้

2.6.5 อุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับการเชื่อมด้วยวิธี TIG (ดังในภาพที่ 2.7)

2.6.5.1 เครื่องเชื่อม (Power Source)

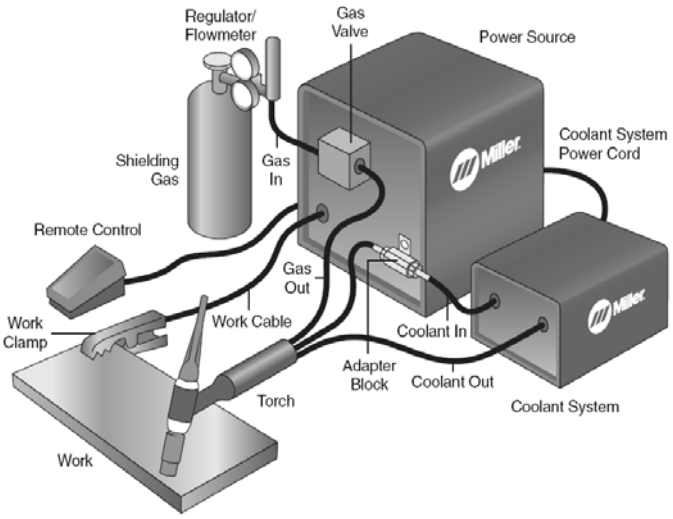
2.6.5.2 หัวเชื่อม (Torch)

2.6.5.3 อิเล็กโทรดทังสเตน (Electrode Tungsten)

2.6.5.4 แก๊สปกคลุม (Shielding Gas) หรือแก๊สเฉื่อย (Inert Gas)

2.6.5.5 อุปกรณ์ปรับความดัน (Regulator)

2.6.5.6 ลวดเชื่อม (Filler Metal)



รูปที่ 2.7 แสดงภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อม [7]

2.6.5.1 เครื่องเชื่อม (Power Source)

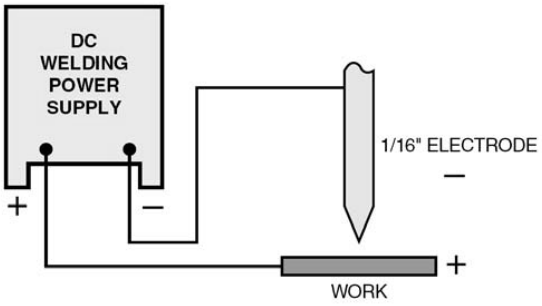
ปัจจุบัน เครื่องเชื่อมทิกถูกออกแบบขึ้น ด้วยเทคโนโลยีที่สูงขึ้น แล้วแต่บริษัทผู้ผลิตจะสร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีใด แต่พื้นฐานการทำงานของเครื่องเชื่อมทิกยังคงใช้หลักการแบบเครื่องเชื่อมกระแสคงที่ (Constant Current) ซึ่งมีทั้งไฟกระแสตรงและกระแสสลับ และโดยทั่วไปเครื่องเชื่อมทิกจะมีกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือรวมอยู่ด้วยเครื่องเชื่อม TIG เป็นเครื่องเชื่อมที่ออกแบบเป็นพิเศษ ซึ่งจะต้องมีระบบความถี่สูง (H.F.)และสวิทซ์อัตโนมัติสำหรับควบคุมการไหลของแก๊สและน้ำเพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ในการหลอมละลาย ในการเชื่อมและการระบายความร้อนของหัวเชื่อมรวมอยู่ในเครื่องด้วย โดยทั่วไปเครื่องเชื่อมจะเป็นแบบ Transformer Rectifier หรือเป็นแบบ Generator ขับด้วยมอเตอร์หรือเครื่องยนต์ก็ได้ ซึ่งในแบบ Transformer Rectifier จะสามารถเลือกกระแสไฟฟ้าเชื่อมตามลักษณะของงานได้เครื่องเชื่อมที่ใช้กันมีขนาดตั้งแต่ 3-350 แอมแปร์ บางเครื่องพิเศษมีตั้งแต่ครึ่งแอมป์ถึง 800 แอมป์และมี Duty Cycle 60 เปอร์เซ็น (ดังในภาพที่ 2.8)

รูปที่ 2.8 แสดงภาพเครื่องเชื่อมทิก

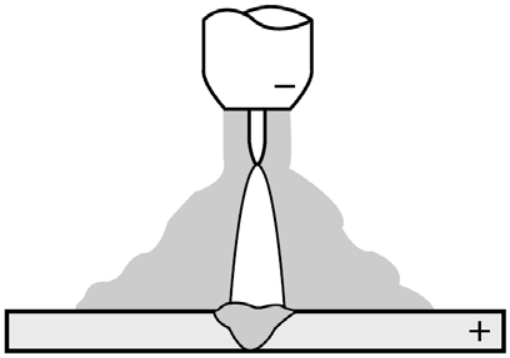
1. ระบบกระแสไฟที่ใช้ในการเชื่อม

กระแสไฟที่ใช้ในการเชื่อม TIG นั้น มี 3 ประเภทด้วยกันคือ

1.1 กระแสตรงขั้วตรง (Direct Current Straight Polarity : D.C.S.P.) หัวเชื่อมหรืออิเล็กโทรดจะเป็นขั้วลบ ส่วนขั้วบวกจะจับที่ชิ้นงาน ประจุไฟฟ้าลบไหลจากหัวเชื่อมอิเล็กโทรดไปสู่ชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 2.9และ2.10 ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นที่ชิ้นงานจะมาก โดยจะเกิดที่ชิ้นงาน 70% และเกิดที่อิเล็กโทรด 30% แนวเชื่อมที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแคบแต่กินลึกมาก กระแสไฟแบบนี้จะใช้ในการเชื่อมเหล็กทั่วไป เหล็กกล้าไร้สนิม และไททาเนียม

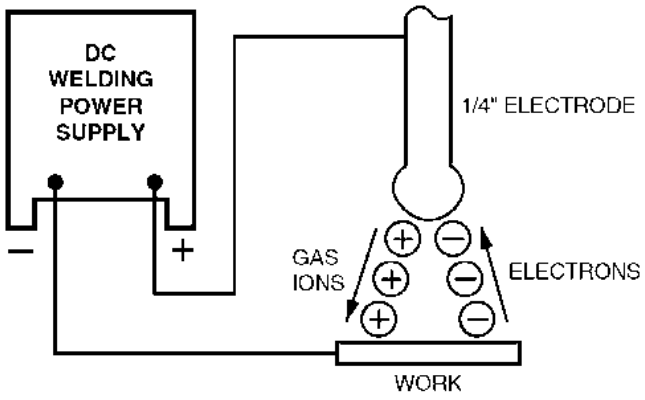


รูปที่ 2.9 แสดงขั้วของกระแสไฟฟ้าที่หัวเชื่อมและชิ้นงานในการเชื่อมแบบ D.C.S.P [7]

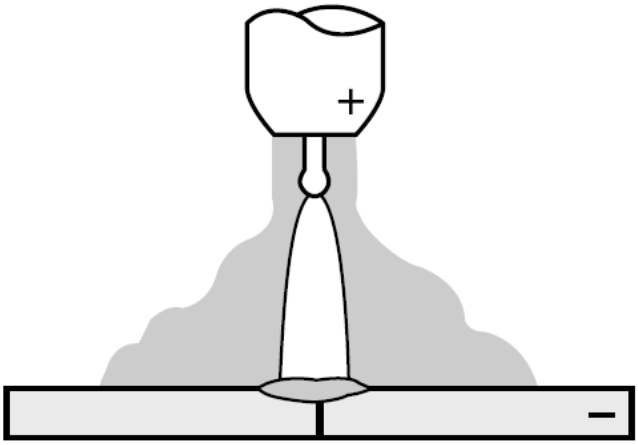


รูปที่ 2.10 แสดงแนวเชื่อมที่แคบและลึกในการเชื่อมแบบ D.C.S.P [7]

2.2 กระแสตรงกลับขั้ว (Direct Current Reverse Polarity) D.C.R.P. หัวเชื่อมหรืออิเล็กโทรดจะเป็นขั้วบวก ส่วนขั้วลบจะจับที่ชิ้นงาน ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นที่หัวเชื่อมจะมีมากจึงจำเป็นที่จะต้องใช้ทังสเตนที่มีขนาดใหญ่กว่าเพราะเหตุว่า ถ้าหากความร้อนที่เกิดขึ้นที่ปลายทังสเตนอิเล็กโทรดมีมาก ก็จะทำให้ปลายทังสเตนอิเล็กโทรดเกิดการละลายแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะกว้างแต่ไม่ลึก (ดังในรูปที่ 2.11และ2.12)



รูปที่ 2.11 แสดงขั้วของกระแสไฟฟ้าที่หัวเชื่อมและชิ้นงานในการเชื่อมแบบ D.C.R.P [7]



รูปที่ 2.12 แสดงแนวเชื่อมที่กว้างแต่ไม่ลึกในการเชื่อมแบบ D.C.R.P [7]

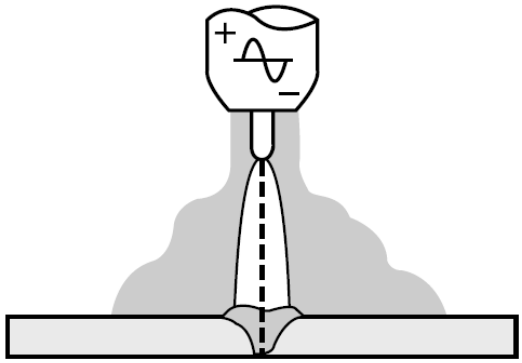
เครื่องเชื่อมทิกที่จ่ายกระแสไฟตรง ช่างเชื่อมต้องต่อขั้วให้ถูกต้อง ซึ่งมีทั้งกระแสไฟตรงขั้วบวก (Direct Current Reversed Polarity: DCRP) และกระแสไฟตรงขั้วลบ (Direct Current Straight Polarity : DCSP) มีการใช้งาน ที่แตกต่างกันดังนี้

1. ติดตั้งเครื่องเชื่อมเป็นขั้วลบ อิเลคตรอนจะไหลจากอิเล็กโทรดไปยังชิ้นงาน ความร้อนที่ชิ้นงานจึงมีมากกว่าความร้อนที่อิเล็กโทรด (ร้อยละ 70 เกิดที่ชิ้นงาน ร้อยละ 30 เกิดที่อิเล็กโทรด)

2. ติดตั้งเครื่องเชื่อมเป็นขั้วบวก อิเล็กโทรดจะไหลจากชิ้นงานไปยังอิเล็กโทรด ความร้อนเกิดขึ้นที่อิเล็กโทรด จึงมีมากกว่าความร้อนที่บนชิ้นงาน (ร้อยละ 70 เกิดที่อิเล็กโทรด ร้อยละ 30เกิดที่ชิ้นงาน)กระแสไฟตรงขั้วบวกต้องใช้อิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโตกว่าขั้วลบ แต่ใช้กระแสไฟต่ำกว่า ทำให้รูปร่างของแนวเชื่อมที่มีลักษณะกว้างและการซึมลึกตื้น (Shallow Penetration WideWeld) แต่มีการนำมาใช้งานเชื่อมแบบ TIG น้อยมากกระแสไฟตรงขั้วลบต้องใช้อิเล็กโทรดรดที่มีขนาดเล็กกว่า ใช้กระแสไฟสูงกว่า รูปร่างแนวเชื่อมแคบและการซึมลึกมาก (Deep Penetration – Narrow Weld) เชื่อมงานได้รวดเร็วและลดการบิด ผิดรูปของชิ้นงาน โดยใช้เชื่อมโลหะได้เกือบทุกชนิด ยกเว้นอะลูมิเนียมและแมกนีเซียม

3. กระแสสลับความถี่สูง (Alternating Current & High Frequency) หลักการทำงานนี้จะเห็นว่าในครึ่งไซเคิลแรกของการเชื่อม ขณะที่หัวเชื่อมทังสเตนเป็นขั้วบวก ที่หัวเชื่อมจะมีความร้อนสูง ในช่วงนี้จะต้องทำการกำจัดออกไซด์ที่ผิวของชิ้นงานออกไปจากบริเวณที่ถูกเชื่อมส่วนในครึ่งไซเคิลหลัง ที่ชิ้นงานจะเกิดความร้อนสูง จึงทำให้เกิดเป็นบ่อหลอมละลายขึ้น (Puddle)แต่ความเป็นจริงแล้วออกไซด์และความชื้น จะเป็นฉนวนกั้นไม่ให้กระแสไฟฟ้าผ่านจากทังสเตนอิเล็กโทรดไปยังชิ้นงานได้สะดวก ดังนั้นกระแสไฟฟ้าความถี่สูง (High Frequency) อย่างต่อเนื่องจะเป็นตัวที่สามารถขจัดผิวออกไซด์บนชิ้นงานได้ดี ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิดที่ชิ้นงาน 50% และ

ทังสเตนอิเล็กโทรด 50% และแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นจะไม่กว้างมากหรือไม่ลึกจนเกินไป ซึ่งจะเหมาะในการเชื่อมอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมได้ดี



รูปที่ 2.13 แสดงแสดงผิวของชิ้นงานในการเชื่อมแบบ D.C.R.P. [7]

การเลือกใช้กระแสไฟแบบกระแสตรงหรือกระแสสลับนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะชิ้นงานที่นำมาเชื่อม กระแสสลับจะเหมาะและเชื่อมได้ดีกับอะลูมิเนียมและแมกนีเซียม ส่วนกระแสตรงใช้ได้ดีกับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กหล่อ เหล็กกล้าละมุน เงิน ทองแดง นิกเกิล และนิกเกิลผสมเป็นต้น เครื่องเชื่อมทิกปัจจุบันได้ออกแบบให้มีช่วงของกระแส 0.5 – 500 แอมแปร์ และอาร์กโวลต์เตจ 10 – 30 โวลต์ 60% Duty Cycle ดังในภาพที่ 2.13

