

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อิทธิพลการเชื่อมซ้อนแนวของกระบวนการ GMAW ต่อสมบัติการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกับเหล็กกล้าไร้สนิมประกอบด้วยเนื้อหาที่สำคัญและเกี่ยวข้องในการวิจัยครั้งนี้ ดังนี้

- 2.1 กรรมวิธีการเชื่อมแบบแก๊สเมทัลอาร์ค (Gas Metal Arc Welding: GMAW) หรือการเชื่อมมิก/แม็ก (MIG/MAG Welding)
- 2.2 การจำแนกเหล็กกล้าไร้สนิม
- 2.3 แผนภาพสมดุลเหล็ก-คาร์บอน
- 2.4 สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมต่อความสามารถในการเชื่อม
- 2.5 การกัดกร่อนตามขอบเกรน
- 2.6 รอยเชื่อมเสื่อมลง
- 2.7 การพาของโลหะหลอมเหลวในแอ่งรอยเชื่อม
- 2.8 การแข็งตัวของโครงสร้างผลึกของแนวเชื่อม
- 2.9 อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อม
- 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กรรมวิธีการเชื่อมแบบแก๊สเมทัลอาร์ค (Gas Metal Arc Welding: GMAW) หรือการเชื่อมมิก/แม็ก (MIG/MAG Welding)

เป็นกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย ที่อาศัยพลังงานความร้อนจากการอาร์คด้วยไฟฟ้าระหว่างลวดเชื่อม (Filler wire or Solid Electrode wire) ที่ไหลป้อนอย่างต่อเนื่องกับชิ้นงาน (Base Metal) โดยมีแก๊สเฉื่อย (Inert gas) หรือ แก๊สผสม (Mixer gas) หรือแก๊สปฏิกิริยา (Active gas) ปกคลุมการอาร์คป้องกันมิให้แก๊สออกซิเจนหรือแก๊สไนโตรเจน เข้ามารวมตัวกับโลหะที่กำลังหลอมละลาย การเรียกชื่อกระบวนการเชื่อมมิกหรือแม็กขึ้นอยู่กับแก๊สที่ใช้ปกคลุม คือ

2.1.1 MAG-M (Metal Active Gas : Mixture Gas Welding)

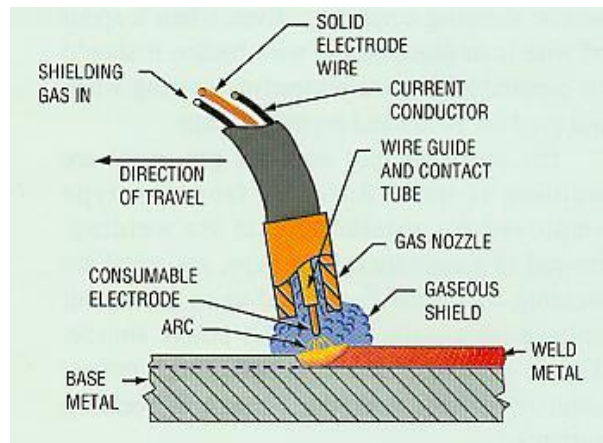
เมื่อใช้แก๊สเฉื่อยเป็นแก๊สปกคลุม เช่น แก๊สอาร์กอน, แก๊สฮีเลียมผสมกับแก๊สปฏิกิริยา (Active Gas) เช่น Argon + 1% ถึง 2% O₂, Argon + He + CO₂, Helium + Ar + CO₂, Argon + CO₂ + H₂ เป็นต้น สามารถใช้เชื่อมกระแสไฟสูงๆ ได้ จึงสามารถทำให้เกิดการส่งถ่ายน้ำโลหะ (Metal transfer) จากลวดเชื่อม (wire electrode) สู่วัสดุแบบ Spray Arc ได้

2.1.2 MIG (Metal Inert Gas Welding)

เมื่อใช้แก๊สเฉื่อยเป็นแก๊สปกคลุม เช่น แก๊สอาร์กอน (Ar), แก๊สฮีเลียม (He) หรือแก๊สอาร์กอนผสมกับแก๊สฮีเลียม สามารถใช้เชื่อมกระแสไฟสูงๆ ได้จึงสามารถทำให้เกิดการส่งถ่ายน้ำโลหะ (Metal transfer) จากลวดเชื่อม (wire electrode) ที่ขึ้นงานแบบ Spray Arc ได้

2.1.3 MAG-C (Metal Active Gas : CO₂ Welding)

ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เป็นแก๊สปกคลุม ใช้เชื่อมกระแสไฟต่ำ จึงทำให้เกิดการส่งถ่ายน้ำโลหะ (Metal transfer) จากลวดเชื่อม (wire electrode) ที่ขึ้นงานแบบ Short Arc Transfer ไม่สามารถทำ Spray Arc ได้เพราะจะเกิดการแตกกระเด็นของน้ำโลหะเชื่อมมากเกินไป (excessive spatter) เหมาะสำหรับใช้เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กผสมทำงานบางเท่านั้น



รูปที่ 2.1 แสดงหลักการอาร์คของกระบวนการเชื่อมแบบแก๊สเมทัลอาร์ค[2]

2.1.4 อิทธิพลของกระแสเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม (Current and Speed)

กระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม มีอิทธิพลอย่างมากต่อปริมาณของบ่อหลอมละลายและการซึมลึกของรอยเชื่อม การที่ใช้กระแสไฟในการเชื่อมสูงจะมีผลต่อรูปร่างของบ่อหลอมละลาย (Weld pool) ให้มีขนาดเพิ่มมากขึ้น ทำให้ชิ้นงานมีโอกาสที่จะหดตัวมากขึ้นซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดรอยแตกร้าวและโพรงตรงกลางแนวเชื่อม

2.1.5 ลวดเชื่อม (Wire Reel)

ลวดเชื่อมที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมมิก/แม็ก ต้องเลือกลวดเชื่อมที่มีสมบัติเดียวกันหรือมีส่วนผสมทางเคมีใกล้เคียงกับวัสดุที่ทำการเชื่อม จึงจะให้แนวเชื่อมมีคุณภาพและส่วนผสมทางเคมีจะบ่งบอกถึงค่าในการทดสอบที่ได้มาตรฐาน

2.1.5.1 การเลือกใช้ลวดเชื่อม

การเลือกใช้ลวดเชื่อมจะต้องพิจารณาชนิดโลหะงานเชื่อม ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลเป็นตัวประกอบหลัก การเลือกลวดเชื่อมที่ถูกต้องเหมาะสมจะได้งานเชื่อมที่สมบูรณ์ ถ้าไม่รู้ชนิดโลหะงานเชื่อมก็ใช้วิธีตรวจสอบด้วยตาเปล่า ซึ่งน้ำหนัก การดูแม่เหล็ก ทดสอบด้วยประกายไฟ การแตกหัก และทางเคมี ข้อพิจารณาในการเลือกใช้ลวดเชื่อมมีดังนี้

1. สมบัติทางกลของโลหะชิ้นงาน ลวดเชื่อมที่เลือกใช้ต้องมีความต้านแรงดึงสูงสุดที่เข้ากันได้กับโลหะชิ้นงาน
2. ส่วนผสมทางเคมีของโลหะชิ้นงาน ต้องเหมาะสมกับส่วนผสมทางเคมีของโลหะลวดเชื่อมและเข้ากันได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานที่ต้องการความต้านทานต่อการกัดกร่อน การนำความร้อนหรือไฟฟ้า วัสดุงานเชื่อมที่ไม่ใช่เหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้าเจืออื่นๆ ควรเลือกส่วนผสมทางเคมีของโลหะชิ้นงานกับโลหะลวดเชื่อม ที่เข้ากันได้
3. ความหนาและรูปทรงโลหะชิ้นงาน งานเชื่อมที่มีความหนาและรูปทรงแตกต่างกันเมื่อนำมาเชื่อมต่อประกอบเข้าด้วยกันซึ่งต้องการความเหนียวสูงสุด เพื่อป้องกันงานเชื่อมเกิดรอยร้าวโลหะ งานเชื่อมควรมีสสมบัติด้านความเหนียวด้วย
4. สภาพการใช้งานและข้อกำหนดรายละเอียดสภาพการใช้งานเชื่อม อาจแตกต่างกัน เช่น ที่อุณหภูมิต่ำ-สูง การรับแรงกระแทก ดังนั้นลวดเชื่อมต้องมีส่วนผสมที่เข้ากันได้กับโลหะงานเชื่อม ต้องเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีสมบัติด้านความเหนียวและต้านทานต่อแรงกระแทก

2.1.5.2 ขนาดลวดเชื่อม

ลวดเชื่อมของกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม จะเป็นเส้นยาวทำเป็นม้วนหรือขด เพื่อใช้งานเชื่อมได้อย่างต่อเนื่อง ม้วนลวดจะมีน้ำหนักประมาณ 0.9-27 กิโลกรัม (2-60 ปอนด์) ลวดเชื่อมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก เมื่อเทียบกับลวดเชื่อมที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมแบบอื่น โดยมีขนาดตั้งแต่ 0.8-1.6 มิลลิเมตร (0.030-1/16 นิ้ว) ซึ่งเป็นขนาดที่นิยมใช้กันแพร่หลาย และยังมีขนาดเล็กที่สุดซึ่งคือ 0.5 มิลลิเมตร (0.020 นิ้ว) และโตสุด 3.2 มิลลิเมตร (1/8 นิ้ว) เพราะเป็นลวดเชื่อมขนาดเล็กจึงต้องใช้กระแสเชื่อมสูง เพื่อให้ได้อัตราการหลอมเหลวของลวดเชื่อมอยู่ในช่วงประมาณ 40-255 มิลลิเมตร/วินาที (100-600 นิ้ว/นาทีก) ดังนั้นลวดเชื่อมต้องสะอาดไม่เป็นสนิม ฝุ่นละออง น้ำมัน หรือสารมลทินซึ่งเกาะติดผิวลวดเชื่อม เพราะเป็นสาเหตุของการเกิดจุดบกพร่องในเนื้อโลหะเชื่อม เช่น ความพรุนและรอยร้าว ยังมีผลต่อปริมาตรโลหะที่ได้รับจากการหลอมเป็นสัดส่วนที่สูงสุดเท่าใด

2.1.5.3 มาตรฐานและการใช้งานของลวดเชื่อม

ตารางที่ 2.1 แสดงรหัสกลุ่มของลวดเชื่อมแต่ละประเภท ตามมาตรฐาน AWS [3]

AWS Specification	โลหะ
A 5.7	ทองแดงและทองแดงเจือ
A 5.9	เหล็กกล้าไร้สนิม
A 5.10	อลูมิเนียมและอลูมิเนียมเจือ
A 5.14	นิกเกิลและนิกเกิลเจือ
A 5.16	ไทเทเนียมและไทเทเนียมเจือ
A 5.18	เหล็กกล้าคาร์บอน

ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมที่ใช้สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม [3]

AWS Class	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu	Fe
ER308	.08	19.5- 22.0	9.0- 11.0	.50	1.0- 2.5	.30- .65	.03	.03	.05	มีผสมอยู่
ER308L ^a	.03	19.5- 22.0	9.0- 11.0	.50	1.0- 2.5	.30- .65	.03	.03	.05	มีผสมอยู่
ER308Mo ^b	.08	18.0- 21.0	9.0- 12.0	2.0- 3.0	1.0- 2.5	.30- .65	.03	.03	.05	มีผสมอยู่
ER308MoI ^{ab}	.04	18.0- 21.0	9.0- 12.0	2.0- 3.0	1.0- 2.5	.30- .65	.03	.03	.05	มีผสมอยู่

2.1.6 แก๊สปกคลุม (Shielding Gas)

แก๊สปกคลุม เป็นแก๊สที่ใช้ปกคลุมบริเวณแนวเชื่อมและบ่อหลอมละลาย เพื่อไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือสกปรก เนื่องจากวัสดุงานร่วบตัวกับไนโตรเจน, ออกซิเจนและไอน้ำในอากาศ ไนโตรเจนที่ฝังตัวอยู่ในแนวเชื่อม จะทำให้แนวเชื่อมมี Ductility และ Impact Strength ลดลงทำให้แตกง่าย ถ้าไนโตรเจนมีปริมาณมากจะทำให้แนวเชื่อมเกิดรูพรุน ออกซิเจนที่มีอยู่มากในเหล็กจะรวมตัวกับคาร์บอนเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งแก๊สนี้จะฝังตัวในโลหะและทำให้เกิดเป็นรู

