

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาผลกระทบทางกระบวนการความร้อน ต่อ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เกรด UNS S31803 โดยผ่านกรรมวิธีการอบอ่อน ประกอบด้วย เนื้อหาที่สำคัญและเกี่ยวข้องในการวิจัยครั้งนี้ ดังนี้

- 2.1 ความหมายของเหล็กกล้าไร้สนิม
- 2.2 ประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม
- 2.3 ธาตุและการให้คุณสมบัติของธาตุที่ผสมลงในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม
- 2.4 การเลือกใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิม
- 2.5 เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์
- 2.6 กระบวนการเชื่อม Gas Tungsten Arc Welding
- 2.7 การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม
- 2.8 โลหะวิทยาในรอยเชื่อม
- 2.9 การทดสอบความแข็งของวัสดุ
- 2.10 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค
- 2.11 การอบอ่อน (Annealing)
- 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความหมายของเหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steels) หมายถึงเหล็กกล้าที่ผสมโครเมียมอย่างน้อย 10.5 % ทำให้มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อน โดยเหล็กกล้าไร้สนิมจะสร้างฟิล์มของโครเมียมออกไซด์ที่บางและแน่นที่ผิวเหล็กกล้า ซึ่งจะปกป้องเหล็กกล้าจากบรรยากาศภายนอก[3]

2.2 ประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิมสามารถแบ่งตามลักษณะ โครงสร้างจุลภาคได้เป็น 5 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

1. เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic grade)
2. เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic grade)
3. เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex grade)
4. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก (Martensitic grade)
5. เหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก (Precipitation-hardening grade)

2.2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic grade)

ที่ใช้กันมากจะผสมโครเมียม (Cr) ประมาณ 12% หรือ 17% (ช่วงของส่วนผสมของ Cr $\pm 1\%$) มีนิเกิลน้อยมาก (ติดมากับวัตถุดิบ) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้จะมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์และมีคุณสมบัติที่แม่เหล็กสามารถดูดติดได้ มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength) และค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ปานกลาง มีค่าความยืด (Elongation) สูง เช่น เกรด 430, 409 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเฟอร์ริติกมีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มออสเทนนิติก แต่อาจพบปัญหาเรื่องเกรนหยาบ (Grain coarsening) และสูญเสียความแกร่ง (Toughness) หลังการเชื่อม การใช้งาน เช่น ชิ้นส่วนเครื่องซักผ้า ชิ้นส่วนระบบท่อไอเสีย และบางเกรดจะผสมโครเมียมสูงเพื่อต้องการใช้กับงานที่ทนอุณหภูมิสูง

2.2.2 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic grade)

เป็นเหล็กกล้าที่ใช้กันมากจะผสมโครเมียมประมาณ 17% (ช่วงของส่วนผสมของ Cr $\pm 1\%$) และนิเกิล (Ni) ประมาณ 9% (ช่วงของส่วนผสมของ Ni $\pm 1\%$) การผสมนิเกิลทำให้เหล็กกลุ่มนี้ต่างจากกลุ่มเฟอร์ริติก โดยนิเกิลจะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนและทำให้โครงสร้างจุลภาคเป็นออสเทนไนต์ เหล็กกลุ่มนี้บางเกรดจะผสมโครเมียมและนิเกิลเพิ่มเพื่อให้สามารถทนต่อการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง ซึ่งทำให้สามารถใช้เป็นส่วนประกอบของเตาหลอม เหล็กกลุ่มออสเทนนิติกนี้จะทนทานต่อการกัดกร่อนดีกว่าเหล็กกลุ่มเฟอร์ริติกในด้านคุณสมบัติเชิงกลเหล็กกลุ่มออสเทนนิติกจะมีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength) ใกล้เคียงกับของกลุ่มเฟอร์ริติก แต่จะมีค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และค่าความยืด (Elongation) สูงกว่าจึงสามารถขึ้นรูปได้ดีมาก เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีคุณสมบัติที่แม่เหล็กไม่ดูดติด เช่น เกรด 304, 316L, 321, 301 การใช้งาน เช่น หม้อ ช้อน ถาด เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก จะผสมโครเมียมประมาณ 11.5-18% เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีคาร์บอนพอสมเหมาะและสามารถชุบแข็งได้ เหล็กกล้ากลุ่มนี้มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength) และความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) สูงมาก แต่จะมีค่าความยืด (Elongation) ต่ำ เช่น เกรด 420 การใช้งาน เช่น ใช้ทำเครื่องมือตัดชิ้นส่วน มีด

2.2.3 เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex Grade)

จะมีโครงสร้างและส่วนผสมระหว่างโครงสร้างออสเทนไนต์และเฟอร์ไรต์ มีโครเมียมผสมประมาณ 21-28% และนิเกิลประมาณ 3-7.5% เหล็กกล้ากลุ่มนี้จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่จุดครากสูงและค่าความยืดสูง จึงเรียกว่ามีทั้งความแข็งแรงและความเหนียว (Ductility) สูง เช่น เกรด 2204, 2205 และ 2507

2.2.4 กลุ่มมาร์เทนซิติค (Martensitic)

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้เป็นเหล็กกล้าที่แม่เหล็กดูดติด(magnetic) มีส่วนผสมของโครเมียม 12-14% และมีคาร์บอนผสมอยู่ปานกลาง มีโมลิบดีนัมเป็นส่วนผสมอยู่ประมาณ 0.2-1% และไม่มีนิกเกิล

2.2.5 เหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก (Precipitation-hardening Grade)

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้เป็นเหล็กกล้าที่มีโครเมียมผสมอยู่ประมาณ 15-18% และมีนิกเกิลผสมอยู่ประมาณ 3-8% เหล็กกล้ากลุ่มนี้สามารถทำการชุบแข็งได้ จึงเหมาะสำหรับทำแกน ปัม หัววาล์ว ตัวอย่างเกรดของเหล็กกลุ่มนี้ เช่น PH13-9Mo, AM-350 [3]

2.3 ธาตุและการให้คุณสมบัติของธาตุที่ผสมลงในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม

2.3.1 คาร์บอน (Carbon)

คาร์บอน (C) เป็นธาตุที่มีอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิมโดยทั่วไปจะไม่เกิน 0.15% (ยกเว้นเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติค) เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีคาร์บอนต่ำ จะเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน ตามขอบเกรน เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็น ตลอดจนเพิ่มความสามารถในการเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมคาร์บอนอยู่ 2 ช่วง คือ 0.02% ($\leq 0.03\%$) และ 0.07% (0.04-0.15%) นอกจากนี้การผสมไทเทเนียม ไปในเหล็กกล้าไร้สนิมจะช่วยให้จับตัวกับคาร์บอนและให้ผลดีต่อคุณสมบัติทั้งสามข้อที่กล่าวมาเหมือนเหล็กกล้าไร้สนิมคาร์บอน 0.02% เหล็กกล้าไร้สนิมในเกรดที่มีอักษร “L” กำกับจะควบคุมคาร์บอนไม่ให้เกิน 0.03% ทำให้สามารถเชื่อมได้ดี มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion) และความสามารถในการขึ้นรูปเย็นสูงกว่าเกรดที่มีคาร์บอนสูงกว่า

2.3.2 โครเมียม (Chromium)

โครเมียม (Cr) ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนในสภาพบรรยากาศทั่วไป โดยผสมอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างน้อย 10.5% แต่เนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมมีการกระจายของโครเมียมอย่างน้อย 10.5% อย่างสม่ำเสมอ เพราะว่า มีส่วนผสมของโครเมียมมากกว่าเล็กน้อย เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมโครเมียม อยู่ 2 ช่วง คือ 12% (10.5-14.0%) และ 17% (16.0-24.0%) ถ้าผสมโครเมียมเกินกว่า 30% จะทำให้เหล็กเปราะ

2.3.3 นิกเกิล (Nickel)

นิกเกิล (Ni) ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบมูมอับในสารละลายกรด เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็น ตลอดจนเพิ่มความสามารถในการเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมนิกเกิลอยู่ 2 ช่วง คือ 0% (ปริมาณเล็กน้อยติดมากับเหล็ก) และ 9% (6.0-15.0%)

2.3.4 โมลิบดีนัม (Molybdenum)

โมลิบดีนัม (Mo) ช่วยเสริมผลความต้านทานต่อการกัดกร่อนของโครเมียม โดยเฉพาะการกัดกร่อนแบบมูมอับ และช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนในสภาพคลอไรด์ด้วย เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมโมลิบดีนัมอยู่ 2 ช่วง คือ 0% (ปริมาณเล็กน้อยติดมากับเหล็ก) และ 2% (1.0-3.0%)

2.3.5 ไทเทเนียม (Ti)

ไทเทเนียม (Ti) ช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบขอบเกรน (Intergranular corrosion) โดยสารทั้งสองตัวจะช่วยป้องกันการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ นอกจากนี้ไทเทเนียม ยังเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็นและความสามารถในการเชื่อมด้วย [4]

2.4 การเลือกใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิม

คุณสมบัติด้านความต้านทานต่อการกัดกร่อน ความสามารถในการขึ้นรูป ความสามารถในการเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมอาจแบ่งเป็นระดับต่างๆ ได้ดังนี้ [4]

2.4.1 ความต้านทานต่อการกัดกร่อน

ปานกลาง	เช่น ใช้สัมผัสกับน้ำสะอาด บรรยากาศตามชนบท
ดี	เช่น น้ำตามอุตสาหกรรม บรรยากาศตามเมือง กรดอ่อนๆ
ดี	มาก เช่น น้ำทะเล บรรยากาศตามทะเล กรดสูง

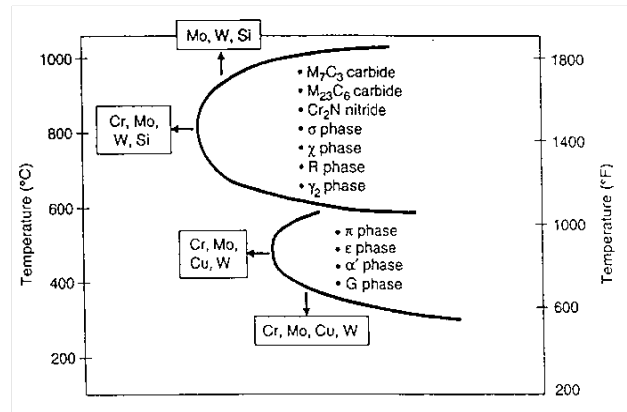
2.4.2 ความสามารถในการขึ้นรูป

ปานกลาง	ใช้กับงานทั่วไป
ดี	ยืดตัวได้สูง
ดีมาก	งานขึ้นรูปลึก (Deep drawing)

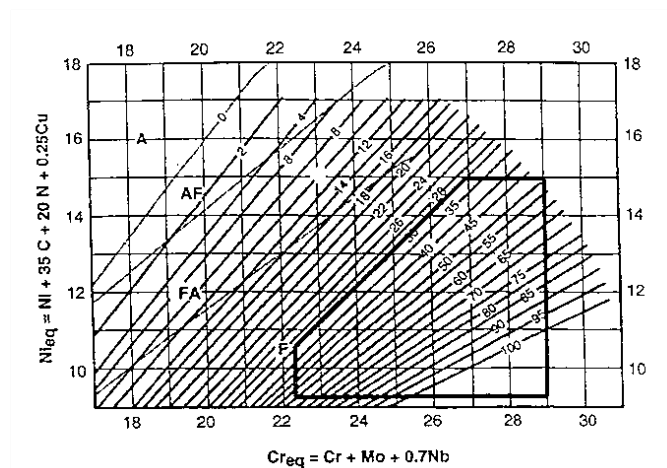
**ตารางที่ 2.1 (ต่อ) ตารางแสดงส่วนผสมทางเคมีและปริมาณสมมูลความต้านทานการกัดกร่อนแบบ
หลุมบ่อ (PRE) ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [5]**

เกรด UNS	ส่วนผสมทางเคมี (%ค่ามากที่สุด)										
	C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Mo	N	ธาตุ อื่นๆ	ช่วงค่า PRE(1)
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
S32760	0.03	1.00	0.01	0.03	1.00	24.0- 26.0	6.0-8.0	3.0-4.0	0.30	0.5-1.0Cu 0.5-1.0W	37.7-47.6
S32900	0.06	1.00	0.03	0.04	0.75	23.0- 28.0	2.5-5.0	1.0-2.0	ไม่ กำหนด	...	> 40
S32950	0.03	2.00	0.01	0.035	0.06	26.0- 29.0	3.5-5.2	1.0-2.5	0.15- 0.35	...	...
PRE(1)=(%Cr)+3.3(%Mo)+16(%N)											

ธาตุผสมหลักๆเหล่านี้ จะไปช่วยเพิ่มเสถียรภาพของโครงสร้างและคุณสมบัติทางกลบางอย่างของเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละเกรด ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละเกรดมีจุดเด่นที่ต่างกันออกไป เช่น ธาตุโครเมียมและโมลิบดีนัม จะทำให้เกิดโครงสร้างเฟอไรต์ ขณะที่ธาตุนิเกิล คาร์บอน และทองแดง ช่วยทำให้เกิดโครงสร้างออสเทนไนต์ และธาตุผสมต่าง ๆ เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ยังมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการตกผลึกของธาตุผสมดังแสดงในรูปที่ 2.1 และในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เพื่อให้ได้ปริมาณโครงสร้างจุลภาคของโลหะฐานและเนื้อโลหะเชื่อมที่สมดุลจะสามารถใช้ แผนภูมิ WRC-1992 ทำนายปริมาณโครงสร้างเฟอไรต์ ในเนื้อโลหะเชื่อมได้ และเพื่อนำมาพัฒนาเป็นส่วนผสมทางเคมีของโลหะฐานให้เกิดความเหมาะสมยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2



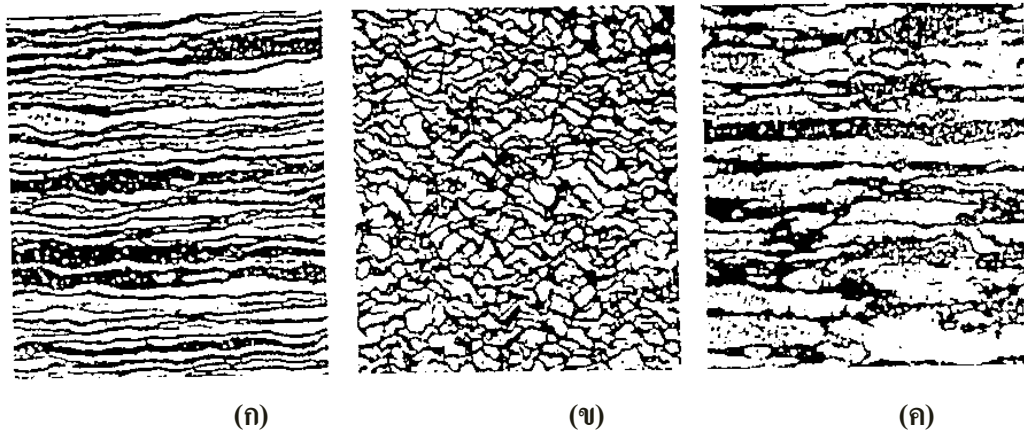
รูปที่ 2.1 ไคอะแกรมการเปลี่ยนแปลงเวลา-อุณหภูมิ (TTT-Diagram) ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการตกผลึกของธาตุผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์[5]



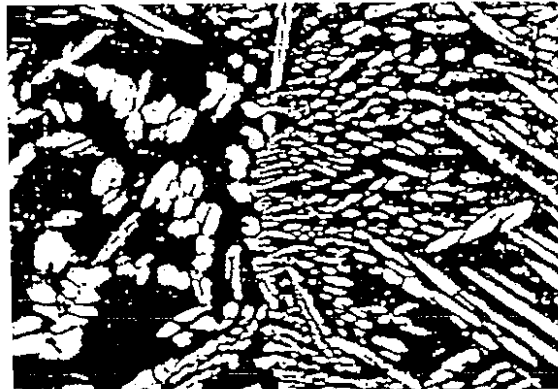
รูปที่ 2.2 แผนภูมิ WRC-1992 สำหรับทำนายปริมาณเฟอร์ไรต์ในเหล็กกล้าไร้สนิม[5]

2.5.1 โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

2.5.1.1 โครงสร้างจุลภาค เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ออกแบบให้มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ 50% และออสเทนไนต์ 50% โดยประมาณ มีพื้นที่เป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์และออสเทนไนต์ที่มีลักษณะเป็นก้อนเกาะติดกัน ซึ่งลักษณะรูปร่างและทิศทางของโครงสร้างจุลภาคจะแตกต่างกันออกไปตามภาคตัดขวางของแนวรีดและกรรมวิธีการผลิตโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4



รูปที่ 2.3 ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรด Alloy 2205 โดยทำการกัดผิวด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ (ก) ลักษณะโครงสร้างในทิศทางขนานกับแนวรีด (ข) ลักษณะโครงสร้างในทิศทางขวางกับแนวรีด (ค) ลักษณะโครงสร้างในทิศทางขนานกับแนวรีด ซึ่งถ่ายโดยกำลังขยายสูงกว่ารูป (ก) [5]



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อดูเพล็กซ์เกรด Alloy 2205 โดยทำการกัดผิวด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์[5]

2.5.2.2 คุณสมบัติทางกล

1. คุณสมบัติทางฟิสิกส์ เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอน ทำให้รอยเชื่อมมีการขยายตัวน้อย ส่งผลให้เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ สามารถคืนตัวได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ยัง มีค่าการนำความร้อนสูงกว่า เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก โดยจะแสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [5]

คุณสมบัติ	เกรด		
	UNS S32750	UNS S32550	UNS S31803
ความหนาแน่น g/cm^3 (lb/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. คุณสมบัติความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength Properties) เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์มีลักษณะเด่นคือ มีความแข็งแรงที่จุดคราก และความต้านทานแรงดึงสูงที่อุณหภูมิห้อง และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์จะมีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากสูงกว่าประมาณ 2 เท่า จึงทำให้การใช้งานในสภาวะเดียวกัน เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์สามารถลดขนาดความหนาของวัสดุต่ำกว่า เมื่อเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก และเหล็กกล้าเฟอร์ริติก ซึ่งค่าคุณสมบัติความต้านทานแรงดึงของเหล็กกล้า ไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกลที่อุณหภูมิห้องของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [5]

สมบัติทางกล กลุ่ม/เกรด		ความต้านทาน แรงดึงที่จุดคราก ต่ำสุด	ความ ต้านทาน แรงดึง	การยืดตัว ต่ำสุด	ค่าความแข็งแรง สูงสุด	
ประเภท	เกรด UNS	MPa	MPa	%	HB	HRC
เฟอร์ริติก	S40900	205	380	20	179	-
	S44700	415	550	20	223	20
ออสเทน เนติก	S31603	170	485	40	217	-
	S31254	300	650	35	223	-

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) สมบัติทางกลที่อุณหภูมิห้องของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [5]

สมบัติทางกล กลุ่ม/เกรด		ความต้านทาน แรงดึงที่จุดคราก ต่ำสุด	ความ ต้านทาน แรงดึง	การยืดตัว ต่ำสุด	ค่าความแข็งแรง สูงสุด	
ดูเพล็กซ์	S31200	450	690	25	293	31
	S31260	485	690	20	290	-
	S31803	450	620	25	293	31
	S32304	400	600	25	290	32
	S32550	550	760	15	302	32
	S32750	550	795	15	310	32
	S32760	550	750	25	270	-
	S32900	485	620	15	269	28
	S32950	485	690	15	293	32

3. ความแข็ง (Hardness) ความแข็งของโลหะฐานในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ มีข้อกำหนดของสมาคมวิศวกรการกัดกร่อนแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (National Association Corrosion Engineer: NACE MR-01-75) ได้กำหนดค่าความแข็ง ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ที่นำไปใช้งานในบริเวณที่มีความเปรี้ยว (Sour service) ควรมีค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 28 ถึง 34 ร็อกเวลสเกลซี (HRC) ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

4. ความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Strength Properties) เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์มีค่าการดูดซับพลังงานถึง 100 จูล ที่อุณหภูมิ -100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าการดูดซับพลังงานที่อยู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริก กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก ซึ่งในการนำเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ไปใช้งานทำโครงสร้างภาชนะรับแรง ตามมาตรฐานนานาชาติ เช่น มาตรฐานสมาคมวิศวกรรมเครื่องกลประเทศสหรัฐอเมริกา (ASME) ได้มีการพิจารณาถึงข้อกำหนดด้านการรับแรงกระแทกของวัสดุในการสร้างภาชนะรับแรงดันในการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำไว้ โดยจะพิจารณาตามความหนาของโลหะฐานที่นำมาสร้างภาชนะรับแรงดัน

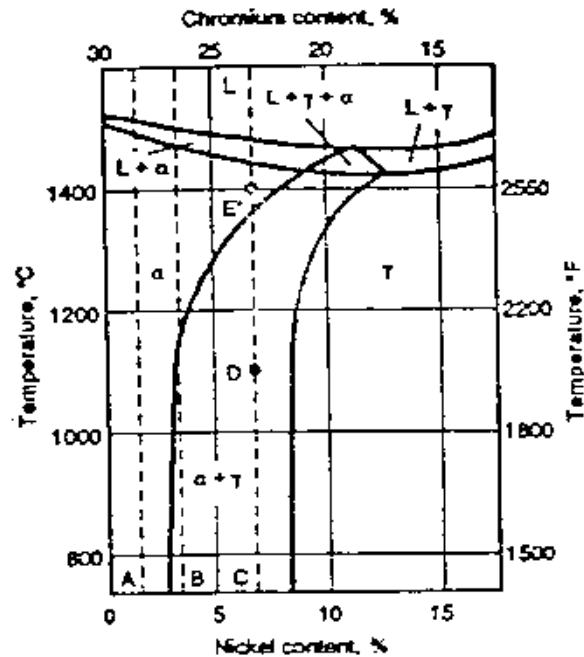
2.5.2.3 การประยุกต์ใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมก๊าซธรรมชาติและน้ำมันอุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมกระดาษ และอุตสาหกรรมการควบคุมมลภาวะ โดยทั่วไปจะนำไปใช้งานในสิ่งแวดล้อมที่เป็น

สารละลายพวกคลอไรด์ โดยนำไปใช้แทนเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนเนติก ที่ได้รับความเสียหาย เพราะเกิดรอยแตกร้าวจากการกัดกร่อนแบบหลุมบ่อ ในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้สำหรับ เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรดสูงที่เรียกว่า ซูเปอร์ดูเพล็กซ์จะมี ความต้านทานต่อสารละลาย ออกซิเจนเนตและคลอไรด์เนตในน้ำทะเลอีกด้วย โดยรายละเอียดของการนำไปใช้งานของเหล็กกล้า ไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรดต่างๆดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การประยุกต์ใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [5]

เกรด	การนำไปใช้งาน
S31803 ,S32760 S32750, S32550	ท่อสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในโรงกลั่นน้ำมัน อุตสาหกรรมเคมี และอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่ใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น อุปกรณ์ย่อยกระดาษ
ทุกเกรด	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ถังบรรจุสารเคมี ภาชนะทำปฏิกิริยาเคมี ตัวกรองก๊าซ ระบบขนถ่ายกรดอะซิติคและฟอสเฟอริก อุปกรณ์ในอุตสาหกรรม ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมัน (ระบบท่อส่งของไหลแบบหลายเฟส)
S32304	อุปกรณ์ทำน้ำร้อนในครัวเรือนที่ต้องการความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม
S32750, S32760 ,S32550	ท่อสำหรับการขนถ่ายน้ำทะเล อุปกรณ์ในการแยกก๊าซธรรมชาติและน้ำมัน อุปกรณ์ในการทำให้เป็นไอของเกลือ

2.5.2.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ สามารถอธิบายโดยใช้สมมติฐานที่ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ประกอบด้วย เหล็ก 68% และ ส่วนผสมของธาตุอื่นๆ อีก 32 % (ธาตุที่ผสมหลักคือ โครเมียม และนิกเกิล) และสามารถนำแผนภาพ กึ่งสมดุลการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก-โครเมียม-นิกเกิล มาอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลง ที่เกิดขึ้นขณะที่ได้รับความร้อนและในขณะที่เย็นตัวลงได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนภาพกึ่งสมดุลการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก-โครเมียม-นิกเกิล(ส่วนผสมของธาตุเหล็ก 68% โดยน้ำหนัก) [5]

ส่วนผสมทางเคมีของธาตุโครเมียม 30 % และนิกเกิล 2% โดยประมาณ (เส้นประ A) เหล็กกล้าไร้สนิมจะแข็งตัวเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิห้อง ส่วนที่ปริมาณส่วนผสมของธาตุโครเมียมลดลงและปริมาณธาตุนิกเกิลเพิ่มขึ้น ซึ่งในช่วงนี้ส่วนผสมทางเคมีประกอบด้วย ธาตุโครเมียม 28% และธาตุนิกเกิล 4 % (เส้นประ B) โดยจะเย็นตัวลงมาและแข็งตัวเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์ อย่างเต็มที่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 1200 ถึง 1300 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเย็นตัวลงมาก็เข้าสู่บริเวณสองโครงสร้าง (บริเวณโครงสร้าง $\alpha + \gamma$) ซึ่งทั้งสองโครงสร้างนี้จะพัฒนาขึ้นและคงไว้จนถึงอุณหภูมิห้อง โดยโครงสร้างที่อยู่ห่างออกไปทางซ้ายของเส้นประ B ที่อยู่ในบริเวณสองโครงสร้าง (บริเวณโครงสร้าง $\alpha + \gamma$) ก็จะเต็มไปด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรท์ สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันก็จะมีส่วนผสมทางเคมีประกอบด้วยธาตุโครเมียม 25% และธาตุนิกเกิล 7% (เส้นประ C) จะมีการเย็นตัวเข้าสู่บริเวณสองโครงสร้างที่อุณหภูมิสูงมาก ดังนั้นจึงมีเวลาในการแพร่ของธาตุผสมในการเปลี่ยนรูป ในสถานะของแข็ง (Solid State Transformation) จากโครงสร้างเฟอร์ไรท์ ไปเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์นาน เนื่องจากส่วนผสมของโลหะผสมตามแนวเส้นประ C จะเริ่มแข็งตัวเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์จนเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์เต็มที่ ในช่วงอุณหภูมิแคบๆ ที่อุณหภูมิสูงก่อนจะเข้าสู่บริเวณสองโครงสร้าง (บริเวณโครงสร้าง $\alpha + \gamma$) ซึ่งจะเห็นว่าโลหะผสมที่เส้นประ A, B และ C จะแข็งตัวในรูปของโครงสร้างเฟอร์ไรท์ก่อนทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์มีโครงสร้างพื้นเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์ (Ferritic Matrices) ซึ่งลำดับของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ตามการเย็นตัว ที่แสดงในรูปที่ 2.5 เป็นดังนี้

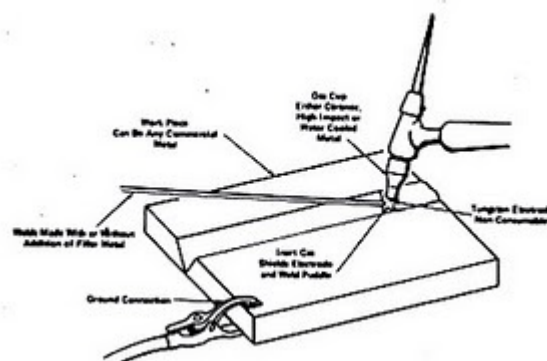
ของเหลว $\longrightarrow$ ของเหลว+เฟอร์ไรต์ $\longrightarrow$ เฟอร์ไรต์ $\longrightarrow$ เฟอร์ไรต์+ออสเทนไนต์

ในการเปลี่ยนโครงสร้างในสถานะของแข็งจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์เป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ จะพิจารณาเรื่องของการแพร่ โดยมีผลมาจากความสัมพันธ์ ระหว่างเวลาและอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง การเย็นตัวที่อุณหภูมิสูงอย่างรวดเร็วของเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์เต็มที่ จะมีผล ทำให้การเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ ไปเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ไม่ทัน จึงยังคงเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์อยู่มาก ซึ่งอย่างไรก็ตาม ในช่วงอุณหภูมิสูงจะเกิดการเปลี่ยนจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ขึ้นสูงกว่าหรือไม่ ก็จะมีผลมาจากส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ แต่ละเกรดด้วยเช่นกัน โดยตัวอย่างอัตราการเย็นตัวช่วงอุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ถึง 800 องศาเซลเซียส หรือที่เรียกกันว่าอุณหภูมิช่วงวิกฤติ (ΔT_{12-8}) ในช่วงนี้จึงใช้เป็นตัวกำหนด วัฏจักรทางความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ถ้าอัตราการเย็นตัวในช่วงอุณหภูมินี้ใช้เวลานาน การเปลี่ยนรูปจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ไปเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ก็จะมีมากขึ้นตามเช่นกัน โดยในการเชื่อมชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีความหนามาก ชิ้นงานจะได้รับความร้อนสูงจะทำให้มีอุณหภูมิช่วงวิกฤติ (ΔT_{12-8}) นาน เพื่อใช้ประโยชน์จากช่วงอุณหภูมิวิกฤติ (ΔT_{12-8}) นี้ในการควบคุมให้เกิดปริมาณโครงสร้างออสเทนไนต์ขึ้นในปริมาณที่เหมาะสม ในบริเวณเนื้อเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน เพื่อจะทำให้ได้รับสมบัติทางกลและความต้านทานการกัดกร่อนตามต้องการ ช่วงอุณหภูมิช่วงอุณหภูมิวิกฤติ (ΔT_{12-8}) ของการเย็นตัวนี้จะไม่ขึ้นกับความหนาของวัสดุชิ้นงาน ไม่เหมือนกับพลังงานความร้อนที่ให้แก่แนวเชื่อม (Heat Input) แต่ช่วงอุณหภูมิวิกฤติ (ΔT_{12-8}) จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เป็นสำคัญ วัฏจักรความร้อนที่อุณหภูมิจะไม่มีผลต่อความสมดุลของปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรต์กับโครงสร้างออสเทนไนต์ แต่จำเป็นต้องมีการควบคุมขอบเขตการขยายตัว ในการเกิดการตกผลึกของสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Phase) โดยทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มน้ำ เพื่อให้ผ่านช่วงอุณหภูมิที่ไวต่อการตกผลึกของสารประกอบโลหะอย่างรวดเร็ว ให้ได้สมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ซึ่งสำหรับการเชื่อมในปกติจะไม่จำเป็นต้องใช้วิธีการจุ่มน้ำ แต่ในบางครั้งการบังคับให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะเป็นผลดีในด้านคุณภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเชื่อมซ้อนหลายแนว ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดสูง (High Alloy Grade) โดยการทำให้ได้โครงสร้างจุลภาคเป็นสองโครงสร้าง ด้วยกรรมวิธีการทางความร้อน (Heat Treatment) ที่อุณหภูมิประมาณ 1550-1100 องศาเซลเซียส หรือที่จุด D ที่แสดงในรูปที่ 2.5 แล้วทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มน้ำ เพื่อหลีกเลี่ยงการตกผลึกของสารประกอบ (Intermetallic Phase) การตกผลึกหรือการตกตะกอนของสารประกอบโลหะจะมีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อนสูง ทำให้ความต้านทานแรงกระแทกลดลง โดยปกติการค้นหากการตกตะกอน หรือ การตกผลึกของสารประกอบในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เป็นการค้นหาซิกมาเฟส (σ Phase) และการตกตะกอนของสารประกอบโลหะ พวกธาตุเหล็ก ธาตุโครเมียมและธาตุโมลิบดีนัม

เป็นต้น ซึ่งมักจะเกิดขึ้นตามขอบเกรน โครงสร้างเฟอร์ไรต์จะมีการขยายเข้าไปในโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่มีปริมาณของธาตุโครเมียม และธาตุโมลิบดีนัมอยู่มาก ซึ่งการตกผลึกดังกล่าวแม้จะเกิดขึ้นในปริมาณน้อย แต่ก็มีผลทำให้คุณสมบัติทางกลและความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ลดลงพอสมควร ลักษณะของโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ที่ผ่านกระบวนการการรีด จะมีลักษณะทิศทางของโครงสร้างออสเทนไนต์ ที่เป็นลักษณะก้อนบนพื้นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ ทั้งในทิศทางขนานหรือตัดขวางกับทิศทางของแนวรีด ขณะที่การขึ้นรูปร้อนหรือการขึ้นรูปเย็น เป็นขบวนการตามหลังขบวนการหล่อ โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่ผ่านกรรมวิธีการหล่อ และผ่านกระบวนการรีดหลังจากกรรมวิธีการหล่อ มีความแตกต่างกันมาก ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อมและบริเวณที่ได้ผลกระทบทางความร้อนของแนวเชื่อม ระหว่างที่เกิดวัฏจักรทางความร้อนในการเชื่อม บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนที่อยู่ติดกับเส้นหลอมละลายจะมีอุณหภูมิสูงที่เหนือบริเวณสองโครงสร้าง (จุด E) ที่แสดงในรูปที่ 2.5 จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างออสเทนไนต์ ไปเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ทั้งหมด ที่มีลักษณะเกรนหยาบ ซึ่งไม่เกี่ยวกับการแผ่ขยายบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์หลังการเย็นตัว และเมื่อมีการเย็นตัวลง ก็จะมีโครงสร้างออสเทนไนต์ เริ่มเกิดขึ้นตามขอบเกรนของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ ในขณะนั้นเองภายในเกรนโครงสร้างเฟอร์ไรต์จะมีการเรียงตัวตามระนาบของผลึกย่อยงานหล่อ ซึ่งในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนของแนวเชื่อมจะมีปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรต์สูง ลักษณะโครงสร้างเช่นนี้จะทำให้คุณสมบัติด้านความเหนียวลดลง และความต้านทานการกัดกร่อนลดลงด้วย ซึ่งระดับของไนโตรเจนในโลหะฐานจะช่วยเพิ่มความสามารถในการเชื่อม และความต้านทานการกัดกร่อนได้ ในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์บางประเภทมีปริมาณไนโตรเจนมากถึง 0.35 % โดยระดับไนโตรเจนในโลหะฐานจะช่วยเพิ่มอุณหภูมิการเปลี่ยนรูปจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ไปเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ ในระหว่างการเย็นตัวให้สูงขึ้น จึงทำให้ช่วงอุณหภูมิที่เป็นช่วงโครงสร้างเฟอร์ไรต์เต็มที่แคบลง นอกจากนี้ยังสนับสนุนให้เกิดการฟอร์มตัวของ โครงสร้างออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ความกว้างของพื้นที่บริเวณผลกระทบทางความร้อน ลดลง ขั้นตอนการเปลี่ยนโครงสร้างในเนื้อเชื่อม ก็เป็นเช่นเดียวกับบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน แต่รูปแบบการแข็งตัวแตกต่างกัน โดยที่เกรนในบริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ มีลักษณะการแข็งตัวเป็นแบบกิ่งไม้ (Columnar Grain) การเจริญเติบโตของเกรนในเนื้อเชื่อมจะโตมากเนื่องจากการเย็นตัวที่รวดเร็ว เติบโตในทิศทางที่แน่นอน และในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ส่วนมากเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่อยู่ก่อน จึงเป็นตัวกำหนดขนาด และทิศทางโครงสร้างในเนื้อเชื่อม โดยโครงสร้างออสเทนไนต์จะเริ่มเกิดขึ้นตามขอบของเฟอร์ไรต์ และเกิดการผ่าเกรนตามระนาบผลึกในขณะเย็นตัวของเนื้อเชื่อม

2.6 กระบวนการเชื่อม Gas Tungsten Arc Welding

กรรมวิธีเชื่อม TIG เป็นกรรมวิธีการเชื่อมโลหะโดยใช้ชิ้นงานหลอมละลายด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นจากการอาร์ก ระหว่างลวดทั้งสแตน (Non-consumable Electrode) กับชิ้นงานเชื่อม โดยมีแก๊สเฉื่อยปกคลุมบริเวณเชื่อมและบ่อหลอมละลายเพื่อไม่ให้บรรยากาศภายนอก เข้ามาทำปฏิกิริยากับบริเวณดังกล่าว ความร้อนที่ได้รับจากการอาร์กสูงประมาณ 1942°C ($35,000^{\circ}\text{F}$) ในการเชื่อมนี้ลวดทั้งสแตน จะทำหน้าที่อาร์กเพื่อให้เกิดความร้อนเท่านั้น โดยจะไม่มีการเติมลงในแนวเชื่อม ถ้าต้องการเติมเนื้อโลหะเชื่อมต้องเติมลวดเชื่อมลงไป การเชื่อม TIG เป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่สามารถเชื่อมโลหะได้เกือบทุกชนิด ซึ่งรวมถึงโลหะผสม เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน, เหล็กกล้าผสม, เหล็กกล้าไร้สนิม, โลหะทนความร้อน, อะลูมิเนียมผสม, ทองแดงและทองแดงผสม เป็นต้น สำหรับตะกั่วและสังกะสีไม่ควรเชื่อม TIG เนื่องจากวัสดุทั้งสองมีจุดหลอมต่ำ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่แตกต่างกับอุณหภูมิของเปลวอาร์คมาก และเมื่อวัสดุดังกล่าวหลอมละลายจะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอ ส่วนโลหะที่มีจุดหลอมสูงสามารถเชื่อมด้วย TIG ได้ดี แต่ถ้าโลหะดังกล่าวเคลือบไว้ด้วยตะกั่ว, สังกะสี, ดีบุก, แคดเมียมหรือ อะลูมิเนียม จะต้องใช้วิธีเชื่อมที่พิเศษแนวเชื่อม ที่เคลือบนี้จะมีคุณสมบัติเชิงกลต่ำ เนื่องจากเกิดการผสมของวัสดุดังกล่าวภายใน แนวเชื่อมวิธีป้องกันควรกำจัดวัสดุที่เคลือบบนโลหะออกก่อน ที่จะทำการเชื่อม และเมื่อเชื่อมเสร็จแล้วจึงซ่อมแซมใหม่ [6]



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบที่สำคัญของการเชื่อม TIG [6]

2.6.1 ข้อดีของการเชื่อม TIG

1. ไม่ต้องใช้ฟลักซ์ แนวเชื่อมที่ได้จึงไม่จำเป็นต้องเคาะสแลก ซึ่งเป็นการตัดปัญหาในเรื่องสแลกฝังในแนวเชื่อม เพราะว่า สแลกที่ฝังอยู่ในแนวเชื่อม จะทำให้แนวเชื่อมไม่แข็งแรงและผุกร่อน ทั้งนี้การเชื่อมโดยใช้แก๊สเฉื่อยซึ่งทำหน้าที่แทนฟลักซ์สำหรับปกคลุมแนวเชื่อม ไม่ให้ออกซิเจนและไนโตรเจนจากบรรยากาศเข้ารวมตัวกับแนวเชื่อมขณะหลอมละลาย

2. ส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อมที่เกิดขึ้น จะมีส่วนผสมเหมือนกับลวดเชื่อม จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น เนื่องจากแก๊สเฉื่อยที่ปกคลุมแนวเชื่อมจะไม่รวมตัวทำปฏิกิริยากับโลหะ ดังนั้น

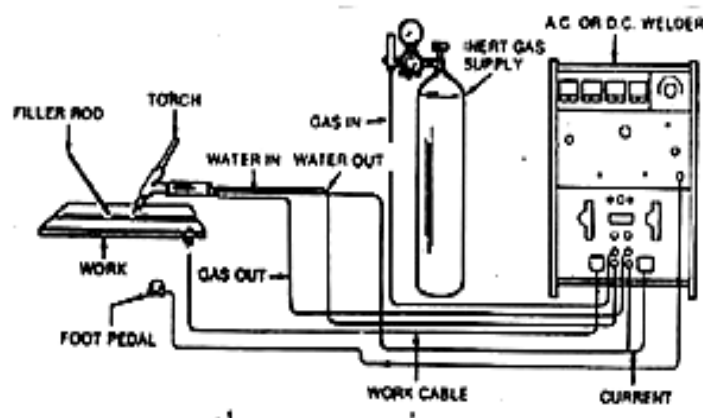
แนวเชื่อมที่ได้จากกรรมวิธีการเชื่อมแบบ TIG จึงแข็งแรง ทนต่อการกัดกร่อนและเหนียวกว่าแนวเชื่อมที่ได้จากกรรมวิธีอื่นๆ

3. สามารถเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม
4. สามารถมองเห็นแนวเชื่อมและบ่อหลอมละลายได้อย่างชัดเจน เนื่องจากการอาร์คที่เกิดขึ้นสะอาด ไม่มีควันและสเปกปกคลุม
5. การเชื่อม TIG ให้ความร้อนสูงและเป็นบริเวณแคบ จึงไม่ทำให้ความร้อนในงานเชื่อมแผ่กระจายกว้างเกินไป งานจึงมีโอกาสบิดตัวน้อย
6. ไม่มีเม็ดโลหะ (spatter) เกิดขึ้นที่บริเวณแนวเชื่อม เนื่องจากการเชื่อม TIG ไม่มีการส่งผ่านน้ำโลหะเหลวเชื่อมข้ามบริเวณอาร์คสู่บ่อหลอมละลาย
7. สามารถเชื่อมต่อเหล็กเหนียวที่มีความหนาแตกต่างกันได้
8. สามารถควบคุมแนวเชื่อมได้ง่าย

2.6.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้กับการเชื่อม TIG [7]

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อม TIG จะกำหนดตามลักษณะการใช้งาน และการออกแบบของบริษัทผู้ผลิต ซึ่งประกอบด้วยส่วนใหญ่น่า ดังนี้

1. เครื่องเชื่อม (Power Source)
2. ระบบน้ำหล่อเย็น (Cooling System)
3. แก๊สปกคลุม (Shielding Gas)
4. หัวเชื่อมและอุปกรณ์ประกอบ (Welding Torch and Equipment)



รูปที่ 2.7 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้กับการเชื่อม TIG [8]

2.6.1.2 เครื่องเชื่อม TIG มีอยู่หลายแบบ

1. Transformer-rectifiers เป็นเครื่องเชื่อมที่จ่ายไฟกระแสตรง
2. Transformer เป็นเครื่องเชื่อมที่จ่ายไฟกระแสสลับ
3. Power-driver generators มีทั้งชนิดขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า จะจ่ายเฉพาะไฟกระแสตรงเท่านั้น แต่ถ้าเป็นชนิดเครื่องยนต์ขับเคลื่อน จะจ่ายได้ทั้งไฟกระแสตรงและไฟกระแสสลับ สำหรับเครื่องเชื่อมชนิด Trans-former และ rectifier นั้นมีข้อดีหลายอย่าง เมื่อเปรียบเทียบกับชนิด Power-Driven generators คือ ลงทุนต่ำ, ไม่มีเสียงดัง, ค่าบำรุงรักษาและค่าใช้จ่ายในการเชื่อมต่ำ, ชิ้นส่วนของเครื่องไม่มีการเคลื่อนที่, ต้องการกำลังต่ำในขณะที่เดินเครื่อง (ไม่ทำการเชื่อม)

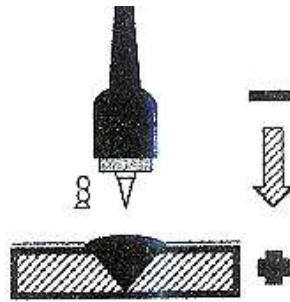


รูปที่ 2.8 เครื่องเชื่อมTIG [8]

2.6.1.3 ระบบกระแสไฟที่ใช้ในการเชื่อม ที่นิยมใช้ในระบบการเชื่อมทิกนั้นมี 3 แบบด้วยกันคือ

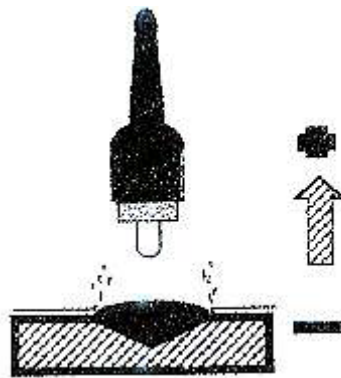
1. กระแสตรงขั้วลบ (Direct Current Electrode Negative) DCEN.
2. กระแสตรงขั้วบวก (Direct Current Electrode Positive) DCEP.
3. กระแสสลับความถี่สูง (Alternating Current & High Frequency) ACHF.

1. กระแสตรงขั้วลบ (DCEN) กระแสตรงขั้วลบ หมายความว่า หัวเชื่อม หรือทั้งสแตนอิเล็กโทรดใช้กระแสไฟเชื่อมเป็นขั้วลบ และกระแสไฟเชื่อมขั้วบวกเป็น ตำแหน่งของชิ้นงาน โดยบรรจุไฟฟ้าลบไหลจากหัวเชื่อมหรืออิเล็กโทรดไปสู่ชิ้นงาน ความร้อนจะเกิดขึ้นที่ชิ้นงานมาก โดยเกิดที่ชิ้นงานประมาณ 70 %และเกิดที่ทั้งสแตนอิเล็กโทรดประมาณ 30 % แนวเชื่อมที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแคบแต่กินลึกมากดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กระแสตรงขั้วลบ (DCEN) [8]

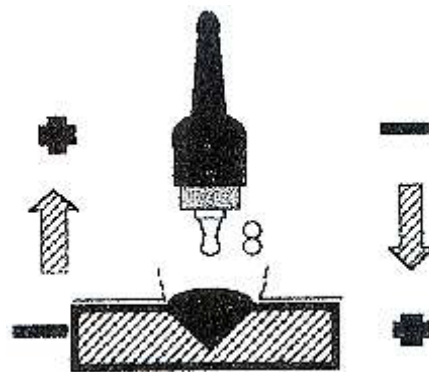
2. กระแสตรงขั้วบวก DCEP กระแสตรงขั้วบวกหมายความว่า ทั้งสแตนเลสใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมเป็นขั้วบวก และกระแสไฟฟ้าเชื่อมลบเป็นตำแหน่งของชิ้นงาน ดังนั้นความร้อนจะเกิดขึ้นที่ชิ้นงานมาก โดยเกิด ที่ชิ้นงานประมาณ 30% และเกิดที่ทั้งสแตนเลสประมาณ 70% แนวเชื่อมจะมีลักษณะแบนกว้างกินล็กน้อย แท่งทั้งสแตนเลสที่เข้ากับกระแสไฟเชื่อมนี้ จะมีขนาดโตกว่าทั้งสแตนเลสที่เข้ากับกระแสไฟฟ้าแบบ DCEN และ ACHF ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กระแสตรงขั้วบวก DCEP [8]

3. กระแสไฟฟ้าสลับและระบบความถี่สูง AC.HF กระแสไฟฟ้าสลับเป็นสิ่งที่จำเป็นในการเชื่อมโลหะที่มีออกไซด์จับอยู่บริเวณผิวของชิ้นงาน ถ้าพิจารณาคลื่นของกระแสไฟฟ้าสลับ จะพบว่าในครึ่งไซเคิลแรกทั้งสแตนเลสเป็นขั้วบวก ออกไซด์ที่ผิวของชิ้นงานตรงบริเวณที่เกิดการอาร์ค จะถูกจัดออกไปจากบริเวณนั้น ในครึ่งไซเคิลต่อมาทั้งสแตนเลสเป็นขั้วลบ ขณะที่ทั้งสแตนเลสจะเย็นลง แต่กลับเกิดความร้อนมากที่ชิ้นงานตรงบริเวณที่เกิดการอาร์ค จึงทำให้เกิดบ่อหลอมละลายบนชิ้นงาน แต่ความเป็นจริงแล้วออกไซด์และความชื้น จะเป็นฉนวนกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าผ่านจาก แท่งทั้งสแตนเลสไปยังชิ้นงานได้สะดวกนั้น เพื่อเป็นการขจัดปัญหาเหล่านี้จึงนำเอา

ระบบความถี่สูง (High Frequency) มาช่วยกระตุ้นการอาร์คในช่วงแรกที่มีลักษณะเป็นกระแสบวก (AC) การทำแบบนี้จะทำให้กระแสไหลออกจากแท่งทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรดไปสู่ชิ้นงานได้ตลอดเวลา และสม่ำเสมอ กระแสสลับและความถี่สูง (ACHF) มีผลดีต่อการเชื่อมอลูมิเนียมทำให้การซึมลึกในการเชื่อมและขจัด Aluminum Oxide ที่พื้นผิวในขณะที่ทำการเชื่อม จึงทำให้การซึมลึกในการเชื่อมมีผลดีและกระแสไฟฟ้าเชื่อมทำให้ออกไซด์ที่เคลือบผิวของชิ้นงานแตกออกจากกัน ก่อนที่ชิ้นงานจะหลอมละลาย กระแสไฟสามารถกำจัดสิ่งสกปรกออกได้และสามารถเชื่อมอลูมิเนียมที่มีความบางประมาณ 1 มิลลิเมตร โดยไม่ต้องป้อนลวดเชื่อมและให้ความร้อนก่อนการเชื่อม การใช้ชนิดของกระแสไฟที่แตกต่างกันมีผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่แตกต่างกัน จึงเป็นผลให้มีลักษณะการกินลึก ตรงบริเวณที่เกิดการอาร์คนั้นแตกต่างกันตลอดจนการเลือกใช้ทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรด ให้เหมาะสมสำหรับกระแสไฟเชื่อมนั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กระแสไฟสลับและระบบความถี่สูง AC.HF [8]

2.6.1.4 ระบบน้ำหล่อเย็น ในการเชื่อม TIG ด้วยกระแสที่สูงกว่า 150 แอมป์ หรือเชื่อมแบบต่อเนื่อง จะทำให้เกิดความร้อนสะสมขึ้นในหัวเชื่อมและสายเชื่อม และอาจจะเป็นเหตุให้อุปกรณ์ดังกล่าวชำรุดเสียหายได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องใช้ระบบระบายความร้อนสายและหัวเชื่อม แหล่งของน้ำหล่อเย็นอาจจะเป็นแบบถังหมุนเวียนที่มีมอเตอร์ขับหรือน้ำจากแหล่งภายนอก เช่น น้ำจากก๊อกก็ได้ โดยน้ำจะผ่าน Solenoid valve สำหรับควบคุมอีกทีหนึ่ง ซึ่งวาล์วของน้ำที่ Solenoid valve จะเปิดเมื่อทำการเชื่อมและวาล์วจะปิดเมื่อหยุดการเชื่อม

ข้อเสียของระบบหล่อเย็นแบบหมุนเวียน คือ

1. ใช้งานไม่สะดวก
2. ถ้าระบบระบายความร้อนขัดข้อง เครื่องเชื่อมจะใช้งานไม่ได้
3. ต้นทุนสูง

2.6.1.5 แก๊สปกคลุม (Shielding Gas) ทำหน้าที่ปกคลุมแนวเชื่อมและบ่อหลอมละลายเพื่อไม่ให้ อากาศโดยรอบเข้าไปทำปฏิกิริยาในขณะเชื่อม[9]

1. แก๊สอาร์กอน (Argon) เป็นแก๊สเฉื่อยที่ได้จากกรรมวิธีผลิตออกซิเจน ซึ่งจะมียุอยู่ในอากาศ ประมาณ 0.9 % แก๊สอาร์กอนจะทำให้การเริ่มต้นเชื่อมง่ายขึ้นให้อาร์คที่เปลวเรียบและสม่ำเสมอ แก๊ส อาร์กอนมีความหนาแน่นมากกว่าบรรยากาศ และถึงสำหรับเก็บอาร์กอนเหลว จะต้องมีฉนวนที่ดี สามารถเก็บแก๊สอาร์กอนที่อุณหภูมิต่ำกว่า -184 องศาเซลเซียส การใช้งานกับโลหะทุกชนิด มีความ บริสุทธิ์ 99.95 % ดีกว่า แก๊สฮีเลียม(He) คือ อาร์กเรียบและนิ่งกว่า ชิมล็กน้อยกว่า Cleaning Effect ดีกว่า อัตราการไหลน้อยกว่า และเริ่มต้นอาร์คดีกว่า และราคาถูกกว่า

2. แก๊สฮีเลียม (Helium) เป็นแก๊สเฉื่อยที่ได้จากกรรมวิธีผลิตแก๊สธรรมชาติ Ionization Potential มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าดีเลิศ ทำให้เปลวอาร์กแผ่ขยายกว้างความเข้มของความร้อนสูง กว่า แก๊สอาร์กอน (Ar) ทำให้แนวเชื่อมชิมล็กได้ดี การใช้แก๊สฮีเลียมเหมาะกับการเชื่อมด้วย วิธีอัตโนมัติ ที่ให้ความเร็วในการเชื่อมสูง ไม่เกิดรูพรุนและการกัดแหว่งแนวเชื่อมรวมทั้งแนวเชื่อมมี บริเวณ เขตอิทธิพลของความร้อนจากการเชื่อมแคบ การใช้งานกับโลหะทุกชนิด ความบริสุทธิ์ 99.99 % ราคาค่อนข้างแพง

3. แก๊สอาร์กอน (Ar) ผสม 15-75 % ฮีเลียม (He) เหมาะกับการ เชื่อมTIGอัตโนมัติ ฮีเลียม (He) ช่วยลดรูพรุน และแตกร้อน เดินแนวเชื่อมเร็ว ลดการบิดงอ อาจเปลืองแก๊สมากขึ้น เพราะ ฮีเลียม (He) ลอยสู่ด้านบน ใช้โวลท์ในการจุดอาร์คสูงกว่า ใช้งานกับโลหะทุกชนิด

4. แก๊สอาร์กอน (Ar) ผสม 7 % ไฮโดรเจน(H)เพิ่มความเร็วในการเดินแนวเชื่อม และลด รูพรุน ใช้งานกับเหล็กกล้า Cr/Ni และ Ni

2.6.1.6 หัวเชื่อมและอุปกรณ์ประกอบ (Welding Torch and Equipment) [10]

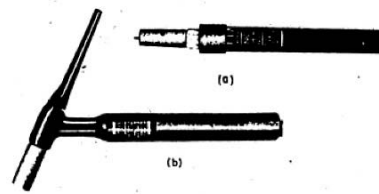
หัวเชื่อมสำหรับการเชื่อม TIG ควรจะมีความแข็งแรง, กะทัดรัด, เบาและหุ้มด้วยฉนวนที่ดี หน้าที่ของ หัวเชื่อมที่สำคัญ ได้แก่

1. เป็นที่จับถือขณะเชื่อม
2. เป็นทางผ่านและบังคับแก๊สปกคลุมเพื่อให้ปกคลุมบริเวณอาร์ก
3. นำกระแสไฟเชื่อมสู่บริเวณอาร์ก
4. เป็นทางผ่านเพื่อให้ระบายความร้อนออกจากอุปกรณ์ที่อยู่ภายในหัวเชื่อม
5. เป็นตัวจับลวดทั้งสแตน

หัวเชื่อมจะประกอบด้วย สายเชื่อม สายยางและข้อต่อสำหรับต่อหัวเชื่อมเข้ากับเครื่องเชื่อม แก๊ส ปกคลุมและน้ำระบายความร้อน สำหรับหัวเชื่อม TIG ชนิดที่ควบคุมการเชื่อมด้วยมือ โดยทั่วไปแบ่ง ออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. ชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air-Cooled)
2. ชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water-Cooled)

หัวเชื่อม TIG มีหลายขนาดตั้งแต่น้ำหนัก 3 ออนซ์จนถึงจนขนาด 1 ปอนด์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของ กระแสเชื่อม, ลวดเชื่อมและ Nozzle ส่วนรูปร่างจะแตกต่างกันตามบริษัทผู้ผลิต แต่โดยทั่วไปแล้วจะมี ทั้งแบบ หัวเชื่อมเป็นมุมและหัวตรง โดยทั่วไปนิยมใช้หัวเอียง ซึ่งลวดเชื่อมจะเอียงทำมุม 120° กับมือจับ อาจจะเป็นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำหรืออากาศก็ได้ ส่วนแบบหัวตรงนั้นลวดเชื่อมจะอยู่ในแนวเดียวกับมือจับ และหัวเชื่อมบางอันจะมีสวิตช์ไฟฟ้า เพื่อควบคุมการไหลของแก๊สปกคลุม โดยการบังคับด้วยมือ

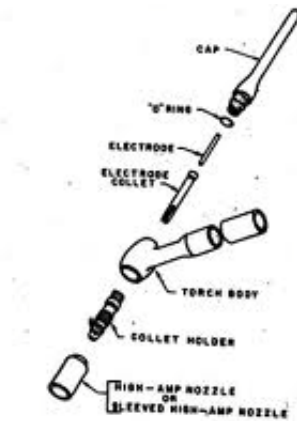


รูปที่ 2.12 หัวเซรามิกสักรอบทั้งสแตนเลสและไทเทเนียม [10]

หัวเชื่อมชนิด Air Cooled นั้น ที่จริงแล้วระบายความร้อนด้วยแก๊สปกคลุม สำหรับอากาศที่ระบายความร้อนออกจะเป็นอากาศที่อยู่โดยรอบหัวเชื่อม ซึ่งจะระบายความร้อนออกได้น้อยมาก หัวเชื่อมชนิดนี้น้ำหนักเบา ขนาดกะทัดรัด และราคาถูกกว่าแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ ส่วนมากใช้กับ กระแสเชื่อมไม่เกิน 150 แอมป์ ซึ่งใช้ในการเชื่อมโลหะบางและ Duty Cycle ต่ำ ลวดเชื่อมทั้งสแตนที่ ใช้กับหัวเชื่อมแบบ Air Cooled จะมีความร้อนมากกว่าลวดที่ใช้กับหัวเชื่อมชนิด Water Cooled โดยเฉพาะถ้าใช้ลวดทั้งสแตนบริสุทธิ์แล้วจะทำให้อุณหภูมิของทั้งสแตนจากลวดเชื่อมเดิมลงในบ่อ หลอมละลายของแนวเชื่อมได้เมื่อเชื่อมด้วยกระแสสูง หัวเชื่อมชนิด Water Cooled มีสายต่ออยู่ 3 เส้น คือ

1. สายเชื่อม เป็นสายเคเบิลทองแดงที่หุ้มด้วยยาง และยังทำหน้าที่เป็นท่อนำทิ้งของน้ำระบายความร้อน สายเคเบิลทองแดงจะมีขนาดเล็กกว่าสายเชื่อมธรรมดา เมื่อใช้กระแสไฟที่เท่ากัน
2. ทางเข้าของน้ำระบายความร้อน เป็นสายยางกลวงที่ต่อออกจาก Solenoid valve ของน้ำหล่อเย็นไปยังหัวเชื่อม
3. ทางเข้าของแก๊สปกคลุม เป็นสายยางกลวงที่ต่อจาก Solenoid valve แก๊สปกคลุมไปยังหัวเชื่อม

2.6.1.6 ส่วนประกอบของหัวเชื่อม TIG ในการเตรียมหัวเชื่อมประการแรกจะต้องเข้าใจหลักการทำงาน และวิธีเลือกใช้ส่วนประกอบของหัวเชื่อมได้ถูกต้อง ส่วนประกอบของหัวเชื่อม TIG มีดังนี้



รูปที่ 2.13 แสดงส่วนประกอบหัวเชื่อม TIG [10]

1. ตัวทอร์ช (Torch Body) เป็นส่วนลำตัวของหัวเชื่อม ภายในทำด้วยทองแดงผสม พร้อมทั้งเป็นทางเดินของแก๊สปกคลุม, น้ำระบายความร้อนและกระแสเชื่อม ซึ่งหุ้มด้วยวัสดุที่เป็นฉนวนกันความร้อนและกระแสไฟเชื่อมอย่างดี
2. ฝาครอบ (Cap) เป็นส่วนปลายสุดของหัวเชื่อม มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้แก๊สไหลออก และยังเป็นตัวป้องกันไม่ให้อากาศไหลเข้าไปปนกับแก๊สภายในหัวเชื่อม
3. วงแหวนยาง (O Ring) เป็นวงแหวนยางกลมที่ประกอบอยู่ที่โคนเกลียวของ Cap สำหรับป้องกันการรั่วของแก๊ส
4. Collet หรือ Electrode Collet เป็นตัวจับลวดเชื่อม ซึ่งกำหนดขนาดตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทังสเตน
5. Collet Holder ยึดติดกับลำตัวหัวเชื่อมด้วยเกลียว Collet Holder ทำด้วยทองแดงผสม ทำหน้าที่บีบจับ Collet ให้จับลวดทังสเตนได้แน่น
6. Nozzle ที่ใช้ในการเชื่อม TIG มีอยู่หลายชนิดได้แก่ ชนิดกระเบื้อง เซรามิก, โลหะ, แก้ว (Fused quartz) และชนิด Dual-Shield Nozzle, Nozzle ชนิดทำด้วย ceramic เป็นแบบที่นิยมใช้กันและราคาถูก แต่สำหรับ Nozzle โลหะที่ระบายความร้อนด้วยน้ำจะมีอายุการใช้งานนานกว่าแบบเซรามิก
7. ลวดเชื่อมทังสเตน (Tungsten Electrodes) ลวดเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อม TIG จะแตกต่างจากลวดเชื่อมอื่น ๆ เนื่องจากลวดเชื่อมทังสเตน ซึ่งทำหน้าที่สำหรับการอาร์คเท่านั้น ไม่ได้เป็นลวดสำหรับเติมแนวเชื่อม ทังสเตนมีจุดหลอมเหลวสูง ประมาณ 6170°F (3410°C) จึงนิยมใช้ทำลวดเชื่อมชนิดไม่สิ้นเปลือง ซึ่งมีความบริสุทธิ์ประมาณ 99.5% ส่วนทังสเตนผสมนั้นจะประกอบด้วยธาตุ

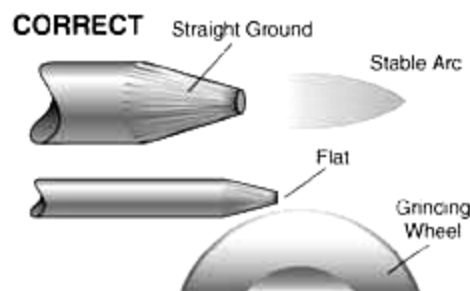
ผสมต่างๆ (thoria หรือ airconia) ทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรด ทำจากโลหะทั้งสแตนเลสและโลหะทั้งสแตนเลสผสม โดยโลหะทั้งสแตนเลสเป็นโลหะที่มีจุดหลอมละลาย (Melting Point) สูงมาก (3, 140° C) ซึ่งจะสูงกว่าโลหะ ชนิดอื่นๆ ลวดทั้งสแตนเลสผสมจะผสมด้วยโลหะธาตุทอเรียม(Thorium)หรือเซอร์โคเนียม (Zirconium) อิเล็กโทรดทั้งสแตนเลสในการเชื่อมแบบ TIG จะทำหน้าที่ให้เกิดการอาร์ค ไม่ใช่โลหะเดิมหรือลวดเชื่อม จึงเป็นอิเล็กโทรดที่ไม่หลอมละลายขนาดอิเล็กโทรดทั้งสแตนเลสมีหลายขนาด ซึ่งมีขนาดความโตวัดที่เส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.010 0.020 0.040 4/1 8/1 16/1 16/3 32/3 และ 32/5 นิ้ว ขนาดความยาวตั้งแต่ 3 6 7 18 และ 24 นิ้วทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรดจะต้องปราศจากสิ่งสกปรกติดที่ผิวลวด ไม่มีรอยแตกและ สลักฝังใน เพราะจะทำให้แนวเชื่อมที่ได้มีคุณภาพต่ำ ผิวอิเล็กโทรดทั้งสแตนเลสมี 2 ลักษณะ คือ แบบผิวเจียรไนกับแบบผิวล้างด้วยน้ำยาเคมี ซึ่งแบบผิวเจียรไนจะมีผิวเป็นมันได้มาตรฐานและราคาสูงกว่าแบบผิวที่ล้างด้วยน้ำยาเคมีขนาดของกระแสไฟในการเชื่อมแบบ TIG จะมากหรือน้อยขึ้นกับอยู่กับชนิดและขนาดของชิ้นงาน การออกแบบรอยต่อ ตำแหน่งท่าเชื่อม ชนิดของ แก๊สปกคลุม และชนิดของหัวเชื่อม เป็นต้นความสามารถในการนำกระแสไฟเชื่อมของอิเล็กโทรดทั้งสแตนเลส ในแต่ละขนาดขึ้นอยู่กับชนิดและหัวของกระแสไฟด้วยคือ กระแสไฟตรงขั้วลบมีความสามารถในการนำกระแสไฟเชื่อมได้มากที่สุดแต่นำกระแสได้น้อยลงเมื่อใช้กระแสสลับ และจะนำกระแสได้น้อยที่สุดเมื่อใช้กระแสไฟตรงขั้วบวก ชนิดและขนาดของอิเล็กโทรดทั้งสแตนเลสมีความสำคัญคือ ช่วยให้คุณภาพของชิ้นงานดีตามที่ต้องการ ถ้าได้ขนาดที่เหมาะสม รวมทั้งจะต้องรู้ถึงกระแสไฟเชื่อม (แอมป์) สำหรับทั้งสแตนเลสด้วยเพราะทำให้ส่วนปลายของทั้งสแตนเลสไม่ถูกทำลายจากการเชื่อม ความแตกต่างและข้อดีข้อเสียของอิเล็กโทรดแต่ละชนิดดังนี้

1. ทั้งสแตน บริสุทธิ์ (Pure Tungsten) ราคาจะถูกกว่าชนิดอื่นๆ คุณภาพในการใช้งานพอใช้ และนิยมใช้กันทั่วไป ใช้ลวดทั้งสแตนบริสุทธิ์ สัญลักษณ์คือ EWP (Electrode Welding Pure Tungsten) จะมีโคดสีที่ปลายลวดสีเขียว ปกติจะใช้กับกระแสไฟสลับในการเชื่อมอะลูมิเนียมและแมกนีเซียม ปลายลวดต้องต้องแต่งให้มนหรือทำให้ละลายกลมเป็นลูกฟุตบอล ลักษณะการอาร์คจะนุ่มสม่ำเสมอ โดยใช้แก๊สอาร์กอนหรือฮีเลียมเป็นแก๊สปกคลุม อิเล็กโทรดทั้งสแตนบริสุทธิ์ถ้าใช้กับไฟฟ้ากระแสตรง ความสามารถนำกระแสไฟจะลดลง และมีโอกาสละลายเป็นเม็ดหยดผ่านการอาร์คไปผสมกับโลหะแนวเชื่อมได้ง่ายกว่าลวดทั้งสแตนเลสผสม

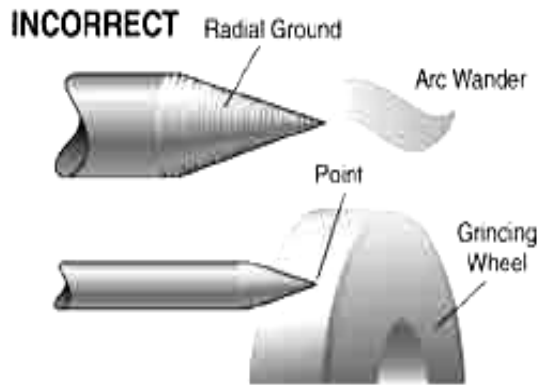
2. ทอเรียมเต็ดทั้งสแตน (Thoriated Tungsten) เป็นอิเล็กโทรดทั้งสแตนเลสที่ผสมด้วยโลหะทอเรียม โคดปลายลวดสีเหลือง สัญลักษณ์คือ EWPT-1 สำหรับทั้งสแตนเลสที่ผสมทอเรียมร้อยละ 1 และสีแดงสำหรับทั้งสแตนเลสที่ผสมทอเรียม 2% สัญลักษณ์คือ EWPT-2 การนำโลหะทอเรียมผสมกับลวดทั้งสแตนเลสจำนวนเพียงเล็กน้อย จะทำให้คุณภาพในการแตกตัวของอิเล็กตรอนดีขึ้น มีผลทำให้การเริ่มต้นการอาร์คดีขึ้นด้วย และมีความสามารถในการนำกระแสไฟได้ในปริมาณสูง ส่วนผสมของทอเรียมร้อยละ 1-2 จะเป็นการเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าได้สูงขึ้นถึงร้อยละ 50 กระแสไฟฟ้าจะไหลได้ดี ทำให้ง่ายต่อการการเริ่มต้นอาร์ค เปลวอาร์คจะคงที่โดยที่อายุการใช้งานชนิดโลหะ

ทองเหลืองผสมกับลวดทั้งสแตนรอยละ 1 จะยาวกว่าชนิดรอยละ 2 ทองเหลืองทั้งสแตนเหมาะกับการเชื่อมเหล็กทั่วไป ด้วยกระแสไฟตรงและต้องลับแต่งปลายลวดให้เรียบแหลม โดยเฉพาะใช้กับกระแสไฟตรงขั้วลบ ลวดทองเหลืองทั้งสแตนรอยละ 2 จะเป็นชนิดใช้กันอย่างแพร่หลายมากทองเหลืองทั้งสแตนอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีลักษณะพิเศษคือ นำเอาลวดทองเหลืองทั้งสแตนมาอัดรวมไว้ในลวดทั้งสแตนบริสุทธิ์ให้กลายเป็นอิเล็กโทรดชนิดใหม่ โดยใช้ลวดทองเหลืองเพียง 1/4 ของพื้นที่หน้าตัดตลอดความยาวของลวด เป็นลวดทั้งสแตนผสมที่มีคุณสมบัติเริ่มต้นการอาร์คได้ดีกระแสไฟไหลผ่านได้มาก และรักษารูปทรงลักษณะมนกลมของปลายลวดได้ดี ใช้ได้กับการเชื่อมโลหะอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมด้วยกระแสไฟฟ้าสลับหรือใช้กระแสตรงได้ ใลค์ที่ปลายลวดเป็นสีน้ำเงิน

3. เซอร์โคเนตเตดทั้งสแตน (Zirconiated Tungsten) อิเล็กโทรดทั้งสแตนที่มีเซอร์โคเนียมผสมอยู่ร้อยละ 0.3-0.5 ใลค์ปลายลวดสีน้ำตาล เหมาะกับกระแสไฟฟ้าสลับความถี่สูงโดยเฉพาะปลายลวด จึงต้องแต่งให้เป็นลักษณะปลายมนกลม เหมือนลวดอิเล็กโทรดทั้งสแตนบริสุทธิ์ซึ่งอิเล็กโทรดทั้งสแตนชนิดนี้สามารถป้องกันการเกิดสิ่งสกปรกที่ปลายลวดได้ดี ทำให้เริ่มต้นการอาร์คได้ง่ายเหมาะกับงานที่ต้องการคุณภาพสูงให้การอาร์คสม่ำเสมอ เป็นลวดที่มีคุณภาพทั่วไปซึ่งจะดีกว่าอิเล็กโทรดทั้งสแตนบริสุทธิ์ แต่ด้อยกว่าลวดทองเหลืองทั้งสแตนในขณะทำการเชื่อม ถ้ามีสิ่งสกปรกติดอยู่ที่ปลายทั้งสแตนอิเล็กโทรด ความชื้น ออกซิเจนและไนโตรเจนจากภายนอก สามารถเข้ามาทำปฏิกิริยากับทั้งสแตนอิเล็กโทรดที่กำลังร้อน และถ้าในการเชื่อม ปลายทั้งสแตนอิเล็กโทรดสัมผัสกับชิ้นโลหะที่กำลังหลอมละลาย จะทำให้สิ่งสกปรกติดเข้าไปในเนื้อชิ้นงานได้ การทำความสะอาดปลายทั้งสแตนอิเล็กโทรดโดยการขัดด้วยหินเจียร หรือการปรับกระแสไฟเชื่อมให้สูง แล้วทำการอาร์คทั้งสแตนอิเล็กโทรดส่วนที่สกปรกลงบนเศษโลหะที่สะอาด จนปลายทั้งสแตนอิเล็กโทรดนั้นโตขึ้น หลังจากนั้นนำส่วนปลายที่โตขึ้นไปหักออกแต่ถ้าสกปรกบ่อยๆ ควรจะเปลี่ยนใช้อันใหม่และหาสาเหตุที่เกิดสกปรกบ่อย



รูปที่ 2.14 แสดงแนวเส้นการแต่งปลายทั้งสแตนที่ถูกต้องสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม[10]



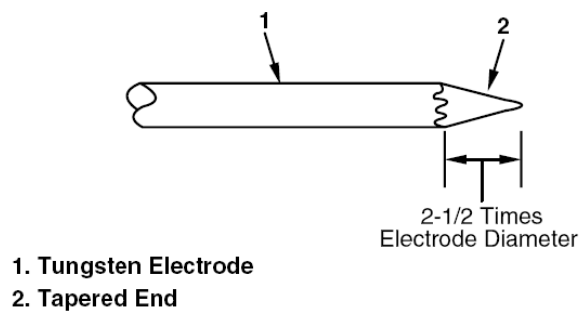
รูปที่ 2.15 แสดงแนวเส้นการแต่งปลายทั้งสแตนเลสที่ผิดสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม[10]

ในการประกอบทั้งสแตนเลสกับหัวเชื่อม จะต้องแต่งส่วนปลายให้เหมาะสมกับกระแสไฟที่เชื่อมเสียก่อน ถ้าใช้กระแสไฟตรงขั้วตรง (D.C.S.P.) เช่น การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมควรเจียรนัยส่วนปลายของทั้งสแตนเลสที่เชื่อมให้เรียบ เป็นมุม 30 องศา และมนปลายส่วนที่แหลมเล็กน้อย ถ้าใช้ไฟกระแสสลับความถี่สูง (A.C.H.F.) ปลายทั้งสแตนเลสก็จะเป็นรูปรีวแต่จะมนกลมที่ส่วนปลายแหลม ให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 3 ใน 4 ของขนาดทั้งสแตนเลส และกระแสตรงกลับขั้ว (D.C.R.P.) ปลายทั้งสแตนเลสที่ควรจะมีลักษณะมนกลมดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงปลายที่เจียรนัยแล้วของทั้งสแตนเลสในการเชื่อมแต่ละแบบ[10]

นอกจากนี้แล้วการปรับความยาวของปลายทั้งสแตนเลสที่เป็นมุมแหลม ก็ขึ้นกับขนาดของทั้งสแตนเลส และทำเชื่อม โดยปกติจะมีความยาวอยู่ที่ 0.5-1 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.17 แสดงปลายที่เจียรนัยแล้วของทั้งสแตนอิเล็คโทรดในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม [10]

ตารางที่ 2.5 แสดงมาตรฐานของลวดเชื่อมทั้งสแตน [10]

AWS-ASTM Classification	ชนิดลวดเชื่อมทั้งสแตน	สี
EWP	Pure Tungsten	เขียว
EWTH-1	1% Thoriated	เหลือง
EWTH-2	2.% Thoriated	แดง
EWTH-3	Pure + Thoriated Tungsten	น้ำเงิน
EWZr	Zirconiated	น้ำตาล

2.7 การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม

ผลิตภัณฑ์เหล็กกล้าไร้สนิมมีการใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีคุณลักษณะพิเศษที่แตกต่างออกไปจากวัสดุอื่นๆ เช่น ความต้านทาน การกัดกร่อนที่ดีสามารถใช้งานภายใต้อุณหภูมิสูง ลักษณะผิวที่สวยงามและ หลากหลาย เหล็กกล้าไร้สนิมไม่เพียงแต่ใช้ทำเครื่องครัว เครื่องสุขภัณฑ์ งานตกแต่งเท่านั้น แต่ยังรวมถึง การนำไปเชื่อมประกอบ เช่น ท่อความดัน แท็งก์ ระบบท่อไอเสียรถยนต์ อุปกรณ์ในโรงงานอุตสาหกรรมเคมี และอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีหลายประเภท โดยแตกต่างกันไปตามส่วนผสมทางเคมีซึ่งมีผลต่อ โครงสร้างจุลภาค คุณสมบัติเชิงกล และ การใช้งาน ความสามารถในการเชื่อมของแต่ละกลุ่ม ก็จะแตกต่างกันออกไป ลักษณะสำคัญของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทต่างๆ มีดังต่อไปนี้[11]

2.7.1 ความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ มีความสามารถในการเชื่อมที่ดี ถึงแม้จะมีความสามารถไม่ดีเท่ากับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก ซึ่งโดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบันจะมีส่วนผสม

ของธาตุคาร์บอนต่ำ น้อยกว่า 0.03 % โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เพื่อป้องกันการกัดกร่อนระหว่างเกรน เนื่องจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ ในโลหะฐานหรือโลหะเดิมจะมีปริมาณของธาตุซัลเฟอร์ และ ฟอสฟอรัสต่ำ ซึ่งน้อยกว่า 0.03 % โดยน้ำหนัก เพื่อลดปัญหาการรอยแตกร้าวขณะแข็งตัว (Hot Crack) ในขณะที่กำลังเปลี่ยนเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์ และมีความต้านทานต่อการแตกร้าวจากการแพร่ของ ไฮโดรเจนได้ดี เนื่องจากธาตุไฮโดรเจนมีความสามารถในการละลายในโครงสร้างออสเทนไนต์ได้ดี อย่างไรก็ตามการแตกร้าวขณะแข็งตัวและการแตกร้าวเนื่องจากการแพร่ของก๊าซไฮโดรเจน ก็ยังมี โอกาสเกิดขึ้นได้ในงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ จึงต้องระมัดระวังและป้องกันในการเชื่อม เป็นอย่างดี โดยทั่วไปกระบวนการที่ใช้เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ได้แก่ กระบวนการเชื่อมด้วย ลวดหุ้มฟลักซ์ (SMAW) กระบวนการเชื่อมทิก (GTAW) กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม (GMAW) กระบวนการเชื่อมอาร์คใต้ฟลักซ์ (SAW) กระบวนการเชื่อมอาร์คสัฟฟลักซ์ (FCAW) และ กระบวนการเชื่อมอาร์คพลาสมา โดยการเลือกกระบวนการเชื่อมใดขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุ ประเภทของรอยต่อ อีกทั้งปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องในด้านการออกแบบและความประหยัดในการเชื่อม

2.7.2 การทำความสะอาดเหล็กกล้าไร้สนิมภายหลังการเชื่อม

ประกอบด้วยขั้นตอนต่อไปนี้

1. ขจัดสเกลและทำความสะอาดผิวรอยเชื่อมใช้สารเคมี ส่วนใหญ่จะใช้สารละลายกรด HN03+HF ในการกำจัดข้อบกพร่องต่างๆจากการเชื่อม เช่น สเกล หรือรอยไหม้ แต่ไม่ควรใช้กับ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค ที่เกิด sensitization (สูญเสียโครเมียม ในรูปของคาร์ไบด์) หรือบริเวณ จินส่วนที่สัมผัสกับเหล็กกล้าคาร์บอน นอกจากนี้ยังมีการใช้เจล สำหรับทาลงไปทีแนวเชื่อมเพื่อ ขจัดสเกลและทำความสะอาดผิวด้วยโดยการใช้เจลจะมีข้อดี คือ ช่วยให้สามารถทำความสะอาดแนว เชื่อมในแนวตั้งได้ กระบวนการทางกล เช่น ใช้การเจียรในผิวออกด้วย grindingwheel หรือการขัด ด้วย power brushing การพ่นทราย (sand blasting) ใช้แปรงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขัด เป็นต้น ซึ่งจะ สามารถขจัดเศษโลหะหลอมจากการเชื่อมที่กระเด็นมาติดบนผิว แผ่นเหล็ก หรือแนวเชื่อมหรือแตก จากฟลักซ์หุ้มลวดเชื่อมได้ ข้อเสียของกระบวนการเชื่อมนี้ คือการสังเกตข้อบกพร่องที่มีขนาดเล็กจะ ทำได้ยาก

2. ทำ Passivation โดยใช้กรดไนตริก เข้มข้น 20-40% ที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดการฟอร์มของชั้นฟิล์มโครเมียมออกไซด์และทำการล้างน้ำภายหลังการทำ Passivation ด้วย

2.8 โลหะวิทยาในรอยเชื่อม (Welding Metallurgy)

2.8.1 HAZ transformation

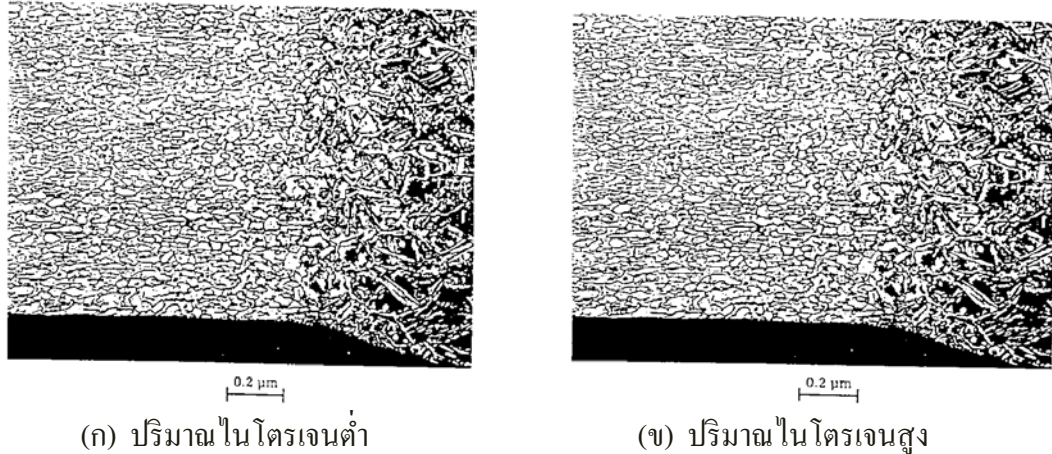
บริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิสูง (HTHAZ) เป็นบริเวณที่อยู่ถัดจากเส้นขอบเขตของการหลอมละลาย ซึ่งจะเข้าสู่จุดหลอมเหลวและกลายเป็นเฟอร์ไรต์เกือบจะสมบูรณ์ ในทางตรงกันข้ามบริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (LTHAZ) เป็นบริเวณเฟสที่สมดุลยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งมีจุดเปลี่ยนระหว่าง LTHAZ และ HTHAZ ที่มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเชื่อมแบบหลายแนว [12]

2.8.1.1 High Temperature HAZ (HTHAZ) การเปลี่ยนรูปโครงสร้างทางจุลภาคในบริเวณนี้ ถูกควบคุมด้วยวิธีปฏิบัติการเชื่อม (Welding Procedure Specification) และส่วนผสมของเหล็กกล้า โดยการให้พลังงานความร้อนในทางปฏิบัติเท่านั้น ปัญหาที่พบคือบริเวณนี้จะมีโครงสร้างที่เต็มไปด้วยเฟอร์ไรต์ ซึ่งวิธีแก้ปัญหาคือทำได้โดยหาส่วนผสมทางเคมีของโลหะฐานที่เหมาะสมที่สุด โดยเฉพาะการเพิ่มระดับไนโตรเจนของเหล็กกล้า ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ผลที่ได้สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์รุ่นใหม่ แสดงให้เห็นว่าระดับปริมาณ เฟอร์ไรต์ในบริเวณ HTHAZ นี้ปกติอยู่ในช่วง 50-70 เปอร์เซ็นต์ โดยต้องมีการควบคุมพลังงาน ความร้อนที่ให้กับแนวเชื่อม ความหนาวัสดุ อุณหภูมิเผาอ่อนก่อนเชื่อม และอุณหภูมิระหว่างแนวเชื่อม

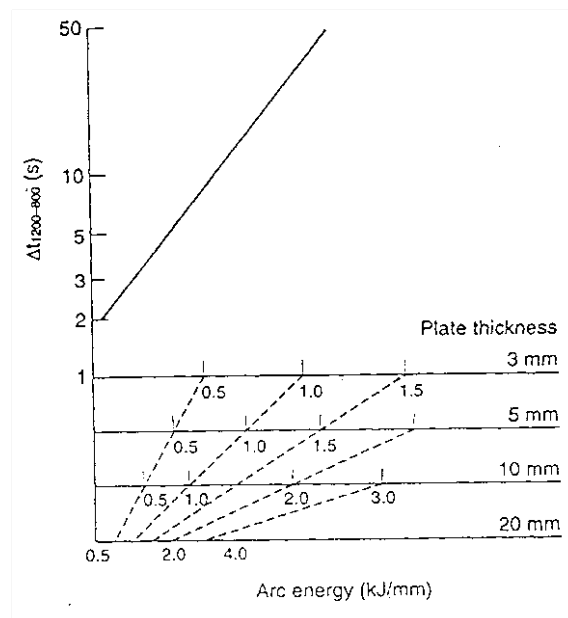
2.8.1.2 Low temperature HAZ(LTHAZ)บริเวณนี้ถูกกำหนดห่างออกมาจากขอบเขตการหลอมละลาย และเป็นบริเวณที่เคยเกิดความร้อนมาแล้ว ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้มีการฟอร์มตัวของเฟส Intermetallic ขึ้นเป็นปัญหาหลักในเหล็กกล้า ไร้สนิมชุบเปอร์ดูเพล็กซ์

2.8.1.3 การควบคุมการเปลี่ยนรูป HAZ ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมควรจะถูกควบคุมเพื่อให้มั่นใจได้ว่าสถานะการเย็นตัวทั้งหมดซ้ำเพียงพอ จะทำให้มีการฟอร์มตัวของออสเทนไนต์ เกิดขึ้นในบริเวณ HTHAZ จะเร็วพอที่จะหลีกเลี่ยงการตกตะกอนในบริเวณ LTHAZ ในทางปฏิบัติจะมีการแนะนำช่วงพลังงานความร้อนที่มีให้กับแนวเชื่อมและอุณหภูมิระหว่างแนวเชื่อมสูงสุด อย่างไรก็ตามยังไม่มี การกำหนดวัฏจักรทางความร้อนที่เหมาะสมอย่างแท้จริง การกำหนดจะต้องพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดจากลักษณะรูปร่างของรอยต่อและความหนาของวัสดุ โดยในทางปฏิบัติจะมีข้อแนะนำเวลาในการเย็นตัวของอุณหภูมิระหว่าง 800°C และ 500°C , $\Delta t_{8/5}$ หรือระหว่าง 1200°C และ 800°C , $\Delta t_{12/8}$ ซึ่งในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวมี การฟอร์มตัว ของออสเทนไนต์เกิดขึ้น และเวลาในการเย็นตัวควรจะอยู่ในช่วง 8 ถึง 30 วินาทีสำหรับ $\Delta t_{8/5}$ ซึ่งจะสอดคล้องกับช่วงเวลา 4 ถึง 15 วินาทีสำหรับ $\Delta t_{12/8}$ หรืออัตราการเย็นตัวประมาณ $20\text{-}50^{\circ}\text{C/s}$ นอกจากนี้เวลาในการเย็นตัว สามารถเทียบเป็นความสัมพันธ์

ระหว่างพลังงานความร้อนที่ให้ต่อแนวเชื่อมกับความหนาของชิ้นงานได้ จากโนโมแกรม ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และ 2.19



รูปที่ 2.18 การเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณ HAZ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์รูป (ก) ปริมาณไนโตรเจนต่ำ และ (ข) ปริมาณไนโตรเจนสูง [12]

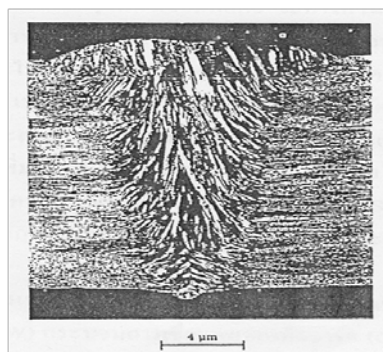


รูปที่ 2.19 โนโมแกรมสำหรับการทำนายเวลาที่ใช้ในการเย็นตัวช่วง $\Delta t_{12/8}$ ของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [12]

2.8.2 โลหะเนื้อแนวมเชื่อม (Weld Metal)

โครงสร้างจุลภาคของเนื้อแนวมเชื่อม จะแตกต่างจากวัสดุฐาน ซึ่งเป็นผลมาจากความแปรผันในส่วนผสมทางเคมีและผลทางความร้อน ในทางปฏิบัติเนื้อแนวมเชื่อม Autogeneous เกือบจะเป็นเฟอริติกทั้งหมด ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ส่วนผสมและอัตราการเย็นตัวของเนื้อแนวมเชื่อมไม่ได้สร้างความสมดุลในสัดส่วนของออสเทนไนต์เลย ดังนั้นส่วนผสมทางเคมีของโลหะเนื้อแนวมเชื่อมจึงเป็นสิ่งสำคัญ ลวดเชื่อมโดยทั่วไปจะมีส่วนผสมที่ทำให้เกิด ออสเทนไนต์มากกว่าเหล็กโลหะฐาน เพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติทางกลและการกัดกร่อน ในปัจจุบันนี้โลหะเติมมาตรฐาน ANSI/AWS และ A5.4 และ A5.9 (แท่งอิเล็กโทรด) ดังเช่นหมวด E/ER 2209 เหมาะสำหรับการเชื่อมเกรดโครเมียม 22 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ E/ER 2553 เหมาะสำหรับเกรดโครเมียม 25 เปอร์เซ็นต์ เช่น S32550 หรือสำหรับลวดโครเมียม 22 เปอร์เซ็นต์ คือ X 22.9.3.L และสำหรับอัลลอยด์ที่เกรดสูงกว่านี้ เช่น X25.9.3 CuL และ X25.9.4L จะเหมาะสมกับลวดเชื่อมชุบเปอร์ดูเพล็กซ์[12]

2.8.2.1 การฟอร์มตัวเป็นของแข็งและการฟอร์มตัวของออสเทนไนต์ (Solidification and Austenite Formation) ในเนื้อแนวมเชื่อมการแข็งตัวเป็นเฟอไรต์เกี่ยวข้องกับการแข็งตัวตามแนวแกน (Epitaxial) ซึ่งโตขึ้นจากโลหะฐานที่ขอบเขตหลอมละลายได้แก่ HTHAZ เดนไดรต์ (Dendrite) ซึ่งเป็นรูปร่างของโครงสร้างของเฟอไรต์แข็งตัว เริ่มต้นโตขึ้นในทิศทางที่สัมพันธ์กับเกรนเดียวทางความร้อน และมีการสร้างเกรนโครงสร้างเฟอริติกเป็นแบบ Columnar ดังแสดงในรูปที่ 2.20



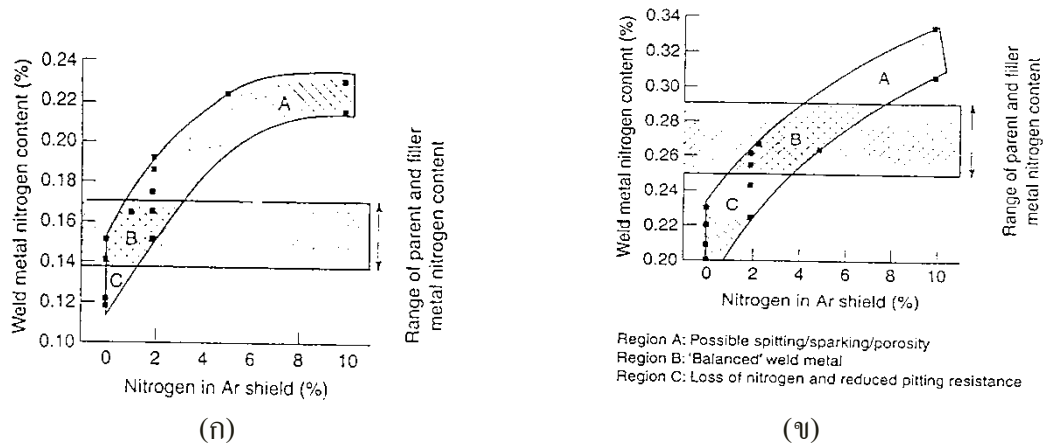
รูปที่ 2.20 โครงสร้างทางมหภาค Columnar ของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์แบบหลายแนวมเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อม GTAW [12]

ซึ่งสภาวะการเริ่มต้นสำหรับการเปลี่ยนรูปร่างไปอยู่ในสถานะของแข็งอื่นนั้น จะขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว จะเป็นตัวกำหนดโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อแนวมเชื่อมในท้ายที่สุด ขนาดและทิศทางของเกรนเฟอไรต์พร้อมทั้งปริมาณเฟอไรต์ และรูปร่างลักษณะของโครงสร้าง (Morphology) มีอิทธิพลต่อสมบัติ ของเนื้อแนวมเชื่อม ตัวอย่างเช่น ลักษณะรูปร่างของโครงสร้างส่งผลต่อความเหนียว

ด้านการต้านทานแรงกระทำของเนื้อแนวเชื่อม การแบ่งแยกทางจุลภาค เนื่องจากการแข็งตัวจะไม่มีผลสำหรับโครงสร้างที่เต็มไปด้วยเฟอริติก อย่างไรก็ตามธาตุที่เป็นส่วนประกอบในสถานะของแข็งระหว่างเฟสจะส่งผลกระทบต่อที่สำคัญทางด้านสมบัติของแนวเชื่อม

การตกผลึกออสเทนไนท์นั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเนื้อแนวเชื่อม การฟอร์มตัวในระยเริ่มต้นจะเกิดขึ้นระหว่างเกรน ตามด้วยการฟอร์มตัวภายในเกรนซึ่งขึ้นกับขนาดของเกรนเฟอร์ไรท์และอัตราการเย็นตัว การตกผลึกออสเทนไนท์ เป็นกระบวนการแพร่ที่มีการควบคุมนิวเคลียชัน (Nucleation) (อนุภาคขนาดเล็กของเฟสออสเทนไนท์ใหม่ที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส) และการโตขึ้นของเกรน สำหรับการเชื่อมที่มีการใช้พลังงานความร้อนต่ำจะมีการฟอร์มตัวของออสเทนไนท์เกิดขึ้นอีกครั้ง ซึ่งจะถูควบคุมโดยกลไก การเปลี่ยนรูปร่างที่สมดุลจากการควบคุมการแพร่กระจายของธาตุคาร์บอนและไนโตรเจน ดังนั้นอัตราการเย็นตัวจึงเป็นสิ่งสำคัญในการกำหนดขอบเขตของการเปลี่ยนรูป อัตราการเย็นตัวช้ามีผลทำให้มีการฟอร์มตัวของออสเทนไนท์มากขึ้น ในขณะที่อัตราการเย็นตัวเร็วทำให้เกิดออสเทนไนท์ลดน้อยลง อย่างไรก็ตามการ Nucleation ของออสเทนไนท์จะยังเกิดขึ้นได้ง่ายตามบริเวณขอบเกรนหรือบริเวณที่มีเกรนเฟอร์ไรท์ขนาดเล็ก โดยทั่วไปเนื้อแนวเชื่อมเหล็กกล้า ไร้สนิมคัลเพลิกซ์มีปริมาณเฟอร์ไรท์ในช่วง 30-70 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับส่วนผสมและอัตราการเย็นตัว

2.8.2.2 ก๊าซไนโตรเจน เป็นก๊าซที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติของเนื้อแนวเชื่อม โดยจะเป็นตัวควบคุมไนโตรเจนระหว่างการเชื่อม เมื่อใช้ก๊าซที่ไม่มีส่วนผสมของไนโตรเจน สำหรับกระบวนการเชื่อมแบบใช้ก๊าซคลุมแนวเชื่อมผล คือ จะทำให้ไนโตรเจนสูญเสียไป เนื่องจากความสามารถในการละลายตัวของไนโตรเจนต่ำกว่าในบ่อหลอมละลาย ช่วงการสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเหล็ก ระยะอาร์ค (ความต่างศักย์) และพลังงานความร้อนที่ให้ต่อแนวเชื่อม เพื่อเป็นการแก้ปัญหานี้การผสมไนโตรเจนในก๊าซที่ใช้ปกคลุมประมาณ 2-5 เปอร์เซ็นต์ จะสามารถป้องกันการสูญเสียไนโตรเจน และมีผลทำให้ปริมาณไนโตรเจน ในเนื้อแนวเชื่อมเพิ่มมากขึ้น ไนโตรเจน สามารถถ่ายเทไปสู่เนื้อแนวเชื่อมได้โดยปริมาณไนโตรเจนในก๊าซที่ใช้ปกคลุมแนวเชื่อม ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Sievert ที่กล่าวว่า “ความสามารถในการละลายของโมเลกุลจะไม่สัมพันธ์กับสารละลาย แต่จะแปรผันตามรากที่สองของความดัน” ไนโตรเจนที่เพิ่มเข้าไปในก๊าซที่ใช้คลุมแนวเชื่อม สามารถใช้ได้กับการเชื่อมแบบทั้งสเดนอาร์ค (GTAW) กระบวนการเชื่อมแบบเมทัลอาร์ค (GMAW) และกระบวนการเชื่อมแบบพลาสมา และมีการนำไปใช้ในการเชื่อมในอุตสาหกรรมน้ำมัน และก๊าซธรรมชาติซึ่งประสบผลแตกต่างกัน โดยปกติการสูญเสียไนโตรเจน จะไม่เกิดขึ้นเมื่อใช้กระบวนการเชื่อมแบบมี สแลกปกคลุม โดยเฉพาะกระบวนการเชื่อมด้วยไฟฟ้า ชั้นของ สแลกสามารถช่วยปกป้องไม่ให้ไนโตรเจนออกไปจากบ่อหลอมละลาย



รูปที่ 2.21 ผลของระดับปริมาณไนโตรเจนในเนื้อรอยเชื่อมโดยใช้ก๊าซอาร์กอนที่มีส่วนผสมของก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซคลุมแนวเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบทังสเตนอาร์ค (GTAW) (ก) เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรด S31803/S32205 (ข) เหล็กกล้าไร้สนิมซูเปอร์ดูเพล็กซ์ [12]

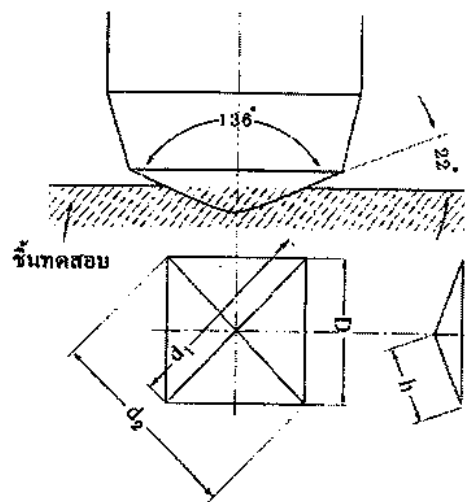
การเชื่อมแบบทังสเตนอาร์ค (GTAW) ด้วยก๊าซคลุมแนวเชื่อมที่มีส่วนผสมของไนโตรเจนที่มีระดับปริมาณส่วนผสมต่างกันจะเหมาะสมกับเกรดดูเพล็กซ์ ที่ต่างกัน เช่น การผสมไนโตรเจน 0.5-1.5 เปอร์เซ็นต์ จะป้องกันการสูญเสียไนโตรเจนในเนื้อแนวเชื่อมของเหล็กเกรดโครเมียม 22 เปอร์เซ็นต์ด้วยกระบวนการเชื่อม GTAW ในขณะที่การผสมก๊าซไนโตรเจนระหว่าง 2-4 เปอร์เซ็นต์ จำเป็นสำหรับเนื้อแนวเชื่อมของเกรดซูเปอร์ดูเพล็กซ์ การใช้ไนโตรเจนผสมในก๊าซคลุมแนวเชื่อม เพื่อการควบคุมไนโตรเจนในเนื้อแนวเชื่อมเป็นวิธีการที่เหมาะสมมากในการเชื่อมด้วยกระบวนการ GTAW และ GMAW การเติมไนโตรเจนมากเกินไปจะทำให้เกิดฟองอากาศในเนื้อแนวเชื่อม โดยรอยต่อที่ทำการเชื่อมด้วยกระบวนการ GTAW แบบหลายแนวด้วยการใช้ก๊าซที่มีส่วนผสมของไนโตรเจนเป็นสัดส่วนที่สูง จะมีปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นในบริเวณแนวรอยเชื่อม ซึ่งจะทำให้เกิดฟองอากาศในแนวเชื่อมถัดมา เนื่องจากในแนวเดิมมีการให้ความร้อนและแนวเดิมเดิมมีการหลอมละลายจากโลหะฐานต่ำ ดังนั้นปริมาณไนโตรเจนในแนวเชื่อมจึงขึ้นอยู่กับปริมาณไนโตรเจนของก๊าซและของแนวเชื่อมที่เชื่อมไปก่อนหน้านี้ และถ้าแนวเชื่อมไปก่อนมีความสามารถในการละลายของไนโตรเจนจำกัด แนวเชื่อมที่ตามมาอาจกลายเป็น Super Saturated และมีการสร้างฟองอากาศหรือรูพรุนขึ้นมา ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีการแนะนำ ว่าการใช้ก๊าซไนโตรเจนผสมในก๊าซอาร์กอนใช้เชื่อมเพียงแนวแรก และแนวให้ความร้อนเท่านั้น หลังจากนั้นให้ใช้ก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ระหว่างการเชื่อมที่เหลือจนเสร็จสมบูรณ์ ปัญหาอื่นที่เกิดจากการใช้ก๊าซไนโตรเจนได้แก่ การเกิดสิ่งสกปรกเจือปนและการสึกหรอของแท่งทังสเตนอิเล็กโทรด ซึ่งเกิดจากการปล่อยหยดโลหะเดิมมากเกินไป จากบ่อหลอมละลายหรือที่รู้จักในลักษณะของการเกิดประกายไฟ ผลอันนี้เกิดจากการที่ก๊าซไนโตรเจนออกมาจากบ่อหลอม

ละลาย ผสมกับปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซที่ใช้คลุมแนวเชื่อมซึ่งมีอยู่สูง ทำให้แก๊สอิเล็กโตรดเกิดการสีกหรือ เร่วขึ้น

2.9 การทดสอบความแข็งของวัสดุ

2.9.1 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

การทดสอบความแข็งของวัสดุแบบวิกเกอร์นี้คล้ายกับบริเนล ในแง่ที่ว่า ค่าที่ได้เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้ต่อพื้นที่ของรอยกด แต่ต่างกันที่หัวกดที่ใช้เป็นเพชรพีระมิด แรงที่ใช้มีตั้งแต่ 5 -120 กิโลกรัม ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุหัวกดที่ทำมาจากเพชรรูปพีระมิดนั้น มีฐานเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีมุมระหว่างหน้าต่อหน้าเท่ากับ 136 องศา ส่วนน้ำหนักหรือแรงกดนั้นขึ้นอยู่กับผิวชิ้นงานทดสอบ และมีขนาดตั้งแต่ 1- 200 กิโลกรัม โดยใช้เวลาในการกดประมาณ 10-30 นาที



รูปที่ 2.22 การทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ [13]

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

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

โดยที่ F = น้ำหนักที่กด (กก.)

D = ความยาวเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม (mm)

1.8544 เป็นค่า $2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$ เมื่อ θ = มุมระหว่างหน้าตรงข้ามของเพชรซึ่ง = 136°

การทดสอบแบบนี้เหมาะกับตัวอย่างที่บางและแข็งมากๆ [13]

2.9.2 การทดสอบความแข็งแรงแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)

การทดสอบความแข็งแรงของวัสดุแบบบริเนล คือใช้ลูกบอลเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งมาอย่างดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร กดลงบนผิวเรียบของวัสดุที่จะวัด โดยใช้แรง 3000 กิโลกรัม สำหรับวัสดุแข็งและ 500 กิโลกรัม สำหรับวัสดุอ่อน โดยใช้เวลา 30 วินาที เป็นมาตรฐาน จากนั้นวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบุ๋ม (Indentation) ค่าความแข็งแรงแบบบริเนล (Brinell hardness number) จะใช้สูตรคำนวณดังนี้คือ

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

เมื่อ Bhn = Brinell hardness number มีหน่วยเป็นแรง/หน่วยพื้นที่

P = แรงที่ใช้กด

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของลูกบอล

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของรอยบุ๋ม

การทดสอบความแข็งแรงแบบบริเนล ไม่เหมาะสมกับวัสดุแข็ง เนื่องจากความแข็งแรงของหัวกดไม่มากนัก นอกจากนี้ยังไม่เหมาะสมกับชิ้นทดสอบที่บางกว่าขนาดของรอยบุ๋ม การทดสอบความแข็งแรงแบบร็อกเวล (Rockwell Hardness Test) การทดสอบความแข็งแรงของวัสดุแบบร็อกเวล คล้ายกับการทดสอบแบบบริเนล แต่ใช้หัวกดเล็กกว่าและแรงน้อยกว่าค่าของแรงที่ใช้และชนิด หรือขนาดของหัวกดจะเปลี่ยนได้ ขึ้นอยู่กับสเกลของความแข็งแรงแบบร็อกเวล ที่เราจะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบ การอ่านค่าความแข็งแรงจะอ่านโดยตรงจากเครื่อง กล่าวคือ ถ้าความลึกของรอยกดลงไปตื้น ค่าของตัวเลขจะสูง แสดงว่าวัสดุมีความแข็งแรงมากวิธีการทดสอบจะให้แรงกระทำเล็กน้อยคือ 10 กิโลกรัม จากนั้นจะเพิ่มแรงกระทำขึ้น ซึ่งอาจจะมีตั้งแต่ 60-100 กิโลกรัม ขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของหัวกด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบด้วย หัวกดที่ใช้ อาจจะเป็นลูกบอลเหล็กหรือเพชรที่มีรูปกรวย การทดสอบแบบร็อกเวลนี้ ใช้อย่างกว้างขวางเพราะสามารถใช้วัดความแข็งแรงของวัสดุชนิดต่างๆ ได้มากกว่า สามารถวัดความแข็งแรงของวัสดุที่การทดสอบแบบบริเนล วัดไม่ได้ การใช้งานสะดวก อ่านค่าได้รวดเร็ว เพราะอ่านโดยตรงจากเครื่อง และเนื่องจากรอยบุ๋มมีขนาดเล็กจึงไม่ทำลายผิวของชิ้นทดสอบ

2.10 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

การตรวจสอบ โครงสร้างทางจุลภาคด้วยสายตา รวมทั้งการค้นหาเฟสของการตกตะกอนที่เกิดขึ้น อย่างเช่นเฟส  คาร์ไบด์ ไนไตรด์และอื่นๆ อย่างไรก็ตามการตีความโครงสร้างทางจุลภาคของ เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ค่อนข้างยากมาก จึงยังไม่มีเกณฑ์ที่ใช้ประเมินโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าปราศจากประสบการณ์ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างที่คล้ายคลึงกับโครงสร้างดังกล่าว และการตรวจจับหาสัดส่วนตะกอนขนาดเล็กๆ โดยใช้สายตาก็ค่อนข้างยากด้วยเช่นกัน [13]

2.10.1 การประเมินความสมดุลของเฟส

การวิเคราะห์หาปริมาณออสเทนไนต์และเฟอร์ไรท์ ในโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณเนื้อแนวเชื่อม สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ จะหาจากทั้งในบริเวณเนื้อแนวเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อนตลอดแนวความหนา ปริมาณเฟอร์ไรท์ในโครงสร้างดูเพล็กซ์สามารถวิเคราะห์ได้ 2 วิธีได้แก่ การวิเคราะห์โดยการนับจุด (Manual Point Counting) หรือ การวิเคราะห์โดย Image Analysis และการวิเคราะห์โดยใช้หลักการเฟอร์ไรต์แมกเนติก โดยทั่วไปการวิเคราะห์ด้วยวิธีการนับจุดและ Image Analysis นี้จัดเป็นการทดสอบแบบทำลาย ซึ่งวิธีเหล่านี้เป็นการวัดสัดส่วนของเฟอร์ไรท์และออสเทนไนต์ที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวอย่างทดสอบ ผลของการวัดจะรายงานในรูปของสัดส่วนโดยพื้นที่ โดยการเอาผลจากการวัดในแต่ละพื้นที่ใน 1 ระบายรวมเป็นสัดส่วนพื้นที่ทั้งหมดในตัวอย่างทดสอบเปอร์เซ็นต์เฟอร์ไรท์ที่กำหนดโดยทั่วไปคือ 35-65 เปอร์เซ็นต์ การวิเคราะห์โดยการนับจุดนี้จะปฏิบัติตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM E562 ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถวิเคราะห์ปริมาณเฟอร์ไรท์ ทั้งในบริเวณเนื้อแนวเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนได้ค่าความถูกต้องในการวัดอยู่ในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แต่การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้คือ ค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลานาน ส่วนการวิเคราะห์โดย Image Analysis เป็นการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งคอมพิวเตอร์จะแยกประเภทโครงสร้างเฟอร์ไรท์และออสเทนไนต์ออกจากกัน โดยจะประมวลผลจากความแตกต่างกันของโครงสร้างด้วยความเข้มหรือความชัดเจนของสีที่เราต้องการวิเคราะห์ วิธีการนี้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ในบริเวณโลหะฐานเท่านั้น ไม่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ในเนื้อรอยเชื่อมเนื่องจากผลของการเตรียมชิ้นงานทดสอบทางจุลภาคด้วยการกัดกรด ทำให้โครงสร้างแนวเชื่อมมีสีที่ปรากฏในคอมพิวเตอร์ไม่ชัดเจน ส่งผลให้คอมพิวเตอร์ซึ่งทำการประเมินผลตามความชัดเจนของสีวิเคราะห์ค่าปริมาณเฟอร์ไรท์คลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง ส่วนวิธีการวัดอีกวิธีหนึ่งคือการใช้หลักการทางสมบัติเฟอร์ไรต์แมกเนติก โดยใช้ระบบจำนวนตัวเลขเฟอร์ไรท์ (Ferrite Number : FN) ซึ่งใช้สำหรับในการวัดปริมาณเฟอร์ไรท์ ในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ ในเนื้อแนวเชื่อม (โดยที่ปริมาณเฟอร์ไรท์ถูกวัดโดยการดึงดูดของสปริงแม่เหล็ก) วิธีนี้ไม่ได้ถูกออกแบบสำหรับการวัดปริมาณเฟอร์ไรท์ที่มีปริมาณสูง ดังเช่นเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ และจะทำการสอบเทียบที่ค่าประมาณ 28 FN นอกจากนี้ความผันแปรในปริมาณเหล็กระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรด

ต่างๆ จะส่งผลกระทบต่อการใช้งานของแม่เหล็กสำหรับเฟสที่สมดุล เพราะไม่มีการพัฒนาความถูกต้องในระบบการวัดของแม่เหล็ก และการพิสูจน์ให้เป็นที่ยอมรับสำหรับการใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ในทางอุตสาหกรรม ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้กันมากที่สุดได้แก่การวัดเป็นแบบเปอร์เซ็นต์เฟอร์ไรท์ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนระบบการวัด FN ไปสู่ระดับของปริมาณเฟอร์ไรท์ในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ในปัจจุบัน สามารถเพิ่มความเชื่อมั่นได้มากขึ้น โดยการเพิ่มแรงที่กระทำแก่สปริงแม่เหล็กเพื่อที่จะขยายช่วงการวัดออกไป มาตรฐานที่ใช้กำหนดสำหรับบริเวณเนื้อแนวเชื่อมโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 50 ถึง 90 FN โดยมีกฎที่ใช้ในการแปลงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์คือ $0.70 (FN) = \% \text{เฟอร์ไรท์}$ อย่างไรก็ตามการวัดปริมาณเฟอร์ไรท์ในปัจจุบันจะใช้เทคนิคทางแม่เหล็ก โดยทั่วไปจะเขียนอยู่ในรูปเทอมของเปอร์เซ็นต์ โดยมีข้อจำกัดของการใช้ระบบการวัด FN ในบางบริเวณของแนวเชื่อม เครื่องมือในการวัดด้วยระบบนี้ใช้ทำการวิเคราะห์ได้ดีกับบริเวณที่ทำการวัดซึ่งมีเนื้อที่กว้างมาก และปริมาณเฟอร์ไรท์กระจายตัวดังเช่นในเนื้อแนวเชื่อม แต่ไม่สามารถให้ค่าที่ถูกต้องกับการวัดที่บริเวณเล็กๆที่มีปริมาณเฟอร์ไรท์สูง ดังตัวอย่างเช่นบริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อน และยังอ่านค่าในเนื้อโลหะฐานไม่ถูกต้องอีกด้วย เนื่องจากผลกระทบของการหักเหไปของแม่เหล็กซึ่งสัมพันธ์กับเมตริกซ์ของเฟอร์ไรท์ที่หายาก

2.11 การอบอ่อน (Annealing)

มีความมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กที่ผ่านการผลิตต่าง ๆ มาเช่น การขึ้นรูปร้อน (Forging, Hot Rolling) การขึ้นรูปเย็น (Cold Rolling, Drawing) การเชื่อม หรือการผ่านการหล่อ (Casting) ซึ่งเหล็กผ่านขั้นตอนการผลิตดังกล่าวนี้ จะมีคุณสมบัติที่ไม่ดีหลายประการ เช่นเหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน จะมีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอตามส่วนที่มีมุมแหลม ซึ่งอัตราการเย็นตัวสูงจะมีความแข็งแรงมากกว่าส่วนอื่น ๆ โครงสร้างของเหล็กบริเวณผิวจะมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยเกรนขนาดเล็ก เพราะถูกแรงกระแทก หรืออัดมากกว่าเนื้อเหล็กภายใน ทำให้คุณสมบัติไม่สม่ำเสมอถึงภายในเช่นเดียวกันเหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น มักจะมีความเครียดที่เกิดจากการถูกแรงอัด หรือบีบเหล็กค้างอยู่ มีส่วนทำให้มีความแข็งแรงไม่สม่ำเสมอ สูญเสียความเหนียว (Ductility) เหล็กที่ผ่านงานเชื่อม เช่นเดียวกัน การเชื่อมเป็นการทำให้เหล็กร้อนเป็นบางจุด การขยายตัวเมื่อถูกความร้อน และการหดตัวเมื่อถูกปล่อยให้เย็นย่อมจะเป็นการยากที่จะทำให้ได้ทั่วถึง มักจะเกิดความเครียดเหลือค้าง และโครงสร้างของเนื้อเหล็กบริเวณจุดที่ทำการเชื่อมจึง ต่างกับเนื้อเหล็กในส่วนอื่นๆ ที่ไม่ถูกความร้อนจากจุดเชื่อม คุณสมบัติของเหล็กจะขาดความไม่สม่ำเสมอเหล็กที่ผ่านงานหล่อ ยิ่งมองเห็นได้ง่ายว่าโครงสร้าง และคุณสมบัติของเหล็กจะมีส่วนที่แตกต่างกันมาก เพราะอัตราการเย็นตัวของเหล็กในแบบหล่อ (ซึ่งส่วนมากใช้ทรายเป็นวัสดุในแบบหล่อ) จะแตกต่างกันทั้งส่วนที่หนาและส่วนที่บาง ยิ่งส่วนที่เป็นแฉกมุม การเย็นตัวจะ

ยิ่งเร็วกว่าส่วนอื่น จึงมักมีความแข็งสูงจากที่กล่าวมาแล้วนี้จะเห็นได้ว่า การที่จะนำเอาเหล็กที่ผ่านกรรมวิธีขึ้นรูปต่าง ๆ ไปใช้งาน หรือนำไปตัด เจาะ กลึง ไส ย่อมจะทำให้เกิดอุปสรรคในลักษณะต่าง ๆ ที่พอจะมองเห็นได้ชัดเจน เช่น การกลึงหรือไส ถ้าเหล็กมีความแข็งไม่เท่ากันทุกส่วน การปรับมุมของมีดกลึง หรือตั้งอัตราความเร็วในการตัดจะเกิดปัญหามากมาย และผลงานที่ได้รับก็ไม่ได้เท่าที่ควร ดังนั้นเหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปขึ้นมา ก่อนจะนำไปใช้งานหรือฟอร์มรูปร่างในขั้นต่อ ๆ ไป จำเป็นจะต้องผ่านการอบให้อ่อนตัว ซึ่งลักษณะของการทำงานมีหลายวิธี

2.11.1 การอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ (Full Annealing)

มีความมุ่งหมายเพื่อให้เหล็กมีความอ่อนตัวสูง โดยเป็นการทำลาย Martensite เพื่อช่วยในการกลึงหรือไสได้ง่าย เพื่อให้เหล็กมีคุณสมบัติด้านไฟฟ้า และแม่เหล็กสม่ำเสมอ

1. Hypo Eutectoid Steels (%C < 0.8) จะเผาไปที่เหนือ Ac3 ประมาณ 30– 50°C เช่น การทำ Refinement Pearlite ที่มีขนาดโต ที่มีส่วนผสมของ 0.3% C เมื่อ Heat ไปเหนือ Ac3 ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยน Phases เป็น γ ที่ละเอียด + α หยาบ (เดิม) และเมื่อให้ Temp สูงกว่า Ac3 ประมาณ 50 °C α ก็จะเปลี่ยนเป็น γ ที่ละเอียด แล้วจากนั้นจึงลด Temp ลงช้า ๆ ประมาณ 150 ° - 200 °C/hr. เมื่อ Temp ลดลงมาถึง Room Temp ก็จะได้ Phase ของ Pearlite ที่ละเอียด + Ferrite ที่ละเอียด

2. Hyper Eutectoid Steels Annealing Temp จะอยู่เหนือ Ac1 ประมาณ 50 °C แล้วลด Temp ลงช้า ๆ โครงสร้างที่ได้ คือ Fine γ ถูกล้อมรอบด้วย Coarse Proeutectoid Cementite ซึ่งจะยังคงมีคุณสมบัติเชิงกลต่ำอยู่ แต่ก็ดีกว่าโครงสร้างที่เป็น Martensite + Cementite เดิม

2.11.2 การอบอ่อนไม่สมบูรณ์ (Incomplete Annealing)

หมายถึง การอบอ่อนที่กระทำที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้น Ac1 หรือบางกรณีอาจจะสูงกว่าเส้น Ac1 เล็กน้อย ความมุ่งหมายก็เพื่อทำลายความเครียดที่เหลืออยู่ อันเนื่องมาจากการขึ้นรูปเย็น หรือเพื่อต้องการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านการกลึง หรือไส สำหรับเหล็กบางชนิด การอบอ่อนไม่สมบูรณ์ที่สำคัญมีอยู่ 2 ลักษณะ

1. การอบอ่อนเพื่อขจัดความเครียดเหลือค้าง (Stress-relief Annealing) เป็นการอบอ่อนเพื่อมุ่งทำลายความเครียดในแท่งเหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น เช่น เหล็กที่ผ่านการรีด หรือผ่านการดึง จะทำให้กลุ่มอะตอมของเหล็กอยู่ในสภาพบิดเบี้ยว (Lattice distortion) ทำให้เหล็กมีความแข็งเพิ่มขึ้น และสูญเสียความเหนียว ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานหรือไม่เหมาะสำหรับที่จะทำการขึ้นรูปในขั้นต่อไป จะต้องทำการอบอ่อนขจัดความเครียดภายในเสียก่อน โดยเผาเหล็กไปยังอุณหภูมิที่ต่ำกว่า Ac1 50°C นี้สำคัญมากปกติจะใช้เวลา 1 ชั่วโมงต่อขนาดของชิ้นงาน 1 ลบ.นิ้ว (1 hr/inch³) แต่ถ้า Martensite

BreakDown เป็น $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ (Sorbite) ถ้าต้องการที่จะใช้เวลาในการทำ Stress Relief นาน ก็จะต้องเผาเหล็กไปที่อุณหภูมิไม่เกิน 200°C

2. การอบอ่อนเพื่อความอ่อนตัวสูง (Spheroidizing (Spheroidize Annealing) เป็นกรรมวิธีการอบอ่อนที่ใช้กับเหล็กที่มีคาร์บอนสูงประมาณ 0.7 – 12% C ซึ่งโครงสร้างของเหล็กจะประกอบไปด้วย Pearlite และ Proeutectoid Cementite ตามขอบเกรน ลักษณะโครงสร้างเช่นนี้ เหล็กจะมีคุณสมบัติด้านความเหนียวลดลง และอีกประการหนึ่ง คุณสมบัติทางด้านการกลึงหรือไส (Machinability) จะไม่ดี จะกลึงให้มีผิวเรียบได้ยาก เพราะปลายแหลมของมีดกลึง ในขณะที่ตัดจะผ่านเนื้อเหล็กอ่อน (Ferrite) และผ่านเนื้อเหล็กที่แข็ง (Cementite) ต้องทำให้ Proeutectoids Cementite เกิดลักษณะที่ไม่ต่อเนื่อง และ Eutectoid Cementite (ใน Pearlite) เกิดลักษณะเป็นเม็ดกลมเล็กๆ (Spheroid) ไม่เป็นลักษณะแถบบาง ๆ (Lamellar) ซึ่งจะกระทำได้โดยการนำเหล็กไปเผาที่อุณหภูมิเหนือเส้น Ac_1 เล็กน้อย ($730^\circ\text{C} - 770^\circ\text{C}$) สำหรับเหล็กที่มีคาร์บอนสูงกว่า 0.8% หรือถ้าเหล็กมีคาร์บอนอยู่ใกล้ระหว่าง 0.7 – 0.8% จะเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า Ac_1 เล็กน้อย แล้วปล่อยให้สูงขึ้นไปกว่า Ac_1 ทำสลับกันไปโดยใช้เวลาประมาณ 10 – 15 ชั่วโมง จากนั้นจึงปล่อยให้เย็นในอากาศ ในขณะที่เหล็กอยู่เหนืออุณหภูมิ Ac_1 เล็กน้อย Cementite ใน Pearlite จะขาดเสถียรภาพเกิดการขาดเป็นช่วง ๆ และเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า Ac_1 Cementite ที่เกิดจากการแตกตัวของ Austenite จะไปรวมตัวกับ Cementite ที่เหลืออยู่ ทำให้ไม่เกิดเป็นแถบบาง ๆ และเหล็กถูกเผาให้อยู่ในช่วงนี้เป็นระยะเวลานาน Cementite จะค่อย ๆ ปรับตัวในฟอร์มที่มีเสถียรภาพมากที่สุด คือ ค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นเม็ดกลม ทำให้เหล็กมีทั้งความอ่อนตัว และความเหนียว การกลึง หรือไส จะได้ผิวเรียบเพราะในขณะที่มีดกลึงตัดผ่านจะไม่มีโอกาสตัดเม็ดกลมเล็ก ๆ ของ Cementite โดยเม็ดเล็ก ๆ ของ Cementite จะหลุดออกหรือไม่ก็เบนหลบไป ทำให้มีดกลึงตัดผ่านเฉพาะเนื้อเหล็ก (Ferrite) อย่างเดียว ไม่เกิดการสั่นที่ปลายมีดกลึง ทำให้ผิวเหล็กเรียบ [14]

2.12 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Riad Badji ,et al. [15] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเฟส และสมบัติทางกล หลังการเชื่อมและอบอ่อนเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เกรด 2205 ที่อุณหภูมิ $800-1000^\circ\text{C}$ พบว่า การวางตัวของเฟอไรต์พบมากบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน และพบออสเทนไนต์ มากที่บริเวณใจกลางเนื้อเชื่อม และพบเฟส σ ซึ่งเป็น precipitation และ M_{23}C_6 โครเมียมคาร์ไบด์ ที่ขอบเกรนระหว่างออสเทนไนต์และเฟอไรต์ และอุณหภูมิในการอบอ่อนที่เหมาะสม ที่ทำให้อัตราส่วนระหว่างเฟอไรต์และออสเทนไนต์เหมาะสม คือ 1050°C อีกทั้งการที่อัตราส่วนระหว่างเฟอไรต์และออสเทนไนต์เท่ากันยังส่งผลให้สมบัติทางกลดีขึ้น

S.K. Ghosh and S. Mondal. [16] ได้ศึกษาอุณหภูมิในการบ่มแข็งเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ พบว่าจากการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 1,300°C และเย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำ หลังจากนั้นบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 700-900°C เป็นเวลา 30 นาที เกิด Precipitation Hardening ได้แก่ Secondary austenite γ_2 , Chi phase and sigma phase บนพื้น δ -ferrite และเมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มแข็งเป็น 120 นาทีพบว่าเกิด Precipitation Hardening หนาแน่นขึ้น และ Chi phase and sigma phase จะสลายไปเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มแข็งเป็น 1,000 °C

วัศพล นันทประยูร [17] ได้ศึกษาและทดสอบตัวแปรสำคัญ คือ ในการเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ มาตรฐาน ASTM A790 เกรด UNS S31803 ด้วยกระบวนการเชื่อมทั้งสแตนอาร์คอาร์กอน พบว่าตัวแปรสำคัญในการเชื่อม ได้แก่ พลังงานความร้อนที่ให้แก่อนิวเชื่อม ก๊าซรองนิวเชื่อม ก๊าซคลุมนิวเชื่อม เทคนิคการเชื่อมเสริมแนว การควบคุมการเย็นตัวหลังการเชื่อม ยี่ห้อและประเภทลวดเชื่อม การใช้น้ำยา Pickling Paste เป็นต้น โดยใช้ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์มาตรฐาน ASTM A790 เกรด UNS S31803 และวิเคราะห์หาปริมาณเฟอร์ไรต์โดยวิธีนับจุดตามมาตรฐาน ASTM E562 และการทดสอบการกัดกร่อนแบบหลุมบ่อตามมาตรฐาน ASTM G48 method A พบว่าบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมที่มีปริมาณเฟอร์ไรต์มากที่สุด ได้แก่บริเวณเนื้อรอยเชื่อมราดหน้า และบริเวณแนวเดิมเต็มชั้นสุดท้าย ในขณะที่บริเวณแนวเชื่อมรากและแนวให้ความร้อนเป็นบริเวณที่มีเฟอร์ไรต์น้อยที่สุดส่วนโครงสร้างบริเวณกระทบความร้อนที่มีปริมาณเฟอร์ไรต์มากที่สุดจะอยู่บริเวณแนวเชื่อมราดหน้าเช่นกัน และบริเวณที่มีเฟอร์ไรต์น้อยที่สุดจะอยู่ในบริเวณให้ความร้อนหรือแนวเดิมเต็มตรงบริเวณกลางแนวเชื่อม

J. Nowacki and A. Lukojc [18] ได้ศึกษาอิทธิพลของการตกตะกอนของออสเทนไนต์เฟสที่สอง ใน HAZ ของการเชื่อมรอยเชื่อมต่อชนในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ด้านความแข็งแรง และความต้านทานการกัดกร่อน ผลการวิเคราะห์พบว่า ออสเทนไนต์เฟสที่สองเกิดจากเฟสเฟอร์ไรต์ ซึ่งเป็นผลกระทบจาก Welding Thermal cycle ซึ่งมีอิทธิพลต่อด้านความแข็งแรงของรอยต่อ และความต้านทานการกัดกร่อน

เกรียงไกร วโนทยาน [19] ได้ศึกษาผลกระทบของกระแสไฟเชื่อมต่อโครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เกรด S31803 ด้วยกระบวนการเชื่อมทิก พบว่า อัตราการเย็นตัวของรอยเชื่อมต่ำจะทำให้เกิดออสเทนไนต์เกิดได้มากขึ้นและขยายขนาดใหญ่ขึ้นด้วย ทำให้พบ ออสเทนไนต์เป็นจำนวนมากในบริเวณเนื้อรอยเชื่อม (Weld metal) แต่กลับลดลงเหลือเพียงเล็กน้อยในเขตอิทธิพลความร้อน (HAZ)

เกรียงไกร แสงอำนาจเดช และคณะ[20] ได้ศึกษาอิทธิพลของการอบบ่มที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะเงินผสม 93.7 Ag-6.0Cu-0.3Sn ในการทดลองเริ่มจากหลอมเงินบริสุทธิ์ ทองแดงบริสุทธิ์ และดีบุกบริสุทธิ์ และหล่อเป็นชิ้นงาน นำไปรีดเย็น จากนั้นนำไปทำการรมวิธีทางความร้อนโดยการอบละลายเฟสด้วยอุณหภูมิต่างๆ ระหว่าง 720-760 °C ตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่าง 260-320 °C ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล ผลการทดลองพบว่าโครงสร้างจุลภาคของงานหล่อ มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ของเฟสที่มีเงินเป็นส่วนผสมหลัก (Ag rich dendrite) และโครงสร้างยูเทคติก ความแข็งมีค่า 73 วิกเกอร์ ความแข็งและความต้านแรงดึงของชิ้นงานขึ้นกับอุณหภูมิ และเวลาในการอบละลายและเวลาในการบ่ม สรุปได้ว่าสภาวะการอบบ่มที่ทำให้ได้ความแข็งสูงสุด ความต้านแรงดึงสูงสุด และความสามารถในการยืดตัวสูงสุด ควรใช้อุณหภูมิการอบละลายเฟสที่ 740 °C แล้วตามด้วยการอบบ่มที่ 300 °C ซึ่งความแข็งมีค่า 167 วิกเกอร์ ความต้านแรงดึงสูงสุดมีค่า 415 เมกะปาสคาล และความสามารถในการยืดตัวมีค่า 9.2 เปอร์เซ็นต์

J.Tusek และคณะ[21] ทดลองผลกระทบของไฮโดรเจนในแก๊สอาร์กอน ที่ใช้เป็นแก๊สคลุมในงานเชื่อม สเตนเลสผสมสูง ในกระบวนการเชื่อม Tig และ Mig ในรูปแบบทั้งสองด้วยค่าความแตกต่างของไฮโดรเจนในแก๊สคลุม ตั้งแต่ 0.5 1.0 5.0 10 และ 20 % แสดงให้เห็นถึงการที่ไฮโดรเจนเข้าไปรวมตัวกับอาร์กอน ทำให้คุณสมบัติของแก๊สอาร์กอนเปลี่ยนไป ทำให้การอาร์กเสถียร(คงที่) ทำให้แรงดันในการอาร์กสูงขึ้น และคงที่ มีการหลอมละลายได้ดีในกระบวนการเชื่อม Tig ที่การใช้ไฮโดรเจน 10 %แก๊สอาร์กอน 90 % ให้ผลการเชื่อมที่ดี และในการเชื่อม Mig ทำให้การหลอมละลายมีประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่น้อยกว่าการเชื่อม Tig

G.M.GOODWIN [22] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของปริมาณความร้อนในระหว่างเชื่อม และกระบวนการเชื่อมต่อการเกิดรอยร้าวในเนื้อโลหะ รอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ใช้วิธีการเชื่อม GTAW เปลี่ยนแปลงความเร็วเชื่อมและกระแสไฟฟ้าเชื่อม เพื่อให้ได้รอยซึมลึกที่สมบูรณ์เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316 พบว่า เมื่อใช้ความเร็วเชื่อมลดลงและกระแสไฟฟ้าเชื่อมเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้น จึงสรุปว่า อิทธิพลตัวแปรการเชื่อมGTAW เมื่อกำหนดให้ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมคงที่ รอยแตกร้าวจะเกิดขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของบ่อน้ำโลหะ และการกระจายของความเค้น (Stress Distribution)