2.6.5.2 หัวเชื่อม TIG (TIG Welding Torch) หัวเชื่อมที่ใช้สำหรับการเชื่อมด้วยวิธี TIG มีชื่อเรียกว่า Torch เป็นตัวสำหรับจับยึดทังสเตนอิเล็กโทรด ปรกติน้ำหนักเบา มีด้วยกัน 2 ระบบ คือ

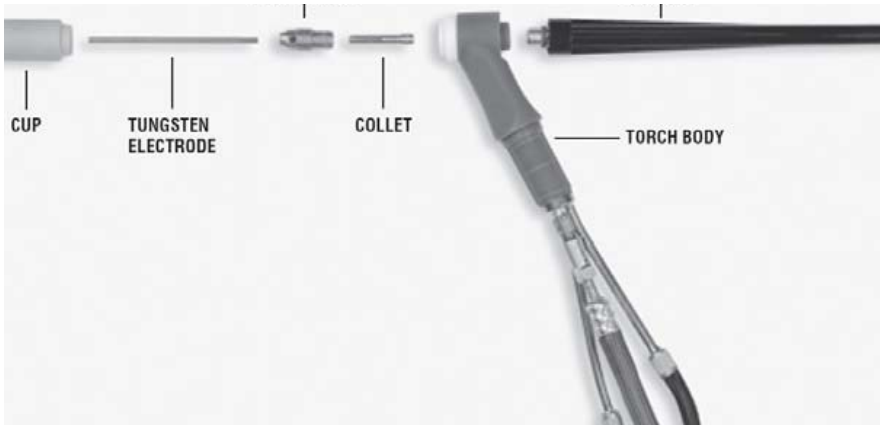
1. ชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air-Cooled Torch) ถูกนำมาใช้งานเชื่อมโลหะบาง ใช้กระแสไฟต่ำ และใช้กับงานเชื่อมที่มีระยะเวลาเชื่อมสั้นๆ การระบายความร้อนอาศัยอากาศโดยรอบเป็นตัวระบายความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 2.14

รูปที่ 2.14 แสดงชิ้นส่วนที่ประกอบในหัวเชื่อมแบบ TIG ชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ [7]

2. ชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water-Cooled Torch) เหมาะสำหรับงานเชื่อมที่ต้องใช้กระแสไฟสูง (สูงกว่า 200 แอมป์ขึ้นไป) และเชื่อมติดต่อกันเวลานานๆ

หัวเชื่อมมีหน้าที่สำคัญสรุปได้ดังนี้

1. เป็นส่วนที่ใช้จับขณะเชื่อม
2. ใช้เป็นหัวจับอิเล็กโทรดทังสเตน
3. เป็นทางผ่านของแก๊สปกคลุมเพื่อไหลไปปกคลุมบริเวณการอาร์ก
4. เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าสู่บริเวณการอาร์ก
5. ใช้เป็นทางผ่านของน้ำที่ไหลมาระบายความร้อนภายในหัวเชื่อมส่วนประกอบของหัวเชื่อมประกอบด้วยชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 อุปกรณ์เหล่านี้สามารถถอดออกสับเปลี่ยนขนาดได้ตามความเหมาะสม มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.15 แสดงชิ้นส่วนที่ประกอบในหัวเชื่อมแบบ TIG ชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ [7]

1. ส่วนลำตัวของหัวเชื่อม (Torch Body) เป็นชิ้นส่วนหลักของหัวเชื่อม ทำด้วยทองแดงผสม เป็นทางผ่านของแก๊สปกคลุมและน้ำที่ไประบายความร้อน และกระแสไฟเชื่อม โดยมีวัสดุที่เป็นฉนวนหุ้มห่ออย่างดี
2. อุปกรณ์จับยึดแท่งทังสเตน (Collet) ใช้จับยึดแท่งอิเล็กโทรดทังสเตนมีขนาดต่างๆ กัน จะต้องเลือกให้เหมาะกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งทังสเตนใช้คู่กับ Clamping Nut
3. อุปกรณ์บีบจับแท่งทังสเตน (Collet Body) เป็นอุปกรณ์ซึ่งประกอบยึดด้วยเกลียวต่อจากส่วนลำตัวของหัวเชื่อมทำหน้าที่บีบจับ (Collets) ให้จับยึดแท่งอิเล็กโทรดทังสเตนได้แน่นขึ้น
4. ครอบบน (Back Cap) เป็นอุปกรณ์ส่วนบนสุดของหัวเชื่อม ทำหน้าที่ครอบแท่งอิเล็กโทรดทังสเตน และป้องกันการไหลของแก๊สปกคลุม มีขนาดความยาวต่างๆ กันตามขนาดของแท่งอิเล็กโทรดทังสเตน

5. หัวครอบ (Nozzle) เป็นชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ที่ครอบอยู่ล่างสุดของหัวเชื่อมใกล้ผิวหน้าชิ้นงาน ทำหน้าที่ป้องกันอิเล็กโทรดทังสเตน และบังคับให้แก๊สปกคลุมไหลตรงไปยังบริเวณอาร์กขณะทำการเชื่อม

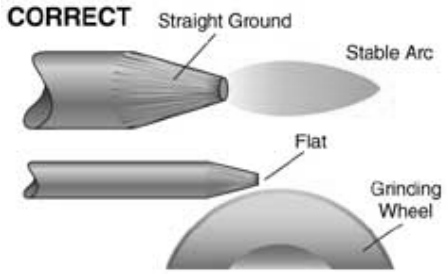
2.6.5.3 อิเล็กโทรดทังสเตน ทำจากโลหะทังสเตนและโลหะทังสเตนผสม โดยโลหะทังสเตนเป็นโลหะที่มีจุดหลอมละลาย (Melting Point) สูงมาก (3,140^{O}C) ซึ่งจะสูงกว่าโลหะ ชนิดอื่นๆ ลวดทังสเตนผสมจะผสมด้วยโลหะธาตุทอเรียม (Thorium) หรือเซอร์โคเนียม (Zirconium)อิเล็กโทรดทังสเตนในการเชื่อมแบบ TIG จะทำหน้าที่ให้เกิดการอาร์ก ไม่ใช่โลหะเติมหรือลวดเชื่อม จึงเป็นอิเล็กโทรดที่ไม่หลอมละลายขนาดอิเล็กโทรดทังสเตนมีหลายขนาด ซึ่งมีขนาดความโตวัดที่เส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.010,0.020, 0.040, 4 1 , 8 1 , 16 1 , 16 3 , 32 3 และ 325 นิ้ว ขนาดความยาวตั้งแต่ 3, 6, 7, 18 และ 24 นิ้วอิเล็กโตรดทังสเตนจะต้องปราศจากสิ่งสกปรกติดที่ผิวลวด ไม่มีรอยแตกและสแลกฝังใน เพราะจะทำให้แนวเชื่อมที่ได้มีคุณภาพต่ำ ผิวอิเล็กโทรดทังสเตนมี 2 ลักษณะ คือ แบบผิวเจียระไนกับแบบผิวล้างด้วยน้ำยาเคมี ซึ่งแบบผิวเจียระไนจะมีผิวเป็นมันได้มาตรฐานและราคาสูงกว่าแบบผิวที่ล้างด้วยน้ำยาเคมีขนาดของกระแสไฟในการเชื่อมแบบ TIG จะมากหรือน้อยขึ้นกับอยู่กับชนิดและขนาดของชิ้นงาน การออกแบบรอยต่อ ตำแหน่งท่าเชื่อม ชนิดของแก๊สปกคลุมและชนิดของหัวเชื่อม เป็นต้นความสามารถในการนำกระแสไฟเชื่อมของอิเล็กโทรดทังสเตน ในแต่ละขนาดขึ้นอยู่กับชนิดและขั้วของกระแสไฟด้วยคือ กระแสไฟตรงขั้วลบมีความสามารถในการนำกระแสไฟเชื่อมได้มากที่สุดแต่จะนำกระแสได้น้อยลงเมื่อใช้กระแสสลับ และจะนำกระแสได้น้อยที่สุดเมื่อใช้กระแสไฟตรงขั้วบวกอิเล็กโทรดทังสเตน ชนิดและขนาดของอิเล็กโทรดทังสเตนมีความสำคัญคือ ช่วยให้คุณภาพของชิ้นงานดีตามที่ต้องการ ถ้าได้ขนาดที่เหมาะสม รวมทั้งจะต้องรู้ถึงกระแสไฟเชื่อม (แอมป์) สำหรับทังสเตนนี้ด้วยเพราะทำให้ส่วนปลายของทังสเตนไม่ถูกทำลายจากการเชื่อม ความแตกต่างและข้อดีข้อเสียของอิเล็กโทรดแต่ละชนิดดังนี้

1. ทังสเตนบริสุทธ์ (Pure Tungsten) ราคาจะถูกกว่าชนิดอื่น ๆ คุณภาพในการใช้งานพอใช้และนิยมใช้กันทั่วไป ใช้ลวดทังสเตนบริสุทธิ์ สัญลักษณ์คือ EWP (Electrode Welding PureTungsten) จะมีโค้ดสีที่ปลายลวดสีเขียว ปกติจะใช้กับกระแสไฟสลับในการเชื่อมอะลูมิเนียมและแมกนีเซียม ปลายลวดต้องต้องแต่งให้มนหรือทำให้ละลายกลมเป็นลูกฟุตบอล ลักษณะการอาร์กจะนิ่มสม่ำเสมอโดยใช้แก๊สอาร์กอนหรือฮีเลียมเป็นแก๊สปกคลุม อิเล็กโทรดทังสเตนบริสุทธิ์ถ้าใช้กับไฟฟ้ากระแสตรงความสามารถนำกระแสไฟจะลดลงและมีโอกาสละลายเป็นเม็ดหยดผ่านการอาร์กไปผสมกับโลหะแนวเชื่อมได้ง่ายกว่าลวดทังสเตนผสม

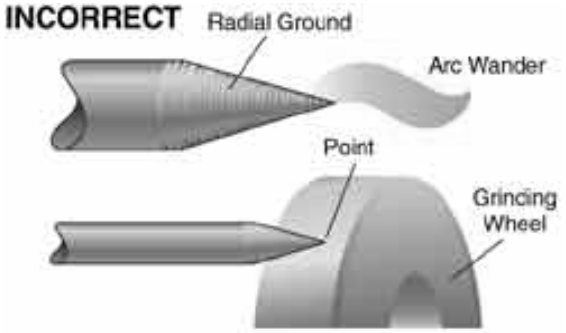
2. ทอริเอทเต็ดทังสเตน (Thoriated Tungsten) เป็นอิเล็กโทรดทังสเตนที่ผสมด้วยโลหะทอเรียมโค้ดปลายลวดสีเหลือง สัญลักษณ์คือ EWPTh-1 สำหรับทังสเตนที่ผสมทอเรียมร้อยละ 1 และสีแดงสำหรับทังสเตนที่ผสมทอเรียม 2% สัญลักษณ์คือ EWPTh-2 การนำโลหะทอเรียมผสมกับลวด

ทังสเตนจำนวนเพียงเล็กน้อย จะทำให้คุณภาพในการแตกตัวของอิเล็กตรอนดีขึ้นมีผลทำให้การเริ่มต้นการอาร์กดีขึ้นด้วย และมีความสามารถในการนำกระแสไฟได้ในปริมาณสูง ส่วนผสมของทอเรียมร้อยละ 1-2 จะเป็นการเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าได้สูงขึ้นถึงร้อยละ 50กระแสไฟฟ้าจะไหลได้ดี ทำให้ง่ายต่อการการเริ่มต้นอาร์ก เปลวอาร์กจะคงที่โดยที่อายุการใช้งานชนิดโลหะทอเรียมผสมกับลวดทังสเตนร้อยละ 1 จะยาวกว่าชนิดร้อยละ 2 ทอริเอททังสเตนเหมาะกับการเชื่อมเหล็กทั่วไป ด้วยกระแสไฟตรงและต้องลับแต่งปลายลวดให้เรียวแหลมโดยเฉพาะใช้กับกระแสไฟตรงขั้วลบ ลวดทอริเอทเต็ดทังสเตนร้อยละ 2 จะเป็นชนิดใช้กันแพร่หลายมากทอริเอทเต็ดทังสเตนอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีลักษณะพิเศษคือ นำเอาลวดทอริเอทเต็ดทังสเตนมาอัดรวมไว้ในลวดทังสเตนบริสุทธิ์ให้กลายเป็นอิเล็กโทรดชนิดใหม่ โดยใช้ลวดทอริเอทเต็ดเพียง2% ของพื้นที่หน้าตัดตลอดความยาวของลวด เป็นลวดทังสเตนผสมที่มีคุณสมบัติเริ่มต้นการอาร์กได้ดีกระแสไฟไหลผ่านได้มากและรักษารูปทรงลักษณะมนกลมของปลายลวดได้ดี ใช้ได้ดีกับการเชื่อมโลหะอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมด้วยกระแสไฟฟ้าสลับหรือใช้กระแสตรงได้ โค้ดที่ปลายลวดเป็นสีน้ำเงิน