พอรุน ออกซิเจนที่อยู่ในเหล็กสามารถรวมตัวกับธาตุอื่นๆ ที่อยู่ในเนื้อเหล็กได้ซึ่งจะอยู่ในรูปของสารประกอบฝังตัวภายในแนวเชื่อม ส่วนไฮโดรเจนที่อยู่ในไอน้ำเมื่อแยกตัวออกมาจะรวมตัวกับหรืออะลูมิเนียมหรือเหล็กทำให้เกิดพอรุนและแตกได้แนวเชื่อมได้ การหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวทำได้โดยการใช้แก๊สปกคลุมซึ่งเดิมใช้แก๊สเฉื่อยจำพวกอาร์กอนและฮีเลียม ปัจจุบันใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และออกซิเจนผสมกับแก๊สเฉื่อย สำหรับแก๊สอาร์กอน, ฮีเลียมและ CO_2 สามารถใช้ได้เลยโดยไม่ต้องผสมกับแก๊สอื่นใดหรืออาจจะผสมกับแก๊สอื่นเพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่มีความสมบูรณ์

2.1.6.1 แก๊สอาร์กอน

กระบวนการเชื่อมโลหะโดยใช้แก๊สคลุม ได้นำเอาอาร์กอนซึ่งเป็นแก๊สเฉื่อยมาใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมและอะลูมิเนียม ในบรรยากาศจะมีอาร์กอนอยู่ประมาณ 0.94% โดยปริมาตร หรือ 1.3% โดยน้ำหนักมีจุดหลอมที่ $-189.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ จุดเดือด $-185.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ หนักกว่าฮีเลียมประมาณ 10 เท่า หนักกว่าอากาศประมาณ 1.4 เท่า อาร์กอนที่นำมาใช้ในการเชื่อม จะต้องมีความบริสุทธิ์ประมาณ 99.995% ถ้าต้องการความบริสุทธิ์มากขึ้นให้ใช้วิธีทำความสะอาดทางเคมีเพิ่มเติมอีก ก็จะได้อาร์กอนบริสุทธิ์ถึง 99.999% อาร์กอนมีศักย์การเกิดไอออนต่ำ (low ionization potential) ให้ความเสถียรต่อการอาร์กสูงการอาร์กเรียบสม่ำเสมอถึงความยาวการอาร์กจะไม่คงที่ ก็ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกระแสน้ำเชื่อมมาก ลดการเกิดประกายโลหะ ทำให้รูปหน้าตัดของรอยเชื่อมลึกลงลึกคล้ายตะปูเมื่ออาร์กอนมีศักย์การเกิดไอออนต่ำ แรงดันการอาร์กจึงอยู่ในเกณฑ์ต่ำสามารถอาร์กใน กระแสไฟฟ้าต่ำได้[10] การเลือกใช้อัตราการไหลของแก๊สคลุมต่ำ เพราะอาร์กอนมีความหนาแน่นสูงทำให้การปั่นป่วนของเปลวเชื่อมน้อย ความเสถียรของการอาร์กขึ้นอยู่กับศักย์ของการเกิดไอออนด้วย แต่ก๊าซอาร์กอนมีศักย์การเกิดไอออนต่ำ อะตอมจึงหลุดเข้าไปในไอออนได้ง่าย ทำให้การอาร์กเสถียรและสม่ำเสมอเมื่อเทียบกับฮีเลียม ซึ่งมีศักย์การเกิดไอออนสูงกว่าจึงต้องใช้พลังงานถึง 24.5 eV เพื่อขับอิเล็กตรอนตอนแรกออกจากอะตอม และใช้พลังงานถึง 54.4 eV สำหรับอิเล็กตรอนที่สอง ซึ่งสูงกว่าอาร์กอนที่ใช้พลังงานเพียง 15.76 eV ในการขับอิเล็กตรอนตัวแรกและอิเล็กตรอนที่สองเพียง 27.6 eV เท่านั้นพลังงานเชื่อมต่ำ เพราะอาร์กอนทำให้บ่อหลอมเหลวแข็งตัวเร็ว การหลอมเข้าด้วยกันของเนื้อโลหะเชื่อมกับขอบตะเข็บเชื่อมไม่ค่อยดี จึงไม่นิยมใช้กับงานเชื่อมอะลูมิเนียม ทองแดง นิกเกิลและไทเทเนียม เป็นแก๊สเฉื่อยที่นำความร้อนต่ำ จึงเกิดเปลวอาร์คแคบและมีความเข้มข้นสูง ทำให้งานได้รับพลังงานและความร้อนสูง แนวเชื่อมที่ได้จะแคบและซึมลึกดี การที่แก๊สอาร์กอนให้เปลวอาร์กที่เข้มข้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาทำความสะอาดออกไซด์บนผิวของชิ้นงานเชื่อม โดยเฉพาะการเชื่อมอะลูมิเนียม แก๊สอาร์กอนใช้เป็นแก๊สปกคลุมสำหรับการเชื่อม MIG ซึ่งใช้ในการเชื่อมโลหะที่ไม่ใช่เหล็กและโลหะผสมได้แก่ อะลูมิเนียม, แมกนีเซียม, อะลูมิเนียมผสมกับแมกนีเซียมและทองแดง [4]

2.1.6.2 แก๊สฮีเลียม

แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สเฉื่อย ที่มีน้ำหนักเบากว่าแก๊สอาร์กอนแต่ทำความร้อนดีกว่า ดังนั้นเปลวการอาร์กที่เกิดจากการใช้แก๊สฮีเลียมปกคลุม จะกว้างและมีความเข้มข้นของการอาร์กต่ำกว่าใช้แก๊สอาร์กอน จึงทำให้ได้แนวเชื่อมที่กว้างและซึมลึกน้อยกว่าใช้แก๊สอาร์กอน แก๊สฮีเลียมจะให้อาร์กโวลต์เตตสูงกว่าแก๊สอาร์กอนเมื่อใช้ระยะอาร์กเท่ากัน แก๊สฮีเลียมได้มาจากการผลิตแก๊สธรรมชาติโดยการอัดแก๊สธรรมชาติและทำให้เย็นตัวลงด้วยขบวนการของแก๊สเหลว จากนั้นแยกเอาไฮโดรคาร์บอนและไนโตรเจนออกสุดท้ายจะได้แก๊สฮีเลียม การเริ่มอาร์กจะเกิดขึ้นยากในบรรยากาศของแก๊สฮีเลียมเมื่อทำการเชื่อม TIG แต่การเชื่อมด้วย MIG จะง่ายขึ้น แก๊สฮีเลียมใช้เป็นแก๊สปกคลุมสำหรับการเชื่อมโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก ได้แก่ ทองแดง อะลูมิเนียม, แมกนีเซียม แก๊สฮีเลียมนี้ยังใช้ผสมกับแก๊สชนิดอื่นเพื่อใช้เป็นแก๊สปกคลุมการเชื่อมได้

2.1.6.3 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

การใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแก๊สปกคลุมมักจะเกิดเม็ดโลหะกระเด็นและการอาร์กไม่สม่ำเสมอ สามารถแก้ไขด้วยการผสมกับอาร์กอน ลักษณะของเปลวอาร์กและแนวเชื่อมจะแตกต่างกันตามความแตกต่างของอัตราส่วนผสมของแก๊สทั้งสอง ส่วนสมบัติทางกลนั้นการใช้แก๊สอาร์กอนผสมกับ CO₂ จะให้ผลดีกว่าการใช้แก๊ส CO₂ อย่างเดียว แก๊สผสมชนิดนี้เหมาะสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าอะลูมิเนียมซึ่งจะให้การซึมลึกดี ลวดเชื่อมจะหลอมละลายดีกว่าใช้แก๊ส CO₂ ซึ่งอยู่ในลักษณะของสารประกอบ ที่ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับออกซิเจน ซึ่งมีใช่เป็นแก๊สเฉื่อยเหมือนกับแก๊สอาร์กอนและแก๊สฮีเลียม ดังนั้นบริเวณการอาร์กที่มีความร้อนสูงจะเกิดออกซิเจนอิสระเมื่อใช้แก๊ส CO₂ เป็นแก๊สปกคลุมเปลวอาร์กที่เกิดขึ้นจะกว้างกว่าการใช้แก๊สอาร์กอน แต่จะแคบกว่าใช้แก๊สฮีเลียม [4] แก๊ส CO₂ เป็นผลที่ได้จากการเผาแก๊สธรรมชาติ ถ่านโค้กหรือน้ำมัน สำหรับแก๊ส CO₂ ที่ได้จากการผลิตแอมโมเนียและการหมักแอลกอฮอล์ จะมีความบริสุทธิ์สูงถึง 100% แนวเชื่อมที่ปกคลุมด้วย CO₂ จะมีความกว้างปานกลางมีการซึมลึกดี การหลอมละลายดี ลักษณะแนวเชื่อมไม่เกิดการกัดแหงบริเวณขอบแนวเชื่อม แต่มีข้อเสียคือ จะเกิดเม็ดโลหะและการอาร์กไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะเมื่อใช้กับการถ่ายเทโลหะลวดเชื่อมแบบ Open Arc ดังนั้นการใช้แก๊ส CO₂ ปกคลุมจึงเหมาะกับการเชื่อมแบบ Micro-Wire ใช้สำหรับเชื่อมเหล็กอะลูมิเนียม แก๊ส CO₂ มีราคาถูกกว่าแก๊สปกคลุมชนิดอื่น จึงทำให้ต้นทุนในการเชื่อมต่ำ โดยบรรจุในถังอาจจะเป็นรูปของเหลวหรือแก๊ส สำหรับแก๊สที่ใช้ในการเชื่อมจะมีความชื้นต่ำ ปริมาณของแก๊สที่ใช้ปกคลุมแนวเชื่อมโดยทั่วไปจะใช้ 25 C.F.H. (ลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง) ถ้าต้องการใช้อัตราการไหลของแก๊สเกินกว่า 25 C.F.H. ควรจะใช้แบบ Manifold ที่ต่อแก๊ส CO₂ 2 ถังขนานกันหรือติดตั้งทำความร้อนไว้ระหว่างถังแก๊สกับ Regulator การใช้ปริมาณการไหลของแก๊สมากเกินไปอาจจะเป็นต้นเหตุให้แก๊ส CO₂ เหลวภายในถังไหลออกได้

2.1.6.4 อาร์กอน-ฮีเลียม

การนำแก๊สอาร์กอนผสมกับแก๊สฮีเลียมเพื่อรวมเอาสมบัติในการเชื่อม ของแก๊สทั้งสองเข้าด้วยกัน โดยผสมฮีเลียม 20-90% หรือมากกว่า อัตราส่วนในการผสมจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ การผสมกระทำได้หลายวิธี โดยการต่อแก๊สจากถังแก๊สแต่ละชนิดเข้าผสมกันที่ชุดผสม ซึ่งชุดผสมนี้สามารถควบคุมเปอร์เซ็นต์ของแต่ละชนิดได้ตามต้องการ

2.1.6.5 อาร์กอน+ออกซิเจน

การใช้แก๊สอาร์กอนกับการเชื่อม MIG จะให้การซึมลึกกลางแนวเชื่อมไม่ดี เกิดการกัดแหว่งที่ขอบแนวเชื่อม การป้องกันทำได้โดยผสมด้วยออกซิเจน 1-5% กับแก๊สอาร์กอน โดยออกซิเจนที่ผสมลงไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเหมือนกับเป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้กับลาวดาเชื่อมที่หลอมละลาย ทำให้สามารถซึมเข้าไปถึงกลางของแนวเชื่อมลดการกัดแหว่งที่ขอบแนวเชื่อม เปลวอาร์กที่เกิดขึ้นจะสม่ำเสมอ แนวเชื่อมจะสวยงามไม่ม้วนจนเกินไป แก๊สผสมชนิดนี้จะใช้กับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถใช้เชื่อมเหล็กอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าผสมต่ำได้ แต่ราคาของแก๊สนี้ค่อนข้างสูง