3. เซอร์โคเนทเต็ดทังสเตน (Zirconiated Tungsten) อิเล็กโทรดทังสเตนที่มีเซอร์โคเนียมผสมอยู่ร้อยละ 0.3-0.5 โค้ดปลายลวดสีน้ำตาล เหมาะกระแสไฟฟ้าสลับความถี่สูงโดยเฉพาะปลายลวด จึงต้องแต่งให้เป็นลักษณะปลายมนกลม เหมือนลวดอิเล็กโทรดทังสเตนบริสุทธิ์ซึ่งอิเล็กโทรดทังสเตนชนิดนี้สามารถป้องกันการเกิดสิ่งสกปรกที่ปลายลวดได้ดี ทำให้เริ่มต้นการอาร์กได้ง่ายเหมาะกับงานที่ต้องการคุณภาพสูงให้การอาร์กสม่ำเสมอ เป็นลวดที่มีคุณภาพทั่วไปซึ่งจะดีกว่าอิเล็กโทรดทังสเตนบริสุทธิ์ แต่ด้อยกว่าลวดทอริเอทเต็ดทังสเตนในขณะทำการเชื่อม ถ้ามีสิ่งสกปรกติดอยู่ที่ปลายทังสเตนอิเล็กโทรด ความชื้น ออกซิเจนและไนโตรเจนจากภายนอก สามารถเข้ามาทำปฏิกิริยากับทังสเตนอิเล็กโทรดที่กำลังร้อน และถ้าในการเชื่อม ปลายทังสเตนอิเล็กโทรดสัมผัสกับชิ้นโลหะที่กำลังหลอมละลาย จะทำให้สิ่งสกปรกติดเข้าไปในเนื้อชิ้นงานได้ การทำความสะอาดปลายทังสเตนอิเล็กโทรดโดยการขัดด้วยหินเจียรหรือล้อทราย ตามวิธีที่แสดงในภาพที่ 2.16 - 2.19 หรือการปรับกระแสไฟเชื่อมให้สูงแล้วทำการอาร์กทังสเตนอิเล็กโทรดส่วนที่สกปรกลงบนเศษโลหะที่สะอาด จนปลายทังสเตนอิเล็กโทรดนั้นโตขึ้น หลังจากนั้นนำส่วนปลายที่โตขึ้นไปหักออกแต่ถ้าสกปรกบ่อย ๆ ควรจะเปลี่ยนใช้อันใหม่และหาสาเหตุที่เกิดสกปรกบ่อย

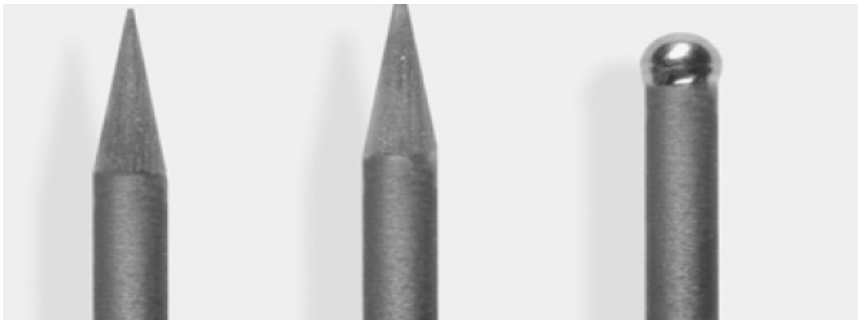


รูปที่ 2.16 แสดงแนวเส้นการแต่งปลายทังสเตนที่ถูกต้องสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม [7]



รูปที่ 2.17 แสดงแนวเส้นการแต่งปลายทังสเตนที่ผิดสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม [7]

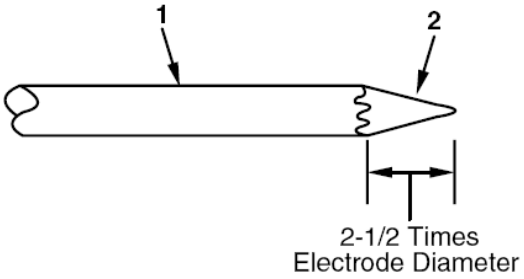
ในการประกอบทังสเตนอิเล็กโทรดเข้ากับหัวเชื่อม จะต้องแต่งส่วนปลายให้เหมาะสมกับกระแสไฟที่เชื่อมเสียก่อน ถ้าใช้กระแสไฟตรงขั้วตรง (D.C.S.P.) เช่น การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมควรจะเจียรนัยส่วนปลายของทังสเตนอิเล็กโทรดด้านที่เชื่อมให้เรียว เป็นมุม 30 องศา และมนปลายส่วนที่แหลมเล็กน้อย ถ้าใช้ไฟกระแสสลับความถี่สูง (A.C.H.F.) ปลายทังสเตนก็จะเป็นรูปเรียวแต่จะมนกลมที่ส่วนปลายแหลม ให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 3 ใน 4 ของขนาดทังสเตน และกระแสตรงกลับขั้ว (D.C.R.P.) ปลายทังสเตนอิเล็กโทรดควรมีลักษณะมนกลม



D.C.S.P A.C.H.F D.C.S.

รูปที่ 2.18 แสดงปลายที่เจียรนัยแล้วของทังสเตนอิเล็กโทรดในการเชื่อมแต่ละแบบ [7]

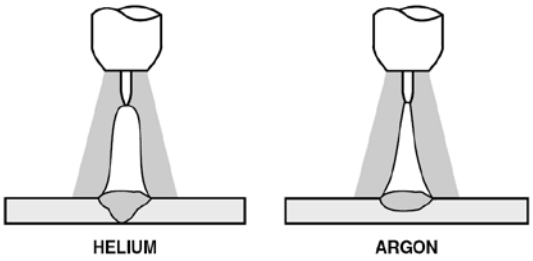
นอกจากนี้แล้วการปรับความยาวของปลายทังสเตนอิเล็กโทรดที่เป็นมุมแหลม ก็ขึ้นกับขนาดของทังสเตน และท่าเชื่อม โดยปกติจะมีความยาวอยู่ที่ 0.5-1 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง ดังภาพด้านล่าง



1. Tungsten Electrode
2. Tapered End

รูปที่ 2.19 แสดงปลายที่เจียรนัยแล้วของทังสเตนอิเล็กโทรดในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม [7]

2.6.5.4 แก๊สปกคลุม (Shielding Gas) หรือแก๊สเฉื่อย (Inert Gas)แก๊สปกคลุมในการเชื่อมแบบ TIG หมายถึง แก๊สที่นำมาใช้ปกคลุมบริเวณอาร์กเพื่อป้องกันมิให้อากาศโดยรอบเข้ามาทำปฏิกิริยากับการอาร์กและบ่อหลอมละลายในแนวเชื่อมเป็นวิธีการที่ใช้กันมานานแล้ว แต่แก๊สที่ใช้ปกคลุมไม่ได้บรรจุไว้ในท่อแบบเดียวกับการเชื่อมแบบ TIG เช่นการเชื่อมด้วยแก๊สออกซิ-อะเซติลีน การเผาไหม้ของแก๊สอะเซติลีนกับแก๊สออกซิเจนที่ทำให้เกิดความร้อนในการเชื่อม มีผลให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำซึ่งแก๊สเหล่านี้ จะทำหน้าที่เป็นแก๊สปกคลุมน้ำโลหะที่กำลังหลอมละลายในแนวเชื่อมได้ดี หรือการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ ก็เช่นเดียวกัน ความร้อนจากการอาร์กจะเผาไหม้ให้สารพอกหุ้มหรือฟลักซ์ส่วนหนึ่งเปลี่ยนสภาพเป็นแก๊สปกคลุมบริเวณอาร์กและทำหน้าที่ให้การอาร์กสม่ำเสมออีกด้วยการเชื่อมแบบ TIG โดยทั่วไปแก๊สที่ใช้คือ อาร์กอนและฮีเลียม ซึ่งแก๊สทั้งสองจะต้องมีความบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 99.99 จึงจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเลือกใช้แก๊สชนิดใดจะต้องพิจารณาศึกษาคุณสมบัติของแก๊สแต่ละชนิดก่อน แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สที่นิยมใช้กันมากโดยเฉพาะเป็นแก๊สที่มีน้ำหนักมากกว่าแก๊สปกคลุมชนิดอื่น หนักกว่าอากาศประมาณ 1.4 เท่า และหนักกว่าแก๊สฮีเลียมถึง 10 เท่า การนำไปใช้งานจึงต้องให้อัตราการไหลของแก๊สฮีเลียมมากกว่าแก๊สอาร์กอน ประมาณ 2 ถึง 3 เท่า เพราะแก๊สฮีเลียมจะเบาตัวออกจากบริเวณการอาร์กอย่างรวดเร็วกว่าดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 เปรียบเทียบความแตกต่างของลักษณะแนวเชื่อมใช้แก๊สอาร์กอนและฮีเลียมปกคลุม [7]

แก๊สเฉื่อยที่ใช้ในการเชื่อมTIG ได้แก่ อาร์กอน (Ar) ฮีเลียม (He) และไฮโดรเจน (H) หรือผสมระหว่างแก๊สดังกล่าว แต่ส่วนใหญ่แล้วจะใช้แก๊สอาร์กอน เพราะหาได้ง่าย ราคาพอสมควรมีน้ำหนักมากกว่าฮีเลียม ซึ่งจะให้ผลดีในการเชื่อมเนื่องจากอัตราการไหลต่ำ แก๊สอาร์กอนจะมีความต้านทานต่อการอาร์กน้อยกว่าแก๊สฮีเลียม ถ้าหากระยะการอาร์กมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ก็จะไม่ทำให้ให้การอาร์กขาดตอน แต่จะต้องเป็นแก๊สอาร์กอนที่มีความบริสุทธิ์ 99.8% สำหรับแก๊สฮีเลียมก็มีข้อดีคือ การเชื่อมจะกินลึกกว่าและทำการเชื่อมได้รวดเร็วกว่าแก๊สอาร์กอน แต่แก๊สฮีเลียมจะต้องมีความบริสุทธิ์ถึง 99.99% ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ (Co_2) นั้น เหมาะสำหรับใช้กับเครื่องแบบอัตโนมัติหรือกึ่งอัตโนมัติ เพราะแก๊สชนิดนี้ทำให้ระยะการอาร์กเปลี่ยนแปลงได้ง่ายยากต่อการควบคุม รายละเอียดการใช้งานแก๊สทั้งสองมีดังนี้

1. แก๊สอาร์กอน (Argon) เป็นแก๊สเฉื่อย การนำแก๊สอาร์กอนมาใช้เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตแก๊สออกซิเจน ซึ่งในอากาศทั่วไปมีปริมาณแก๊สอาร์กอนผสมอยู่เพียงร้อยละ 0.94 ทำให้ราคาของแก๊สอาร์กอนสูงกว่าแก๊สออกซิเจนหลายเท่าตัว การจัดเก็บแก๊สอาร์กอนบรรจุไว้ในสภาวะของแก๊สหรือของเหลวก็ได้ โดยรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในระดับต่ำกว่า -300° F หรือ -184° F แก๊สอาร์กอนที่บรรจุท่อในสภาวะแก๊สจะอัดไว้ด้วยความดันประมาณ 3,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้วที่อุณหภูมิ 70° F และมีความจุประมาณ 330 ลูกบาศก์ฟุต ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่สามารถแยกอิเล็กตรอนจากอะตอมของแก๊สอาร์กอน (Ionization Potential) คือ 15.7 โวลต์ และแก๊สอาร์กอนมีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อน จึงทำให้บริเวณการอาร์กมีความเข้มข้นสูง ลำแสงการอาร์กจะมีลักษณะเล็กและแคบดังภาพที่ 2-20 ใช้ได้ดีกับการเชื่อมโลหะอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมด้วยกระแสไฟสลับ แก๊สอาร์กอนทำให้การอาร์กอนทำให้การอาร์กสม่ำเสมอ แนวเชื่อมสะอาด เหมาะกับการเชื่อมด้วยโลหะเกือบทุกชนิดที่เป็นโลหะชิ้นงานบาง ซึ่งมีความหนาไม่เกิน1/ 8นิ้ว

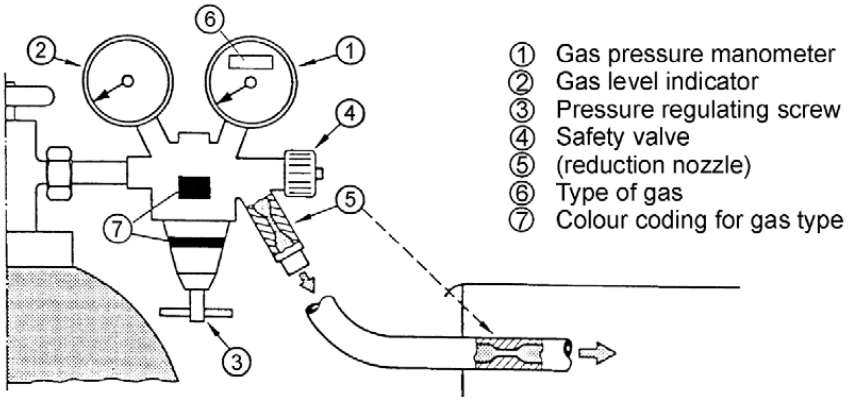
2. แก๊สฮีเลียม (Helium) เป็นแก๊สชนิดหนึ่งที่มีอยู่ในอากาศร้อยละ 0.0005 โดยปริมาตรมีน้ำหนักเบามาก โดยเบากว่าแก๊สอาร์กอนถึง 10 เท่า เมื่อนำไปใช้ในการปกคลุมการอาร์กจะต้องเพิ่มอัตราการไหลให้สูงกว่าแก๊สอาร์กอนประมาณ 2 ถึง 3 เท่า จึงจะมีประสิทธิภาพในการปกคลุมเท่าแก๊สอาร์กอน ส่วนราคาของแก๊สฮีเลียมกับแก๊สอาร์กอนจะใกล้เคียงกัน ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สามารถแยก