2.1.6.6 อาร์กอน – ไฮโดรเจน

การผสมแก๊สไฮโดรเจนกับอาร์กอนทำให้เพิ่มความเร็วการเชื่อมได้สูงขึ้น เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มศักย์การอาร์ค (Arc Voltage) และการเหนี่ยวนำความร้อน (Thermal Conductivity) แต่ถ้าผสมแก๊สไฮโดรเจนในปริมาณมาก จะก่อให้เกิดโพรง (Porosity) ขึ้นในเนื้อโลหะรอยเชื่อมได้ดังนั้น การเลือกใช้แก๊สปกคลุมที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อม GMAW จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งแก๊สอาร์กอนผสมกับแก๊สไฮโดรเจน จะนำไปใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม, Inconel Monel และโลหะที่มีปัญหาเนื่องจากรูพรุน จุดประสงค์ของการใช้แก๊สผสมชนิดนี้ เพื่อช่วยเพิ่มความร้อนในการเชื่อมให้สูงขึ้น ช่วยควบคุมรูปร่างของรอยเชื่อมการไหลตัวของน้ำโลหะในบ่อหลอมละลายดี และรอยเชื่อมสม่ำเสมอ แก๊สผสมชนิดนี้ไม่ใช่แก๊สเฉื่อยที่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงไม่ควรนำไปเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนหรือเหล็กกล้าผสมต่ำ ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถใช้แก๊สผสมนี้ ที่มีอัตราส่วนผสมของไฮโดรเจนสูงถึง 15 % ตัวอย่างอัตราส่วนผสมที่ใช้ อาร์กอน 95 % และไฮโดรเจน 5 % [6]

2.1.6.7 อาร์กอน - ฮีเลียม - CO₂

แก๊สผสมชนิดนี้ใช้สำหรับเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กความแข็งแรงสูง (High Strength Steel) ด้วยวิธี Short Arc ซึ่งปริมาณของแก๊สแต่ละชนิดจะมีสมบัติทำให้งานทนต่อการกัดกร่อนดี การอาร์คสม่ำเสมอซึมลึกดี และช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อม การใช้แก๊สปกคลุมผสมอาจจะใช้แก๊สดังกล่าวผสมกันหลายชนิดก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติตามที่ผู้ใช้งานต้องการและอัตราส่วนจะเปลี่ยนแปลงตามต้องการด้วย

2.2 การจำแนกเหล็กกล้าไร้สนิม

การแบ่งกลุ่มสแตนเลสวิธีนี้เป็นที่ยอมรับกันทั่วโลก ในตำราและในเอกสารทั่วไปมักแบ่งวิธีนี้เป็นหลัก การแบ่งโดยอาศัยโครงสร้างจุลภาคพื้นฐานเป็นหลักสำคัญในการแบ่ง สามารถแบ่งสแตนเลสออกได้ 5 กลุ่มอันได้แก่ [6]

2.2.1 กลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic)

มีโครงสร้างเนื้อโลหะเป็นออสเทนไนต์ (austenite) อะตอมของผลึกจัดเรียงตัวแบบ FCC (face-centered cubic) ธาตุสำคัญที่ทำให้สแตนเลสกลุ่มนี้มีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์คือ ธาตุนิเกิล และ ธาตุแมงกานีส

คุณสมบัติสำคัญของสแตนเลสกลุ่มออสเทนนิติก คือ คุณสมบัติที่แม่เหล็กดูดไม่ติด (non – magnetic) หรืออาจดูดติดแบบอ่อนอ่อนหากสแตนเลสออสเทนนิติกผ่านการขึ้นรูปเย็น (cold work) ชุบแข็งไม่ได้ มีส่วนผสมหลักที่สำคัญได้แก่โครเมียมไม่ต่ำกว่า 16% คาร์บอนไม่เกิน 0.15% และส่วนผสมของธาตุ นิเกิล หรือ แมงกานีส อย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้งสองอย่างรวมกัน สแตนเลสออสเทนนิติกเป็น ประเภทที่ใช้งานแพร่หลายมากที่สุดถึงกว่า 70% สแตนเลสออสเทนนิติกยังแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ได้แก่

2.2.1.1 ประเภทออสเทนนิติก-นิเกิล (Cr-Ni) ใช้อนุกรม 300 เป็นตัวสื่อ ประเภทนี้มีนิเกิลผสมไม่ต่ำกว่า 8% บางชนิดอาจไททานเนียมและ โมลิบดีนัมผสมอยู่ด้วย คุณสมบัติที่สำคัญคือ มีคุณสมบัติการขึ้นรูปได้ดีเยี่ยม มีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยม และใช้งานได้ทั้งที่อุณหภูมิสูงและต่ำได้ดี ตัวอย่างชนิดสแตนเลสในประเภทนี้ได้แก่ 304 316

2.2.1.2 ประเภทออสเทนนิติก-แมงกานีส (Cr-Mn) ใช้อนุกรม 200 เป็นตัวสื่อ ประเภทนี้มีแมงกานีสผสมอยู่ประมาณ 4-5 % และอาจมีนิเกิลผสมอีก 1-4% ประเภทนี้มีการใช้งานกันมากขึ้นในช่วง 4-5 ปีที่ผ่านมาเนื่องจากราคานิเกิลสูงจัด แต่คุณสมบัติโดยรวมไม่ว่าจะเป็นเรื่องการขึ้นรูปและคุณสมบัติ ทนทานต่อการผุกร่อนยังเป็นรองออสเทนนิติกประเภท 300

2.2.2 กลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic)

มีโครงสร้างเนื้อโลหะเป็นเฟอร์ไรต์ (ferrite) อะตอมของผลึกจัดเรียงตัวแบบ BCC (Body-centered cubic) เป็นโครงสร้างอะตอมพื้นฐานของสแตนเลสที่เหมือนกับเหล็กกล้าคาร์บอน ธาตุสำคัญที่เป็นตัวหลักของสแตนเลสกลุ่มนี้ได้แก่ โครเมียม ไม่ต่ำกว่า 11 % และ คาร์บอนไม่เกิน 0.12% ใช้อนุกรม 400

เป็นตัวสื่อ คุณสมบัติที่สำคัญของสแตนเลสกลุ่มนี้คือ แม่เหล็กดูดติด (magnetic) แปรรูปได้ง่าย นำความร้อนได้ดีเยี่ยม ราคาต่ำและเสถียร สแตนเลสเฟอร์ริติกยังมีการแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่

2.2.2.1 ประเภทสามัญประจำบ้าน มีอัตราการใช้สูงกว่า 48 % เป็นอันดับหนึ่งของยอดการใช้เฟอร์ริติกทั้งหมด แน่นอนจะเป็นชนิดไหนไม่ได้ นอกจาก 420 429 429J1 430 และ 440 ที่เรามากคุ้นกันดี ซึ่งมีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ 14-18 % ดังนั้นจึงมีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ขึ้นรูปได้ดี และใกล้เคียงกับออสเทนนิติก 304 จึงสามารถนำเฟอร์ริติกประเภทนี้มาใช้ทดแทนเกรด 304 ได้อย่างหลากหลายได้แก่ เครื่องครัว ถังปั่นเครื่องซักผ้า เครื่องล้างจาน กรอบประตูหน้าต่าง อ่างล้างน้ำ ประดับยนต์ และอื่น ๆ อีกมากมาย

2.2.2.2 ประเภทประหยัด มีอัตราการใช้งานเป็นอันดับที่ 2 ประมาณ 30 % ของตลาดเฟอร์ริติก ประเภทนี้จะมียอดประกอบของโครเมียมต่ำสุด ประมาณ 10-14% ราคาจึงต่ำสุดด้วย ได้แก่ 403 405 409L 410L และ 420J2 ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเฟอร์ริติกประเภทนี้จึงต้องใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีหรือมีการกัดกร่อนน้อย หรือประเภทผลิตภัณฑ์ที่มีการทาสี ดังนั้นสแตนเลสประเภทนี้จึงนิยมนำมาทำระบบท่อไอเสียรถยนต์ ท่อพักเสียง ตู้เก็บสินค้า รถโดยสาร รถพ่วง รถไฟ และกรอบจอภาพ

2.2.2.3 ประเภทสารพัดช่าง ในชนิด 430 แม้จะใช้งานได้ใกล้เคียงชนิด 304 แต่เรื่องการเชื่อมและการขึ้นรูปยังด้อยกว่า ดังนั้นเฟอร์ริติกเองจึงได้พัฒนาเฟอร์ริติกประเภทนี้ขึ้นมา เพื่อให้มีคุณสมบัติการเชื่อมและการขึ้นรูปได้ดีไม่แพ้เกรด 304 เลยทีเดียว มียอดประกอบหลักโครเมียม 16-20% กับธาตุไททาเนียมหรือไนโอเบียมเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เป็นเฟอร์ริติกที่เสถียร อันได้แก่ 430Ti 430LX 430J1L 439 และ 441 ดังนั้นจึงนิยมนำมาทำชิ้นงานที่เกี่ยวข้องกับงานเชื่อมและขึ้นรูป ตัวอย่างการใช้งาน ได้แก่ อ่างล้างจาน ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ระบบท่อไอเสีย ถังปั่นเครื่องซักผ้าแบบเชื่อม ผงซักฟอกแต่งภายใน เฟอร์ริติกประเภทนี้มีอัตราการใช้ประมาณ 13 % ของตลาดโดยรวม จึงอันดับได้เป็นที่ 3 ของเฟอร์ริติกที่นิยมใช้กัน

2.2.2.4 ประเภททนร้อนทนกรด หากพูดถึงออสเทนนิติก พระเอกที่เด่นเรื่องนี้คือ 316L แต่เฟอร์ริติกก็มีเช่นกัน ได้แก่เกรด 434 436 436J1L และ 444 เนื่องจากเฟอร์ริติกประเภทนี้ประกอบด้วย โครเมียม 16-20% กับธาตุโมลิบดีนัมประมาณ 0.75-2.5 % ซึ่งมีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนเทียบเท่า 316L อีกทั้งธาตุโมลิบดีนัมยังเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงนิยมนำมาทำชิ้นงานที่ทนการกัดกร่อนและงานที่ใช้อุณหภูมิสูง เช่น ถังใส่น้ำร้อน ถังต้มน้ำ ระบบท่อไอเสีย กัดน้ำ เครื่องไมโครเวฟ และผลิตภัณฑ์หลากหลายที่ใช้ในพื้นที่เปิดได้ดีเยี่ยม โดยมีส่วนแบ่งตลาดรวม 7% ของเฟอร์ริติก

2.2.2.5 ประเภทไฮโครม ประเภทนี้ยังมีใช้กันน้อยประมาณ 2 % ของตลาดเฟอร์ริติก ประเภทที่มีผู้ใช้ น้อยที่สุดนี้ ประกอบด้วยโครเมียมสูง 21-30% กับธาตุโมลิบดีนัมเป็นส่วนสำคัญ ได้แก่เกรด 443 445 446 447 และ 448 ในตลาดมักเรียกประเภทนี้ว่าพวกไฮโครม หรือพวกที่มีโครเมียมสูงนั่นเอง เฟอร์ริติกประเภทนี้มีสมบัติทนการกัดกร่อนเทียบเท่ากับ 317LN ดังนั้นจึงนิยมนำมาทำพวกงานที่ทน การกัดกร่อนสูงยิ่ง เช่น ผลิตภัณฑ์บนเรือสมุทร ชายฝั่งทะเล ยิง 447 และ 448 ที่มีโครเมียมผสมเกือบ 30% และโมลิบดีนัมรวม 4% จึงมีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนในน้ำทะเลเทียบเท่าโลหะไททา เนียมที่เดียว

2.2.3 กลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic)

มีโครงสร้างเริ่มต้นเช่นเดียวกับกลุ่มเฟอร์ริติก อะตอมของผลึกจัดเรียงตัวแบบ BCC (Body-centered cubic) แต่เมื่อผ่านการชุบแข็งแล้วจะได้โครงสร้างเป็นมาเทนไซด์ ใช้อุณหภูมิ 400 เป็นตัวสื่อ เช่นเดียวกับกลุ่มเฟอร์ริติก มีส่วนผสมใกล้เคียงกับเฟอร์ริติกมีธาตุโครเมียมราว 11.5-18% คาร์บอนอยู่ ราว 0.08%-0.75% ที่สำคัญคือไม่มีนิเกิลหรือหากมีก็ไม่เกิน 0.6%

คุณสมบัติที่สำคัญของสแตนเลสตระกูลนี้คือ แม่เหล็กดูดติด (Magnetic) สามารถปรับความแข็งได้โดย การชุบแข็ง (การให้ความร้อนแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว: Quenching) ที่อุณหภูมิ 400-510 °C และ ออบคืนตัว (Tempering) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 °C สามารถลดความแข็งได้ คล้ายกับเหล็กกล้าคาร์บอน ทำให้สแตนเลสกลุ่มนี้ มีคุณสมบัติต้านทานการสึกกร่อนและแข็งแรงทนทานได้ดียิ่งกว่าสแตนเลสกลุ่ม ออสเทนนิติกและเฟอร์ริติก มักนำไปใช้งานที่สำคัญในการผลิตเครื่องตัด อุตสาหกรรมเครื่องบิน พัด ลมกังหัน เป็นต้น ตัวอย่างของชนิดสแตนเลสในกลุ่มนี้ ได้แก่ 403 410 416 420 และ 440