อิเล็กตรอนจากอะตอมของแก๊สฮีเลียมได้คือ 24.3 โวลต์ ซึ่งสูงกว่าแก๊สอาร์กอนมาก เนื่องจากแก๊สฮีเลียมมีคุณสมบัติเป็นตัวนำความร้อนที่ดี เมื่อนำไปใช้ในงานเชื่อมเปลวอาร์กจะแผ่กระจายกว้าง ความเข้มข้นการอาร์กลดลง ความร้อนบริเวณแนวเชื่อมจะมีเนื้อที่กว้างขึ้น และความร้อนในศูนย์กลางของการอาร์ก ซึ่งมีความเข้มข้นสูงจะหลอมละลายชิ้นงานตรงแนวเชื่อมให้เกิดการซึมลึกเข้าไปในเนื้อโลหะได้ดี และซึมลึกกว่าการใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สปกคลุม ดังแสดงในภาพที่ 2-20เมื่อใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สปกคลุมในงานเชื่อม จะให้พลังงานความร้อนสูง จึงเหมาะกับการเชื่อมชิ้นงานหนาและชิ้นงานที่ต้องการความเร็วในการเชื่อมสูง แต่อาร์กโวลเตจและพลังงานความร้อนไม่คงที่ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดรูพรุนในแนวเชื่อมได้จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานเชื่อมธรรมดาที่ควบคุมด้วยมือ แต่จะเหมาะกับการเชื่อมแบบอัตโนมัติมากกว่า และเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในงานเชื่อม ลดการเกิดรูพรุนในแนวเชื่อม ควรใช้แก๊สฮีเลียมผสมกับแก๊สอาร์กอนในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 จะทำให้ได้แนวเชื่อมที่ดีและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นการพิจารณาเลือกใช้แก๊สปกคลุมให้เหมาะสมกับงานเชื่อมสามารถใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินใจได้หัวปรับความดันละวัดปริมาณการไหลของแก๊ส (Regulator with Flow Meter) แก๊สปกคลุมสำหรับการเชื่อมแบบ TIG ถูกบรรจุไว้ในท่อความดันสูง ดังนั้นการจะนำมาใช้งานจะต้องมีอุปกรณ์ปรับความดันหรือหัวปรับความดัน (Regulator) เพื่อลดความดันมาใช้ตามความเหมาะสม ซึ่งหัวปรับความดันแก๊สปกคลุมจะออกแบบเป็นลักษณะพิเศษคือ จะมีอุปกรณ์วัดความดันภายในท่อ มีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว (PSI) และมี Flow Meter วัดปริมาณการไหลของแก๊ส มีหน่วยเป็นลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง (CFH) หรือลิตรต่อนาที (LPM)

2.6.5.5 อุปกรณ์ปรับความดันแก๊ส (Regulator)

หัวปรับความดันละวัดปริมาณการไหลของแก๊ส (Regulator with Flow Meter) แก๊สปกคลุมสำหรับการเชื่อมแบบ TIG ถูกบรรจุไว้ในท่อความดันสูง ดังนั้นการจะนำมาใช้งานจะต้องมีอุปกรณ์ปรับความดันหรือหัวปรับความดัน (Regulator) เพื่อลดความดันมาใช้ตามความเหมาะสม ซึ่งหัวปรับความดันแก๊สปกคลุมจะออกแบบเป็นลักษณะพิเศษคือ จะมีอุปกรณ์วัดความดันภายในท่อ มีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว (PSI) และมี Flow meter วัดปริมาณการไหลของแก๊ส มีหน่วยเป็นลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง (CFH) หรือลิตรต่อนาที (LPM) ซึ่งในงานเชื่อมแบบอาร์กทังสเตนโดยใช้แก๊สคลุมปริมาณแก๊สที่ใช้ในแต่ละลักษณะงานจะมีปริมาณที่ไม่เท่ากัน จึงจำเป็นต้องปรับปริมาณแก๊สตามต้องการในแต่ละลักษณะงาน ซึ่งมีด้วยกันสองแบบ แบบแรกคือ แบบ Manometer แบบที่สองคือแบบ Flow-Meter แบบ Manometer รายละเอียดแสดงตามภาพที่ 2.21 และแบบ Flow-Meter ตามภาพที่ 2.22

1. แบบ Manometer

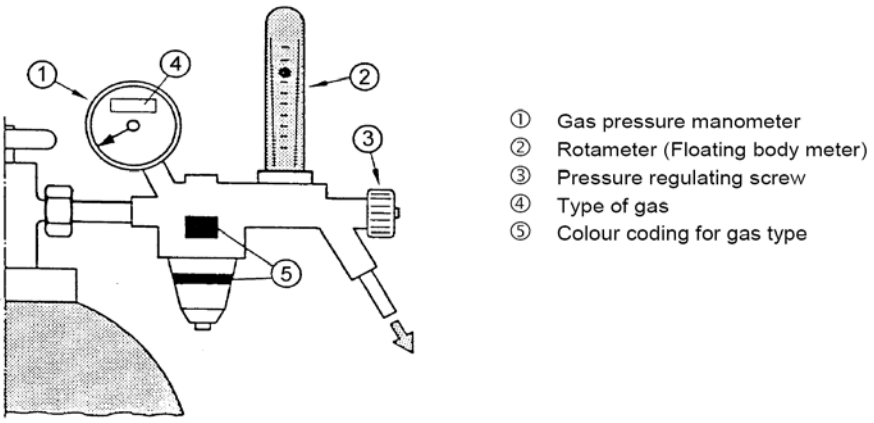


รูปที่ 2.21 อุปกรณ์ปรับความดัน แบบ Manometer [7]

หลักการทำงานของอุปกรณ์ปรับความดันแบบ Manometer จากรูปจะปรากฏอุปกรณ์ย่อยแต่ละตัว ซึ่งมีหน้าที่ต่างกัน

- หมายเลข 1 Gas Pressure Manometer มีหน้าที่วัดแรงดันที่ใช้งาน
- หมายเลข 2 Gas Level Indicator เป็นเกจวัดแรงดันสูง
- หมายเลข 3 Pressure Regulating Screw ทำหน้าที่เป็นวาล์วเปิดปิดแก๊สจากตำแหน่งหมายเลข 2 ไปยังหมายเลข 1
- หมายเลข 4 Safety Valve ทำหน้าที่เป็นวาล์วจ่ายปริมาณแก๊สที่ต้องกาเมื่อทำการเปิดวาล์วปริมาณแก๊สจะไหลไปยังหัวเชื่อม (Torch) โดยเกจหมายเลข 2 จะทำหน้าที่วัดปริมาณที่นำไปใช้
- หมายเลข 5 Reduction Nozzle ทำหน้าที่ค่อยๆ ปล่อยแก๊สที่นำไปใช้งาน
- หมายเลข 6 Type of Gas บอกชนิดของแก๊สที่ใช้
- หมายเลข 7 Color Coding for Gas Type รหัสแถบสีบอกชนิดของแก๊ส

2. แบบ Flow-Meter



รูปที่ 2.22 อุปกรณ์ปรับความดัน แบบ Flow-Meter [7]

หลักการทำงานของอุปกรณ์ปรับความดันแบบ Flow-Meter จากรูปจะปรากฏอุปกรณ์ย่อยแต่ละตัว ซึ่งมีหน้าที่ต่างกัน

- หมายเลข 1 Gas pressure Manometer เป็นเกจวัดแรงดันสูง
- หมายเลข 2 Rota-meter (Floating Body Meter) หลอดแก้วและลูกลอยวัดปริมาณแก๊สที่ใช้งาน
- หมายเลข 3PressureRegulating Screw ทำหน้าที่เป็นวาล์วเปิดปิดแก๊สหรือเพิ่มลดปริมาณแก๊สต้องการ
- หมายเลข 4 Type of Gas บอกชนิดของแก๊สที่ใช้
- หมายเลข 5 Color Coding for Gas Type รหัสแถบสีบอกชนิดของแก๊ส

2.6.6 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมแบบ TIG

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมแบบ TIG ดังนี้

2.6.6.1 ระยะอาร์ก (Arc Length หรือ Arc Gap) คือ ระยะจากหัวอิเล็กโทรดถึงพื้นผิวใช้งานการตั้งค่าระยะอาร์กขึ้นอยู่กับกระแสไฟเชื่อม ความเสถียรของการเกิดอาร์ก ดังนั้นการรักษาระยะอาร์กให้คงที่มีผลอย่างยิ่งต่อความต่อเนื่องของรอยเชื่อมจากกฎของทอมป์ (Rule of Thumb) ระยะอาร์กที่ใช้งานเท่ากับระยะอาร์กพื้นฐานเท่ากับ 0.10 นิ้ว รวมกับครึ่งหนึ่งของความลึกของรอยเชื่อมที่ต้องการ ตัวอย่างเช่นความหนาของแผ่นโลหะ 0.30 นิ้ว เท่ากับระยะความลึกของรอยเชื่อมเท่ากับ0.3นิ้วดังนั้น ระยะอาร์ก= ระยะอาร์กพื้นฐาน (0.10 นิ้ว) + ระยะความลึกของรอยเชื่อม (0.30/2 นิ้ว) = 0.25 นิ้ว

2.6.6.2 ความเร็วในการเชื่อม (Weld Speed) คือ ความเร็วของหัวเชื่อมขณะเคลื่อนที่เชื่อมเหนือชิ้นงาน ขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนลวดเติมและความหนาชิ้นงาน จุดประสงค์หลักของการเชื่อมคือใช้เวลาน้อยที่สุดโดยแนวเชื่อมมีคุณภาพตามต้องการ ความเร็วในการเชื่อมเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดอัตราการผลิตที่ได้จากการเชื่อม ยกตัวอย่างเช่น งานเชื่อมรูปวงกลมมีอัตราความเร็วในการเชื่อม 4-10 นิ้วต่อนาที (IPM) งานเชื่อมเครื่องกลึงมีอัตราความเร็วในการเชื่อม 5-60 นิ้วต่อนาทีและงานเชื่อมหม้อบดมีอัตราความเร็วในการเชื่อมเริ่มจาก 3 นิ้วต่อนาที จนถึง 60 ฟุตต่อนาที (FPM)งานเชื่อมท่อขณะหมุนใช้อัตราความเร็วในการเชื่อมเริ่มต้น 10 นิ้วต่อนาที ถึง 20 นิ้วต่อนาทีโดยปกติแล้วงานเชื่อมวัสดุที่มีความหนามาก (Heavy-Wall Thickness) ใช้ความเร็วในการเชื่อมต่ำกว่างานเชื่อมวัสดุที่มีความหนาน้อย (Thinner-Well Thickness)

2.6.6.3 กระแสไฟเชื่อม (Welding Current) คือกระแสไฟที่ทำให้เกิดความร้อนที่หัวอิเล็กโทรดเกิดจากถ่ายเทประจุลบจากหัวอิเล็กโทรดไปยังชิ้นงาน การปรับตั้งกระแสไฟเชื่อมขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุที่ถูกเชื่อม, ความหนาชิ้นงาน และแก๊สปกคลุม วัตถุประสงค์หลักของการปรับตั้งกระแสไฟเชื่อมเพื่อให้ไม่มีรอยตำหนิบนรอยเชื่อมและความลึกของรอยเชื่อมตามต้องการขณะเริ่มต้นการเชื่อม ควรปรับตั้งกระแสที่ 1 แอมแปร์ สำหรับความหนาชิ้นงานทุก ๆ 0.001 นิ้วและใช้อัตราความเร็วเพิ่มขึ้น 10 นิ้วต่อนาที สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม ยกตัวอย่าง ความหนาชิ้นงาน0.030 นิ้ว กระแสไฟเฉลี่ยเท่ากับ 0.030/0.001 เท่ากับ 30 แอมป์

2.6.6.4 อาร์กพัลส์ (Arc Pulsing) คือ การเปลี่ยนแปลงกระแสไฟอย่างรวดเร็วจากกระแสสูงสุด (Peak Current) ไปยังค่ากระแสเบส (Background Current) เทคนิคนี้ช่วยลดปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ทำให้ความเร็วในการเชื่อมสูงขึ้น การใช้อาร์กพัลส์ช่วยให้รอยเชื่อมไม่มีจุดรอยแตก ส่งผลให้คุณภาพงานเชื่อมสูงขึ้นและเพิ่มผลผลิตงานเชื่อม

2.6.7 อิเล็กโทรดทังสเตน (Tungsten Welding Electrode) ขึ้นอยู่กับตัวแปรดังนี้

2.6.7.1 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอิเล็กโทรดที่มีขนาดใหญ่มีอายุการใช้งานยาวนานแต่เกิดการอาร์กได้ยากเมื่อต้องการเชื่อมที่ใช้กระแสไฟต่ำ จากกฎของทอมป์สำหรับการค่ากระแสไฟขนาดกลางเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอิเล็กโทรด คูณด้วย 1,500

2.6.7.2 รูปร่างหัวทังสเตนที่มีความแหลมใช้กระแสไฟต่ำ ช่วยให้การอาร์กในตอนเริ่มต้นเป็นอย่างต่อเนื่อง และเกิดการอาร์กในบริเวณกว้าง ส่วนหัวทังสเตนที่มีลักษณะมน อายุการใช้งานมากกว่า รอยเชื่อมมีความลึกมากกว่าเมื่อใช้กระแสไฟเท่ากัน โดยทั่วไปมุมองศาของหัวทังสเตน 20-30 องศา

สามารถทนกระแสได้ถึง 90 แอมแปร์ เมื่อต้องการอิเล็กโทรดทังสเตนทนกระแสสูง ดังนั้นมุมองศาหัวทังสเตนต้องมากขึ้นด้วยดังนั้น จะเห็นได้ว่า ในการเชื่อมโลหะไร้สนิมโดยใช้เครื่องเชื่อม TIG ให้ถูกต้อง จะมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายอย่าง ตั้งแต่ ชนิดของกระแสไฟฟ้าความหนาของแผ่นโลหะไร้สนิม, รูปแบบของการเชื่อมต่อ, ขนาดของทังสเตนอิเล็กโทรด, ขนาดของลวดเติมในกรณีที่จำเป็นต้องมีการเติมลวดเชื่อม, ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่เชื่อม, รวมทั้งชนิดของแก๊สเฉื่อยที่ใช้ในการเชื่อม รวมทั้งการปรับค่าความดันของแก๊สที่เหมาะสม เพื่อให้การเชื่อมถูกวิธี และชิ้นงานได้คุณภาพ

2.6.8 การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ

โลหะทุกชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เนื่องจากอิทธิพลของธาตุต่างๆ ที่ผสมอยู่ในโลหะแต่ละชนิดตลอดจนกระบวนการผลิต คุณสมบัติโดยธรรมชาติของโลหะนั้น และกรรมวิธีทางความร้อนที่กระทำต่อโลหะ ดังนั้น เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติบางอย่างของโลหะ การทดสอบและการตรวจสอบทางโลหะวิทยาจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งการตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ สามารถทำได้ 2 ลักษณะ คือ การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macroscope) และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microscope) การตรวจสอบโครงสร้างทั้ง 2 วิธีดังกล่าว ก็เพื่อต้องการทราบอิทธิพลของธาตุผสมในโลหะที่ทำการตรวจสอบนั้นๆ อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากกระทำทางความร้อนสิ้นสุดลงด้วย และข้อมูลที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม

2.6.8.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค เป็นการตรวจสอบโครงสร้างด้วยตาเปล่าหรือใช้กล้องขยายที่มีกำลังขยายที่ไมเกิน 50 เท่า การเตรียมชิ้นงานเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคนั้นไม่ยุ่งยาก เพราะว่าเป็นการตรวจสอบรูพรุนภายในของโลหะ การแยกชั้นของผลึก รอยร้าว รอยแตกหน้าตัดที่ถูกดึงจนขาด และปริมาณธาตุผสมในโลหะ เป็นต้นการตรวจสอบด้วยวิธีนี้ จะมีวิธีการตรวจสอบอยู่หลายวิธีทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและจุดประสงค์ของการตรวจสอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคโดยวิธี Baumann เป็นการตรวจสอบการแพร่กระจายของธาตุกำมะถันในโลหะว่ามีมากน้อยเพียงใด ซึ่งจะใช้กับเหล็กกล้าเท่านั้น โดยวิธีการตรวจสอบดังนี้

1.1 ตัดชิ้นงานตามพื้นที่หน้าตัดที่ต้องการตรวจสอบ ด้วยเครื่องมือที่ทำให้เกิดความร้อนน้อยที่สุด ทั้งนี้เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้ธาตุกำมะถันมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลทำให้การตรวจสอบเกิดข้อผิดพลาดจากความเป็นจริง

1.2 ขัดผิวหน้าตัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากซิลิกอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 220 – 320 และในขณะขัดผิวควรเปิดน้ำ เพื่อไล่ผงขัดและเศษโลหะออกด้วย

1.3 ล้างผิวขัดให้สะอาดปราศจากไขมัน

1.4 นำกระดาษอัดรูปถ่ายตอนกลางวันจุ่มในกรดกำมะถันเจือจาง ซึ่งประกอบด้วยกรดกำมะถัน 5 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร โดยจุ่มนานประมาณ 2 นาที

1.5 จากนั้นนำกระดาษอัดรูปออกจากกรดแล้วปล่อยให้แห้ง วางลงบนผิวขัดโดยใช้เวลาประมาณ 1 – 5 นาที

1.6 ล้างกระดาษอัดรูปด้วยน้ำเปล่า แล้วนำไปแช่ในน้ำยาคงตัว ซึ่งประกอบด้วยน้ำ1 ลิตร เกลือ 250 กรัม โดยใช้เวลาในการแช่ประมาณ 15 นาที

1.7 จากนั้นนำกระดาษอัดรูปดังกล่าวไปแช่น้ำเปล่านาน 30 นาที แล้วเป่าให้แห้งด้วยลมร้อน เมื่อเปล่าด้วยลมร้อนแล้วจนกระดาษอัดรูปแห้งแล้ว เราจะเห็นภาพการกระจายตัวของกำมะถันเป็นสีน้ำตาลแก่ปรากฏอยู่บนกระดาษอัดรูปนั้น

2. การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคโดยวิธี Fly Etching เหมาะสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ หรือเหล็กกล้าที่ผ่านการอบปกติมาแล้ว การตรวจสอบวิธีนี้จะใช้สำหรับการตรวจหาแนวเส้นใยการคราก หรือแนวใยรับแรง ซึ่งเกิดจากการขึ้นรูปเย็น และกรรมวิธีทางความร้อน และมีผลต่อความแข็งแรงของโลหะนั้นๆ โดยมีวิธีการตรวจสอบ ดังนี้

2.1 ขัดผิวหน้าชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 – 1000

2.2 นำชิ้นตรวจสอบไปอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 150 – 200 เซลเซียส

2.3 กัดผิวที่ต้องการตรวจสอบด้วยกรดดินประสิวแบบเจือจาง โดยใช้เวลาในการกัด1-2 นาที

2.4 เมื่อกัดด้วยกรดตามเวลาที่กำหนดแล้ว ล้างผิวทดสอบด้วยแอลกอฮอล์แล้วเป่าให้แห้ง

2.5 ตรวจสอบความเข้มของผิว ถ้าผิวตรวจสอบช่วงใดได้รับอิทธิพลจากการขึ้นรูปเย็นหรือกรรมวิธีทางความร้อน จนเกิดเส้นใยการครากและเส้นใยรับแรง ผิวช่วงนั้นจะถูกกัดด้วยกรดเป็นสีเข้มกว่าบริเวณอื่น

3. การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคโดยวิธี Grain Flow เป็นการตรวจสอบเหล็กกล้าที่ผ่านการตีขึ้นรูป ซึ่งจะทำให้เกรนของเหล็กเกิดการไหลลื่นไปตามแนวแรงที่ตี เกรนที่ดีจะต้องมีการไหลของเกรนอย่างต่อเนื่องตามรูปร่างลักษณะของชิ้นงานนั้น ๆ ซึ่งจะส่งผลให้ชิ้นงานนั้นมีความแข็งแรงสูง โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

3.1 ตัดชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบด้วยเครื่องมือตัดที่ไม่ก่อให้เกิดความร้อนสูง ทั้งนี้เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้ธาตุกำมะถันมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลทำให้การตรวจสอบเกิดข้อผิดพลาดจากความเป็นจริง

3.2 ขัดผิวหน้าชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 – 1200

3.3 นำกรดเกลือ 2 ส่วน ผสมกับน้ำ 3 ส่วน แล้วนำไปต้มให้เดือด

3.4 จุ่มชิ้นงานลงในกรดเกลือที่กำลังเดือดนานไม่เกิน 20 นาที แล้วนำชิ้นงานออกจากกรดเกลือ จากนั้นเราจะสามารถมองเห็นแนวการไหลของเกรนได้ชัดเจน

2.6.8.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค เป็นการตรวจสอบที่กระทำได้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง ถ้าเป็นกล้องที่ใช้แสงจากหลอดไฟจะให้กำลังขยายไม่เกิน 2,000 เท่าแต่ถ้าเป็นกล้องที่ใช้แสงอิเล็กตรอนจะสามารถให้กำลังขยายได้สูงถึง 100,000 เท่า หรือมากกว่านี้โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

2.6.8.3 ตัดชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบด้วยเครื่องมือตัดที่ไม่ก่อให้เกิดความร้อนสูงทั้งนี้เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้ธาตุกำมะถันมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลทำให้การตรวจสอบเกิดข้อผิดพลาดจากความเป็นจริง

2.6.8.4 ขัดผิวหน้าตัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากซิลิกอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 220,320, 400 และ 600 ตามลำดับ ในขณะขัดผิวควรเปิดน้ำ เพื่อไล่ผงขัดและเศษโลหะออกด้วย

2.6.8.5 ขัดผิวด้วยผงขัดที่ทำมาจากผงอะลูมินา (Alumina Oxide) และแมกนีเซียม(Magnesium Oxide) ที่มีขนาดตั้งแต่ 0.05 – 0.3 ไมครอน

2.6.8.6 นำชิ้นงานตรวจสอบที่ถูกขัดผิวจนเป็นมันแล้ว ไปล้างด้วยแอลกอฮอล์

2.6.8.7 ทำการกัดผิวที่ต้องการตรวจสอบด้วยน้ำยากัดชิ้นงาน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่นำมาทำการตรวจสอบ ดังแสดงในภาคผนวก ก

2.6.8.8 นำชิ้นงานไปล้างด้วยแอลกอฮอล์ แล้วเป่าให้แห้ง

2.6.8.9 ทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อทำการวิเคราะห์ว่าเป็นโครงสร้างชนิดใดบ้าง เพราะโครงสร้างต่างๆ ของโลหะจะมีคุณสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน

2.7 โลหะวิทยาในรอยเชื่อม (Welding Metallurgraphy)

2.7.1 HAZ Transformation

บริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิสูง (HTHAZ) เป็นบริเวณที่อยู่ถัดจากเส้นขอบเขตการหลอมละลาย ซึ่งจะเข้าสู่จุดหลอมเหลวและกลายเป็นเฟอร์ไรท์เกือบจะสมบูรณ์ ในทางตรงข้ามบริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (LTHAZ) เป็นบริเวณเฟสที่สมดุล

ยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลง และจะมีจุดเปลี่ยนระหว่าง LTHAZ และ HTHAZ ที่มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเชื่อมแบบหลายแนว [8]

2.7.1.1 High Temperature HAZ (HTHAZ)

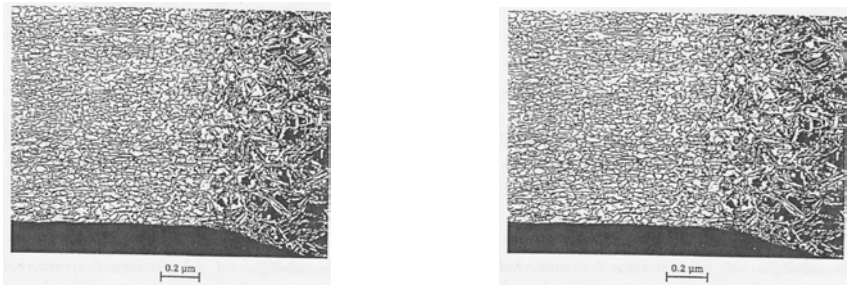
การเปลี่ยนรูปโครงสร้างทางจุลภาคในบริเวณนี้ถูกควบคุมด้วยวิธีปฏิบัติการเชื่อม(Welding Procedure Specification) และส่วนผสมของเหล็กกล้า โดยการให้พลังงานความร้อนในทางปฏิบัติเท่านั้น ปัญหาที่พบคือบริเวณนี้จะมีโครงสร้างที่เต็มไปด้วยเฟอร์ไรท์ ซึ่งวิธีแก้ปัญหาทำได้โดยหาส่วนผสมทางเคมีของโลหะฐานที่เหมาะสมที่สุด โดยเฉพาะการเพิ่มระดับไนโตรเจนของเหล็กกล้า ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ผลที่ได้สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์รุ่นใหม่ แสดงให้เห็นว่าระดับปริมาณ เฟอร์ไรท์ในบริเวณ HTHAZ นี้ปกติอยู่ในช่วง 50-70 เปอร์เซ็นต์ โดยต้องมีการควบคุมพลังงาน ความร้อนที่ให้กับแนวเชื่อม ความหนาวัสดุ อุณหภูมิเผาอุ่นก่อนเชื่อม และอุณหภูมิระหว่างแนวเชื่อม [8]

2.7.1.2 Low Temperature HAZ (LTHAZ)

บริเวณนี้ถูกกำหนดห่างออกมาจากขอบเขตการหลอมละลาย และเป็นบริเวณที่เคยเกิดความร้อนมาแล้ว ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้มีการฟอร์มตัวของเฟส Intermetallic ขึ้นเป็นปัญหาหลักในเหล็กกล้าไร้สนิมซุปเปอร์ดูเพล็กซ์