2.2.4 กลุ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกผลึก (Precipitation hardening)

มีโครงสร้างเริ่มต้นเป็นออสเทนนิติกเมื่อผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1030 °C แล้วปล่อยให้เย็นตัวใน อากาศจะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นมาเทนไซด์ จากนั้นนำไปตกผลึกแข็งที่อุณหภูมิช่วง 500-600 °C แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศอีกครั้ง จะทำให้ได้โครงสร้างมาเทนไซด์สมบูรณ์แบบ จะมีเม็ดเกรน เล็กลงกว่าเดิม มีความเหนียวสูง

สแตนเลสกลุ่มนี้มีส่วนผสมของโครเมียม 15-18% และนิเกิล 3.00-7.75% เมื่อเพิ่มความแข็งแรงโดย กลไกเพิ่มความแข็งจากการตกผลึก (Precipitation hardening mechanism) จะสามารถเพิ่มความ แข็งแรงสูงมาก มีค่าความเค้นพิสูจน์ (Proof stress) อยู่ระหว่าง 1,000 – 1,500 เมกาปาสกาล (MPa) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและกรรมวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน (Heat treatment)

ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นของสแตนเลสกลุ่มนี้ จึงมักนำไปใช้ทำชิ้นส่วนพวก วาร์ว ข้อต่อ เฟือง เพลลา ชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมเคมี และชิ้นส่วนในเครื่องบิน

ตัวอย่างของชนิดสแตนเลสในกลุ่มนี้ ได้แก่ 630 631 และ 17-4PH



2507 Duplex Stainless Steel Fittings (Source: Swagelok)

รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของชนิดสแตนเลสในกลุ่มนี้ ได้แก่ 630 631 และ 17-4PH[6]

2.2.5 กลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex)

มีโครงสร้างผสมระหว่าง โครงสร้างเฟอร์ริติก และออสเทนนิติก ในสัดส่วน ประมาณ 30% และ 70% ตามลำดับ จุดเด่นของ สแตนเลสกลุ่มนี้คือ มีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนได้เยี่ยมยอด ด้วยความแข็งแรงทนทานที่เยี่ยมยอดกว่ากลุ่มออสเทนนิติก ขณะที่ง่ายต่อการขึ้นอีกด้วย คุณสมบัติทางกายภาพ อยู่ระหว่างสแตนเลสกลุ่มออสเทนนิติกและเฟอร์ริติก แต่ใกล้เคียงกับเฟอร์ริติกและเหล็กคาร์บอนมากกว่า คุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting) และแบบซอกอับ (Crevice) เป็นผลจากความสัมพันธระหว่าง โครเมียม โมลิบดีนัม ทั้งสแตนและไนโตรเจน ที่เป็นส่วนผสมของสแตนเลสกลุ่มนี้ สแตนเลสกลุ่มดูเพล็กซ์ทุกชนิดมีคุณสมบัติทนต่อการเกิดการกัดกร่อนตามแนวขอบเกรนจาก คลอไรด์ (chloride stress corrosion cracking) ได้ดียิ่งกว่าสแตนเลสออสเทนนิติกกลุ่ม 300 ด้วย

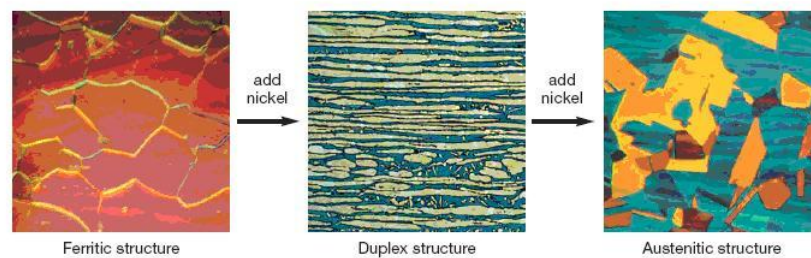
กลุ่มดูเพล็กซ์ยังสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท โดยอาศัยคุณสมบัติการทนต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting resistance equivalent number: $PREN = \%Cr + 3.3 (\%Mo + 0.5\%W) + 16\%Ni$) เป็นสำคัญ โดยค่าพรีน (PREN) ยิ่งมากยิ่งขึ้นก็ยิ่งมีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนได้มาก อันได้แก่

2.2.5.1 ประเภทลีนดูเพล็กซ์ (Lean Duplex) ตัวแทนของดูเพล็กซ์ประเภทนี้ได้แก่ ดูเพล็กซ์ชนิด 2304 มีโครเมียม 19.5-24.0 เปอร์เซนต์ นิกเกิลไม่เกิน 5 % โมลิบดีนัมประมาณไม่เกิน 1.0% ไนโตรเจนประมาณ 0.05-0.27% ไม่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ มีค่าพรีนประมาณ 25

2.2.5.2 ประเภทคูเพิล็กซ์มาตรฐาน (Standard Duplex) ตัวแทนของคูเพิล็กซ์ประเภทนี้ได้แก่ คูเพิล็กซ์ชนิด 2205 มีโครเมียม 19.5-23.0 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิลประมาณ 3-6.5 % โมลิบดีนัมประมาณ 1.5-3.5% ไนโตรเจนประมาณ 0.08-0.35% ไม่มีทังสเตนเป็นองค์ประกอบ มีค่าพรีนประมาณ 35

2.2.5.3 ประเภทซูเปอร์คูเพิล็กซ์ (Super Duplex) ตัวแทนของคูเพิล็กซ์ประเภทนี้ได้แก่ คูเพิล็กซ์ชนิด 2507 มีโครเมียม 24.0-30.0 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิลประมาณ 5-8 % โมลิบดีนัมประมาณ 1.0-5.0% ไนโตรเจนประมาณ 0.15-0.4% อาจมีทังสเตนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยประมาณ 0.5-2.5% มีค่าพรีนประมาณ 45

2.2.5.4 ประเภทไฮเปอร์คูเพิล็กซ์ (Hyper Duplex) ตัวแทนของคูเพิล็กซ์ประเภทนี้ได้แก่ คูเพิล็กซ์ชนิด 32707 มีโครเมียม 26.0-33.0 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิลประมาณ 5.5-9.0 % โมลิบดีนัมประมาณ 3.0-5.0% ไนโตรเจนประมาณ 0.3-0.6% ไม่มีทังสเตนเป็นองค์ประกอบ มีค่าพรีนประมาณ 55



รูปที่ 2.3 โครงสร้างไฮเปอร์คูเพิล็กซ์ [8]

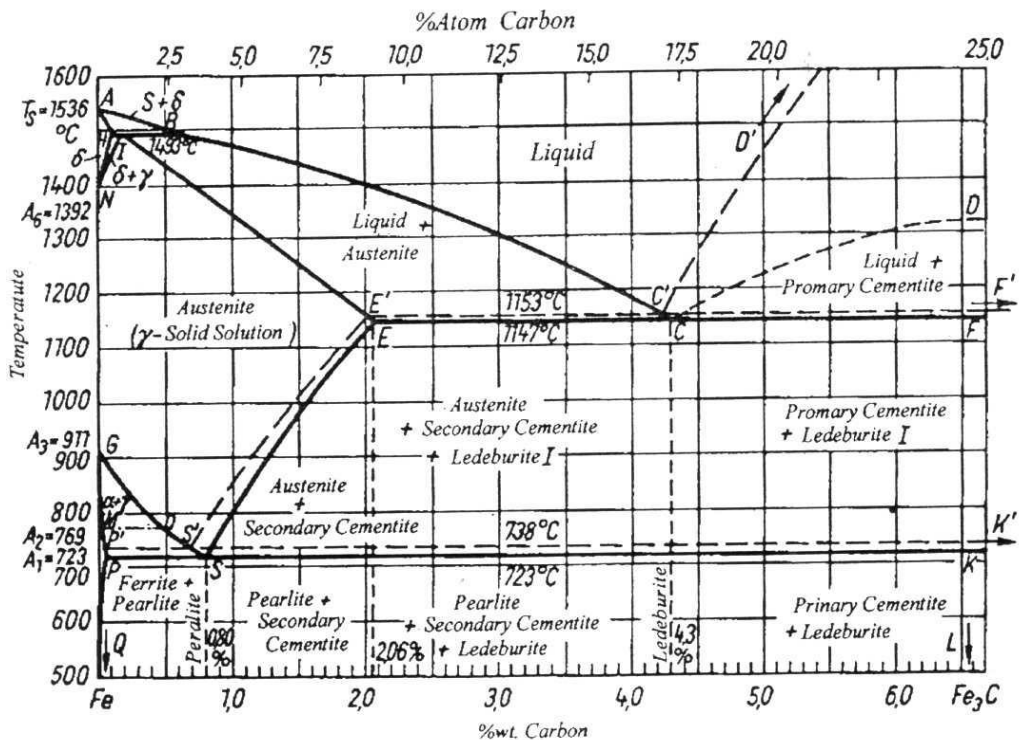
ปัจจุบันเริ่มมีการส่งเสริมให้มีการใช้งานสแตนเลสคูเพิล็กซ์เพิ่มมากขึ้น ได้แก่ การใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตแก๊ซ แก๊ซเชื้อเพลิง น้ำมัน การเปลี่ยนน้ำทะเลเป็นน้ำจืด อุตสาหกรรมอาหาร และเครื่องคั้ม และแม้กระทั่งในงานสถาปัตยกรรมต่างๆ [8]

2.3 แผนภาพสมดุลเหล็ก-คาร์บอน

แผนภาพสมดุลของโลหะผสมมีความสำคัญเป็นอย่างมากในงานอุตสาหกรรม คือ Fe-c Diagram หรือแผนภาพสมดุลเหล็ก-คาร์บอน เป็นแผนภาพระบบสมดุลที่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันในสภาพโลหะผสมสารละลายของแข็งเพียงบางส่วน ทั้งนี้เนื่องจากอะตอมของเหล็กกับอะตอมของคาร์บอนมีขนาดแตกต่างกันมาก โดยอะตอมเหล็กจะมีรัศมีอะตอม 1.24 Å ในขณะที่อะตอมของคาร์บอนมีรัศมีอะตอม 0.77 Å ทำให้คาร์บอนเพียงส่วนหนึ่งในปริมาณจำกัดเท่านั้นที่สามารถละลายปนในระบบ

ผลึกเหล็กกลายเป็นสารละลายของแข็งได้ ปริมาณการละลายของคาร์บอนในเหล็กจะแตกต่างกันไปตามระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง ประกอบกับการที่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง Allotropic Structure มีผลทำให้ปริมาณหรือความสามารถในการละลายคาร์บอนของเหล็กแต่ละ phase แตกต่างกันอย่างมาก การเกิด Supercooling หรือ Undercooling จึงยังมีผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทุก ๆ ด้านของเหล็กที่แตกต่างกันกว้างขวางมากยิ่งขึ้น ทำให้เหล็กเหมาะสมจะถูกนำมาใช้งานด้านต่าง ๆ ตามต้องการได้อย่างกว้างขวาง โดยทั่วไปจะกำหนดไว้ว่าความแตกต่างระหว่างเหล็กเหนียวและเหล็กหล่อนั้นจะใช้ตำแหน่งที่ 2%คาร์บอนในแผนภาพสมดุลเหล็ก-คาร์บอนเป็นเกณฑ์[7]

เหล็กบริสุทธิ์มีจุดหลอมละลายที่ระดับอุณหภูมิ 1539°C และมีรูปแบบการจับตัวของอะตอมเป็น Allotropic crystal สองแบบด้วยกันคือ BCC และ FCC ตามแต่ระดับอุณหภูมิที่เหล็กนั้นได้รับ ระบบผลึก BCC-Crystal ของเหล็กที่ระดับอุณหภูมิต่ำกว่า 910°C นี้จะเรียกทั่วไปว่า α -Iron หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า α -Ferrite หรือ α -Phase ในขณะที่ระบบผลึก FCC-Crystal ที่อยู่ในระหว่าง 910-1398°C จะเรียกว่า γ -Iron หรือ Austenite หรือ γ -Phase โดย BCC-Crystal ที่ระดับอุณหภูมิสูงกว่า 1398°C จะเรียกว่า δ -Iron หรือ δ -Ferrite หรือ δ -Phase[4]



รูปที่ 2.4 แผนภาพสมดุลของเหล็ก-คาร์บอน[6]

2.4 สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมต่อความสามารถในการเชื่อม

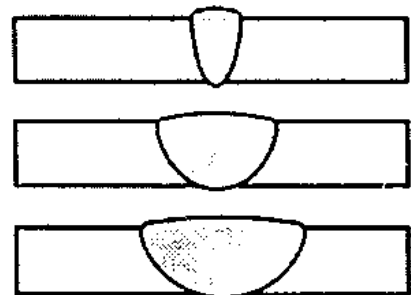
เหล็กกล้าไร้สนิมมีสมบัติทางกายภาพ (physical properties) ที่สำคัญและแตกต่างจากเหล็กกล้าคาร์บอนอยู่สองประการคือการนำความร้อนและการขยายตัวเนื่องจากความร้อน

2.4.1 การนำความร้อน

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกมีความสามารถในการนำความร้อนประมาณ 1/3 ของเหล็กกล้าคาร์บอน ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยค่าการเชื่อมเดียวกัน จะพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีการนำความร้อนออกไปจากบริเวณแนวเชื่อมช้ากว่าเหล็กกล้าคาร์บอน จึงทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีการบิดตัวมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และการเพิ่มธาตุผสม เช่น นิกเกิล โครเมียม หรือทองแดงลงในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก จะทำให้มีความสามารถในการนำความร้อนลดลง [9]

Type of Stainless	Thermal Conductivity*
Low Carbon Steel	35
410 Martensitic Stainless 430 Ferritic Stainless	15-17
304 Austenitic Stainless	11-13

*Btu/hr-ft-F



รูปที่ 2.5 ผลของสมบัติทางกายภาพต่อการเชื่อม[9]

2.4.2 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

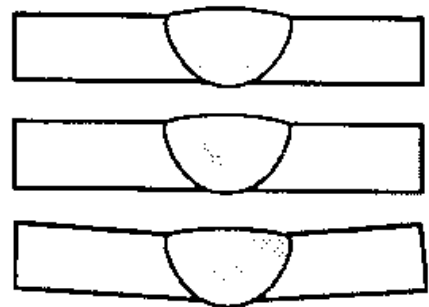
ระหว่างการเชื่อมจะมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อน และทำให้เกิดการบิดงอของโลหะที่ทำการเชื่อม ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนจะเป็นสิ่งที่บ่งบอกว่าโลหะนั้นจะมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนและหดตัวเมื่อเย็นตัวมาน้อยเพียงใด หากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวมากก็จะมีการขยายตัวและหดตัวมากและส่งผลให้เกิดการบิดตัวมากขึ้นตามลำดับ

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนประมาณ 50% ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติกและมาร์เทนซิติกจะมีค่าสัมประสิทธิ์การ

ขยายตัวเนื่องจากความร้อนใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอน ดังนั้นหากทำการปรับเปลี่ยนค่าการเชื่อมสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกเพื่อให้ได้ขนาดรอยเชื่อมใกล้เคียงกับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนหรือมาร์เทนซิติก จะพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกจะมีการบิดตัวมากขึ้น ดังรูปที่ 2.6 และการเพิ่มธาตุผสม เช่น นิกเกิล หรือทองแดงลงในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก จะทำให้มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนลดลง [9]

กล่าวโดยสรุปว่า การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมจะใช้เทคนิคการเชื่อมที่แตกต่างกับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน เนื่องจากการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมนั้นจะมีโอกาสเสี่ยงต่อการบิดตัวได้สูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน ดังนั้นการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมจะต้องควบคุมปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (heat input) ให้ต่ำที่สุด โดยการใช้กระแสเชื่อมที่ต่ำ ใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็ก เดินแนวเชื่อมให้เร็วขึ้น การเชื่อมชิ้นงานที่บางกว่า 0.25 นิ้ว (6.35 มม.) ควรจะใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน และหากเป็นชิ้นงานที่หนาอาจจะใช้เทคนิคการเชื่อมแบบเว้นระยะ (Step Welding) หรืออาจใช้แผ่นโลหะที่นำความร้อนสูงประกบได้ชิ้นงานที่ทำการเชื่อม [10]

Type of Stainless	Main Coefficient of Thermal Expansion
Low Carbon Steel	6.5
410 Martensitic Stainless 430 Ferritic Stainless	6.5
304 Austenitic Stainless	10



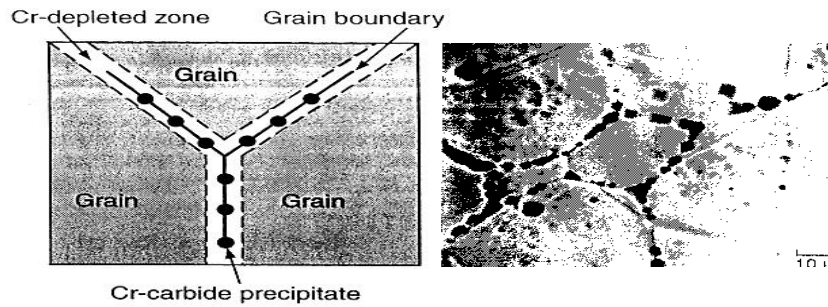
*From 30-1000 °F (micro-in/in-F)

รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบการขยายตัวเนื่องจากความร้อนระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน[10]

2.5 การกัดกร่อนตามขอบเกรน

เนื่องจากในเหล็กทั่ว ๆ ไปจะมีคาร์บอนผสมอยู่ เมื่อผสมโครเมียมลงไปโครเมียมเป็นธาตุที่รวมกับคาร์บอนได้ดีให้โครเมียมคาร์ไบด์ ด้วยเหตุนี้ปริมาณของโครเมียมในเหล็กจะลดลงต่ำกว่า 12% (ถ้าผสมโครเมียมเพียง 12 %) ทำให้เหล็กไม่มีสมบัติต้านทานการเป็นสนิมได้ โดยทั่ว ๆ ไปจะผสมโครเมียมตั้งแต่ 15 –18 % เพื่อให้มีปริมาณโครเมียมสูงกว่า 12 % แม้ว่าจะมีโครเมียมรวมกับ

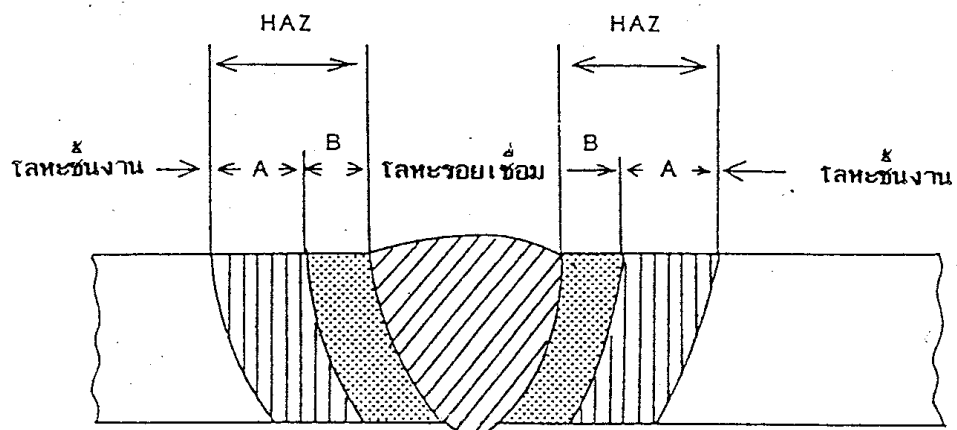
คาร์บอนเสียบ้างก็ตาม การเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ ส่วนใหญ่จะเกิดอยู่ตามขอบเกรน (grain boundary) ดังนั้น ถ้าในเหล็กมีโครเมียมต่ำกว่า 15 % อาจจะทำให้ตามบริเวณขอบเกรนของเหล็กมีโครเมียมต่ำกว่า 12 % อาจจะทำให้เหล็กเกิดการสึกกร่อนขึ้นได้ตามบริเวณขอบเกรน ซึ่งเรียกว่า Intergranular Corrosion การเกิดผุกร่อนลักษณะนี้จะเกิดตามเกรน และกินลึกลงไปเมื่อเกรนที่ถูกกัดกร่อนหลุดไปที่ละเกรน ดูที่ผิวอาจจะมองเห็นไม่มากแต่ลึกลงไปอาจจะลึกมากก็ได้ [11]



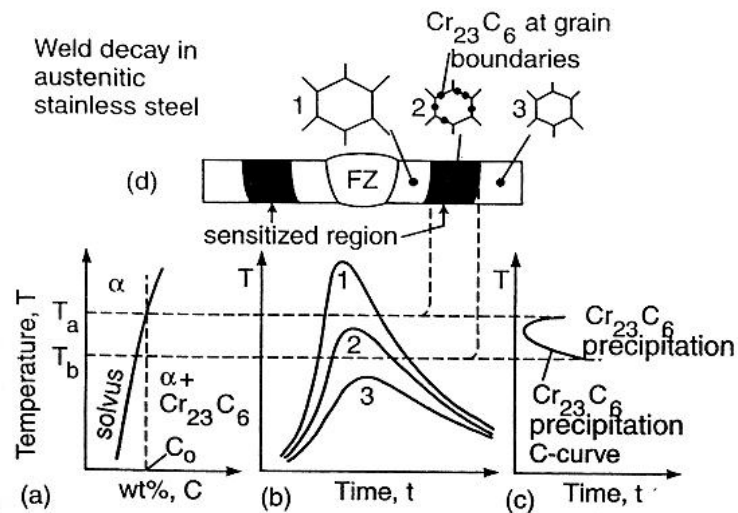
รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน[11]

2.6 รอยเชื่อมเสื่อมลง

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่ผ่านการรีดมาแล้วและถูกทำกรรมวิธีทางความร้อนด้วย โครงสร้างจุลภาคของโลหะชิ้นงานแสดงโครงสร้างที่ผ่านการรีดมาในเฟสของออสเทนไนต์เดี่ยว ตรงกันข้ามกับสิ่งนี้ บริเวณกระทบร้อน (HAZ) ประกอบด้วยพื้นที่สองแห่งที่แตกต่างกัน บริเวณส่วนที่ละลาย (solution part) ได้รับความร้อนถึง 1000⁰ C หรือ มากกว่านี้ และบริเวณส่วนที่คาร์ไบด์ตกผลึก (carbide crystallized) ได้รับความร้อน 500⁰ C ถึง 800⁰ C ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก A คือ บริเวณคาร์ไบด์ตกผลึก B คือ บริเวณอบละลาย[11]



รูปที่ 2.9 แสดงการกระจายตัวของโครเมียมที่กระจุกตัวใกล้กับขอบเกรน [11]

ความสามารถในการละลายตัวของคาร์บอนในโลหะขึ้นงานจะลดลงอย่างมากที่อุณหภูมิต่ำกว่า 900°C โลหะขึ้นงานซึ่งถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วในกระบวนการการละลายตัวของแข็งจะมีคาร์บอนอยู่ในสถานะของแข็งที่ไม่คงตัว (unstable) ในขอบเขตที่ได้รับความร้อนที่ $500 - 600^{\circ}\text{C}$ โดยความร้อนจากการเชื่อม (บริเวณคาร์ไบด์ตกผลึก ในรูปที่ 2.9 คาร์บอนจะผสมกับโครเมียมซึ่งมีความเกี่ยวข้องกันมากและโครเมียมคาร์ไบด์จะตกผลึกคงตัวในขอบเกรนออสเทนไนท์) การที่โครเมียมคาร์ไบด์ตกผลึกตามขอบเกรนก็ทำให้ปริมาณโครเมียมลดลงรอบ ๆ ขอบเกรน ขึ้นที่มีโครเมียมต่ำตามขอบเกรนนี้ก็จะจะเป็นเหตุให้เกิดการกัดกร่อนและปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่ารอยเชื่อมเสื่อมลง การขยายตัวของการกัดกร่อนตามเกรนเป็นผลมาจากปริมาณคาร์บอน และยังได้รับอิทธิพลมาจากอุณหภูมิการให้ความร้อนกับเวลาในการให้ความร้อน และการกัดกร่อนตามเกรนจะเกิดขึ้นในระยะเวลาสั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีอุณหภูมิประมาณ 700°C

ในบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ของโลหะขึ้นงาน มีพื้นที่กว้างที่จะเกิดการกัดกร่อนตามเกรน เมื่อความร้อนเข้าของการเชื่อมเพิ่มขึ้น ซึ่งก็หมายความว่าความร้อนเข้าจากการเชื่อมมีปริมาณมาก ก็จะทำความต้านทานการกัดกร่อนตามเกรนของบริเวณกระทบร้อนน้อยลงอย่างมาก ในการเชื่อมแบบหลายชั้นเชื่อมของขึ้นงานที่หนาบริเวณ HAZ ก็จะได้รับความร้อนซ้ำ ๆ กันตลอด และจากที่กล่าวถึงข้างต้น กรณีของการเชื่อมชั้นเชื่อมเดียว ความร้อนเข้าไม่สามารถทำให้มีอิทธิพลต่อความต้านทานการกัดกร่อนของกรรมวิธีการเชื่อมนี้ [12]

2.7 การพาของโลหะหลอมเหลวในแอ่งรอยเชื่อม

โดยทั่วไปแล้ว ลักษณะการหลอมลึกลงของแนวเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกจะต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติกและมาร์เทนซิติก เนื่องจากความสามารถในการนำความร้อนของกลุ่มออสเทนนิติกจะต่ำ และความหนืดของโลหะหลอมเหลว นอกจากนี้ยังมีปัจจัยทางความร้อนอื่น ๆ ที่มีผลต่อการหลอมลึกลงของแนวเชื่อมเกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม (autogenous welding) หรือการเชื่อมในแนวแรกของรอยต่อที่ต้องมีการเชื่อมหลาย ๆ แนวเชื่อม ปัจจัยที่มีผลต่อการหลอมลึกลงของแนวเชื่อมได้เคยมีการให้ข้อสังเกตว่าเป็นผลมาจากแรงตึงผิวของโลหะหลอมเหลวในบริเวณแอ่งรอยเชื่อม [13]

ในแอ่งรอยเชื่อม (Weld pool) ของชิ้นงานขณะที่ทำการเชื่อม จะเกิดการพาของโลหะหลอมเหลวในแอ่งรอยเชื่อม (Weld pool convection) ขึ้นเสมอ การพาของโลหะหลอมเหลวนั้นเป็นปรากฏการณ์ของการไหลของโลหะเหลว (Fluid flow) ในแอ่งรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นจากการอาร์ค จะส่งผลโดยตรงต่อลักษณะรูปร่างและขนาดของแนวเชื่อมที่จะได้รับ และยังเกี่ยวข้องกับการเกิดข้อบกพร่องหลายชนิดในแนวเชื่อมอีกด้วย ทิศทางการไหลของโลหะเหลวมีอิทธิพลต่อการพาความร้อนในแอ่งรอยเชื่อม เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับทิศทางและความเร็วในการเคลื่อนที่ของโลหะหลอมเหลว ประเภทของการพาของโลหะหลอมเหลวนั้น สามารถจำแนกได้ตามแหล่งกำเนิดที่สำคัญ 3 ประการดังนี้ [13]

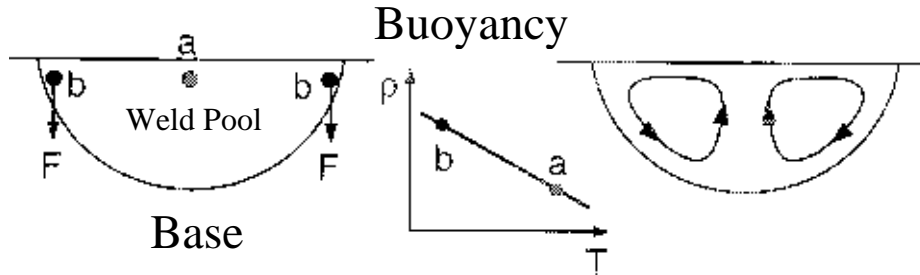
1. แรงลอยตัว (Buoyancy Force ; B)
2. แรงอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็ก (Electromagnetic Force ; E)
3. แรงตึงผิว (Surface Tension Driven Flow ; M)

การเชื่อมในสภาวะปกติแรงที่เกิดจากแรงตึงผิวจะมีอิทธิพลต่อลักษณะของแนวเชื่อมมากที่สุด ส่วนแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก และแรงลอยตัว จะมีอิทธิพลต่อลักษณะของแนวเชื่อมน้อยลงตามลำดับ ($M > E > B$) [14]

2.7.1 แรงลอยตัว (Buoyancy Force)

ธรรมชาติของโลหะจะมีความหนาแน่น (Density) ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.8 จะพบว่าบริเวณจุดกึ่งกลางของแนวเชื่อม (บริเวณใต้การอาร์คหรือจุด a) มีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณขอบของแนวเชื่อม (จุด b) ดังนั้นโลหะหลอมเหลว ที่อยู่บริเวณจุดกึ่งกลางแนวเชื่อมจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าบริเวณขอบแนวเชื่อม ส่งผลให้โลหะหลอมเหลว บริเวณขอบแนวเชื่อมซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าจมลงสู่ด้านล่างโดยแรงโน้มถ่วง ทำให้ลักษณะการพาของโลหะ

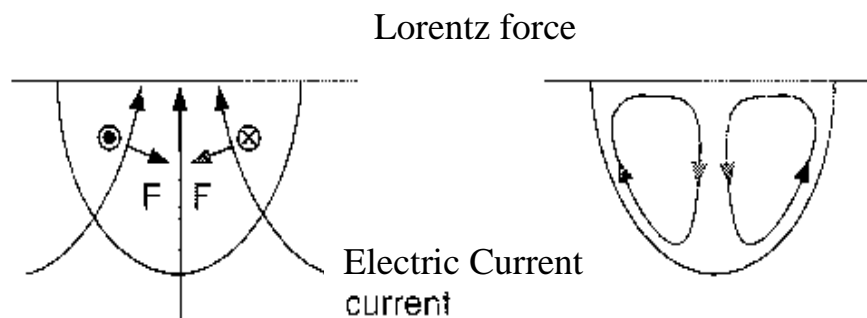
หลอมเหลวไหลเวียนออกจากจุดศูนย์กลางของแนวเชื่อมไปยังขอบแนวเชื่อม ปรากฏการณ์ลักษณะนี้ จะส่งผลทำให้ลักษณะของแนวเชื่อมกว้างและตื้น



รูปที่ 2.10 การพาของโลหะหลอมเหลวจากแรงลอยตัว [14]

2.7.2 แรงอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Force)

ในกรณีของการเชื่อมด้วยไฟฟ้ากระแสตรงต่ออิเล็กโทรดเป็นขั้วลบ จะมีการไหลของกระแสไฟฟ้าจากชิ้นงานซึ่งเป็นขั้วบวกไปสู่ทั้งสแตนอิเล็กโทรดที่เป็นขั้วลบ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.9 จะพบว่ามีความแรงอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic force) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งคือ Lorentz เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อม โดยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กจะผลักโลหะหลอมเหลว ให้มีการหมุนวนลงด้านล่าง ดังนั้นโลหะหลอมเหลวบริเวณผิวหน้าจะหมุนลงด้านล่างที่บริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อม ปรากฏการณ์ลักษณะนี้จะส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีลักษณะแคบและการหลอมลึกสูง การเพิ่มกระแสเชื่อมให้สูงขึ้นถึงระดับ 250 แอมแปร์ จะทำให้แรงที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการหมุนวนของโลหะหลอมเหลวมากขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มการหลอมลึกของงานเชื่อม โดยการเพิ่มกลไกการพาที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจำเป็นต้องใช้กระแสการเชื่อมที่สูง ดังนั้นจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพงานเชื่อมได้ จึงเป็นสิ่งที่ควรหลีกเลี่ยงในทางปฏิบัติ

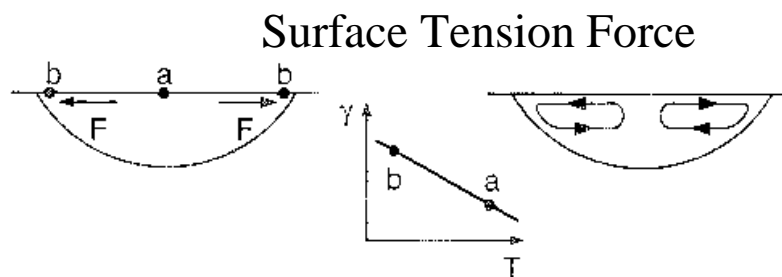


รูปที่ 2.11 การพาของโลหะหลอมเหลวจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า [14]

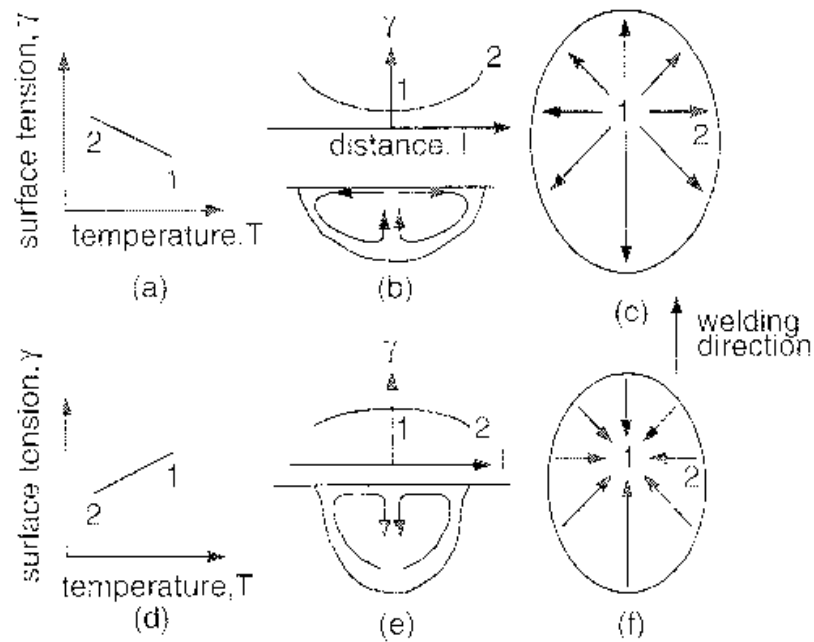
2.7.3 แรงอันเนื่องมาจากแรงตึงผิว (Surface Tension Driven Flow)

แรงอันเนื่องมาจากแรงตึงผิว (Surface Tension Driven Flow) ของโลหะหลอมเหลวหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Marangoni Convection หรือ Thermocapillary Convection ปรากฏการณ์แรงอันเนื่องมาจากแรงตึงผิวจะเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของแอ่งรอยเชื่อม แรงอันเนื่องมาจากแรงตึงผิวของโลหะหลอมเหลว มีบทบาทสำคัญต่อการไหลของโลหะหลอมเหลวในการเชื่อม เนื่องจากแรงตึงผิวจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งโดยมากในโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสมแรงตึงผิวจะลดลงเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อพิจารณาในแนวเชื่อมจะพบว่าบริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อมซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่ใต้การอาร์คจะมีอุณหภูมิสูงและแรงตึงผิวต่ำ ในขณะที่บริเวณขอบแนวเชื่อมด้านนอกมีอุณหภูมิต่ำกว่าและมีแรงตึงผิวสูง จึงทำให้ลักษณะการไหลของโลหะหลอมเหลวไหลเวียนออกจากจุดศูนย์กลางของแนวเชื่อมไปยังขอบแนวเชื่อม หมายความว่าสัมประสิทธิ์ของแรงตึงผิวจะมีค่าเป็นลบ ($\frac{dy}{dT} < 0$; M-) ปรากฏการณ์ลักษณะนี้จะทำให้ความร้อนถูกถ่ายเทไปยังขอบของแนวเชื่อม ดังรูปที่ 2.11 ส่งผลทำให้ลักษณะของแนวเชื่อมกว้างและตื้นคล้ายกันกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากแรงลอยตัว [12]