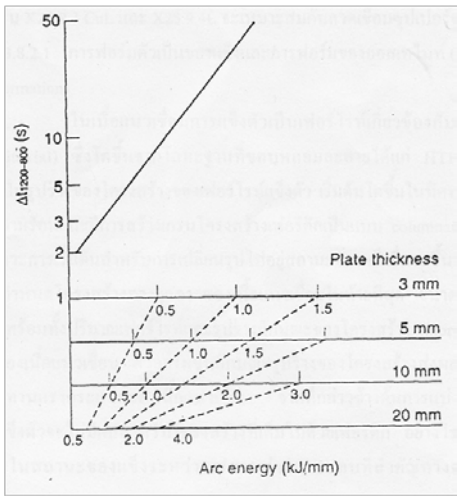
2.7.1.3 การควบคุมการเปลี่ยนรูป HAZ

ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมควรจะถูกควบคุมเพื่อที่ให้มั่นใจได้ว่าสภาวะการเย็นตัวทั้งหมดช้าเพียงพอที่ทำให้มีการฟอร์มตัวของออสเทนไนท์เกิดขึ้นในบริเวณ HTHAZ และเร็วพอที่จะหลีกเลี่ยงการตกตะกอนในบริเวณ LTHAZ ในทางปฏิบัติจะมีการแนะนำช่วงพลังงานความร้อนที่ให้กับแนวเชื่อมและอุณหภูมิระหว่างแนวเชื่อมสูงสุด อย่างไรก็ตามยังไม่มีการกำหนดวัฏจักรทางความร้อนที่เหมาะสมอย่างแท้จริง เพราะการกำหนดจะต้องพิจารณาถึงผลกระทบจากลักษณะรูปร่างของรอยต่อและความหนาของวัสดุ โดยในทางปฏิบัติจะมีข้อแนะนำเวลาในการเย็นตัวของอุณหภูมิระหว่าง 800°C และ 500°C, $\Delta t_{8/5}$, หรือระหว่าง 1200°C และ 800°C, $\Delta t_{12/8}$ ซึ่งในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวมีการฟอร์มตัว ออสเทนไนท์เกิดขึ้น เวลาในการเย็นตัวควรอยู่ในช่วง 8 ถึง 30 วินาทีสำหรับ $\Delta t_{8/5}$ ซึ่งจะสอดคล้องกับช่วงเวลา 4 ถึง 15 วินาทีสำหรับ $\Delta t_{12/8}$ หรืออัตราการเย็นตัวประมาณ 20-50^{O}C /s นอกเหนือจากนี้เวลาในการเย็นตัวนี้ สามารถเทียบเป็นความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อนที่ให้ต่อแนวเชื่อมกับความหนาของเหล็กได้จากโนโมแกรม[9]ที่แสดงในรูปที่ 2.23และรูปที่ 2.24



(ก) (ข)

รูปที่ 2.23 การเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณ HAZ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์รูป (ก) ปริมาณไนโตรเจนต่ำ รูป (ข) ปริมาณไนโตรเจนสูง [9]



รูปที่ 2.24 โนโมแกรมสำหรับการทำนายเวลาที่ใช้ในการเย็นตัวช่วง $\Delta t_{12/8}$ ของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [9]

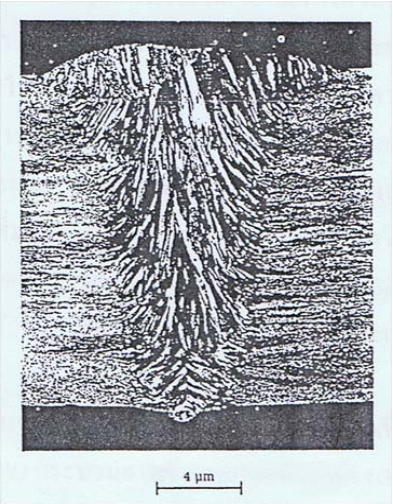
2.7.2 โลหะเนื้อแนวเชื่อม (Weld Metal)

โครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อแนวเชื่อมจะแตกต่างจากวัสดุฐาน ซึ่งเป็นผลมาจากความแปรผันในส่วนผสมทางเคมีและผลทางความร้อน ในทางปฏิบัติเนื้อแนวเชื่อม Autogeneous เกือบจะเป็นเฟอริติกทั้งหมดประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ส่วนผสมและอัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อมไม่ได้สร้างความสมดุลในสัดส่วนของออสเทนไนท์เลย ดังนั้นส่วนผสมทางเคมีของโลหะนื้อแนวเชื่อมจึงเป็นสิ่งสำคัญ ลวดเชื่อมโดยทั่วไปจะมีส่วนผสมที่ทำให้เกิดออสเทนไนท์มากกว่าเหล็กโลหะฐานเพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติทางกลและการกัดกร่อน ในปัจจุบันนี้โลหะเติมมาตรฐาน ANSI/AWS และ A5.4 และ A5.9 (แท่งอิเลคโทรด) ดังเช่นหมวด E/ER 2209 เหมาะสำหรับการเชื่อมเกรดโครเมียม 22 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ E/ER 2553 เหมาะสำหรับเกรดโครเมียม 25 เปอร์เซ็นต์ ดังเช่น S32550 หรือ

สำหรับลวดโครเมียม 22 เปอร์เซ็นต์ คือ X 22.9.3.L และสำหรับอัลลอยด์ที่เกรดสูงกว่านี้เช่น X25.9.3 CuL และ X25.9.4L จะเหมาะสมกับลวดเชื่อมซุปเปอร์ดูเพล็กซ์ [9]

2.7.2.1 การฟอร์มตัวเป็นของแข็งและการฟอร์มตัวของออสเทนไนท์ (Solidification and Austenite Formation)

ในเนื้อแนวเชื่อมการแข็งตัวเป็นเฟอร์ไรท์เกี่ยวข้องกับการแข็งตัวตามแนวแกน (Epitaxial) ซึ่งโตขึ้นจากโลหะฐานที่ขอบเขตหลอมละลายได้แก่ HTHAZ เดนไดรท์ (Dendrite) ซึ่งเป็นรูปร่างของโครงสร้างของเฟอร์ไรท์แข็งตัว เริ่มต้นโตขึ้นในทิศทางที่สัมพันธ์กับเกรเดียนทางความร้อน และมีการสร้างเกรนโครงสร้างเฟอริติกเป็นแบบ Columnar ดังแสดงในรูปที่ 2.25 ซึ่งสภาวะการเริ่มต้นสำหรับการเปลี่ยนรูปไปอยู่สถานะของแข็งอื่นจะขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว และจะเป็นตัวกำหนดโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อแนวเชื่อมในท้ายที่สุด ขนาดและทิศทางของเกรนเฟอร์ไรท์พร้อมทั้งปริมาณเฟอร์ไรท์ และรูปร่างลักษณะของโครงสร้าง (Morphology) มีอิทธิพลต่อสมบัติของเนื้อแนวเชื่อม ตัวอย่างเช่นลักษณะรูปร่างของโครงสร้างส่งผลต่อความเหนียว ด้านการต้านทานแรงกระแทกของเนื้อแนวเชื่อม จากที่กล่าวข้างต้นการแบ่งแยกทางจุลภาคเนื่องจากการแข็งตัวจะไม่มีผลสำหรับโครงสร้างที่เต็มไปด้วยเฟอริติก อย่างไรก็ตามธาตุที่เป็นส่วนประกอบในสถานะของแข็งระหว่างเฟสจะส่งผลกระทบที่สำคัญทางด้านสมบัติของแนวเชื่อม



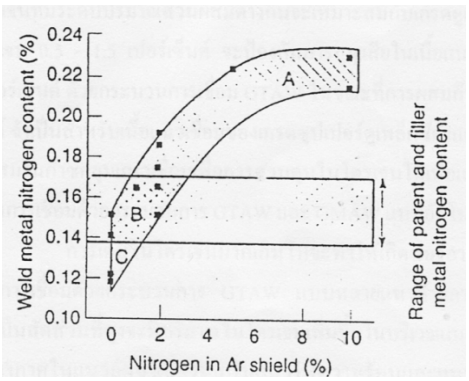
รูปที่ 2.25 โครงสร้างทางมหภาค Columnar ของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์แบบหลายแนวเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อม GTAW[9]

การตกผลึกออสเทนไนท์นั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเนื้อแนวเชื่อม การฟอร์มตัวในระยะเริ่มต้นจะเกิดขึ้นระหว่างเกรน ตามด้วยการฟอร์มตัวภายในเกรนซึ่งขึ้นกับขนาดเกรนเฟอร์ไรท์และอัตราการเย็นตัว การตกผลึกออสเทนไนท์เป็นกระบวนการแพร่ที่มีการควบคุมนิวคลีเอชั่น (Nucleation) (อนุภาคขนาดเล็กของเฟสออสเทนไนท์ใหม่ที่เกิดขึ้นในขณะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส) และการโตขึ้นของเกรน สำหรับการเชื่อมที่มีการใช้พลังงานความร้อนต่ำจะมีการฟอร์มตัวของออสเทนไนท์เกิดขึ้นอีกครั้ง ซึ่งจะถูกควบคุมโดยกลไกการเปลี่ยนรูปที่สมดุลจากการควบคุมการแพร่กระจาย ของธาตุคาร์บอนและไนโตรเจน ดังนั้นอัตราการเย็นตัวจึงเป็นสิ่งสำคัญในการกำหนดขอบเขตของการเปลี่ยนรูป อัตราการเย็นตัวช้ามีผลทำให้มีการฟอร์มตัวของออสเทนไนท์มากขึ้น ในขณะที่อัตราการเย็นตัวร็วทำให้เกิดออสเทนไนท์ลดน้อยลง อย่างไรก็ตามการ Nucleation ของออสเทนไนท์จะยิ่งเกิดขึ้นได้ง่ายที่ตามบริเวณขอบเกรนหรือบริเวณที่มีเกรนเฟอร์ไรท์ขนาดเล็ก โดยทั่วไปเนื้อแนวเชื่อมดูเพล็กซ์มีปริมาณเฟอร์ไรท์ในช่วง 30-70 เปอร์เซนต์ ขึ้นอยู่กับส่วนผสมและอัตราการเย็นตัว [9]

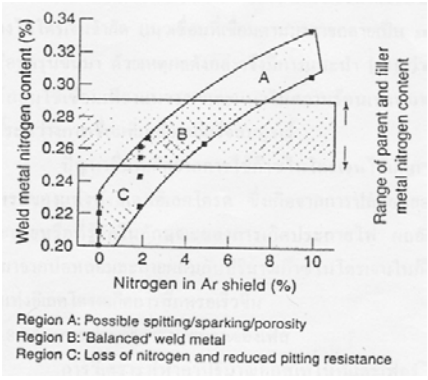
2.7.2.2 ก๊าซไนโตรเจน

ก๊าซไนโตรเจนมีอิทธิพลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติของเนื้อแนวเชื่อมโดยจะเป็นตัวควบคุมไนโตรเจนระหว่างการเชื่อม เมื่อใช้ก๊าซที่ไม่มีส่วนผสมของไนโตรเจน สำหรับกระบวนการเชื่อมแบบใช้ก๊าซคลุมแนวเชื่อมผลคือ จะทำให้ไนโตรเจนสูญเสียไป ดังแสดงในรูปที่ 2.26 เนื่องจากความสามารถในการละลายตัวของไนโตรเจนต่ำกว่าในบ่อหลอมละลาย ช่วงการสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเหล็ก ระยะอาร์ค (ความต่างศักย์) และพลังงานความร้อนที่ให้ต่อแนวเชื่อม เพื่อเป็นการแก้ปัญหานี้การผสมไนโตรเจนในก๊าซที่ใช้ปกคลุมประมาณ 2-5 เปอร์เซ็นต์ จะสามารถป้องกันการสูญเสียไนโตรเจน และมีผลทำให้ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อแนวเชื่อมเพิ่มมากขึ้น ไนโตรเจนสามารถถ่ายเทไปสู่เนื้อแนวเชื่อมได้โดยปริมาณไนโตรเจนในก๊าซที่ใช้ปกคลุมแนวเชื่อม ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Seivert ที่กล่าวว่า “ความสามารถในการละลายของโมเลกุลจะไม่สัมพันธ์กับสารละลาย แต่จะแปรผันตามรากที่สองของความดัน”

ไนโตรเจนที่เพิ่มเข้าไปในก๊าซที่ใช้คลุมแนวเชื่อม สามารถใช้ได้กับการเชื่อมแบบทังสเตนอาร์ค (GTAW) กระบวนการเชื่อมแบบเมทัลอาร์ค (GMAW) และกระบวนการเชื่อมแบบพลาสม่า และมีการนำไปใช้ในการเชื่อมในอุตสาหกรรมน้ำมันและก๊าซธรรมชาติซึ่งประสบผลแตกต่างกัน โดยปกติการสูญเสียไนโตรเจน จะไม่เกิดขึ้นเมื่อใช้กระบวนการเชื่อมแบบมีสแลกปกคลุม โดยเฉพาะกระบวนการเชื่อมด้วยไฟฟ้า ชั้นของสแลกสามารถช่วยปกป้องไม่ให้ไนโตรเจนออกไปจากบ่อหลอมละลาย



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.26 ผลของระดับปริมาณไนโตรเจนในเนื้อรอยเชื่อมโดยใช้ก๊าซอาร์กอนที่มีส่วนผสมของก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซคลุมแนวเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบทังสเตนอาร์ค (GTAW) (ก) เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรด S31803/S32205 (ข) เหล็กกล้าไร้สนิมซุปเปอร์ดูเพล็กซ์ [10]

การเชื่อมแบบทังสเตนอาร์ค (GTAW) ด้วยก๊าซคลุมแนวเชื่อมที่มีส่วนผสมของไนโตรเจนที่มีระดับปริมาณส่วนผสมต่างกันจะเหมาะสมกับเกรดดูเพล็กซ์ที่ต่างกัน เช่นการผสมไนโตรเจน 0.5-1.5 เปอร์เซ็นต์ จะป้องกันการสูญเสียในเนื้อแนวเชื่อมของเหล็กเกรดโครเมี่ยม 22 เปอร์เซ็นต์ ด้วยกระบวนการเชื่อม GTAW ในขณะที่การผสมก๊าซไนโตรเจนระหว่าง 2-4 เปอร์เซ็นต์ จำเป็นสำหรับเนื้อแนวเชื่อมของเกรดซุปเปอร์ดูเพล็กซ์ เพื่อการควบคุมไนโตรเจนในเนื้อแนวเชื่อมเป็นวิธีการที่เหมาะสมมากในการเชื่อมด้วยกระบวนการ GTAW และ GMAW การเติมไนโตรเจนมากเกินไปจะทำให้เกิดฟองอากาศในเนื้อแนวเชื่อม โดยรอยต่อที่ทำการเชื่อมด้วยกระบวนการ GTAW แบบหลายแนวด้วยการใช้ก๊าซที่มีส่วนผสมของไนโตรเจนเป็นสัดส่วนที่สูง จะมีปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นในบริเวณแนวรอยเชื่อมเติมเต็ม ซึ่งจะทำให้เกิดฟองอากาศในแนวถัดมาเนื่องจากในแนวให้ความร้อนและแนวเติมเต็มมีการหลอมละลายจาโลหะฐานต่ำ ดังนั้นปริมาณไนโตรเจนในเนื้อแนวเชื่อมจึงขึ้นอยู่กับปริมาณไนโตรเจนของก๊าซและของแนวเชื่อมที่เชื่อมไปก่อนหน้านี้ และถ้าแนวเชื่อมไปก่อนมีความสามารถในการละลายของไนโตรเจนจำกัด แนวเชื่อมที่ตามมาอาจกลายเป็น Super Saturated และมีการสร้างฟองอากาศหรือรูพรุนขึ้นมา ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีการแนะนำ ว่าการใช้ก๊าซไนโตรเจนผสมในก๊าซอาร์กอนใช้เชื่อมเพียงแนวรากและแนวให้ความร้อนเท่านั้น หลังจากนั้นให้ใช้ก๊าซอาร์กอนบริสุทธ์ระหว่างการเชื่อมที่เหลือจนเสร็จสมบูรณ์ ปัญหาอื่นที่เกิดจากการใช้ก๊าซไนโตรเจนได้แก่ การเกิดสิ่งสกปรกเจือปนและการสึกหรอของแท่งทังสเตน อิเลคโทรด ซึ่งเกิดจากการปล่อยหยดโลหะเติมมากเกินไป จากบ่อหลอมละลายหรือที่รู้จักในลักษณะของการเกิดประกายไฟ

ผลอันนี้เกิดจากการที่ก๊าซไนโตรเจนออกมาจากบ่อหลอมละลาย ผสมกับปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซที่ใช้คลุมแนวเชื่อมซึ่งมีอยู่สูง ทำให้แท่งอิเลคโทรดเกิดการสึกหรอเร็วขึ้น [10]

2.8 กลไกการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ

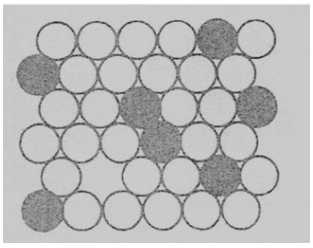
กลไกการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ แบ่งออกเป็น

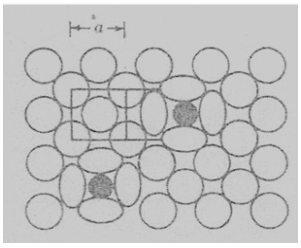
2.8.1 Work Hardening

เป็นการทำให้โลหะบริสุทธิ์หรือโลหะผสม มีความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นโดยการขึ้นรูปเย็น (Cold Working) ในระหว่างกระบวนการนั้นจะเกิด Dislocation จำนวนมากซึ่งเป็นสาเหตุทำให้โลหะมีความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

2.8.2 Solid Solution Hardening

โลหะจะมีความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจากเติมธาตุอื่นลงไปกลายเป็นโลหะผสม ซึ่งจะมีสารละลายของแข็งเข้าไปแทนที่อยู่ 2 แบบดังรูปที่ 2.27 และ 2.28 ทำให้เกิด Strain จากอะตอมที่มีขนาดต่างกันทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของ Dislocation และสมบัติทางไฟฟ้ามีความแตกต่างกันด้วย





รูปที่ 2.27 สารละลายของแข็งแบบแทนที่ [10] **รูปที่ 2.28** สารละลายของแข็งแบบเซลล์แทรก [10]

2.8.3 Precipitation Hardening

คือการทำให้อนุภาคเล็กๆตกตะกอนและมีการกระจายตัวอย่างหนาแน่น และสม่ำเสมอด้วยวิธีการทางความร้อน อนุภาคเล็ก ๆ ที่เกิดการตกตะกอนทำหน้าที่เป็นสิ่งขัดขวางการเคลื่อนที่ของ Dislocation ส่งผลทำให้ความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นโลหะผสมที่สามารถผ่านกระบวนการ Precipitation ได้นั้นจะต้องเป็นระบบที่มีความสามารถในการละลายของธาตุหนึ่งในอีกด้านหนึ่งลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ดังรูปที่ 2.13 โดยจะลดลงจากจุด a ไป b ตามแนวเส้น Solvus กระบวนการนี้ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ

2.8.3.1 Solution Heat Treatment

ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปหรือการหล่อ จะถูกนำมาให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่อยู่ระหว่าง Solvus และ Solidus หลังจากนั้นนำมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมินั้น เพื่อให้มีโครงสร้างสม่ำเสมอ จากรูป ณ อุณหภูมิ T_1 ที่จุด C เป็นอุณหภูมิที่ใช้ในบริเวณนี้เพราะเป็น จุดกึ่งกลางระหว่าง Solvus และ Solidus ของสารละลายของแข็ง

2.8.3.2 Quenching

เป็นการทำให้ชิ้นงานตัวอย่างเย็นตัวอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิห้อง ตัวกลางที่ใช้มักจะเป็นน้ำ แล้วเกิดเฟสสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด (Super Saturated Solid Solution) สำหรับองค์ประกอบ X_1 โครงสร้างหลังจาก Quenching จนถึงอุณหภูมิ T_3 ที่จุด d จะประกอบด้วยสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด

2.8.3.3 Aging

เป็นขั้นตอนที่ทำให้อนุภาคโตขึ้นและสามารถควบคุมได้ จะเกิดการกระจายตัวของอนุภาคอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของ Dislocation การบ่มแข็งสามารถทำได้กับโลหะที่มีธาตุผสมมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไป โดยพิจารณาอย่างง่ายจากแผนภูมิระบบสองเฟส ซึ่งแผนภูมิระบบสองเฟสดังกล่าว จะต้องมีลักษณะที่สำคัญคือ ความสามารถในการละลายของ ตัวถูกละลาย ในตัวทำละลายจะต้องขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ ตัวถูกละลายสามารถแพร่ละลายเข้าสู่ตัวทำละลายเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิลดลงทำให้ตัวถูกละลายออกจากตัวถูกละลาย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ โดยประกอบด้วยขั้นตอนการบ่มแข็ง (Age Hardening) ดังนี้

2.8.3.3.1 ขั้นตอน Solution Treatment

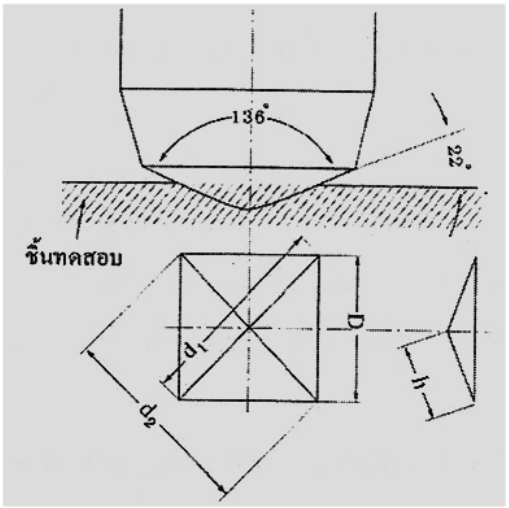
2.8.3.3.2 ขั้นตอน Quenching

2.8.3.3.3 ขั้นตอน Agin

2.9 การทดสอบความแข็งของวัสดุ

2.9.1 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

การทดสอบความแข็งของวัตถุแบบวิกเกอร์นี้คล้ายกับบริเนล ในแง่ที่ว่า ค่าที่ได้เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้ต่อพื้นที่ของรอยกด แต่ต่างกันที่หัวกดที่ใช้เป็นเพชรพีระมิด แรงที่ใช้มีตั้งแต่ 5 -120 กก. ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุหัวกดที่ทำมาจากเพชรรูปพีระมิดนั้น มีฐานเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีมุมระหว่างหน้าต่อหน้าเท่ากับ 136 องศา ส่วนน้ำหนักหรือแรงกดนั้นขึ้นอยู่กับผิวชิ้นงานทดสอบ และมีขนาดตั้งแต่ 1- 200 กิโลกรัม โดยใช้เวลาในการกดประมาณ 10-30 นาที ดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 การทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ [11]

การทดสอบแบบวิกเกอร์นี้สามารถทดสอบความแข็งแรงของเหล็กได้ทุกชนิดไม่ว่าจะมีขนาดหรือรูปทรงเช่นใดก็ตาม เป็นการทดสอบที่ให้ความละเอียดสูง การคำนวณค่า Vickers Hardness Number (VHN) หรือ Diamond-Pyramid Hardness (DPH) ใช้สูตร

$$\text{DPH} = \frac{1.8544F}{D^2}$$

โดยที่ F = น้ำหนักที่กด (กก.)

D = ความยาวเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม (mm)

1.8544 เป็นค่า 2 sin ($\theta/2$) เมื่อ θ = มุมระหว่างหน้าตรงข้ามของเพชรซึ่ง = 136°C

การทดสอบแบบนี้เหมาะกับตัวอย่างที่บางและแข็งมากๆ

2.9.2 การทดสอบความแข็งแรงแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)

การทดสอบความแข็งของวัสดุแบบบริเนล คือใช้ลูกบอลเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งมาอย่างดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. กดลงบนผิวเรียบของวัสดุที่จะวัด โดยใช้แรง 3000 กก. สำหรับวัสดุแข็งและ 500 กก. สำหรับวัสดุอ่อน โดยใช้เวลา 30 วินาที เป็นมาตรฐาน จากนั้นวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบุ๋ม (Indentation) ค่าความแข็งแรงแบบบริเนล (Brinell hardness number) จะใช้สูตรคำนวณดังนี้คือ

$$Bhn = \frac{\text{แรงกดที่ใช้}}{\text{พื้นที่ของรอยบุ๋ม}} = \frac{P}{(\pi D/2)(D-\sqrt{D^2-d^2})}$$

เมื่อ Bhn = Brinell hardness number มีหน่วยเป็นแรง/หน่วยพื้นที่

P = แรงที่ใช้กด

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของลูกบอล

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของรอยบุ๋ม

การทดสอบความแข็งแบบบริเนลนี้ ไม่เหมาะสมกับวัสดุแข็ง เนื่องจากความแข็งของหัวกดไม่มากนัก นอกจากนียังไม่เหมาะกับชิ้นทดสอบที่บางกว่าขนาดของรอยบุ๋มการทดสอบความแข็งแบบรอกเวล (Rockwell Hardness Test) การทดสอบความแข็งของวัสดุแบบร็อกเวลคล้ายกับการทดสอบแบบบริเนล แต่ใช้หัวกดเล็กกว่าและแรงน้อยกว่าค่าของแรงที่ใช้และชนิด หรือขนาดของหัวกดจะเปลี่ยนได้ ขึ้นกับสเกลของความแข็งแบบร็อกเวลที่เราจะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบ การอ่านค่าความแข็งจะอ่านโดยตรงจากเครื่อง กล่าวคือ ถ้าความลึกของรอยกดลงไปตื้น ค่าของตัวเลขจะสูง แสดงว่าวัสดุมีความแข็งมากวิธีการทดสอบจะให้แรงกระทำเล็กน้อยคือ 10 กก. จากนั้นจะเพิ่มแรงกระทำขึ้น ซึ่งอาจจะมีตั้งแต่ 60-100 กก. ขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของหัวกด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบด้วย หัวกดที่ใช้อาจจะเป็นลูกบอลเหล็กหรือเพชรที่มีรูปกรวย การทดสอบแบบรอบเวลานี้ ใช้อย่างกว้างขวางเพราะสามารถใช้วัดความแข็งของวัสดุชนิดต่างๆได้มากกว่า สามารถวัดความแข็งของวัสดุที่การทดสอบแบบบริเนลวัดไม่ได้ การใช้งานสะดวกอ่านค่าได้รวดเร็ว เพราะอ่านโดยตรงจากเครื่อง และเนื่องจากรอยบุ๋มมีขนาดเล็กจึงไม่ทำลายผิวของชิ้นทดสอบ [11]

2.10 การประเมินความสมดุลของเฟส

การวิเคราะห์หาค่าปริมาณออสเทนไนท์และเฟอร์ไรท์ในโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณเนื้อแนวเชื่อมสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ จะหาจากทั้งในบริเวณเนื้อแนวเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อนตลอดแนวความหนา ปริมาณเฟอร์ไรท์ในโครงสร้างดูเพล็กซ์สามารถวิเคราะห์ได้ 2 วิธีได้แก่ การวิเคราะห์โดยการนับจุด (Manual Point Counting) หรือ การวิเคราะห์โดย Image Analysis และการวิเคราะห์โดยใช้หลักการเฟอร์โรแมกเนติก โดยทั่วไปการวิเคราะห์ด้วยวิธีการนับจุดและ Image Analysis นี้จัดเป็นการทดสอบแบบทำลาย ซึ่งวิธีเหล่านี้เป็นการวัดสัดส่วนของเฟอร์ไรท์และออสเทนไนท์ที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวอย่างทดสอบ ผลของการวัดจะรายงานในรูปของสัดส่วนโดยพื้นที่ โดยการเอาผลจากการวัดในแต่ละพื้นที่ใน 1 ระนาบรวมเป็นสัดส่วนพื้นที่ทั้งหมดในตัวอย่างทดสอบเปอร์เซ็นต์เฟอร์ไรท์ที่กำหนดโดยทั่วไปคือ 35-65 เปอร์เซ็นต์ การวิเคราะห์โดยการนับจุดนี้จะปฏิบัติตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM E562 ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถวิเคราะห์ปริมาณเฟอร์ไรท์ ทั้งในบริเวณเนื้อแนวเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนได้

ค่าความถูกต้องในการวัดอยู่ในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แต่การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้คือ ค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลานาน ส่วนการวิเคราะห์โดย Image Analysis เป็นการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งคอมพิวเตอร์จะแยกประเภทโครงสร้างเฟอร์ไรท์และออสเทนไนท์ออกจากกัน โดยจะประมวลผลจากความแตกต่างกันของโครงสร้างด้วยความเข้มหรือความชัดเจนของสีที่เราต้องการวิเคราะห์ วิธีการนี้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ในบริเวณโลหะฐานเท่านั้น ไม่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ในเนื้อรอยเชื่อม เนื่องจากผลของการเตรียมชิ้นงานทดสอบทางจุลภาคด้วยการกัดกรด ทำให้โครงสร้างแนวเชื่อมมีสีที่ปรากฏในคอมพิวเตอร์ไม่ชัดเจน ส่งผลให้คอมพิวเตอร์ซึ่งทำการประเมินผลตามความชัดเจนของสีวิเคราะห์ค่าปริมาณเฟอร์ไรท์คลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง ส่วนวิธีการวัดอีกวิธีหนึ่งคือการใช้หลักการทางสมบัติเฟอร์โรแมกเนติก โดยใช้ระบบจำนวนตัวเลขเฟอร์ไรท์ (Ferrite Number : FN) ซึ่งใช้สำหรับในการวัดปริมาณเฟอร์ไรท์ ในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนท์ในเนื้อแนวเชื่อม (โดยที่ปริมาณเฟอร์ไรท์ถูกวัดโดยการดึงดูดของสปริงแม่เหล็ก)วิธีนี้ไม่ได้ถูกออกแบบสำหรับการวัดปริมาณเฟอร์ไรท์ที่มีปริมาณสูง ดังเช่นเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ และจะทำการสอบเทียบที่ค่าประมาณ 28 FN นอกจากนี้ความผันแปรในปริมาณเหล็กระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เกรดต่างๆ จะส่งผลกระทบต่อการดึงดูดของแม่เหล็กสำหรับเฟสที่สมดุล เพราะไม่มีการพัฒนาความถูกต้องในระบบการดูดของแม่เหล็ก และการพิสูจน์ให้เป็นที่ยอมรับสำหรับการใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ในทางอุตสาหกรรม ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้กันมากที่สุดได้แก่การวัดเป็นแบบเปอร์เซ็นต์เฟอร์ไรท์ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนระบบการวัด FN ไปสู่ระดับของปริมาณเฟอร์ไรท์ในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ในปัจจุบัน สามารถเพิ่มความเชื่อมั่นได้มากขึ้น โดยการเพิ่มแรงที่กระทำแก่สปริงแม่เหล็ก

เพื่อที่จะขยายช่วงการวัดออกไป มาตรฐานที่ใช้กำหนดสำหรับบริเวณเนื้อแนวเชื่อมโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 50 ถึง 90 FN โดยมีกฎที่ใช้ในการแปลงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์คือ 0.70 (FN) = % เฟอร์ไรท์

อย่างไรก็ตามการวัดปริมาณเฟอร์ไรท์ในปัจจุบันจะใช้เทคนิคทางแม่เหล็ก โดยทั่วไปจะเขียนอยู่ในรูปเทอมของเปอร์เซ็นต์ โดยมีข้อจำกัดของการใช้ระบบการวัด FN ในบางบริเวณของแนวเชื่อม เครื่องมือในการวัดด้วยระบบนี้ใช้ทำการวิเคราะห์ได้ดีกับบริเวณที่ทำการวัดซึ่งมีเนื้อที่กว้างมาก และปริมาณเฟอร์ไรท์กระจายตัวดังเช่นในเนื้อแนวเชื่อม แต่ไม่สามารถให้ค่าที่ถูกต้องกับการวัดที่บริเวณเล็กๆที่มีปริมาณเฟอร์ไรท์สูง ดังตัวอย่างเช่นบริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อน และยังอ่านค่าในเนื้อโลหะฐานไม่ถูกต้องอีกด้วย เนื่องจากผลกระทบของการหักเหไปของแม่เหล็กซึ่งสัมพันธ์กับเมตริกซ์ของเฟอร์ไรท์ที่หยาบ [12]

2.11 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยสายตา รวมทั้งการค้นหาเฟสของการตกตะกอนที่เกิดขึ้นอย่างเช่นเฟส σ คาร์ไบด์ ไนไตรด์และอื่นๆ อย่างไรก็ตามการตีความโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ค่อนข้างยากมาก จึงยังไม่มีเกณฑ์ที่ใช้ประเมินโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าปราศจากประสบการณ์ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างที่คล้ายคลึงกับโครงสร้างดังกล่าว และ การตรวจจับหาสัดส่วนตะกอนขนาดเล็ก ๆ โดยใช้สายตาก็ค่อนข้างยากด้วยเช่นกัน

2.12 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Riad Badji ,et al. ([13] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเฟส และสมบัติทางกล หลังการเชื่อมและอบอ่อนเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เกรด 2205 ที่อุณหภูมิ 800-1000^{O}C พบว่า การวางตัวของเฟอร์ไรท์พบมากบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน และพบออสเทนไนท์ มากที่บริเวณใจกลางเนื้อเชื่อม และพบเฟส σ ซึ่งเป็น precipitation และ $M_{23}C_6$ โครเมียมคาร์ไบด์ ที่ขอบเกรนระหว่างออสเทนไนท์และ เฟอร์ไรท์ และอุณหภูมิในการอบอ่อนที่เหมาะสม ที่ทำให้อัตราส่วนระหว่างเฟอร์ไรท์และ ออสเทนไนท์เหมาะสม คือ 1050^{O}C อีกทั้งการที่อัตราส่วนระหว่างเฟอร์ไรท์และออสเทนไนท์เท่ากันยังส่งผลให้สมบัติทางกลดีขึ้น

S.K. Ghosh and S. Mondal. [14] ได้ศึกษาอุณหภูมิในการบ่มแข็งเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ พบว่าจากการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 1,300^{O}C และเย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำ หลังจากนั้นบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 700-900^{O}C เป็นเวลา 30 นาที เกิด Precipitation Hardening ได้แก่ Secondary austenite Y_2, Chi phase and sigma phase บนพื้น δ-ferrite และเมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มแข็งเป็น 120 นาทีพบว่าเกิด

Precipitation Hardening หนาแน่นขึ้น และ Chi phase and sigma phase จะสลายไปเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มแข็งเป็น 1,000^{O}C

วัสพล นันทประยูร [15] ได้ศึกษาและทดสอบตัวแปรสำคัญ คือ ในการเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ มาตรฐาน ASTM A790 เกรด UNS S31803 ด้วยกระบวนการเชื่อมทังสเตนอาร์คอาร์กอน พบว่าตัวแปรสำคัญในการเชื่อม ได้แก่ พลังงานความร้อนที่ให้แก่แนวเชื่อม ก๊าซรองแนวเชื่อม ก๊าซคลุมแนวเชื่อม เทคนิคการเชื่อมเสริมแนว การควบคุมการเย็นตัวหลังการเชื่อม ยี่ห้อและประเภทลวดเชื่อม การใช้น้ำยา Pickling Paste เป็นต้น โดยใช้ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์มาตรฐาน ASTM A790 เกรด UNS S31803 และวิเคราะห์หาปริมาณเฟอร์ไรท์โดยวิธีนับจุดตามาตรฐาน ASTM E562 และการทดสอบการกัดกร่อนแบบหลุมบ่อตามมาตรฐาน ASTM G48 method A พบว่าบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมที่มีปริมาณเฟอร์ไรท์มากที่สุด ได้แก่บริเวณเนื้อรอยเชื่อมราดหน้า และบริเวณแนวเติมเต็มชั้นสุดท้าย ในขณะที่บริเวณแนวเชื่อมรากและแนวให้ความร้อนเป็นบริเวณที่มีเฟอร์ไรท์น้อยที่สุดส่วนโครงสร้างบริเวณกระทบความร้อนที่มีปริมาณเฟอร์ไรท์มากที่สุดจะอยู่บริเวณแนวเชื่อมราดหน้าเช่นกัน และบริเวณที่มีเฟอร์ไรท์น้อยที่สุดจะอยู่ในบริเวณให้ความร้อนหรือแนวเติมเต็มตรงบริเวณกลางแนวเชื่อม J. Nowacki and A. Lukojc [16] ได้ศึกษาอิทธิพลของการตกตะกอนของออสเทนไนท์เฟสที่สอง ใน HAZ ของการเชื่อมรอยเชื่อมต่อชนในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ด้านความแข็งแรง และความต้านทานการกัดกร่อน ผลการวิเคราะห์พบว่า ออสเทนไนท์เฟสที่สองเกิดจากเฟสเฟอร์ไรท์ ซึ่งเป็นผลกระทบจาก Welding Thermal cycle ซึ่งมีอิทธิพลต่อด้านความแข็งแรงของรอยต่อ และความต้านทานการกัดกร่อน

เกรียงไกร วโนทยาน [17] ได้ศึกษาผลกระทบของกระแสไฟเชื่อมต่อโครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เกรด S31803 ด้วยกระบวนการเชื่อมทิก พบว่า อัตราการเย็นตัวของรอยเชื่อมต่ำจะทำให้ออสเทนไนท์เกิดได้มากขึ้นและขยายขนาดใหญ่ขึ้นด้วย ทำให้พบ ออสเทนไนท์เป็นจำนวนมากในบริเวณเนื้อรอยเชื่อม (Weld metal) แต่กลับลดลงเหลือเพียงเล็กน้อยในเขตอิทธิพลความร้อน (HAZ)

เกรียงไกร แสงอำนาจเดช และคณะ [18] ได้ศึกษาอิทธิพลของการอบบ่มที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะเงินผสม 93.7 Ag-6.0Cu-0.3Sn ในการทดลองเริ่มจากหลอมเงินบริสุทธิ์ ทองแดงบริสุทธิ์ และดีบุกบริสุทธิ์ และหล่อเป็นชิ้นงาน นำไปรีดเย็น จากนั้นนำไปทำกรรมวิธีทางความร้อนโดยการอบละลายเฟสด้วยอุณหภูมิต่างๆ ระหว่าง 720-760 องศาเซลเซียส ตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่าง 260-320 องศาเซลเซียส ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล ผลการทดลองพบว่าโครงสร้างจุลภาคของงานหล่อ มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ของเฟสที่มีเงินเป็นส่วนผสมหลัก (Ag richdendrite) และโครงสร้างยูเทคติก ความแข็งมีค่า 73 วิกเกอร์ ความแข็งและความ

ต้านแรงดึงของชิ้นงานขึ้นกับอุณหภูมิ และเวลาในการอบละลายและเวลาในการบ่ม สรุปได้ว่าสภาวะการอบบ่มที่ทำให้ได้ความแข็งสูงสุด ความต้านแรงดึงสูงสุด และความสามารถในการยืดตัวสูงสุด ควรใช้อุณหภูมิการอบละลายเฟสที่ 740 องศาเซลเซียส แล้วตามด้วยการอบบ่มที่300 องศาเซลเซียส ซึ่งความแข็งมีค่า 167 วิกเกอร์ ความต้านแรงดึงสูงสุดมีค่า 415 เมกกะปาสคาล และความสามารถในการยืดตัวมีค่า 9.2 เปอร์เซ็นต์

Zhang Wei ,et al. [19] ได้ศึกษาการให้ความร้อนในการบ่มแข็ง ต่อพลังงานความร้อนจากการกระแทก และโครงสร้างจุลภาค ในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เกรด2101 พบว่า พลังงานความร้อนจากการกระแทกลดลงอย่างมาก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิบ่มแข็งตั้งแต่ $700^{O}C$ ขึ้นไป ค่าพลังงานความร้อนจากการกระแทกสูงสุดคือ 37 J หลังจากบ่มแข็งที่ $700^{O}C$ ซึ่งเมื่อทำการอบอ่อน (Anneal) จะเหลือแค่เพียง 34% และพบว่าเมื่อชิ้นงานที่บ่มแข็งที่ $700^{O}C$ นี้มีค่าพลังงานความร้อนจากการกระแทกลดลงหลังจากอยู่ที่อุณหภูมิห้องเมื่อเวลาผ่านไป 3 นาที และลดลงอีกครึ่งหนึ่งเมื่อทิ้งไว้ 10 นาที ผลการวิเคราะห์ผิวหน้าการแตกหัก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการบ่มแข็งพบว่า ลักษณะการแตกหักแบบโครงร่างตาข่ายเปลี่ยนเป็นการแตกหักแบบเปราะ และการแตกหักตามขอบเกรน นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี พบการตกตะกอนจำนวนมากกระจายตัวบริเวณขอบเขตระหว่างเฟอร์ไรท์กับออสเทนไนท์ และขอบเขตระหว่างเฟอร์ไรท์กับเฟอร์ไรท์ เมื่อวิเคราะห์ผลึกของเฟสต่างๆที่ตกตะกอนเฟสที่พบคือ Cr_2N ซึ่งจากการทดลองได้ผลสรุปว่า Cr_2N ทำให้ลดพลังงานความร้อนจากการกระแทกลง