ทิศทางไหลของโลหะหลอมเหลว สามารถเปลี่ยนแปลงได้ จากการศึกษา [13 , 14] พบว่าในเหล็กที่มีปริมาณกำมะถันผสมอยู่สูง หรือการที่มีปริมาณของสารบางอย่างผสมอยู่จะมีลักษณะการไหลของโลหะหลอมเหลว จากบริเวณขอบแนวเชื่อมเข้าสู่กึ่งกลางแนวเชื่อมและหมุนวนลงสู่ด้านล่าง หมายความว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงตึงผิวจะมีค่าเป็นบวก ($\frac{dy}{dT} > 0$; M+) ทำให้แนวเชื่อมมีลักษณะการหลอมลึกที่มากขึ้น ดังรูปที่ 2.12 C และ D



รูปที่ 2.12 การพาของโลหะหลอมเหลวจากแรงอันเนื่องมาจากความตึงผิว [14]



รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงทิศทางการพาของโลหะหลอมเหลว [14]

2.8 การแข็งตัวของโครงสร้างผลึกของแนวเชื่อม

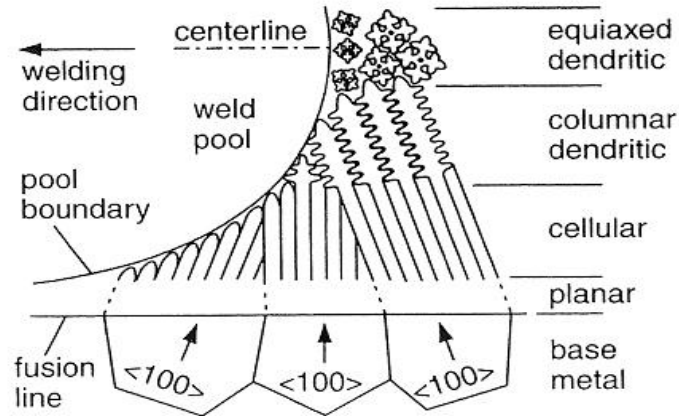
2.8.1 การเกิดเกรนลักษณะ Epitaxial growth ที่ขอบของแอ่งรอยเชื่อม

ในกรณีของการเชื่อมแบบหลอมละลาย เกรนของโลหะฐาน (Base metal) จะทำหน้าที่เหมือนกับฐานรองรับ (Substrate) สำหรับการเกิด nucleation ของโลหะขณะที่มีการแข็งตัวจากสภาพหลอมเหลว ดังนั้นโลหะหลอมเหลวในแอ่งรอยเชื่อมจะสัมผัสติดกับฐานรองรับและเกิดเป็นเกรนโลหะในลำดับต่อมา

ในกรณีการเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม (Autogenous welding) จะเกิด nucleation โดยการจัดเรียงตัวของอะตอมจากฐานรองรับ โดยไม่มีการเปลี่ยนทิศทางการเรียงตัวของผลึกที่เติบโต เรียกว่าการเติบโตแบบ Epitaxial growth หรือ Epitaxial nucleation โดยมี การเติบโตในทิศทาง $\langle 100 \rangle$ สำหรับโลหะที่มีโครงสร้างเป็นแบบ FCC หรือ BCC [13] และได้แสดงลักษณะการเติบโตของเกรนไว้ในรูปที่ 2.14

ในกรณีการเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อมหรือการเชื่อมโลหะต่างกันสองชนิด ส่วนผสมของโลหะเชื่อมจะต่างจากส่วนผสมของโลหะฐาน และโครงสร้างผลึกของโลหะเชื่อมก็จะต่างจากโครงสร้างผลึก

ของโลหะฐานเช่นกัน เมื่อเป็นเช่นนี้ก็จะไม่มีการเกิดโครงสร้างลักษณะ Epitaxial growth ในการเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อมและจะเกิดเป็นเกรนใหม่ที่ขอบของแอ่งรอยเชื่อม (Fusion boundary)



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะเติบโตของเกรนของโลหะเชื่อม [13]

2.8.2 การเกิดเกรนลักษณะ Competitive growth ที่ขอบของแอ่งรอยเชื่อม

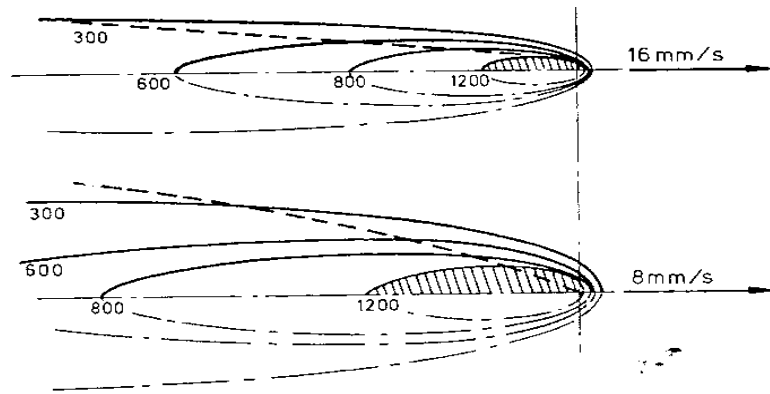
ในการเชื่อมโดยปกติ โครงสร้างผลึกจะเกิดในลักษณะ Epitaxial growth ที่ขอบของแอ่งรอยเชื่อมในกรณีที่โลหะเชื่อมและโลหะฐานมีโครงสร้างผลึกที่เหมือนกัน หรือเกิดเกรนใหม่เมื่อโลหะที่เชื่อมทั้งสองชั้นนั้นมีโครงสร้างผลึกที่ไม่เหมือนกัน อย่างไรก็ตามในบริเวณถัดเข้ามาจากขอบของแอ่งรอยเชื่อมจะมีกลไกในการเกิดเกรนที่ต่างออกไป เรียกว่า การเกิดเกรนลักษณะ Competitive growth

ระหว่างที่มีการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว เกรนที่แข็งตัวจะพยายามแข็งตัวและเติบโตในทิศทางที่ตั้งฉากกับแอ่งรอยเชื่อม เนื่องจากเป็นทิศทางที่มีค่า Temperature gradient และการนำความร้อนสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามเกรนของผลึกโลหะจะพยายามเติบโตในทิศทางที่เติบโตได้ง่ายที่สุด ซึ่งก็คือ การเติบโตในทิศทางที่ตั้งฉากกับแอ่งรอยเชื่อม

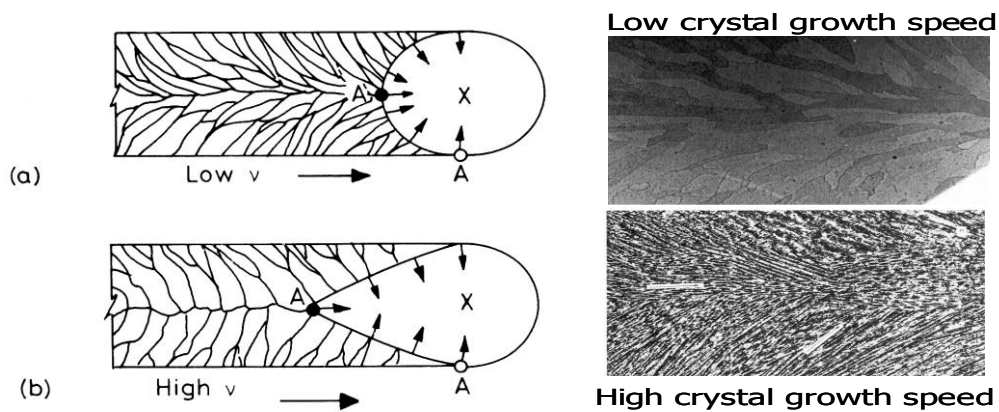
2.9 อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อม

ความเร็วในการเดินลวดเชื่อมจะมีผลต่อลักษณะรูปร่างของวงจระแสดความร้อน ก็จะส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อมด้วย กล่าวคือจะทำให้แนวเชื่อมเล็กหรือใหญ่ตามต้องการ การที่ได้แนวเชื่อมที่มีขนาดต่างกันการหลอมละลายของงานเชื่อมก็จะต่างกันออกไป ถ้าเพิ่มความเร็วในการเชื่อม จะมีผลดังนี้ 1) ทำให้รูปร่างของวงจระแสดพลังงานความร้อนต่อความยาวของแนวเชื่อมลดลง 2) การหลอม

ละลายของงานเชื่อมจะลดลง 3) การตื่นเปิดองลวดเชื่อม ฟลักซ์ ต่อความยาวแนวเชื่อมลดลง ดังนั้น จึงทำให้ความสามารถในการรับภาระของแนวเชื่อมลดลงไปด้วย



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะการแผ่กระจายของวงจความร้อนเมื่อความเร็วในการเชื่อมต่างกัน[13]



รูปที่ 2.16 แสดงการเกิดโครงสร้างของรอยเชื่อมกรณีใช้ความเร็วต่างกัน[13]

การใช้ความเร็วสูงหรือความเร็วต่ำในการเชื่อมจะส่งผลโดยตรงต่อลักษณะของการเกิดโครงสร้างของ รอยเชื่อม กล่าวคือถ้าเป็นการเชื่อมด้วยความเร็วสูง ๆ รอยเชื่อมจะเกิดโครงสร้าง Columnar Dendrite ที่เล็กและละเอียด ซึ่งจะส่งผลดีต่อสมบัติทางกลของรอยเชื่อม แต่ถ้าเชื่อมด้วยความเร็วต่ำ ๆ ในเวลาที่เท่ากันโลหะงานจะได้รับความร้อนเข้ามามากกว่า และเย็นตัวช้ากว่าก็จะเกิดการตกผลึกของ โครเมียมคาร์ไบด์เกิดขึ้นได้ และโครงสร้างของ Columnar Dendrite ที่ได้จะหยาบกว่าซึ่งไม่ส่งผลดี ต่อสมบัติทางกลเลย [13]

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

T. W. NELSON, J. C. LIPPOLD AND M. J. MILLS (1999) [1] ได้ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างจุลภาค(Microstructure) ในบริเวณของการหลอมละลาย (Fusion boundary) จากการเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน(Dissimilar welds) ระหว่าง เหล็กกล้าสเตนเลสเฟอร์ริติก และ เหล็กกล้าสเตนเลสออสเทนนิติก ด้วยลวดเชื่อม 70Ni-30Cu (AWS A5.14 ERNiCu-7) หลักสำคัญในการศึกษาคือ ต้องเข้าใจธรรมชาติ และปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในบริเวณที่เกิดการหลอมละลาย จนกระทั่งมีการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลวเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกหรือเกิดกระบวนการแข็งตัวของโลหะ (Solidification) ได้หลายรูปแบบ หลักการพื้นฐานคือ คุณสมบัติเฉพาะหรือคุณสมบัติของธาตุผสมที่แตกต่างกัน จะส่งผลต่อความสามารถทางด้านการเชื่อมและความสามารถในการหลอมละลายต่างกัน ด้วย นอกจากนี้ปรากฏการณ์ดังกล่าวยังส่งผลกระทบต่อบริเวณข้างเคียง คือบริเวณกรทปร้อน(Heat Affected Zone) ซึ่งจากการศึกษารูปได้ว่า โครงสร้างผลึกที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิออสเทนเนติก (Austenitic temperature) ซึ่งเกิดโครงสร้างผลึกแบบ γ -FCC จะเป็นโครงสร้างเบื้องต้นของการเปลี่ยนแปลงเป็นโครงสร้างอย่างอื่น เนื่องจากผลของอุณหภูมิ อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่บริเวณหลอมละลายสามารถมีผลกระทบต่อลักษณะของเกรน(Grain)ที่บริเวณได้รับผลกระทบจากความร้อน(HAZ)ได้

J.A. BROOKS และ F.J. LAMBERT ,JR [12] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ และปริมาณเคลต้า-เฟอร์ไรท์ ต่อการเกิดรอยแตกร้าวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 309 พบว่า เมื่อปริมาณซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดรอยแตกร้าวมากขึ้น และเมื่อปริมาณเคลต้า-เฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้นทำให้การเกิดรอยแตกร้าวลดลง เมื่อปริมาณผลรวมของซัลเฟอร์กับฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น 0.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะต้องเพิ่มปริมาณเคลต้า-เฟอร์ไรท์ขึ้นประมาณ 4 FN เพื่อป้องกันการเกิดรอยแตกร้าวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก องค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเคลต้า-เฟอร์ไรท์ ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก คือ ธาตุส่วนผสมทางเคมี การเปลี่ยนโครงสร้างของเฟอร์ไรท์ ลักษณะของเฟอร์ไรท์ และอัตราการเย็นตัวของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

S.A.DAVID [13] ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของเคลต้า-เฟอร์ไรท์และการเปลี่ยนแปลงปริมาณเคลต้า-เฟอร์ไรท์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก พบว่า ลักษณะของเคลต้า-เฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิดคือ 1) Vermicular Morphology พบในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่เกิดเป็นโครงสร้างคูเพิลลิกซ์ 2) Lathy Morphology พบในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่เกิดเป็นโครงสร้างคูเพิลลิกซ์ 3) Acicular Morphology เคลต้า-เฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะ

คล้ายกับเข็มนมีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ 4) Globular Morphology เคลลต้า-เฟอร์ไรท์ชนิดนี้ไม่ได้เกิดจากการแข็งตัวของเนื้อโลหะรอยเชื่อม แต่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเคลลต้า-เฟอร์ไรท์เมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อน มีค่าเฉลี่ยของปริมาณเฟอร์ไรท์นัมเบอร์เท่ากับ 10

M.ONSOIEN และคณะ [14] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของแก๊สไฮโดรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนสำหรับการเชื่อม GMAW ต่อลักษณะรอยเชื่อม (Bead Morphology) และคุณลักษณะของการอาร์ค (Arc Characteristic) โดยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไฮโดรเจน 1, 2,3 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่า เมื่อปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นทำให้สัถยการอาร์คและความต้านทานอาร์คเพิ่มขึ้น เนื่องจากแก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไฮโดรเจนมีประจุไฟฟ้า (Charge Carrier) น้อยกว่าแก๊สปกคลุมอาร์กอนบริสุทธิ์ และแก๊สไฮโดรเจนมีค่า Thermal Conductivity มากกว่าแก๊สอาร์กอน ทำให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ Arc Column มีขนาดเล็กลง นอกจากนี้เมื่อปริมาณแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนมีปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราส่วนของความกว้างต่อรอยซึมลึกของรอยเชื่อมมีค่าลดลง

R.K. OKAGAWA , R.D.DIXON และ D.L. OLSON [15] ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของไนโตรเจนที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304L โดยใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจน มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สไนโตรเจน 0 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่า เมื่อใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนบริสุทธิ์ ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมจะเท่ากับโลหะพื้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนทำให้ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการลดปริมาณเคลลต้าเฟอร์ไรท์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อม จึงสรุปว่า แก๊สปกคลุมอาร์กอนที่ผสมแก๊สไนโตรเจน 0 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของเนื้อโลหะรอยเชื่อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะการกระจายตัวและปริมาณของเคลลต้าเฟอร์ไรท์

T. OGAWA, K.SUAUKI และ T.ZAIZEN [16] ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนผสมต่อการเกิดโพรง รอยร้าว (Cracking) และสมบัติการคืบ (Creep Properties) โดยการใช้อแก๊สปกคลุมอาร์กอนบริสุทธิ์ และแก๊สอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจน พบว่า เมื่อปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นก่อให้เกิดปัญหาคือ 1) เกิดโพรงเพิ่มขึ้น 2) เกิดรอยแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking) เพิ่มมากขึ้น จากการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจน 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าเนื้อโลหะรอยเชื่อมมีโพรงเกิดขึ้น และเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะ

รอยเชื่อม ซึ่งปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดแตกร้าวของรอยเชื่อม ในกรณีที่เนื้อโลหะรอยเชื่อมมีโครงสร้างอสเตนไนท์ทั้งหมด เนื่องจากไนโตรเจนทำให้ขนาดเกรนอสเตนไนท์เล็กลง

V.P. KUJANPAA, L.P. KARJALANEN และ A.V. SIVANEN [17] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของแก๊สปกคลุมต่อการเกิดรอยบกพร่อง (Discontinuity) ของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเตนนิติก เกรด 316 ใช้แก๊สปกคลุมด้านบนเป็นแก๊สผสมระหว่างแก๊สอาร์กอนกับแก๊สไฮโดรเจน แก๊สฮีเลียมกับแก๊สอาร์กอน แก๊สอาร์กอนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์ ตามลำดับ อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที แก๊สปกคลุมด้านหลัง (Trail Shielding) อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที ส่วนแก๊สปกคลุมด้านล่าง (Root Shielding) ใช้แก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์และแก๊สไนโตรเจนผสมแก๊สไฮโดรเจน อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที พบว่า รอยบกพร่องที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะรอยเชื่อมมี 3 ชนิด คือ รอยแตก โพรงตรงกลาง (Center cavity) และรอยกินลึก (Undercut) แต่ไม่เกิดรูพรุนขึ้นภายในเนื้อโลหะรอยเชื่อม ปริมาณรอยบกพร่องเหล่านี้สามารถทำให้ลดลงโดยใช้แก๊สปกคลุมด้านบนเป็นแก๊สผสมระหว่างแก๊สอาร์กอนกับแก๊สไฮโดรเจน หรือแก๊สฮีเลียมกับแก๊สอาร์กอน เนื่องจากแก๊สผสมทั้งสองชนิดนี้ทำให้การเชื่อมได้รอยเชื่อมที่ซึมลึกสมบูรณ์ ด้วยระดับกระแสไฟฟ้าเชื่อมลดลง ซึ่งส่งผลต่อการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรอยเชื่อม

V.P.KUJANPAA [18] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเกิดรอยบกพร่องในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมอสเตนนิติก เกรด 316 หนา 2 มม. เมื่อใช้ตัวแปรในการเชื่อมที่แตกต่างกันโดยในการศึกษามุ่งเน้นการพิจารณาปริมาณและขนาดของรอยบกพร่องที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงกระแสเชื่อม และความเร็วเชื่อม ใช้วิธีการเชื่อม GTAW โดยไม่ใช้ลวดเชื่อม เชื่อมในท่าราบ รอยต่อชิ้นงานเป็นแบบต่อชน จากการศึกษาพบว่า รอยบกพร่องที่เกิดขึ้นมี 6 ชนิด คือ รอยแตก โพรงตรงกลาง (Cracked Center Cavities) Ripple Cavities รอยกินลึก (Undercut) และ Humps การแบ่งประเภท กำหนดได้จากตำแหน่งการเกิดรอยบกพร่อง ขนาดและรูปร่างของรอยบกพร่อง การเชื่อมที่ใช้กระแสเชื่อมสูง ทำให้ปริมาตรบ่อน้ำโลหะ (Weld Pool) มีขนาดเพิ่มมากขึ้น โอกาสที่เกิดการหดตัว (Shrinkage) เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการเกิดรอยแตกและโพรงตรงกลาง สำหรับการเชื่อมที่ความเร็วเชื่อมต่ำ ทำให้ลักษณะของบ่อหลอมละลายเปลี่ยนรูปทรงจากรูปไข่ (Ellipse) เป็นรูปร่างค่อนข้างกลม (Drop-Shapes) ทำให้เกิดการแยกตัว (Segregation) ของสารเจือปนได้มาก ส่งผลต่อการเกิดรอยแตกร้าวในเนื้อโลหะรอยเชื่อม ดังนั้นสรุปได้ว่า การเพิ่มระดับกระแสเชื่อมไม่มีผลต่อการเปลี่ยนชนิดรอยบกพร่อง แต่ทำให้รอยบกพร่องมีขนาดและปริมาณเพิ่มขึ้น สำหรับความเร็วเชื่อมมีผลต่อการเกิดลักษณะรอยบกพร่องดังนี้คือ รอยแตกและ Ripple Cavities เกิดขึ้นเมื่อใช้ความเร็วเชื่อมต่ำ ในขณะที่ โพรงตรงกลาง รอยกินลึก และ Humps เกิดขึ้นเมื่อใช้ความเร็วเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น

G.M.GOODWIN [19] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของปริมาณความร้อนในระหว่างเชื่อมและกระบวนการเชื่อมต่อการเกิดรอยร้าวในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ใช้วิธีการเชื่อม GTAW เปลี่ยนแปลงความเร็วเชื่อมและกระแสไฟฟ้าเชื่อม เพื่อให้ได้รอยเชื่อมลึกที่สมบูรณ์เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316 พบว่า เมื่อใช้ความเร็วเชื่อมลดลงและกระแสไฟฟ้าเชื่อมเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้น จึงสรุปว่า อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมGTAW เมื่อกำหนดให้ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมคงที่ รอยแตกร้าวจะเกิดขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของบ่อน้ำโลหะ และการกระจายของความเค้น (Stress Distribution) ที่ด้านหลังของบ่อน้ำโลหะ และเมื่อเพิ่มปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมสูงขึ้น ทำให้เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน

Limmanivichitr และ Kou [20] พบว่า หากเติมสารที่ส่งผลต่อสมบัติของผิวโลหะหลอมเหลว (Surface Active Agent) ลงไปในแอ่งหลอมเหลวจะมีผลต่อแรงตึงผิวของโลหะหลอมเหลว โดยทำให้บริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อมซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่ใต้การอาร์คจะมีแรงตึงผิวสูงที่สุด ในขณะที่บริเวณขอบแนวเชื่อมด้านนอกมีแรงตึงผิวต่ำ จึงทำให้ลักษณะการไหลของโลหะหลอมเหลวไหลเวียนจากขอบแนวเชื่อมไปยังจุดศูนย์กลางของแนวเชื่อม จากหลักการและลักษณะการไหลของโลหะหลอมเหลว โดยอิทธิพลแรงอันเนื่องมาจากความตึงผิว จึงเป็นแนวความคิดให้นักวิจัยคิดค้นหาวิธีที่จะเพิ่มสารที่ส่งผลต่อสมบัติของผิวโลหะหลอมเหลว บริเวณการเชื่อมเพื่อที่จะทำให้ทิศทางการไหลของโลหะหลอมเหลวนั้นหมุนวนเข้าสู่กลางแนวเชื่อม วิธีการดังกล่าวนี้จึงนำไปสู่การคิดค้นและพัฒนาฟลักซ์สำหรับการเชื่อมแบบก๊าวทังสแตนอาร์ค เพื่อช่วยให้ระดับการหลอมลึกเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมตามปกติ

F.C.HULL [21] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของปริมาณเคลด้า-เฟอร์ไรท์ ที่มีผลต่อการเกิดรอยแตกร้าวขณะร้อนเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก พบว่า ปริมาณเคลด้า-เฟอร์ไรท์ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 5 หรือ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดรอยแตกร้าวขณะร้อนให้สูงขึ้น เนื่องจากซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสละลายได้ดีในโครงสร้างเฟอร์ไรท์ และ เคลด้า-เฟอร์ไรท์ช่วยเพิ่มสมบัติความแข็งแรง (Strength) ในขณะที่ความแกร่ง (Toughness) และการยืดตัว (Ductility) ลดลงไม่มากนัก ตลอดจนช่วยลดปัญหาการกัดกร่อนของเนื้อโลหะรอยเชื่อมด้วย เมื่อปริมาณเคลด้า-เฟอร์ไรท์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรทำให้เกิดโครงสร้างดาข่ายของเคลด้า-เฟอร์ไรท์และเกิดการกัดกร่อนในบริเวณตามแนวขอบดาข่ายระหว่างรอยต่อของเคลด้า-เฟอร์ไรท์กับออสเทนไนท์ และเมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิประมาณ 600 หรือ 900 องศาเซลเซียส พบว่าเคลด้า-เฟอร์ไรท์ สามารถเปลี่ยนเป็นซิกม่า (Sigma-Phase) ได้ ซึ่งมีสมบัติเปราะ ทำให้มีโอกาสเกิดรอยแตกร้าวได้มากยิ่งขึ้น

E.J. BARNHOUS and J.C. LIPPOLD (1998) [22] ได้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาค และคุณสมบัติทางกลด้านความเหนียว (Toughness) และความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) ของการเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน (Dissimilar welds) ระหว่างเหล็กกล้าสแตนเลสดูเพล็กซ์ (Duplex Stainless Steel : Alloy 2205) กับเหล็กกล้าคาร์บอน (Plain Carbon structural steel : A 36) ด้วยการใช้อัดเชื่อม Duplex Stainless Steel Filler Metal ER 2209 และลวดเชื่อม Ni-Based Alloy 625 Filler Metal โดยใช้กระบวนการเชื่อม Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) จากการเชื่อมด้วยกระบวนการดังกล่าวพบว่าเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงใน โครงสร้างที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลด้านความเหนียวของเนื้อโลหะเชื่อม เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและลักษณะของเกรน เช่นการตกผลึกเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ตามแนวขอบเขตการหลอมละลาย (Fusion line) ในเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal) และบริเวณได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ)