

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

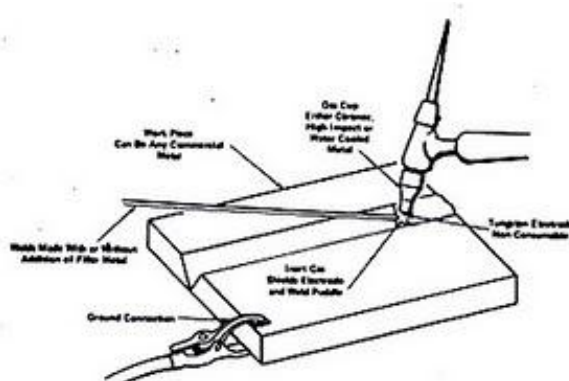
การศึกษาผลกระทบของฟลักซ์ต่อสมบัติการเชื่อมทิก (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW) ของ เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (AISI 2205) ประกอบด้วย เนื้อหาที่สำคัญและเกี่ยวข้องในการวิจัยครั้งนี้

- 2.1 กระบวนการเชื่อม (Gas Tungsten Arc Welding)
- 2.2 ความหมายของเหล็กกล้าไร้สนิม
- 2.3 ประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม
- 2.4 ธาตุและการให้คุณสมบัติของธาตุที่ผสมลงในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม
- 2.5 การเลือกใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิม
- 2.6 เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex)
- 2.7 การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม
- 2.8 สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมต่อความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม
- 2.9 อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อม
- 2.10 การพาของโลหะหลอมเหลวในแอ่งรอยเชื่อม
- 2.11 การแข็งตัวของโครงสร้างผลึกของแนวเชื่อม
- 2.12 โลหะวิทยาในรอยเชื่อม (Welding Metallurgy)
- 2.13 การทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ
- 2.14 คุณสมบัติของธาตุต่าง ๆ ที่ใช้ทำฟลักซ์
- 2.15 คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal Properties)
- 2.16 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการเชื่อม Gas Tungsten Arc Welding

กรรมวิธีเชื่อม TIG เป็นกรรมวิธีการเชื่อมโลหะโดยใช้ขั้วงานหลอมละลายด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นจากการอาร์ก ระหว่างลวดทังสเตน (Non-consumable Electrode) กับชิ้นงานเชื่อม โดยมีแก๊สเฉื่อยปกคลุมบริเวณเชื่อมและบ่อหลอมละลายเพื่อไม่ให้เกิดบรรยากาศภายนอก เข้ามาทำปฏิกิริยากับบริเวณดังกล่าว ความร้อนที่ได้รับจากการอาร์กสูงประมาณ 1942°C ($35,000^{\circ}\text{F}$) ในการเชื่อมนี้ลวดทังสเตนจะทำหน้าที่อาร์กเพื่อให้เกิดความร้อนเท่านั้น โดยจะไม่มี การเติมลงในแนวเชื่อม ถ้าต้องการเติมเนื้อโลหะเชื่อมต้องเติมลวดเชื่อมลงไป การเชื่อม TIG เป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่สามารถเชื่อมโลหะได้เกือบทุกชนิด ซึ่งรวมถึงโลหะผสม เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน, เหล็กกล้าผสม, เหล็กกล้าไร้สนิม, โลหะทนความร้อน, อะลูมิเนียมผสม, ทองแดงและทองแดงผสม เป็นต้น สำหรับตะกั่วและสังกะสีไม่ควรเชื่อม TIG เนื่องจากวัสดุทั้งสองมีจุดหลอมต่ำ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่แตกต่างกับอุณหภูมิของเปลวอาร์คมาก

และเนื้อวัสดุดังกล่าวหลอมละลายจะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอ ส่วนโลหะที่มีจุดหลอมสูงสามารถเชื่อมด้วย TIG ได้ดี แต่ถ้าโลหะดังกล่าวเคลือบไว้ด้วยตะกั่ว, สังกะสี, ดีบุก, แคดเมียมหรือ อะลูมิเนียม จะต้องใช้วิธีเชื่อมที่พิเศษแนวเชื่อม ที่เคลือบนี้จะมีคุณสมบัติเชิงกลต่ำ เนื่องจากเกิดการผสมของวัสดุดังกล่าวภายใน แนวเชื่อมวิธีป้องกันควรกำจัดวัสดุที่เคลือบบนโลหะออกก่อน ที่จะทำการเชื่อม และเมื่อเชื่อมเสร็จแล้วจึงซ่อมแซมใหม่ [5]



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของการเชื่อม TIG [5]

2.1.1 ข้อดีของการเชื่อม TIG

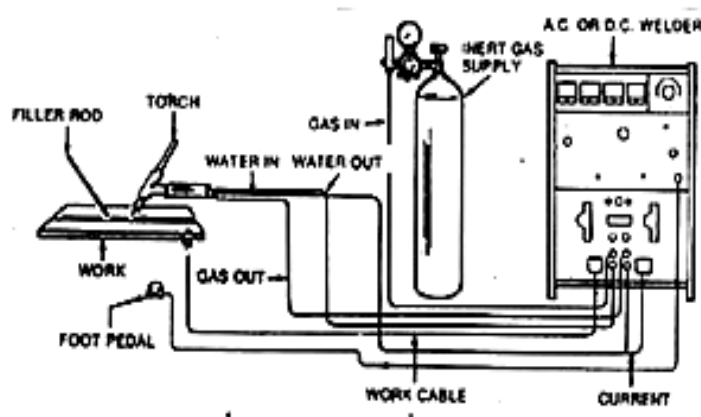
1. ไม่ต้องใช้ฟลักซ์ แนวเชื่อมที่ได้จึงไม่จำเป็นต้องเคาะสแลก ซึ่งเป็นการตัดปัญหาในเรื่องสแลกฝังในแนวเชื่อม เพราะว่า สแลกที่ฝังอยู่ในแนวเชื่อม จะทำให้แนวเชื่อมไม่แข็งแรงและสุกร้อน ทั้งนี้การเชื่อมโดยใช้แก๊สเฉื่อยซึ่งทำหน้าที่แทนฟลักซ์สำหรับปกคลุมแนวเชื่อมไม่ให้ออกซิเจนแลไนโตรเจนจากบรรยากาศเข้ารวมตัวกับแนวเชื่อมขณะหลอมละลาย
2. ส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นจะมีส่วนผสมเหมือนกับลวดเชื่อม จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น เนื่องจากแก๊สเฉื่อยที่ปกคลุมแนวเชื่อมจะไม่รวมตัวทำปฏิกิริยากับโลหะ ดังนั้นแนวเชื่อมที่ได้จากกรรมวิธีการเชื่อมแบบ TIG จึงแข็งแรง ทนต่อการกัดกร่อนและเหนียวกว่าแนวเชื่อมที่ได้จากกรรมวิธีอื่นๆ
3. สามารถเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม
4. สามารถมองเห็นแนวเชื่อมและบ่อหลอมละลายได้อย่างชัดเจน เนื่องจากการอาร์คที่เกิดขึ้นสะอาด ไม่มีควันและสแลกปกคลุม
5. การเชื่อม TIG ให้ความร้อนสูงและเป็นบริเวณแคบ จึงไม่ทำให้ความร้อนในงานเชื่อมแผ่กระจายกว้างเกินไป งานจึงมีโอกาสบิดตัวน้อย
6. ไม่มีเม็ดโลหะ (spatter) เกิดขึ้นที่บริเวณแนวเชื่อม เนื่องจากการเชื่อม TIG ไม่มีการส่งผ่านน้ำโลหะลวดเชื่อมข้ามบริเวณอาร์คสู่บ่อหลอมละลาย

7. สามารถเชื่อมต่อเหล็กเหนียวที่มีความหนาแตกต่างกันได้
8. สามารถควบคุมแนวเชื่อมได้ง่าย

2.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้กับการเชื่อม TIG [6]

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 2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้กับการเชื่อม TIG [7]

2.1.2.1 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, ต้องการกำลังต่ำในขณะเดินเครื่อง (ไม่ทำการเชื่อม)

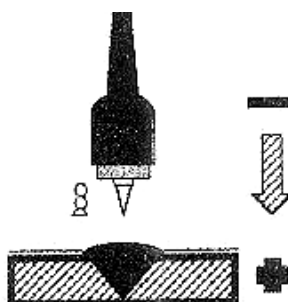


รูปที่ 2.3 เครื่องเชื่อมTIG [7]

2.1.2.2 ระบบกระแสไฟที่ใช้ในการเชื่อม ที่นิยมใช้ในกระบวนการเชื่อมทิกนั้นมี 3 แบบด้วยกันคือ

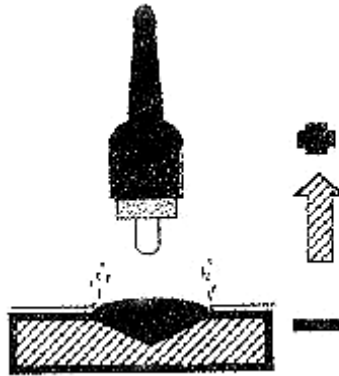
1. กระแสตรงขั้วลบ (Direct Current Electrode Negative) DCEN.
2. กระแสตรงขั้วบวก (Direct Current Electrode Positive) DCEP.
3. กระแสสลับความถี่สูง (Alternating Current & High Frequency) ACHF.

2.1.2.2.1 กระแสตรงขั้วลบ (DCEN) กระแสตรงขั้วลบ หมายความว่า หัวเชื่อม หรือทั้งสแตนอิเล็กโทรรดใช้กระแสไฟเชื่อมเป็นขั้วลบ และกระแสไฟเชื่อมขั้วบวกเป็น ตำแหน่งของชิ้นงาน โดยบรรจุไฟฟ้าลบไหลจากหัวเชื่อมหรืออิเล็กโทรรดไปสู่ชิ้นงาน ความร้อนจะเกิดขึ้นที่ชิ้นงานมาก โดยเกิดที่ชิ้นงานประมาณ 70 % และเกิดที่ทั้งสแตนอิเล็กโทรรดประมาณ 30 % แนวเชื่อมที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแคบแต่กินลึกมากดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระแสตรงขั้วลบ (DCEN) [7]

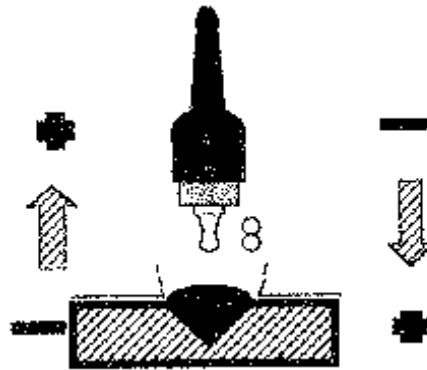
2.1.2.2.2 กระแสตรงชั่ววอก DCEP กระแสตรงชั่ววอกหมายความว่า ทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรดใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมเป็นชั่ววอก และกระแสไฟฟ้าเชื่อมลบเป็นตำแหน่งของชิ้นงาน ดังนั้นความร้อนจะเกิดขึ้นที่ชิ้นงานมาก โดยเกิด ที่ชิ้นงานประมาณ 30% และเกิดที่ทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรดประมาณ 70% แนวเชื่อมจะมีลักษณะแบนกว้างกินล็กน้อย แท่งทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรดที่ใช้กับกระแสไฟเชื่อมนี้ จะมีขนาดโตกว่าทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรด ที่ใช้กับกระแสไฟฟ้าแบบ DCENและACHFดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กระแสตรงชั่ววอก (DCEP) [7]

2.1.2.2.3 กระแสไฟสลับและระบบความถี่สูง AC.HF กระแสไฟสลับเป็นสิ่งจำเป็นในการเชื่อมโลหะที่มีออกไซด์ฉาบอยู่บริเวณผิวของชิ้นงาน ถ้าพิจารณาคลื่นของกระแสไฟสลับ จะพบว่าในครึ่งไซเคิลแรกที่ทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรดเป็นชั่ววอก ออกไซด์ที่ผิวของชิ้นงานตรงบริเวณที่เกิดการอาร์ค จะถูกขจัดออกไปจากบริเวณนั้น ในครึ่งไซเคิลต่อมาทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรดเป็นชั่วลบ ขณะที่ทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรดจะเย็นลง แต่กลับเกิดความร้อนมากที่ชิ้นงานตรงบริเวณที่เกิดการอาร์ค จึงทำให้เกิดบ่อหลอมละลายบนชิ้นงาน แต่ความเป็นจริงแล้วออกไซด์และความชื้น จะเป็นฉนวนกันไม่ให้กระแสผ่านจาก แท่งทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรดไปยังชิ้นงานได้สะดวกนั้น เพื่อเป็นการขจัดปัญหาเหล่านี้จึงนำเอาระบบความถี่สูง (High Frequency) มาช่วยกระตุ้นการอาร์คในช่วงแรกที่มีลักษณะเป็นกระแสบวก (AC) การทำแบบนี้จะทำให้กระแสไหลออกจากแท่งทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรดไปสู่ชิ้นงานได้ตลอดเวลาและสม่ำเสมอ กระแสสลับและความถี่สูง (ACHF) มีผลดีต่อการเชื่อมอลูมิเนียมทำให้การซึมลึกในการเชื่อมและขจัด Aluminum Oxide ที่พื้นผิวในขณะที่ทำการเชื่อม จึงทำให้การซึมลึกในการเชื่อมมีผลดีและกระแสไฟฟ้าเชื่อมทำให้ออกไซด์ที่เคลือบผิวของชิ้นงานแตกออกจากกัน ก่อนที่ชิ้นงานจะหลอมละลาย กระแสไฟสามารถกำจัดสิ่งสกปรกออกได้และสามารถเชื่อมอลูมิเนียมที่มีความบางประมาณ 1 มิลลิเมตร โดยไม่ต้องป้อนลวดเชื่อมและให้ความร้อนก่อนการเชื่อม การใช้ชนิดของกระแสไฟที่ แตกต่างกันมีผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่แตกต่างกัน จึงเป็นผลให้มีลักษณะการกินล็ก ตรงบริเวณที่เกิดการอาร์ค

นั้นแตกต่างกันตลอดจนการเลือกใช้ทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรด ให้เหมาะสมสำหรับกระแสไฟเชื่อม นั้น ๆ ด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กระแสไฟสลับและระบบความถี่สูง AC.HF [7]

2.1.2.3 ระบบน้ำหล่อเย็น ในการเชื่อม TIG ด้วยกระแสที่สูงกว่า 150 แอมป์ หรือเชื่อมแบบต่อเนื่อง จะทำให้เกิดความร้อนสะสมขึ้นในหัวเชื่อมและสายเชื่อม และอาจจะเป็นเหตุให้อุปกรณ์ดังกล่าวชำรุดเสียหายได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องใช้น้ำระบาย ความร้อนสายและหัวเชื่อม แหล่งของน้ำหล่อเย็นอาจจะเป็นแบบถังหมุนเวียนที่มีมอเตอร์ขับหรือน้ำจากแหล่งภายนอก เช่น น้ำจากก๊อกก็ได้ โดยน้ำจะผ่าน Solenoid valve สำหรับควบคุมอีกทีหนึ่ง ซึ่งวาล์วของน้ำที่ Solenoid valve จะเปิดเมื่อทำการเชื่อมและวาล์วจะปิดเมื่อหยุดการเชื่อม

ข้อเสียของระบบหล่อเย็นแบบหมุนเวียน คือ

1. ใช้งานไม่สะดวก
2. ถ้าระบบระบายความร้อนขัดข้อง เครื่องเชื่อมจะใช้งานไม่ได้
3. ต้นทุนสูง

2.1.2.4 แก๊สปกคลุม (Shielding Gas) ทำหน้าที่ปกคลุมแนวเชื่อมและบ่อหลอมละลายเพื่อไม่ให้อากาศโดยรอบเข้าไปทำปฏิกิริยาในขณะที่เชื่อม [8]

1. แก๊สอาร์กอน (Argon) เป็นแก๊สเฉื่อยที่ได้จากกรรมวิธีผลิตออกซิเจน ซึ่งจะมีอยู่ในอากาศประมาณ 0.9 % แก๊สอาร์กอนจะทำให้การเริ่มต้นเชื่อมง่ายให้อาร์คที่เปลวเรียบและสม่ำเสมอ แก๊สอาร์กอนมีความหนาแน่นมากกว่าบรรยากาศ และถึงสำหรับเก็บอาร์กอนเหลว จะต้องมีความดันที่สามารถเก็บแก๊สอาร์กอนที่อุณหภูมิต่ำกว่า -184 องศาเซลเซียส การใช้งานกับโลหะทุกชนิด มีความ

บริสุทธิ์ 99.95 % ดีกว่า แก๊สฮีเลียม(He) คือ อาร์คเรียบและนิ่งกว่า ชี้มลิกน้อยกว่า Cleaning Effect ดีกว่า อัตราการไหลน้อยกว่า และเริ่มต้นอาร์คดีกว่า และราคาถูกกว่า

2. แก๊สฮีเลียม (Helium) เป็นแก๊สเฉื่อยที่ได้จากกรรมวิธีผลิตแก๊สธรรมชาติ Ionization Potential มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าดีเลิศ ทำให้เปลวอาร์คแผ่ขยายกว้างความเข้มของความร้อนสูงกว่า แก๊สอาร์กอน (Ar) ทำให้แนวเชื่อมเชื่อมลิกได้ดี การใช้แก๊สฮีเลียมเหมาะกับการเชื่อมด้วย วิธีอัตโนมัติ ที่ให้ความเร็วในการเชื่อมสูง ไม่เกิดรูพรุนและการกัดแหว่งแนวเชื่อมรวมทั้งแนวเชื่อมมีบริเวณ เขตอิทธิพลของความร้อนจากการเชื่อมแคบ การใช้งานกับโลหะทุกชนิด ความบริสุทธิ์ 99.99 % ราคาค่อนข้าง

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 และลดรูพรุน ใช้งานกับเหล็กกล้า Cr/Ni และ Ni

2.1.2.5 หัวเชื่อมและอุปกรณ์ประกอบ (Welding Torch and Equipment) [8]

หัวเชื่อมสำหรับการเชื่อม TIG ควรจะมีความแข็งแรง, กะทัดรัด, เบาและหุ้มด้วยฉนวนที่ดี หน้าที่ของหัวเชื่อมที่สำคัญ ได้แก่

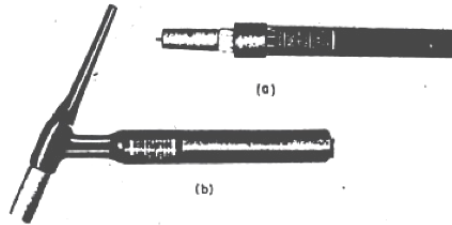
1. เป็นที่จับถือนขณะเชื่อม
2. เป็นทางผ่านและบังคับแก๊สปกคลุมเพื่อให้ปกคลุมบริเวณอาร์ค
3. นำกระแสไฟเชื่อมสู่บริเวณอาร์ค
4. เป็นทางผ่านเพื่อให้ระบายความร้อนออกจากอุปกรณ์ที่อยู่ภายในหัวเชื่อม
5. เป็นตัวจับลวดทั้งสแตน

หัวเชื่อมจะประกอบด้วย สายเชื่อม สายยางและข้อต่อสำหรับต่อหัวเชื่อมเข้ากับเครื่องเชื่อม แก๊สปกคลุมและน้ำระบายความร้อน สำหรับหัวเชื่อม TIG ชนิดที่ควบคุมการเชื่อมด้วยมือ โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

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

หัวเชื่อม TIG มีหลายขนาดตั้งแต่น้ำหนัก 3 ออนซ์จนถึงจนขนาด 1 ปอนด์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของ กระแสเชื่อม, ลวดเชื่อมและ Nozzle ส่วนรูปร่างจะแตกต่างกันตามบริษัทผู้ผลิต แต่โดยทั่วไปแล้วจะมีทั้งแบบ หัวเชื่อมเป็นมุมและหัวตรง โดยทั่วไปนิยมใช้หัวเอียง ซึ่งลวดเชื่อมจะเอียงทำมุม 120° กับมือ

จับ อาจจะเป็นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำหรืออากาศก็ได้ ส่วนแบบหัวตรงนั้นลวดเชื่อมจะอยู่ในแนวเดียวกับมือจับ และหัวเชื่อมบางอันจะมีสวิตช์ไฟฟ้า เพื่อควบคุมการไหลของแก๊สปกคลุม โดยการบังคับด้วยมือ

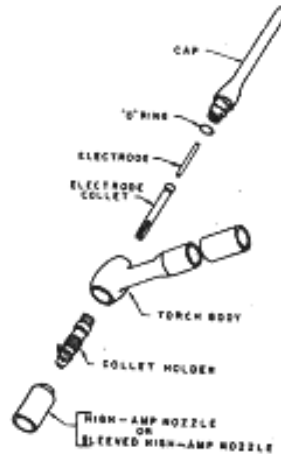


รูปที่ 2.7 หัวเซรามิกสักรอบทั้งสแตนเลสและไทเทเนียม [8]

หัวเชื่อมชนิด Air Cooled นั้น ที่จริงแล้วระบายความร้อนด้วยแก๊สปกคลุม สำหรับอากาศที่ระบายความร้อนออกจะเป็นอากาศที่อยู่โดยรอบหัวเชื่อม ซึ่งจะระบายความร้อนออกได้น้อยมาก หัวเชื่อมชนิดนี้น้ำหนักเบา ขนาดกะทัดรัด และราคาถูกกว่าแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ ส่วนมากใช้กับกระแสเชื่อมไม่เกิน 150 แอมป์ ซึ่งใช้ในการเชื่อมโลหะบางและ Duty Cycle ต่ำ ลวดเชื่อมทั้งสแตนที่ใช้กับหัวเชื่อมแบบ Air Cooled จะมีความร้อนมากกว่าลวดที่ใช้กับหัวเชื่อมชนิด Water Cooled โดยเฉพาะถ้าใช้ลวดทั้งสแตนบริสุทธิ์แล้วจะทำให้อุณหภูมิของทั้งสแตนจากลวดเชื่อมเดิมลงในบ่อหลอมละลายของแนวเชื่อมได้เมื่อเชื่อมด้วยกระแสสูง หัวเชื่อมชนิด Water Cooled มีสายต่ออยู่ 3 เส้นคือ

1. สายเชื่อม เป็นสายเคเบิลทองแดงที่หุ้มด้วยยาง และยังทำหน้าที่เป็นท่อน้ำทิ้งของน้ำระบายความร้อน สายเคเบิลทองแดงจะมีขนาดเล็กกว่าสายเชื่อมธรรมดา เมื่อใช้กระแสไฟที่เท่ากัน
2. ทางเข้าของน้ำระบายความร้อน เป็นสายยางกลางที่ต่อออกจาก Solenoid valve ของน้ำหล่อเย็นไปยังหัวเชื่อม
3. ทางเข้าของแก๊สปกคลุม เป็นสายยางกลางที่ต่อจาก Solenoid valve แก๊สปกคลุมไปยังตัวเชื่อม

2.1.2.6 ส่วนประกอบของหัวเชื่อม TIG ในการเตรียมหัวเชื่อมประการแรกจะต้องเข้าใจหลักการทำงาน และวิธีเลือกใช้ส่วนประกอบของหัวเชื่อมได้ถูกต้อง ส่วนประกอบของหัวเชื่อม TIG มีดังนี้



รูปที่ 2.8 แสดงส่วนประกอบหัวเชื่อม TIG [8]

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 ซึ่งกำหนดขนาดตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทั้งสแตน

5. Collet Holder ยึดติดกับลำตัวหัวเชื่อมด้วยเกลียว Collet Holder ทำด้วยทองแดงผสม ทำหน้าที่บีบจับ Collet ให้จับลวดทั้งสแตนได้แน่น

6. Nozzle ที่ใช้ในการเชื่อม TIG มีอยู่หลายชนิดได้แก่ ชนิดกระเบื้อง เซรามิก, โลหะ, แก้ว (Fused quartz) และชนิด Dual-Shield Nozzle, Nozzle ชนิดทำด้วย ceramic เป็นแบบที่นิยมใช้กันและราคาถูก แต่สำหรับ Nozzle โลหะที่ระบายความร้อนด้วยน้ำจะมีอายุการใช้งานนานกว่าแบบเซรามิก

7. ลวดเชื่อมทั้งสแตน (Tungsten Electrodes) ลวดเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อม TIG จะแตกต่างจากลวดเชื่อมอื่นๆ เนื่องจากลวดเชื่อมทั้งสแตน ซึ่งทำหน้าที่สำหรับการอาร์คเท่านั้น ไม่ได้เป็นลวดสำหรับเติมแนวเชื่อม ทั้งสแตนมีจุดหลอมเหลวสูง ประมาณ 6170°F (3410°C) จึงนิยมใช้ทำลวดเชื่อมชนิดไม่สิ้นเปลือง ซึ่งมีความบริสุทธิ์ประมาณ 99.5% ส่วนทั้งสแตนผสมนั้นจะประกอบด้วยธาตุผสมต่างๆ (thoria หรือ airconia) ทั้งสแตนอิเล็กโทรด ทำจากโลหะทั้งสแตนและโลหะทั้งสแตนผสม โดยโลหะทั้งสแตนเป็นโลหะที่มีจุดหลอมละลาย (Melting Point) สูงมาก ($3,140^{\circ}\text{C}$) ซึ่งจะสูงกว่าโลหะ ชนิดอื่นๆ ลวดทั้งสแตนผสมจะผสมด้วยโลหะธาตุทอเรียม (Thorium) หรือเซอร์โคเนียม (Zirconium)

อิเล็กโทรดทั้งสแตนในการเชื่อมแบบ TIG จะทำหน้าที่ให้เกิดการอาร์ค ไม่ใช่โลหะเติมหรือลวดเชื่อม จึงเป็นอิเล็กโทรดที่ไม่หลอมละลายขนาดอิเล็กโทรดทั้งสแตนมีหลายขนาด ซึ่งมีขนาดความโตวัดที่เส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 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 นิ้วทั้งสแตนอิเล็กโทรดจะต้องปราศจากสิ่งสกปรกติดที่ผิวลวด ไม่มีรอยแตก และ สลักฝังใน เพราะจะทำให้แนวเชื่อมที่ได้มีคุณภาพต่ำ ผิวอิเล็กโทรดทั้งสแตนมี 2 ลักษณะ คือ แบบผิวเจียรไนกับแบบผิวล้างด้วยน้ำยาเคมี ซึ่งแบบผิวเจียรไนจะมีผิวเป็นมันได้มาตรฐานและราคาสูงกว่าแบบผิวที่ล้างด้วยน้ำยาเคมีขนาดของกระแสไฟในการเชื่อมแบบ TIG จะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับอยู่กับชนิดและขนาดของชิ้นงาน การออกแบบรอยต่อ ตำแหน่งท่าเชื่อม ชนิดของแก๊สปกคลุม และชนิดของหัวเชื่อม เป็นต้นความสามารถในการนำกระแสไฟเชื่อมของอิเล็กโทรดทั้งสแตน ในแต่ละขนาดขึ้นอยู่กับชนิดและหัวของกระแสไฟด้วยคือ กระแสไฟตรงขั้วลบมีความสามารถในการนำกระแสไฟเชื่อมได้มากที่สุดแต่นำกระแสได้น้อยลงเมื่อใช้กระแสสลับ และจะนำกระแสได้น้อยที่สุดเมื่อใช้กระแสไฟตรงขั้วบวก ชนิดและขนาดของอิเล็กโทรดทั้งสแตนมีความสำคัญคือ ช่วยให้คุณภาพของชิ้นงานได้ตามที่ต้องการ ถ้าได้ขนาดที่เหมาะสม รวมทั้งจะต้องรู้ถึงกระแสไฟเชื่อม (แอมป์) สำหรับทั้งสแตนนี้ด้วยเพราะทำให้ส่วนปลายของทั้งสแตนไม่ถูกทำลายจากการเชื่อม

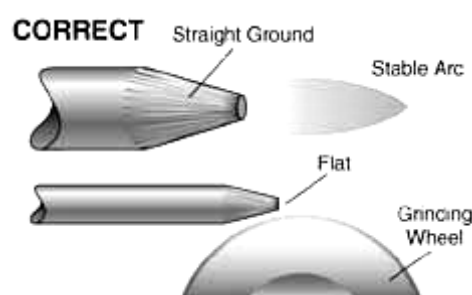
ความแตกต่างและข้อดีข้อเสียของอิเล็กโทรดแต่ละชนิดดังนี้

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

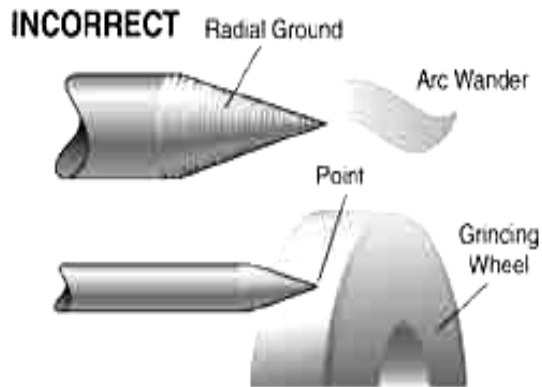
2. ทอริเอตทั้งสแตน (Thoriated Tungsten) เป็นอิเล็กโทรดทั้งสแตนที่ผสมด้วยโลหะทอริยม โค้ดปลายลวดสีเหลือง สัญลักษณ์คือ EWPT-1 สำหรับทั้งสแตนที่ผสมทอริยมร้อยละ 1 และสีแดง สำหรับทั้งสแตนที่ผสมทอริยม 2% สัญลักษณ์คือ EWPT-2 การนำโลหะทอริยมผสมกับลวดทั้งสแตนจำนวนเพียงเล็กน้อย จะทำให้คุณภาพในการแตกตัวของอิเล็กตรอนดีขึ้น มีผลทำให้การเริ่มต้นการอาร์คดีขึ้นด้วย และมีความสามารถในการนำกระแสไฟได้ในปริมาณสูง ส่วนผสมของทอริยมร้อยละ 1-2 จะเป็นการเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าได้สูงขึ้นถึงร้อยละ 50 กระแสไฟฟ้าจะไหลได้ดี ทำให้ง่ายต่อการการเริ่มต้นอาร์ค เปลวอาร์คจะคงที่โดยที่อายุการใช้งานชนิดโลหะทอริยมผสมกับลวดทั้งสแตนร้อยละ 1 จะยาวกว่าชนิดร้อยละ 2 ทอริเอตทั้งสแตนเหมาะกับการเชื่อมเหล็กทั่วไป ด้วยกระแสไฟตรงและต้องลับแต่งปลายลวดให้เรียวแหลม โดยเฉพาะใช้กับกระแส

ไฟตรงขั้วลบ ลวดทอริเอทเต็ดทั้งสแตนรอยละ 2 จะเป็นชนิดใช้กันอย่างแพร่หลายมากทอริเอทเต็ดทั้งสแตนอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีลักษณะพิเศษคือ นำเอาลวดทอริเอทเต็ดทั้งสแตนมาอัดรวมไว้ในลวดทั้งสแตนบริสุทธิ์ให้กลายเป็นอิเล็กโทรดชนิดใหม่ โดยใช้ลวดทอริเอทเต็ดเพียง 1/4 ของพื้นที่หน้าตัดตลอดความยาวของลวด เป็นลวดทั้งสแตนผสมที่มีคุณสมบัติเริ่มต้นการอาร์คได้ดีกระแสไฟไหลผ่านได้มาก และรักษารูปทรงลักษณะมนกลมของปลายลวดได้ดี ใช้ได้ดีกับการเชื่อมโลหะอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมด้วยกระแสไฟฟ้าสลับหรือใช้กระแสตรงได้ โค้ดที่ปลายลวดเป็นสีน้ำเงิน

3. เซอร์โคเนทเต็ดทั้งสแตน (Zirconiated Tungsten) อิเล็กโทรดทั้งสแตนที่มีเซอร์โคเนียมผสมอยู่ร้อยละ 0.3-0.5 โค้ดปลายลวดสีน้ำตาล เหมาะแก่กระแสไฟฟ้าสลับความถี่สูงโดยเฉพาะปลายลวด จึงต้องแต่งให้เป็นลักษณะปลายมนกลม เหมือนลวดอิเล็กโทรดทั้งสแตนบริสุทธิ์ซึ่งอิเล็กโทรดทั้งสแตนชนิดนี้สามารถป้องกันการเกิดสิ่งสกปรกที่ปลายลวดได้ดีทำให้เริ่มต้นการอาร์คได้ง่ายเหมาะกับงานที่ต้องการคุณภาพสูง และให้การอาร์คสม่ำเสมอ เป็นลวดที่มีคุณภาพทั่วไปซึ่งจะดีกว่าอิเล็กโทรดทั้งสแตนบริสุทธิ์ แต่ด้อยกว่าลวดทอริเอทเต็ดทั้งสแตนในขณะทำการเชื่อม ถ้ามีสิ่งสกปรกติดอยู่ที่ปลายทั้งสแตนอิเล็กโทรด ความชื้น ออกซิเจนและไนโตรเจนจากภายนอก สามารถเข้ามาทำปฏิกิริยากับทั้งสแตนอิเล็กโทรดที่กำลังร้อน และถ้าในการเชื่อม ปลายทั้งสแตนอิเล็กโทรดสัมผัสกับชิ้นโลหะที่กำลังหลอมละลาย จะทำให้สิ่งสกปรกติดเข้าไปในเนื้อชิ้นงานได้ การทำความสะอาดปลายทั้งสแตนอิเล็กโทรดโดยการขัดด้วยหินเจียร หรือการปรับกระแสไฟเชื่อมให้สูง แล้วทำการอาร์คทั้งสแตนอิเล็กโทรดส่วนที่สกปรกลงบนเศษโลหะที่สะอาด จนปลายทั้งสแตนอิเล็กโทรดนั้นโตขึ้น หลังจากนั้นนำส่วนปลายที่โตขึ้นไปหักออกแต่ถ้าสกปรกบ่อยๆ ควรจะเปลี่ยนใช้อันใหม่และหาสาเหตุที่เกิดสกปรกบ่อย



รูปที่ 2.9 แสดงแนวเส้นการแต่งปลายทั้งสแตนที่ถูกต้องสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม[8]



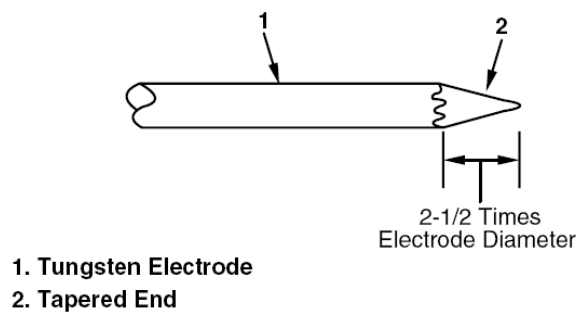
รูปที่ 2.10 แสดงแนวเส้นการแต่งปลายทั้งสแตนที่ผิดสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม [8]

ในการประกอบทั้งสแตนอเล็กโตรดเข้ากับหัวเชื่อม จะต้องแต่งส่วนปลายให้เหมาะสมกับกระแสไฟที่เชื่อมเสียก่อน ถ้าใช้กระแสไฟตรงขั้วตรง (D.C.S.P.) เช่น การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมควรจะเจียรนัยส่วนปลายของทั้งสแตนอเล็กโตรดด้านที่เชื่อมให้เรียบ เป็นมุม 30 องศา และมนปลายส่วนที่แหลมเล็กน้อย ถ้าใช้ไฟกระแสสลับความถี่สูง (A.C.H.F.) ปลายทั้งสแตนก็จะเป็นรูปรีเวต์แต่จะมนกลมที่ส่วนปลายแหลม ให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 3 ใน 4 ของขนาดทั้งสแตน และกระแสตรงกลับขั้ว (D.C.R.P.) ปลายทั้งสแตนอเล็กโตรดควรมีลักษณะมนกลมดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.11 แสดงปลายที่เจียรนัยแล้วของทั้งสแตนอเล็กโตรดในการเชื่อมแต่ละแบบ [8]

นอกจากนี้แล้วการปรับความยาวของปลายทั้งสแตนอเล็กโตรดที่เป็นมุมแหลม ก็ขึ้นกับขนาดของทั้งสแตน และท่าเชื่อม โดยปกติจะมีความยาวอยู่ที่ 0.5-1 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงปลายที่เจียรนัยแล้วของแท่งสแตนเลสเล็กโทรดในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม [8]

ตารางที่ 2.1 แสดงมาตรฐานของลวดเชื่อมแท่งสแตนเลส [8]

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

2.2 ความหมายของเหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิม หรือ สแตนเลส (อังกฤษ: Stainless steel) ในทางโลหะกรรมหมายถึงโลหะผสมเหล็กที่มีโครเมียมอย่างน้อยที่สุด 10.5% ชื่อในภาษาไทย แปลจากภาษาอังกฤษว่า stainless steel เนื่องจากโลหะผสมดังกล่าวไม่เป็นสนิมที่มีสาเหตุจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง ออกซิเจนในอากาศ กับโครเมียมในเนื้อสแตนเลส เกิดเป็นฟิล์มบางๆเคลือบผิวไว้ ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดความเสียหายให้กับตัวเนื้อสแตนเลสได้เป็นอย่างดี ป้องกันการกัดกร่อน และไม่ชำรุดหรือสึกกร่อนง่ายอย่างโลหะทั่วไป สำหรับในสหรัฐอเมริกาและในหลายประเทศ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการบิน นิยมเรียกโลหะนี้ว่า corrosion resistant steel เมื่อไม่ได้ระบุชัดว่าเป็นโลหะผสมชนิดใด และคุณภาพระดับใด แต่ในท้องตลาดเราสามารถพบเห็น สแตนเลสเกรด 18-8 มากที่สุด ซึ่งเป็นการระบุถึง ธาตุที่เจือลงในเนื้อเหล็กคือ โครเมียมและนิกเกิล ตามลำดับ สแตนเลสประเภทนี้จัดเป็น Commercial Grade คือมีใช้ทั่วไปหาซื้อได้ง่าย มักใช้ทำเครื่องใช้ทั่วไป ซึ่งเราสามารถจำแนกประเภทของสแตนเลสได้จากเลขรหัสที่กำหนดขึ้นตามมาตรฐาน AISI เช่น 304 304L 316 316L เป็นต้น ซึ่งส่วนผสมจะเป็นตัวกำหนดเกรดของสแตนเลส ซึ่งมีความต้องการในการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป สแตนเลสกับการเกิดสนิม

ปกติ Stainless steel จะไม่เป็นสนิมเพราะที่ผิวของมันจะมีฟิล์มโครเมียมออกไซด์ บางๆเคลือบผิวอยู่ อันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง Cr ใน Stainless steel กับ ออกซิเจนในอากาศ การทำให้ Stainless steel เป็นสนิมคือการถูกทำลายฟิล์มโครเมียมออกไซด์ ที่เคลือบผิวออกไปในสภาวะที่ Stainless steel สามารถเกิดสนิมได้ ก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมาอีกครั้งเช่น ถ้าสแตนเลสถูกทำให้เกิดรอยขีดข่วน แล้วบริเวณรายนั้นมีความชื้น ซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยากับธาตุเหล็ก ก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมา ก็จะเป็นสาเหตุให้เกิดสนิมขึ้นได้ [9]

2.3 ประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิมสามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างจุลภาคได้เป็น 5 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

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

2.3.1 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

2.3.2 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic grade)

เป็นเหล็กกล้าที่ใช้กันมากจะผสมโครเมียมประมาณ 17% (ช่วงของส่วนผสมของ Cr $\pm 1\%$) และนิเกิล (Ni) ประมาณ 9% (ช่วงของส่วนผสมของ Ni $\pm 1\%$) การผสมนิเกิลทำให้เหล็กกลุ่มนี้ต่างจากกลุ่มเฟอร์ริติก โดยนิเกิลจะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนและทำให้โครงสร้างจุลภาคเป็นออสเทนไนต์ เหล็กกลุ่มนี้บางเกรดจะผสมโครเมียมและนิเกิลเพิ่มเพื่อให้สามารถทนต่อการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง ซึ่งทำให้สามารถใช้เป็นส่วนประกอบของเตาหลอม เหล็กกลุ่มออสเทนนิติก

นี้จะทนทานต่อการกัดกร่อนดีกว่าเหล็กกลุ่มเฟอร์ริติกในด้านคุณสมบัติเชิงกลเหล็กกลุ่มออสเทนนิติกจะมีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength) ใกล้เคียงกับของกลุ่มเฟอร์ริติก แต่จะมีค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และค่าความยืด (Elongation) สูงกว่าจึงสามารถขึ้นรูปได้ดีมาก เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีคุณสมบัติที่แม่เหล็กไม่ดูดติด เช่น เกรด 304, 316L, 321, 301 การใช้งาน เช่น หม้อ ช้อน ถาด เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค จะผสมโครเมียมประมาณ 11.5-18% เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีคาร์บอนพอสมควรและสามารถชุบแข็งได้ เหล็กกล้ากลุ่มนี้มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength) และความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) สูงมาก แต่จะมีค่าความยืด (Elongation) ต่ำ เช่น เกรด 420 การใช้งาน เช่น ใช้ทำเครื่องมือตัดชิ้นส่วน มีด

2.3.3 เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex grade)

จะมีโครงสร้างและส่วนผสมระหว่างโครงสร้างออสเทนไนต์และเฟอร์ไรท์ มีโครเมียมผสมประมาณ 21-28% และนิกเกิลประมาณ 3-7.5% เหล็กกล้ากลุ่มนี้จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่จุดครากสูงและค่าความยืดสูง จึงเรียกได้ว่ามีทั้งความแข็งแรงและความเหนียว (Ductility) สูง เช่น เกรด 2304 2205 และ 2507

2.3.4 กลุ่มมาร์เทนซิติค (Martensitic)

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

2.3.5 เหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก (Precipitation-hardening grade)

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

2.4 ธาตุและการให้คุณสมบัติของธาตุที่ผสมลงในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม

2.4.1 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%) นอกจากนี้

การผสมไทเทเนียม ไปในเหล็กกล้าไร้สนิมจะช่วยให้อึดตัวกับคาร์บอนและให้ผลดีต่อคุณสมบัติทั้งสามข้อที่กล่าวมาเหมือนเหล็กกล้าไร้สนิมคาร์บอน 0.02% เหล็กกล้าไร้สนิมในเกรดที่มีอักษร “L” กำกับจะควบคุมคาร์บอนไม่ให้เกิน 0.03% ทำให้สามารถเชื่อมได้ดี มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion) และความสามารถในการขึ้นรูปเย็นสูงกว่าเกรดที่มีคาร์บอนสูงกว่า

2.4.2 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

2.4.3 นิกเกิล (Nickel)

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

2.4.4 โมลิบดีนัม (Molybdenum)

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

2.4.5 ไทเทเนียม (Ti)

ไทเทเนียม (Ti) ช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบขอบเกรน (Intergranular corrosion) โดยสารทั้งสองตัวจะช่วยป้องกันการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ นอกจากนี้ไทเทเนียม ยังเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็นและความสามารถในการเชื่อมด้วย [9]

2.5 การเลือกใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิม

คุณสมบัติด้านความต้านทานต่อการกัดกร่อน ความสามารถในการขึ้นรูป ความสามารถในการเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมอาจแบ่งเป็นระดับต่าง ๆ ได้ดังนี้ [10]

2.5.1 ความต้านทานต่อการกัดกร่อน

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

2.5.2 ความสามารถในการขึ้นรูป

ปานกลาง	ใช้กับงานทั่วไป
ดี	ยืดตัวได้สูง
ดีมาก	งานขึ้นรูปลึก (Deep drawing)

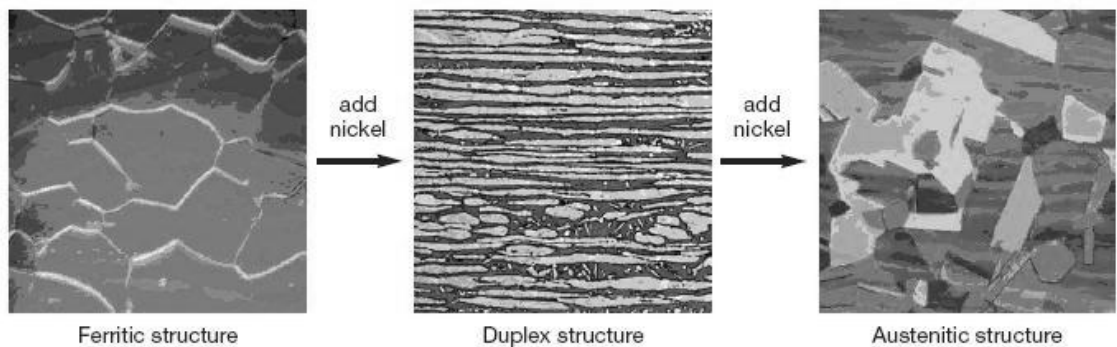
2.5.3 ความสามารถในการเชื่อม

ปานกลาง	งานที่ไม่ต้องเชื่อม
ดี	เชื่อมได้ในงานที่ไม่มีความเสี่ยงในเรื่องของการกัดกร่อนแบบขอบเกรน
ดีมาก	เชื่อมได้ในงานที่มีความเสี่ยงในเรื่องของการกัดกร่อนแบบขอบเกรน

2.6 เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex)

มีโครงสร้างผสมระหว่าง โครงสร้างเฟอร์ริติก และออสเทนนิติก ในสัดส่วน ประมาณ 30% และ 70% ตามลำดับ จุดเด่นของ สเตนเลสกลุ่มนี้คือ มีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนได้เยี่ยมยอด ด้วยความแข็งแรงทนทานที่เยี่ยมยอดกว่ากลุ่มออสเทนนิติก ขณะที่ง่ายต่อการขึ้นอีกด้วย คุณสมบัติทางกายภาพอยู่ระหว่างสเตนเลสกลุ่มออสเทนนิติกและเฟอร์ริติก แต่ใกล้เคียงกับเฟอร์ริติกและเหล็กคาร์บอนมากกว่า คุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting) และแบบชอกอับ (Crevice) เป็นผลจากความสัมพันธ์ระหว่าง โครเมียม โมลิบดีนัม ทั้งสเตนและไนโตรเจน ที่เป็นส่วนผสมของสเตนเลสกลุ่มนี้ สเตนเลสกลุ่มดูเพล็กซ์ทุกชนิดมีคุณสมบัติทนต่อการเกิดการกัดกร่อนตามแนวขอบเกรนจากคลอไรด์ (chloride stress corrosion cracking) ได้ดียิ่งกว่าสเตนเลสออสเทนนิติกกลุ่ม 300 ด้วยกลุ่มดูเพล็กซ์ยังสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท โดยอาศัยคุณสมบัติการทนต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting resistance equivalent number: PREN = %Cr + 3.3 (%Mo + 0.5%W) + 16%Ni) เป็นสำคัญ โดยค่าพรีน (PREN) ยิ่งมากยิ่งสื่อว่ามีคุณสมบัติด้านทนการกัดกร่อนได้มาก อันได้แก่

1. ประเภทลีนดูเพล็กซ์ (Lean Duplex) ตัวแทนของดูเพล็กซ์ประเภทนี้ได้แก่ ดูเพล็กซ์ชนิด 2304 มีโครเมียม 19.5-24.0 เปอร์เซนต์ นิกเกิลไม่เกิน 5 % โมลิบดีนัมประมาณไม่เกิน 1.0% ไนโตรเจนประมาณ 0.05-0.27% ไม่มีทังสเตนเป็นองค์ประกอบ มีค่าพรีนประมาณ 25
2. ประเภทดูเพล็กซ์มาตรฐาน (Standard Duplex) ตัวแทนของดูเพล็กซ์ประเภทนี้ได้แก่ ดูเพล็กซ์ ชนิด 2205 มีโครเมียม 19.5-23.0 เปอร์เซนต์ นิกเกิลประมาณ 3-6.5 % โมลิบดีนัมประมาณ 1.5-3.5% ไนโตรเจนประมาณ 0.08-0.35% ไม่มีทังสเตนเป็นองค์ประกอบ มีค่าพรีนประมาณ 35
3. ประเภทซูเปอร์ดูเพล็กซ์ (Super Duplex) ตัวแทนของดูเพล็กซ์ประเภทนี้ได้แก่ ดูเพล็กซ์ ชนิด 2507 มีโครเมียม 24.0-30.0 เปอร์เซนต์ นิกเกิลประมาณ 5-8 % โมลิบดีนัมประมาณ 1.0-5.0% ไนโตรเจนประมาณ 0.15-0.4% อาจมีทังสเตนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยประมาณ 0.5-2.5% มีค่าพรีนประมาณ 45
4. ประเภทไฮเปอร์ดูเพล็กซ์ (Hyper Duplex) ตัวแทนของดูเพล็กซ์ประเภทนี้ได้แก่ ดูเพล็กซ์ ชนิด 32707 มีโครเมียม 26.0-33.0 เปอร์เซนต์ นิกเกิลประมาณ 5.5-9.0 % โมลิบดีนัมประมาณ 3.0-5.0% ไนโตรเจนประมาณ 0.3-0.6% ไม่มีทังสเตนเป็นองค์ประกอบ มีค่าพรีนประมาณ 55



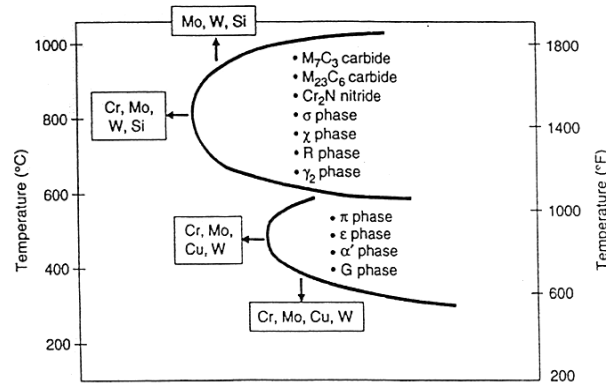
รูปที่ 2.13 ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงส่วนผสมทางเคมีและปริมาณสมมูลความต้านทานการกัดกร่อนแบบ
หลุมบ่อ (PRE) ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [11]

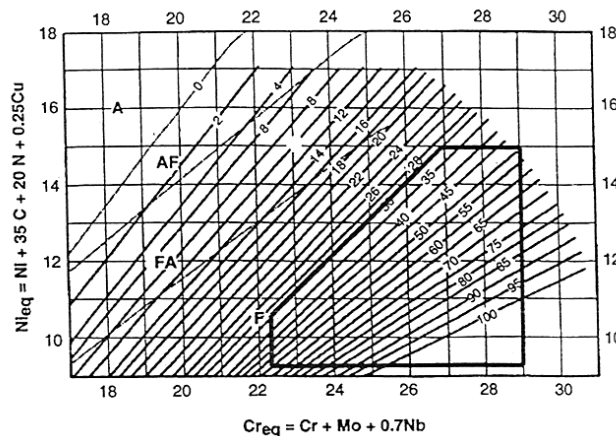
เกรด UNS	ส่วนผสมทางเคมี (%ค่ามากที่สุด)										
	C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Mo	N	ธาตุ อื่นๆ	ช่วงค่า PRE(1)
S31200	0.03	2.00	0.03	0.04 5	1.00	24.0- 26.0	5.5-6.5	1.2-2.0	0.14- 0.20	...	30.2-35.8
S31260	0.03	1.00	0.03	0.03	0.75	24.0- 26.0	5.5-7.5	2.5-3.5	0.10- 0.30	0.10- 0.50W, 0.20- 0.80Cu	33.9-42.4
S31500	0.03	1.2- 2.00	0.03	0.03	1.4-2.0	18.0- 19.0	4.25- 5.25	2.5-3.0	0.05- 0.10	...	27.1-30.5
S31803	0.03	2.00	0.02	0.03	1.00	21.0- 23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.08- 0.20	...	27.1-30.5
S32304	0.03	2.50	0.04	0.04	1.00	21.5- 24.5	3.0-5.5	0.05- 0.60	0.05- 0.20	0.05- 0.06Cu	30.5-37.8
S32550	0.03	1.50	0.03	0.04	1.00	24.0- 27.0	4.5-6.5	2.9-3.9	0.10- 0.25	1.5- 2.5Cu	22.5-29.7
S32750	0.03	1.20	0.02	0.035	1.00	24.0- 26.0	6.0-8.0	3.0-5.0	0.24- 0.32	0.5Cu	35.2-43.9
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 05-1.0W	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 ขณะที่ธาตุนิกเกิล คาร์บอน และทองแดง ช่วยทำให้เกิดโครงสร้างออสเทนไนต์ และธาตุผสมต่างๆเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ยังมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการตกผลึกของธาตุผสมดังแสดงในรูปที่ 2.14 และในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

เพื่อให้ได้ปริมาณโครงสร้างจุลภาคของโลหะฐานและเนื้อโลหะเชื่อมที่สมดุลจะสามารถใช้ แผนภูมิ WRC-1992 ทำนายปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรต์ ในเนื้อโลหะเชื่อมได้ และเพื่อนำมาพัฒนาเป็นส่วนผสมทางเคมีของโลหะฐานให้เกิดความเหมาะสมยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 ไคอะแกรมการเปลี่ยนแปลงเวลา-อุณหภูมิ (TTT-Diagram) ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการตกผลึกของธาตุผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์[11]

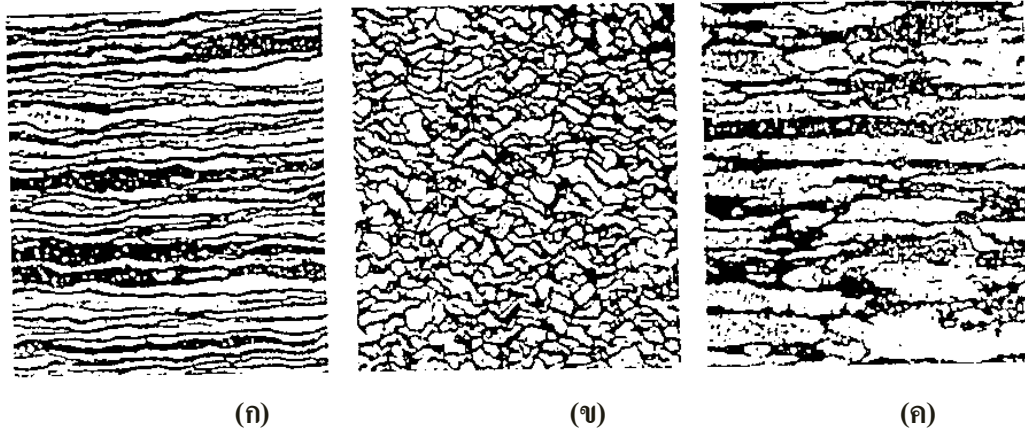


รูปที่ 2.15 แผนภูมิ WRC-1992 สำหรับทำนายปริมาณเฟอร์ไรต์ในเหล็กกล้าไร้สนิม[11]

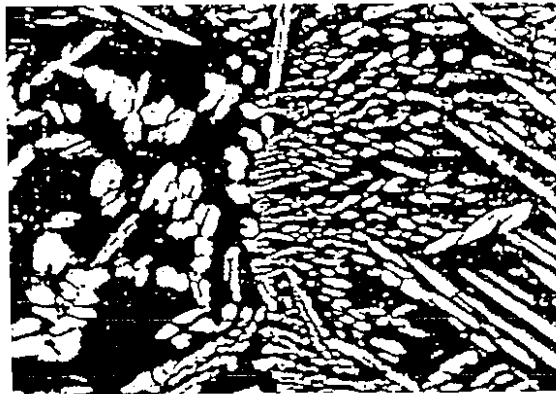
2.6.1 โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

2.6.1.1 โครงสร้างจุลภาค เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ออกแบบให้มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ 50% และ ออสเทนไนต์ 50% โดยประมาณ มีพื้นที่เป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์และออสเทนไนต์ที่มีลักษณะเป็นก้อน

เกาะติดกัน ซึ่งลักษณะรูปร่างและทิศทางของโครงสร้างจุลภาคจะแตกต่างกันออกไปตามภาคตัดขวางของแนวรีดและกรรมวิธีการผลิตโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4



รูปที่ 2.16 ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรด Alloy 2205 โดยทำการกัดผิวด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ (ก) ลักษณะโครงสร้างในทิศทางขนานกับแนวรีด (ข) ลักษณะโครงสร้างในทิศทางขวางกับแนวรีด (ค) ลักษณะโครงสร้างในทิศทางขนานกับแนวรีด ซึ่งถ่ายโดยกำลังขยายสูงกว่ารูป (ก) [11]



รูปที่ 2.17 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อดูเพล็กซ์เกรด Alloy 2205 โดยทำการกัดผิวด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ [11]

2.6.2.2 คุณสมบัติทางกล

1. คุณสมบัติทางฟิสิกส์เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอน ทำให้รอยเชื่อมมีการขยายตัวน้อย ส่งผลให้เหล็กกล้าไร้สนิมดู

เพล็กซ์ สามารถคืนตัวได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ยัง มีค่าการนำความร้อนสูงกว่า เหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนเนติก โดยจะแสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [11]

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 2.4 สมบัติทางกลที่อุณหภูมิห้องของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [11]

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 2.4 (ต่อ) สมบัติทางกลที่อุณหภูมิห้องของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [11]

สมบัติทางกล กลุ่ม/เกรด		ความต้านทาน แรงดึงที่จุดคราก ต่ำสุด	ความ ต้านทาน แรงดึง	การยืดตัว ต่ำสุด	ค่าความแข็งแรง สูงสุด	
ประเภท	เกรด UNS	MPa	MPa	%	HB	HRC
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

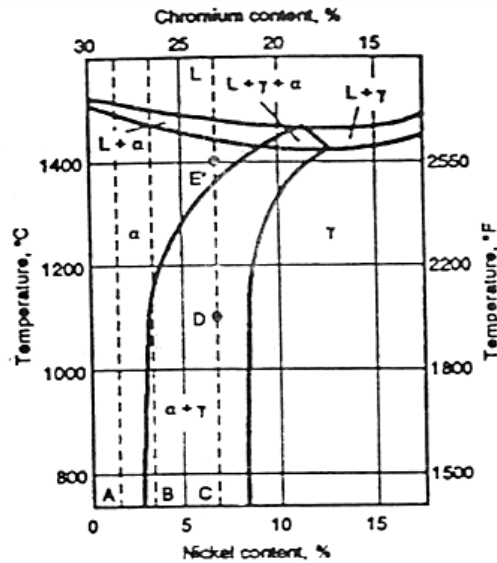
4. ความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Strength Properties) เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์มีค่าการดูดซับพลังงานถึง 100 จูล ที่อุณหภูมิ -100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าการดูดซับพลังงานที่อยู่ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก ซึ่งในการนำเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ไปใช้งานทำโครงสร้างภาชนะรับแรง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

2.6.2.3 การประยุกต์ใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมก๊าซธรรมชาติและน้ำมัน อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมกระดาษ และอุตสาหกรรมการควบคุมมลภาวะ โดยทั่วไปจะนำไปใช้งานในสิ่งแวดล้อมที่เป็นสารละลายพวกคลอไรด์ โดยนำไปใช้แทนเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนเนติก ที่ได้รับความเสียหายเพราะเกิดรอยแตกร้าวจากการกัดกร่อนแบบหลุมบ่อ ในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรดสูงที่เรียกว่า ซุปเปอร์ดูเพล็กซ์จะมี ความต้านทานต่อสารละลายออกซิเจนเนตและคลอไรด์เนตในน้ำทะเลอีกด้วย โดยรายละเอียดของการนำไปใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรดต่างๆดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.5 การประยุกต์ใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [11]

เกรด	การนำไปใช้งาน
S31803 ,S32760 S32750, S32550	ท่อสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในโรงกลั่นน้ำมัน อุตสาหกรรมเคมี และอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่ใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น อุปกรณ์ย่อยกระดาษ
ทุกเกรด	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ถึงบรรจุสารเคมี ภาชนะทำปฏิกิริยาเคมี ตัวกรองก๊าซ ระบบขนถ่ายกรดอะซิติกและฟอสเฟอริก อุปกรณ์ในอุตสาหกรรมก๊าซธรรมชาติ และน้ำมัน (ระบบท่อส่งของไหลแบบหลายเฟส)
S32304	อุปกรณ์ทำน้ำร้อนในครัวเรือนที่ต้องการความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม
S32750, S32760 ,S32550	ท่อสำหรับการขนถ่ายน้ำทะเล อุปกรณ์ในการแยกก๊าซธรรมชาติและน้ำมัน อุปกรณ์ในการทำให้เป็นไอของเกลือ

2.6.2.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์สามารถอธิบายโดยใช้สมมติฐานที่ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ประกอบด้วย เหล็ก 68% และส่วนผสมของธาตุอื่นๆ อีก 32 % (ธาตุที่ผสมหลักคือ โครเมียม และนิกเกิล) และสามารถนำแผนภาพกิ่งสมดุลการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก-โครเมียม-นิกเกิล มาอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นขณะที่รับความร้อนและในขณะที่เย็นตัวลงได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แผนภาพถึงสมดุลการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก-โครเมียม-นิกเกิล
(ส่วนผสมของธาตุเหล็ก 68% โดยน้ำหนัก) [11]

ส่วนผสมทางเคมีของธาตุโครเมียม 30 % และนิกเกิล 2% โดยประมาณ (เส้นประ A) เหล็กกล้าไร้สนิมจะแข็งตัวเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิห้อง ส่วนที่ปริมาณส่วนผสมของธาตุโครเมียมลดลงและปริมาณธาตุนิกเกิลเพิ่มขึ้น ซึ่งในช่วงนี้ส่วนผสมทางเคมีประกอบด้วย ธาตุโครเมียม 28% และธาตุนิกเกิล 4 % (เส้นประ B) โดยจะเย็นตัวลงมาและแข็งตัวเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์อย่างเต็มที่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 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 ไปเป็นโครงสร้างออสเทนไนท์นาน 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+เฟอร์ไรท์ $\longrightarrow$ เฟอร์ไรท์ $\longrightarrow$ เฟอร์ไรท์+ออสเทนไนท์

ในการเปลี่ยนโครงสร้างในสถานะของแข็งจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์เป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ จะพิจารณาเรื่องของการแพร่ โดยมีผลมาจากความสัมพันธ์ ระหว่างเวลาและอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง การเย็นตัวที่อุณหภูมิสูงอย่างรวดเร็วของเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์เต็มที่ จะมีผล ทำให้การเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ ไปเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ไม่ทัน จึงยังคงเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์อยู่มาก ซึ่งอย่างไรก็ตาม ในช่วงอุณหภูมิสูงจะเกิดการเปลี่ยนจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ เป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ที่สูงกว่าหรือไม่ ก็จะมีผลมาจากส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ แต่ละเกรดด้วยเช่นกัน โดยตัวอย่างอัตราการเย็นตัวช่วงอุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ถึง 800 องศาเซลเซียส หรือที่เรียกกันว่าอุณหภูมิช่วงวิกฤติ (ΔT_{12-8}) ในช่วงนี้จึงใช้เป็นตัวกำหนด วัฏจักรทางความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ถ้าอัตราการเย็นตัวในช่วงอุณหภูมินี้ใช้เวลานาน การเปลี่ยนรูปจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ไปเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ก็จะมีมากขึ้นตามเช่นกัน โดยในการเชื่อมชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีความหนา มาก ชิ้นงานจะได้รับความร้อนสูงจะทำให้มีอุณหภูมิช่วงวิกฤติ (ΔT_{12-8}) นาน เพื่อใช้ประโยชน์จากช่วงอุณหภูมิวิกฤติ (ΔT_{12-8}) นี้ในการควบคุมให้เกิดปริมาณโครงสร้างออสเทนไนต์ขึ้นในปริมาณที่เหมาะสม ในบริเวณเนื้อเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน เพื่อจะทำให้ได้รับสมบัติทางกลและความต้านทานการกัดกร่อนตามต้องการ ช่วงอุณหภูมิช่วงอุณหภูมิวิกฤติ (ΔT_{12-8}) ของการเย็นตัวนี้จะไม่ขึ้นกับความหนาของวัสดุชิ้นงาน ไม่เหมือนกับพลังงานความร้อนที่ให้แก่นวเชื่อม (Heat Input) แต่ช่วงอุณหภูมิวิกฤติ (ΔT_{12-8}) จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เป็นสำคัญ วัฏจักรความร้อนที่อุณหภูมิจะไม่ผลต่อความสมดุลของปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรต์กับโครงสร้างออสเทนไนต์ 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

โดยปกติการค้นหาการตกตะกอน หรือ การตกผลึกของสารประกอบในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เป็นการค้นหาซิกมาเฟส (σ Phase) และการตกตะกอนของสารประกอบโลหะ พวกธาตุเหล็ก ธาตุ

โครเมียมและธาตุโมลิบดีนัม เป็นต้น ซึ่งมักจะเกิดขึ้นตามขอบเกรน โครงสร้างเฟอร์ไรต์จะมีการขยายเข้าไปในโครงสร้าง เฟอร์ไรต์ที่มีปริมาณของธาตุโครเมียม และธาตุโมลิบดีนัมอยู่มาก ซึ่งการตกผลึกดังกล่าวจะเกิดขึ้นในปริมาณน้อย แต่ก็มีผลทำให้คุณสมบัติทางกลและความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ลดลงพอสมควร ลักษณะของโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ที่ผ่านกระบวนการการรีด จะมีลักษณะทิศทางของโครงสร้างออสเทนไนต์ที่เป็นลักษณะก้อนบนพื้นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ ทั้งในทิศทางขนานหรือตัดขวางกับทิศทางของแนวรีด ขณะที่การขึ้นรูปร้อนหรือการขึ้นรูปเย็น เป็นขบวนการตามหลังขบวนการหล่อ โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม ดูเพล็กซ์ที่ผ่านกรรมวิธีการหล่อ และผ่านกระบวนการรีดหลังจากกรรมวิธีการหล่อ มีความแตกต่างกันมาก ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อมและบริเวณที่ได้ผลกระทบทางความร้อนของแนวเชื่อม ระหว่างที่เกิดวัฏจักรทางความร้อนในการเชื่อม บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนที่อยู่ติดกับเส้นหลอมละลายจะมีอุณหภูมิสูงที่เหนือบริเวณสองโครงสร้าง (จุด E) ที่แสดงในรูปที่ 2.5 จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างออสเทนไนต์ ไปเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ ทั้งหมด ที่มีลักษณะเกรนหยาบ ซึ่งไม่เกี่ยวกับการแผ่ขยายบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์หลังการเย็นตัว และเมื่อมีการเย็นตัวลง ก็จะมีโครงสร้างออสเทนไนต์ เริ่มเกิดขึ้นตามขอบเกรนของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ ในขณะที่เนื้อภายในเกรนโครงสร้างเฟอร์ไรต์จะมีการเรียงตัวตามระนาบของผลึกคล้ายงานหล่อ ซึ่งในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนของแนวเชื่อมจะมีปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรต์สูง ลักษณะโครงสร้างเช่นนี้จะทำให้คุณสมบัติด้านความเหนียวลดลง และความต้านทานการกัดกร่อนลดลงด้วย ซึ่งระดับของไนโตรเจนในโลหะฐานจะช่วยเพิ่มความสามารถในการเชื่อม และความต้านทานการกัดกร่อนได้ ในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์บางประเภทมีปริมาณไนโตรเจนมากถึง 0.35 % โดยระดับไนโตรเจนในโลหะฐานจะช่วยเพิ่มอุณหภูมิการเปลี่ยนรูปจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ไปเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ ในระหว่างการเย็นตัวให้สูงขึ้น จึงทำให้ช่วงอุณหภูมิที่เป็นช่วงโครงสร้างเฟอร์ไรต์เต็มทีแคบลง นอกจากนี้ยังสนับสนุนให้เกิดการฟอร์มตัวของโครงสร้างออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ความกว้างของพื้นที่บริเวณผลกระทบทางความร้อนลดลง

ขั้นตอนการเปลี่ยนโครงสร้างในเนื้อเชื่อม ก็เป็นเช่นเดียวกับบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน แต่รูปแบบการแข็งตัวแตกต่างกัน โดยที่เกรนในบริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ มีลักษณะการแข็งตัวเป็นแบบกิ่งไม้ (Columnar Grain) การเจริญเติบโตของเกรนในเนื้อเชื่อมจะโตมากเนื่องจากการเย็นตัวที่รวดเร็ว เติบโตในทิศทางที่แน่นอน และในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน ส่วนมากเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์อยู่ก่อน จึงเป็นตัวกำหนดขนาด และทิศทางโครงสร้างในเนื้อเชื่อม โดยโครงสร้างออสเทนไนต์จะเริ่มเกิดขึ้นตามขอบของเฟอร์ไรต์ และเกิดการผ่าเกรนตามระนาบผลึกในขณะเย็นตัวของเนื้อเชื่อม

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 [12]

2.7.1 ความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ มีความสามารถในการเชื่อมที่ดี ถึงแม้จะมีความสามารถไม่ดีเท่ากับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก ซึ่งโดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบันจะมีส่วนผสมของธาตุคาร์บอนต่ำ น้อยกว่า 0.03 % โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เพื่อป้องกันการกัดกร่อนระหว่างเกรน เนื่องจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ ในโลหะฐานหรือโลหะเติมจะมีปริมาณของธาตุซัลเฟอร์ และ ฟอสฟอรัสต่ำ ซึ่งน้อยกว่า 0.03 % โดยน้ำหนัก เพื่อลดปัญหาการรอยแตกร้าวขณะแข็งตัว (Hot Crack) ในขณะที่กำลังเปลี่ยนเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์ และมีความต้านทานต่อการแตกร้าวจากการแพร่ของไฮโดรเจนได้ดี เนื่องจากธาตุไฮโดรเจนมีความสามารถในการละลายในโครงสร้างออสเทนไนต์ได้ดี อย่างไรก็ตามการแตกร้าวขณะแข็งตัวและการแตกร้าวเนื่องจากการแพร่ของก๊าซไฮโดรเจน ก็ยังมีโอกาสเกิดขึ้นได้ในงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ จึงต้องระมัดระวังและป้องกันในการเชื่อมเป็นอย่างดี โดยทั่วไปกระบวนการที่ใช้เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ได้แก่ กระบวนการเชื่อมด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ (SMAW) กระบวนการเชื่อมทิก (GTAW) กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม (GMAW) กระบวนการเชื่อมอาร์คใต้ฟลักซ์ (SAW) กระบวนการเชื่อมอาร์คใส้ฟลักซ์ (FCAW) และ กระบวนการเชื่อมอาร์คพลาสมา โดยการเลือกกระบวนการเชื่อมใดขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุประเภทของรอยต่อ อีกทั้งปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องในด้านการออกแบบและความประหยัดในการเชื่อม

2.7.2 การทำความสะอาดเหล็กกล้าไร้สนิมภายหลังการเชื่อม

ประกอบด้วยขั้นตอนต่อไปนี้

1. จัดสเกลและทำความสะอาดผิวรอยเชื่อมใช้สารเคมี ส่วนใหญ่จะใช้สารละลายกรด HN03+HF ในการกำจัดข้อบกพร่องต่าง ๆ จากการเชื่อม เช่น สเกล หรือรอยไหม้ แต่ไม่ควรใช้กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก ที่เกิด sensitization (สูญเสียโครเมียม ในรูปของคาร์ไบด์) หรือบริเวณ

ชิ้นส่วนที่สัมผัสกับเหล็กกล้าคาร์บอนนอกจากนี้ยังมีการใช้เจล สำหรับทาลงไปบนแนวเชื่อมเพื่อจัดสเกลและทำความสะอาดผิวด้วย โดยการใช้เจลจะมีข้อดี คือ ช่วยให้สามารถทำความสะอาดแนวเชื่อมในแนวตั้งได้ กระบวนการทางกล เช่น ใช้การเจียรในผิวออกด้วย grinding wheel หรือการขัดด้วย power brushing การพ่นทราย (sand blasting) ใช้แปรงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขัด เป็นต้น ซึ่งจะสามารถจัดเศษโลหะหลอมจากการเชื่อมที่กระเด็นมาติดบนผิว แผ่นเหล็ก หรือแนวเชื่อมหรือแยกจากฟลักซ์หุ้มลวดเชื่อมได้ ข้อเสียของกระบวนการเชื่อมนี้ คือการสังเกตข้อบกพร่องที่มีขนาดเล็กจะทำได้ยาก

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

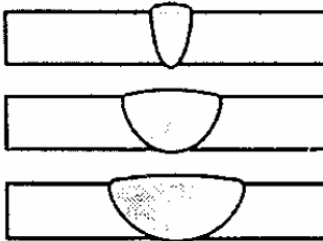
2.8 สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมต่อความสามารถในการเชื่อม

เหล็กกล้าไร้สนิมมีสมบัติทางกายภาพ (physical properties) ที่สำคัญและแตกต่างจากเหล็กกล้าคาร์บอนอยู่สองประการคือการนำความร้อนและการขยายตัวเนื่องจากความร้อน

2.8.1 การนำความร้อน

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกมีความสามารถในการนำความร้อนประมาณ 1/3 ของเหล็กกล้าคาร์บอน ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยค่าการเชื่อมเดียวกัน จะพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีการนำความร้อนออกไปจากบริเวณแนวเชื่อมช้ากว่าเหล็กกล้าคาร์บอน จึงทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีการบิดตัวมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 2.19 และการเพิ่มธาตุผสม เช่น นิกเกิล โครเมียม หรือทองแดงลงในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก จะทำให้มีความสามารถในการนำความร้อนลดลง [13]

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



*Btu/hr-ft-F

*Btu/hr-ft-F

รูปที่ 2.19 แสดงผลของสมบัติทางกายภาพต่อการเชื่อม [13]

2.8.2 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

ระหว่างการเชื่อมจะมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อน และทำให้เกิดการบิดงอของโลหะที่ทำการเชื่อม ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนจะเป็นสิ่งที่บ่งบอกว่าโลหะนั้นจะมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนและหดตัวเมื่อเย็นตัวมากน้อยเพียงใด หากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวมากก็จะมีการขยายตัวและหดตัวมากและส่งผลให้เกิดการบิดตัวมากขึ้นตามลำดับ

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน สูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนประมาณ 50% ขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติกและเฟอร์ริติก จะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอน ดังนั้นถ้าทำการปรับเปลี่ยนค่าการเชื่อมสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก เพื่อให้ได้ขนาดรอยเชื่อมใกล้เคียงกับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนหรือมาร์เทนซิติก จะพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกจะมีการบิดตัวมากขึ้น ดังแสดงในรูป 2.20 และการเพิ่มธาตุผสม เช่น นิกเกิลหรือทองแดงลงในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก จะทำให้มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนลดลง [13]

การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม จะต้องใช้เทคนิคการเชื่อมที่แตกต่างจากการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนทั่วไป เนื่องจากการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม มีโอกาสเสี่ยงต่อการบิดตัวสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน ดังนั้นการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมต้องควบคุมปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (heat input) ให้ต่ำที่สุด โดยการใช้กระแสเชื่อมที่ต่ำและใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็ก ใช้ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมให้เร็วขึ้น การเชื่อมชิ้นงานที่บางกว่า 0.25 นิ้ว (6.35 มม.) ควรใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ส่วนการเชื่อมชิ้นงานที่หนาอาจจะใช้เทคนิคการเชื่อมแบบเว้นระยะ (Step Welding) อาจใช้แผ่นโลหะที่นำความร้อนสูงประกบได้ชิ้นงานที่ทำการเชื่อม [13]

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

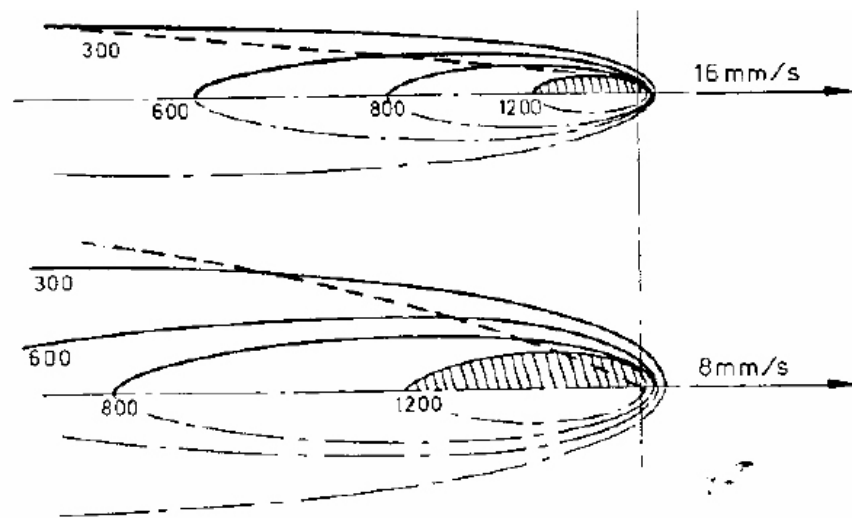
*From 30-1000 ° F (micro-in/in-F)

*From 30-1000 °F (micro-in/in-F)

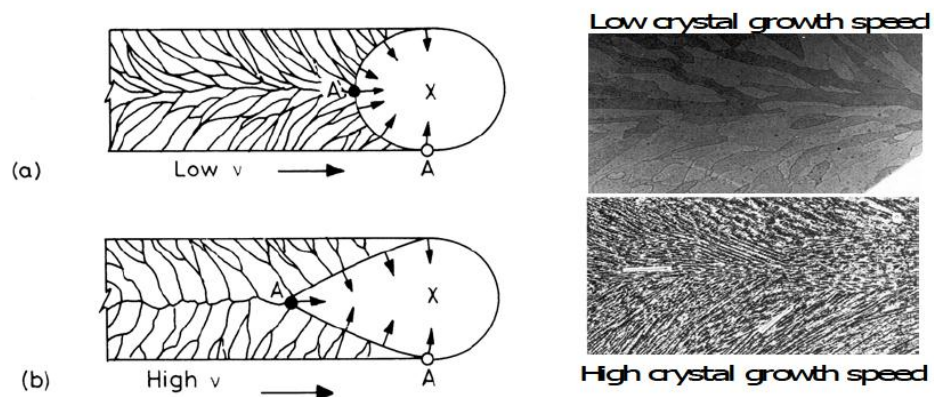
รูปที่ 2.20 แสดงการเปรียบเทียบการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน

2.9 อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อม

ความเร็วในการเดินลวดเชื่อมจะมีผลต่อลักษณะรูปร่างของวงจรระแสความร้อน ก็จะส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อมด้วย กล่าวคือจะทำให้แนวเชื่อมเล็กหรือใหญ่ตามต้องการ การที่ได้แนวเชื่อมที่มีขนาดต่างกันการหลอมละลายของงานเชื่อมก็จะต่างกันออกไป ถ้าเพิ่มความเร็วในการเชื่อม จะมีผลดังนี้ 1) ทำให้รูปร่างของวงจรพลังงานความร้อนต่อความยาวของแนวเชื่อมลดลง 2) การหลอมละลายของงานเชื่อมจะลดลง 3) การสิ้นเปลืองลวดเชื่อม ฟลักซ์ ต่อความยาวแนวเชื่อมลดลง ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการรับภาระของแนวเชื่อมลดลงไปด้วย [14]



รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะการแผ่กระจายของวงจรความร้อนเมื่อความเร็วในการเชื่อมต่างกัน [14]



รูปที่ 2.22 แสดงการเกิดโครงสร้างของรอยเชื่อมกรณีใช้ความเร็วต่างกัน [14]

การใช้ความเร็วสูงหรือความเร็วต่ำในการเชื่อมจะส่งผลโดยตรงต่อลักษณะของการเกิดโครงสร้างของรอยเชื่อม กล่าวคือถ้าเป็นการเชื่อมด้วยความเร็วสูง ๆ รอยเชื่อมจะเกิดโครงสร้าง Columnar Dendrite ที่เล็กและละเอียด ซึ่งจะส่งผลดีต่อสมบัติทางกลของรอยเชื่อม แต่ถ้าเชื่อมด้วยความเร็วต่ำ ๆ ในเวลาที่เท่ากันโลหะงานจะได้รับพลังงานความร้อนเข้ามากกว่า และเย็นตัวช้ากว่าก็จะเกิดการตกผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์เกิดขึ้นได้ และโครงสร้างของ Columnar Dendrite ที่ได้จะหยาบกว่าซึ่งไม่ส่งผลดีต่อสมบัติทางกลเลย [14]

2.10 การพาของโลหะหลอมเหลวในแอ่งรอยเชื่อม

โดยทั่วไปแล้ว ลักษณะการหลอมลึกของแนวเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกจะต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติกและมาร์เทนซิติก เนื่องจากความสามารถในการนำความร้อนของกลุ่มออสเทนนิติกจะต่ำ และความหนืดของโลหะหลอมเหลว นอกจากนั้นยังมีปัจจัยทางความร้อนอื่น ๆ ที่มีผลต่อการหลอมลึกของแนวเชื่อมเกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม (autogenous welding) หรือการเชื่อมในแนวแรกของรอยต่อที่ต้องมีการเชื่อมหลาย ๆ แนวเชื่อม ปัจจัยที่มีผลต่อการหลอมลึกของแนวเชื่อมได้เคยมีการให้ข้อสังเกตว่าเป็นผลมาจากแรงตึงผิวของโลหะหลอมเหลวในบริเวณแอ่งรอยเชื่อม [15]

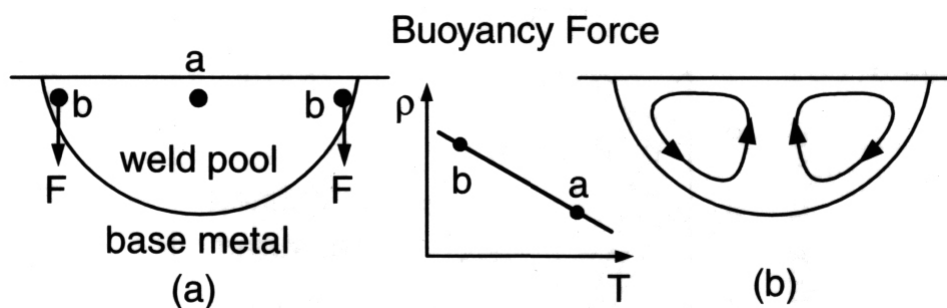
ในแอ่งรอยเชื่อม (Weld pool) ของชิ้นงานขณะที่ทำการเชื่อม จะเกิดการพาของโลหะหลอมเหลวในแอ่งรอยเชื่อม (Weld pool convection) ขึ้นเสมอ การพาของโลหะหลอมเหลวนั้นเป็นปรากฏการณ์ของการไหลของโลหะเหลว (Fluid flow) ในแอ่งรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นจากการอาร์ค จะส่งผลโดยตรงต่อลักษณะรูปร่างและขนาดของแนวเชื่อมที่จะได้รับ และยังเกี่ยวข้องกับการเกิดข้อบกพร่องหลายชนิดในแนวเชื่อมอีกด้วยทิศทางการไหลของโลหะเหลวมีอิทธิพลต่อการพาความร้อนในแอ่งรอยเชื่อม เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับทิศทางและความเร็วในการเคลื่อนที่ของโลหะหลอมเหลวประเภทของการพาของโลหะหลอมเหลวนั้น สามารถจำแนกได้ตามแหล่งกำเนิดที่สำคัญ 3 ประการดังนี้

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

การเชื่อมในสภาวะปกติแรงที่เกิดจากแรงตึงผิวจะมีอิทธิพลต่อลักษณะของแนวเชื่อมมากที่สุด ส่วนแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก และแรงลอยตัว จะมีอิทธิพลต่อลักษณะของแนวเชื่อมน้อยลงตามลำดับ ($M > E > B$) [16]

2.10.1 แรงลอยตัว (Buoyancy Force)

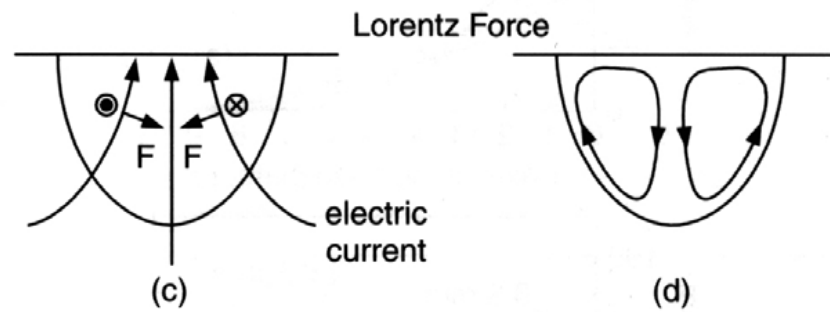
ธรรมชาติของโลหะจะมีความหนาแน่น (Density) ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.23 จะพบว่าบริเวณจุดกึ่งกลางของแนวเชื่อม (บริเวณใต้การอาร์คหรือจุด a) มีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณของแนวเชื่อม (จุด b) ดังนั้นโลหะหลอมเหลว ที่อยู่บริเวณจุดกึ่งกลางแนวเชื่อมจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าบริเวณขอบแนวเชื่อม ส่งผลให้โลหะหลอมเหลว บริเวณขอบแนวเชื่อมซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าจมลงสู่ด้านล่างโดยแรงโน้มถ่วง ทำให้ลักษณะการพาของโลหะหลอมเหลวไหลเวียนออกจากจุดศูนย์กลางของแนวเชื่อมไปยังขอบแนวเชื่อม ปรากฏการณ์ลักษณะนี้จะส่งผลทำให้ลักษณะของแนวเชื่อมกว้างและตื้น



รูปที่ 2.23 การพาของโลหะหลอมเหลวจากแรงลอยตัว

2.10.2 แรงอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Force)

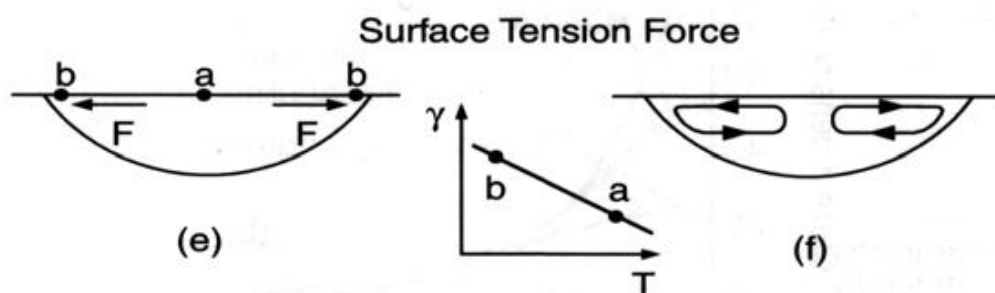
ในกรณีของการเชื่อมด้วยไฟฟ้ากระแสตรงต่ออิเล็กโทรดเป็นขั้วลบ จะมีการไหลของกระแสไฟฟ้าจากชิ้นงานซึ่งเป็นขั้วบวกไปสู่ทั้งสแตนอิเล็กโทรดที่เป็นขั้วลบ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.24 จะพบว่าแรงอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic force) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งคือ Lorentz เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อม โดยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กจะผลักโลหะหลอมเหลว ให้มีการหมุนวนลงด้านล่าง ดังนั้นโลหะหลอมเหลวบริเวณผิวหน้าจะหมุนลงด้านล่างที่บริเวณกึ่งกลางแนวเชื่อม ปรากฏการณ์ลักษณะนี้จะส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีลักษณะแคบและการหลอมลึกสูง การเพิ่มกระแสเชื่อมให้สูงขึ้นถึงระดับ 250 แอมแปร์ จะทำให้แรงที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดการหมุนวนของโลหะหลอมเหลวมากขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มการหลอมลึกของงานเชื่อม โดยการเพิ่มกลไกการพาที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจำเป็นต้องใช้กระแสการเชื่อมที่สูง ดังนั้นจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพงานเชื่อมได้ จึงเป็นสิ่งที่ควรหลีกเลี่ยงในทางปฏิบัติ



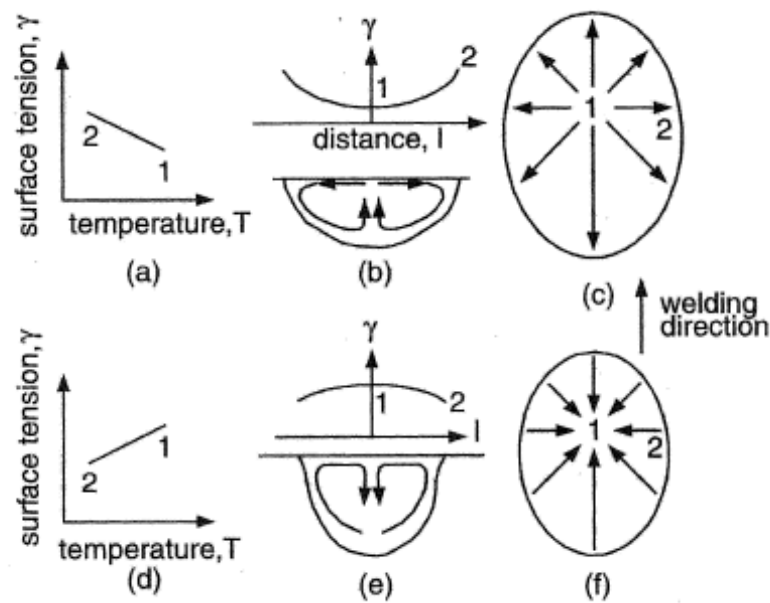
รูปที่ 2.24 การพาของโลหะหลอมเหลวจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

2.10.3 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 ($dTdy < 0$; M-) ปรากฏการณ์ลักษณะนี้จะทำให้ความร้อนถูกถ่ายเทไปยังขอบของแนวเชื่อม ดังรูปที่ 2.25 ส่งผลทำให้ลักษณะของแนวเชื่อมกว้างและดันคล้ายกันกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากแรงลอยตัว ทิศทางไหลของโลหะหลอมเหลว สามารถเปลี่ยนแปลงได้ จากการศึกษา [16] พบว่าในเหล็กที่มีปริมาณกำมะถันผสมอยู่สูง หรือการที่มีปริมาณของสารบางอย่างผสมอยู่จะมีลักษณะการไหลของโลหะหลอมเหลว จากบริเวณขอบแนวเชื่อมเข้าสู่กึ่งกลางแนวเชื่อมและหมุนวนลงสู่ด้านล่างหมายความว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงตึงผิวจะมีค่าเป็นบวก ($dTdy > 0$; M+) ทำให้แนวเชื่อมมีลักษณะการหลอมลึกที่มากขึ้น



รูปที่ 2.25 การพาของโลหะหลอมเหลวจากแรงอันเนื่องมาจากความตึงผิว

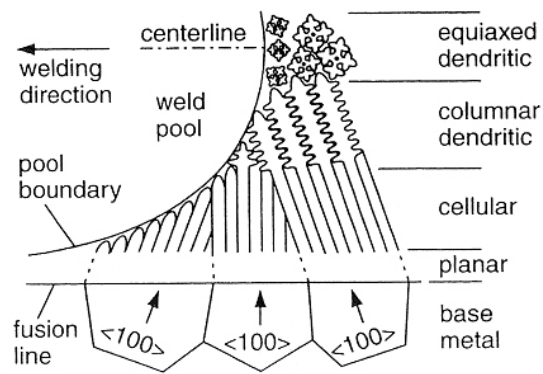


รูปที่ 2.26 การเปลี่ยนแปลงทิศทางการพาของโลหะหลอมเหลว

2.11 การแข็งตัวของโครงสร้างผลึกของแนวเชื่อม

2.11.1 การเกิดเกรนลักษณะ Epitaxial growth ที่ขอบของแอ่งรอยเชื่อม

ในกรณีของการเชื่อมแบบหลอมละลาย เกรนของโลหะฐาน (Base metal) จะทำหน้าที่เหมือนกับฐานรองรับ (Substrate) สำหรับการเกิด nucleation ของโลหะขณะที่มีการแข็งตัวจากสภาพหลอมเหลว ดังนั้นโลหะหลอมเหลวในแอ่งรอยเชื่อมจะสัมผัสติดกับฐานรองรับและเกิดเป็นเกรนโลหะ ในลำดับต่อมาในกรณีการเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม (Autogenous welding) จะเกิด nucleation โดยการจัดเรียงตัวของอะตอมจากฐานรองรับ โดยไม่มีการเปลี่ยนทิศทางการเรียงตัวของผลึกที่เติบโต เรียกว่าการเติบโตแบบ Epitaxial growth หรือ Epitaxial nucleation โดยมีการเติบโตในทิศทาง $\langle 100 \rangle$ สำหรับโลหะที่มีโครงสร้างเป็นแบบ FCC หรือ BCC [17] และได้แสดงลักษณะการเติบโตของเกรนไว้ในรูปที่ 2.22 ในกรณีการเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อมหรือการเชื่อมโลหะต่างกันสองชนิด ส่วนผสมของโลหะเชื่อมจะต่างจากส่วนผสมของโลหะฐาน และโครงสร้างผลึกของโลหะเชื่อมก็จะต่างจากโครงสร้างผลึกของโลหะฐานเช่นกัน เมื่อเป็นเช่นนี้ก็จะไม่มีการเกิดโครงสร้างลักษณะ Epitaxial growth ในการเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อมและจะเกิดเป็นเกรนใหม่ที่ขอบของแอ่งรอยเชื่อม (Fusion boundary)



รูปที่ 2.27 แสดงลักษณะเติบโตของเกรนของโลหะเชื่อม[18]

2.11.2 การเกิดเกรนลักษณะ Competitive growth ที่ขอบของแอ่งรอยเชื่อม

ในการเชื่อมโดยปกติ โครงสร้างผลึกจะเกิดในลักษณะ Epitaxial growth ที่ขอบของแอ่งรอยเชื่อมในกรณีที่โลหะเชื่อมและโลหะฐานมีโครงสร้างผลึกที่เหมือนกัน หรือเกิดเกรนใหม่เมื่อโลหะที่เชื่อมทั้งสองชิ้นนั้นมีโครงสร้างผลึกที่ไม่เหมือนกัน อย่างไรก็ตามในบริเวณถัดเข้ามาจากขอบของแอ่งรอยเชื่อมจะมีกลไกในการเกิดเกรนที่ต่างออกไป เรียกว่า การเกิดเกรนลักษณะ Competitive growth ระหว่างที่มีการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว เกรนที่แข็งตัวจะพยายามแข่งตัวและเติบโตในทิศทางที่ตั้งฉากกับแอ่งรอยเชื่อม เนื่องจากเป็นทิศทางที่มีค่า Temperature gradient และการนำความร้อนสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามเกรนของผลึกโลหะจะพยายามเติบโตในทิศทางที่เติบโตได้ง่ายที่สุด ซึ่งก็คือการเติบโตในทิศทางที่ตั้งฉากกับแอ่งรอยเชื่อม

2.12 โลหะวิทยาในรอยเชื่อม (Welding Metallography)

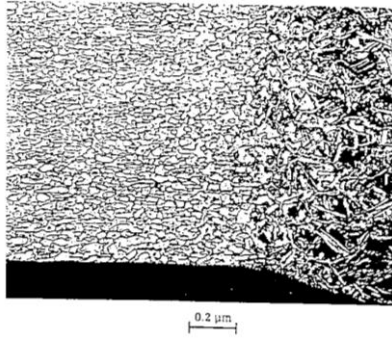
2.12.1 HAZ transformation

บริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิสูง (HTHAZ) เป็นบริเวณที่อยู่ถัดจากเส้นขอบเขตของการหลอมละลาย ซึ่งจะเข้าสู่จุดหลอมเหลวและกลายเป็นเฟอร์ไรต์เกือบจะสมบูรณ์ ในทางตรงกันข้ามบริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (LTHAZ) เป็นบริเวณเฟสที่สมดุลยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งมีจุดเปลี่ยนระหว่าง LTHAZ และ HTHAZ ที่มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเชื่อมแบบหลายแนว [19]

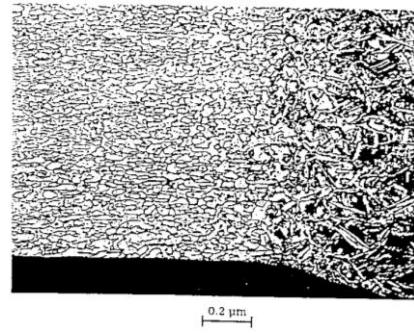
2.12.1.1 High Temperature HAZ (HTHAZ) การเปลี่ยนรูปโครงสร้างทางจุลภาคในบริเวณนี้ ถูกควบคุมด้วยวิธีปฏิบัติการเชื่อม (Welding Procedure Specification) และส่วนผสมของเหล็กกล้า โดยการให้พลังงานความร้อนในทางปฏิบัติเท่านั้น ปัญหาที่พบคือบริเวณนี้จะมีโครงสร้างที่เต็มไปด้วยเพอร์ไรท์ ซึ่งวิธีแก้ปัญหาคือได้โดยหาส่วนผสมทางเคมีของโลหะฐานที่เหมาะสมที่สุด โดยเฉพาะการเพิ่มระดับในโตรเจนของเหล็กกล้า ดังแสดงในรูปที่ 2.28 ผลที่ได้สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์รุ่นใหม่ แสดงให้เห็นว่าระดับปริมาณ เพอร์ไรท์ในบริเวณ HTHAZ นี้ปกติอยู่ในช่วง 50-70 เปอร์เซ็นต์ โดยต้องมีการควบคุมพลังงาน ความร้อนที่ให้กับแนวเชื่อม ความหนาวัสดุ อุณหภูมิเผาอ่อนก่อนเชื่อม และอุณหภูมิระหว่างแนวเชื่อม

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

2.12.1.3 การควบคุมการเปลี่ยนรูป HAZ ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อมควรจะถูกควบคุมเพื่อให้มั่นใจได้ว่าสถานะการเย็นตัวทั้งหมดซ้ำเพียงพอ จะทำให้มีการฟอร์มตัวของออสเทนไนต์ เกิดขึ้นในบริเวณ HTHAZ จะเร็วพอที่จะหลีกเลี่ยงการตกตะกอนในบริเวณ LTHAZ ในทางปฏิบัติจะมีการแนะนำช่วงพลังงานความร้อนที่มีให้กับแนวเชื่อมและอุณหภูมิระหว่างแนวเชื่อมสูงสุด อย่างไรก็ตามยังไม่มีข้อกำหนดวัฏจักรทางความร้อนที่เหมาะสมอย่างแท้จริง 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 สามารถเทียบเป็นความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อนที่ให้ต่อแนวเชื่อมกับความหนาของชิ้นงานได้จากโนโมแกรม ดังแสดงในรูปที่ 2.28 และ 2.29

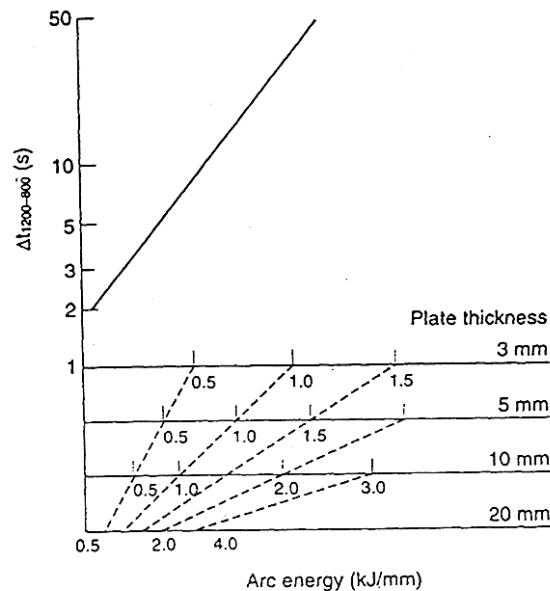


(ก) ปริมาณไนโตรเจนต่ำ



(ข) ปริมาณไนโตรเจนสูง

รูปที่ 2.28 การเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณ HAZ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์รูป (ก) ปริมาณไนโตรเจนต่ำ และ(ข) ปริมาณไนโตรเจนสูง [19]



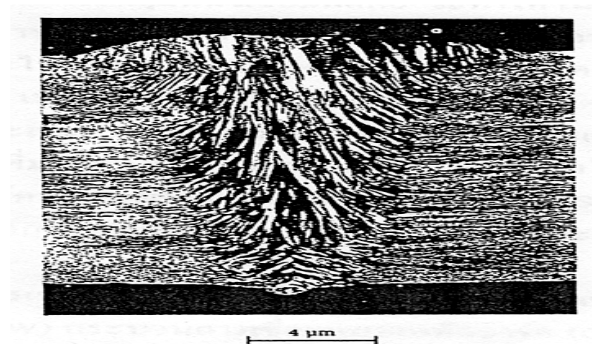
รูปที่ 2.29 โนโมแกรมสำหรับการทำนายเวลาที่ใช้ในการเย็นตัวช่วง $\Delta t_{12/8}$ ของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [19]

2.12.2 โลหะเนื้อแนวเชื่อม (Weld Metal)

โครงสร้างจุลภาคของเนื้อแนวเชื่อม จะแตกต่างจากวัสดุฐาน ซึ่งเป็นผลมาจากความแปรผันในส่วนผสมทางเคมีและผลทางความร้อน ในทางปฏิบัติเนื้อแนวเชื่อม Autogeneous เกือบจะเป็นเฟอริติกทั้งหมด ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ส่วนผสมและอัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อมไม่ได้สร้างความสมดุลในสัดส่วนของออสเทนไนต์เลย ดังนั้นส่วนผสมทางเคมีของโลหะเนื้อแนวเชื่อมจึงเป็นสิ่งสำคัญ ลวดเชื่อมโดยทั่วไปจะมีส่วนผสมที่ทำให้เกิด ออสเทนไนต์มากกว่าเหล็กโลหะฐาน

เพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติทางกลและการกัดกร่อน ในปัจจุบันนี้โลหะเติมมาตรฐาน ANSI/AWS และ A5.4 และ A5.9 (แท่งอิเล็กโทรด) ดังเช่นหมวด E/ER 2209 เหมาะสำหรับการเชื่อมเกรดโครเมียม 22 เปอร์เซนต์ ในขณะที่ E/ER 2553 เหมาะสำหรับเกรดโครเมียม 25 เปอร์เซนต์ เช่น S32550 หรือสำหรับลวดโครเมียม 22 เปอร์เซนต์ คือ X 22.9.3.L และสำหรับอัลลอยด์ที่เกรดสูงกว่านี้ เช่น X25.9.3 CuL และ X25.9.4L จะเหมาะสมกับลวดเชื่อมชุบเปอร์ดูเพล็กซ์[19]

2.12.2.1 การฟอร์มตัวเป็นของแข็งและการฟอร์มตัวของออสเทนไนต์ (Solidification and Austenite Formation) ในเนื้อแนวเชื่อมการแข็งตัวเป็นเฟอร์ไรต์เกี่ยวข้องกับการแข็งตัวตามแนวแกน (Epitaxial) ซึ่งโตขึ้นจากโลหะฐานที่ขอบเขตหลอมละลายได้แก่ HTHAZ เดนไดรต์ (Dendrite) ซึ่งเป็นรูปร่างของโครงสร้างของเฟอร์ไรต์แข็งตัว เริ่มต้นโตขึ้นในทิศทางที่สัมพันธ์กับเกรนเดียวทางความร้อน และมีการสร้างเกรนโครงสร้างเฟอร์ริติกเป็นแบบ Columnar ดังแสดงในรูปที่ 2.30



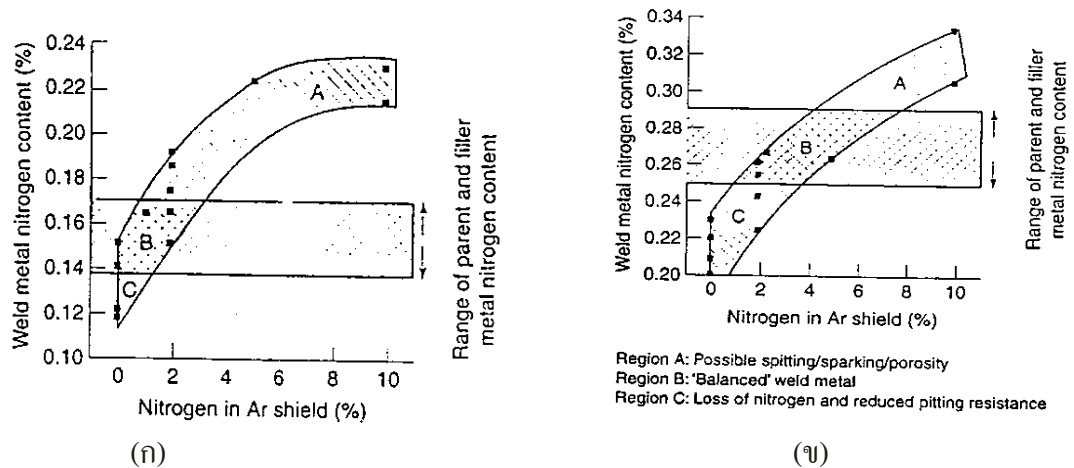
รูปที่ 2.30 โครงสร้างทางมหภาค Columnar ของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์แบบหลายแนวเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อม GTAW [19]

ซึ่งสภาวะการเริ่มต้นสำหรับการเปลี่ยนรูปร่างไปอยู่ในสถานะของแข็งอื่นนั้น จะขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว จะเป็นตัวกำหนดโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อแนวเชื่อมในท้ายที่สุด ขนาดและทิศทางของเกรนเฟอร์ไรต์พร้อมทั้งปริมาณเฟอร์ไรต์ และรูปร่างลักษณะของโครงสร้าง (Morphology) มีอิทธิพลต่อสมบัติ ของเนื้อแนวเชื่อม ตัวอย่างเช่น ลักษณะรูปร่างของโครงสร้างส่งผลต่อความเหนียว ด้านการต้านทานแรงกระแทกของเนื้อแนวเชื่อม การแบ่งแยกทางจุลภาค เนื่องจากการแข็งตัวจะไม่มีผลสำหรับโครงสร้างที่เต็มไปด้วยเฟอร์ริติก อย่างไรก็ตามธาตุที่เป็นส่วนประกอบในสถานะของแข็งระหว่างเฟสจะส่งผลกระทบที่สำคัญทางด้านสมบัติของแนวเชื่อม

การตกผลึกออสเทนไนต์นั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเนื้อแนวเชื่อม การฟอร์มตัวในระยะเริ่มต้นจะเกิดขึ้นระหว่างเกรน ตามด้วยการฟอร์มตัวภายในเกรนซึ่งขึ้นกับขนาดของเกรนเฟอร์ไรต์และอัตรา

การเย็นตัว การตกผลึกออสเทนไนต์ เป็นกระบวนการแพร่ที่มีการควบคุมนิวเคลียส (Nucleation) (อนุภาคขนาดเล็กของเฟสออสเทนไนต์ใหม่ที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส) และการโตขึ้นของเกรน สำหรับการเชื่อมที่มีการใช้พลังงานความร้อนต่ำจะมีการฟอร์มตัวของ ออสเทนไนต์เกิดขึ้นอีกครั้ง ซึ่งจะถูกรับควบคุมโดยกลไก การเปลี่ยนรูปร่างที่สมดุลจากการควบคุมการแพร่กระจายของธาตุคาร์บอนและไนโตรเจน ดังนั้นอัตราการเย็นตัวจึงเป็นสิ่งสำคัญในการกำหนดขอบเขตของการเปลี่ยนรูป อัตราการเย็นตัวช้ามีผลทำให้มีการฟอร์มตัวของออสเทนไนต์มากขึ้น ในขณะที่อัตราการเย็นตัวเร็วทำให้เกิดออสเทนไนต์ลดน้อยลง อย่างไรก็ตามการ Nucleation ของออสเทนไนต์จะยังเกิดขึ้นได้ง่ายตามบริเวณขอบเกรนหรือบริเวณที่มีเกรนเฟอร์ไรต์ขนาดเล็ก โดยทั่วไปเนื้อแนวเชื่อมเหล็กกล้า ไร้สนิมดูเพล็กซ์มีปริมาณเฟอร์ไรต์ในช่วง 30-70 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับส่วนผสมและอัตราการเย็นตัว

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



รูปที่ 2.31 ผลของระดับปริมาณไนโตรเจนในเนื้อรอยเชื่อมโดยใช้ก๊าซอาร์กอนที่มีส่วนผสมของก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซคลุมแนวเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบทั้งสแตนอาร์ค(GTAW) (ก) เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรด S31803/S32205 (ข) เหล็กกล้าไร้สนิมซูเปอร์ดูเพล็กซ์ [19]

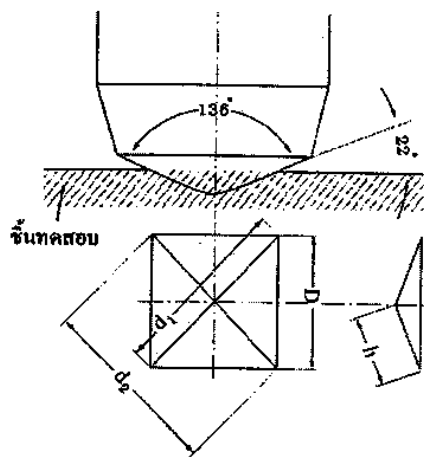
การเชื่อมแบบทั้งสแตนอาร์ค (GTAW) ด้วยก๊าซคลุมแนวเชื่อมที่มีส่วนผสมของไนโตรเจนที่มีระดับปริมาณส่วนผสมต่างกันจะเหมาะสมกับเกรดดูเพล็กซ์ ที่ต่างกัน เช่น การผสมไนโตรเจน 0.5-1.5 เปอร์เซ็นต์ จะป้องกันการสูญเสียในเนื้อแนวเชื่อมของเหล็กเกรดโครเมียม 22 เปอร์เซ็นต์ด้วยกระบวนการเชื่อม GTAW ในขณะที่การผสมก๊าซไนโตรเจนระหว่าง 2-4 เปอร์เซ็นต์ จำเป็นสำหรับเนื้อแนวเชื่อมของเกรดซูเปอร์ดูเพล็กซ์ การใช้ไนโตรเจนผสมในก๊าซคลุม แนวเชื่อม เพื่อการควบคุมไนโตรเจนในเนื้อแนวเชื่อมเป็นวิธีการที่เหมาะสมมากในการเชื่อมด้วยกระบวนการ GTAW และ GMAW การเติมไนโตรเจนมากเกินไปจะทำให้เกิดฟองอากาศในเนื้อแนวเชื่อม โดยรอยต่อที่ทำการเชื่อมด้วยกระบวนการ GTAW แบบหลายแนวด้วยการใช้ก๊าซที่มีส่วนผสมของไนโตรเจนเป็นสัดส่วนที่สูง จะมีปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นในบริเวณแนวรอยเชื่อม ซึ่งจะทำให้เกิดฟองอากาศในแนวเชื่อมถัดมา เนื่องจากในแนวเดิมมีการให้ความร้อนและแนวเดิมเต็มมีการหลอมละลายจากโลหะฐานต่ำ ดังนั้นปริมาณไนโตรเจนในแนวเชื่อมจึงขึ้นอยู่กับปริมาณไนโตรเจนของก๊าซและของแนวเชื่อมที่เชื่อมไปก่อนหน้านี้ และถ้าแนวเชื่อมไปก่อนมีความสามารถในการละลายของไนโตรเจนจำกัด แนวเชื่อมที่ตามมาอาจกลายเป็น Super Saturated และมีการสร้างฟองอากาศหรือรูพรุนขึ้นมา ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีการแนะนำ ว่าการใช้ก๊าซไนโตรเจนผสมในก๊าซอาร์กอนใช้เชื่อมเพียงแนวแรก และแนวให้ความร้อนเท่านั้น หลังจากนั้นให้ใช้ก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ระหว่างการเชื่อมที่เหลือจนเสร็จสมบูรณ์ ปัญหาอื่นที่เกิดจากการใช้ก๊าซไนโตรเจนได้แก่ การเกิดสิ่งสกปรกเจือปนและการสึกหรอของแท่งทั้งสแตนอิเล็กโทรด ซึ่งเกิดจากการปล่อยหยดโลหะเดิมมากเกินไป จากบ่อหลอมละลายหรือที่รู้จักในลักษณะของการเกิดประกายไฟ ผลอันนี้เกิดจากการที่ก๊าซไนโตรเจนออกมาจากบ่อหลอม

ละลาย ผสมกับปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซที่ใช้คลุมแนวเชื่อมซึ่งมีอยู่สูง ทำให้แท่งอิเล็กโทรดเกิดการสึกหรอ เร็วขึ้น

2.13 การทดสอบความแข็งของวัสดุ

2.13.1 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

การทดสอบความแข็งของวัสดุแบบวิกเกอร์นี้คล้ายกับบริเนล ในแง่ที่ว่า ค่าที่ได้เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้ต่อพื้นที่ของรอยกด แต่ต่างกันที่หัวกดที่ใช้เป็นเพชรพริสมิด แรงที่ใช้มีตั้งแต่ 5 -120 กิโลกรัม ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุ หัวกดที่ทำมาจากเพชรรูปพริสมิดนั้น มีฐานเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีมุมระหว่างหน้าต่อหน้าเท่ากับ 136 องศา ส่วนน้ำหนักหรือแรงกดนั้นขึ้นอยู่กับผิวชิ้นงานทดสอบ และมีขนาดตั้งแต่ 1- 200 กิโลกรัม โดยใช้เวลาในการกดประมาณ 10-30 นาที



รูปที่ 2.32 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ [20]

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 (ม)

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

การทดสอบแบบนี้เหมาะกับตัวอย่างที่บางและแข็งมาก ๆ [20]

2.13.2 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 นอกจากนี้ยังไม่เหมาะกับชิ้นทดสอบที่บางกว่าขนาดของรอยบุ๋ม การทดสอบความแข็งแรงแบบรอกเวล (Rockwell Hardness Test) การทดสอบความแข็งแรงของวัสดุแบบรอกเวล คล้ายกับการทดสอบแบบบริเนล แต่ใช้หัวกดเล็กกว่าและแรงน้อยกว่าค่าของแรงที่ใช้และชนิด หรือขนาดของหัวกดจะเปลี่ยนได้ ขึ้นอยู่กับสเกลของความแข็งแรงแบบรอกเวล ที่เราจะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบ การอ่านค่าความแข็งแรงจะอ่านโดยตรงจากเครื่อง กล่าวคือ ถ้าความลึกของรอยกดลงไปตื้น ค่าของตัวเลขจะสูง แสดงว่าวัสดุมีความแข็งแรงมากวิธีการทดสอบจะให้แรงกระทำเล็กน้อยคือ 10 กิโลกรัม จากนั้นจะเพิ่มแรงกระทำขึ้น ซึ่งอาจจะมีตั้งแต่ 60-100 กิโลกรัม ขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของหัวกด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบด้วย หัวกดที่ใช้ อาจจะเป็นลูกบอลเหล็กหรือเพชรที่มีรูปกรวย การทดสอบแบบรอกเวลนี้ ใช้อย่างกว้างขวางเพราะสามารถใช้วัดความแข็งแรงของวัสดุชนิดต่างๆ ได้มากกว่า สามารถวัดความแข็งแรงของวัสดุที่การทดสอบแบบบริเนล วัดไม่ได้ การใช้งานสะดวก

อ่านค่าได้รวดเร็ว เพราะอ่านโดยตรงจากเครื่อง และเนื่องจากรอยบ่มมีขนาดเล็กจึงไม่ทำลายผิวของชิ้นทดสอบ

2.14 คุณสมบัติของธาตุต่างๆ ที่ใช้ทำฟลักซ์

2.14.1 ธาตุอลูมิเนียมออกไซด์

อะลูมินา (Alumina) สูตรทางเคมี คือ Al_2O_3 อะลูมินาเป็นวัสดุที่ใช้มากที่สุด มีโครงสร้างผลึกแบบ Alpha Phase (Al_2O_3) เป็น Phase ที่มีความแข็งแรงสูงที่สุด โดยเฉพาะ Hexagonal Alpha เป็นตัวที่ Stable มากที่สุดที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากผลึก มีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ มีค่าความหนาแน่นสูง Alumina มักพบในรูปของ Hydrate คือ ผลึกของ Alumina มีการรวมตัวทางเคมีกับน้ำ เช่น หิน Bauxite ซึ่งประกอบด้วยแร่ที่สำคัญ 3 ชนิด คือ จิปไชท์ ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$), ไคอะสปอร์ ($Al_2O_3 \cdot H_2O$), โบห์ไมท์ ($Al_2O_3 \cdot H_2O$) จุดหลอมเหลวสูง (2050 °C) Alumina เป็นวัสดุที่มีความทนไฟสูง มีความทนต่อการกัดกร่อน จากสารเคมี และมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ด้วยสมบัตินี้เอง Alumina จึงถูกนำมาในการผลิตวัตถุดิบไฟ เบ้าหลอม หัวเทียน และแผ่นรองวงจรไฟฟ้า ปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านเตาเผา ได้รุดหน้าไปมาก สามารถผลิตอะลูนา ที่หลอมตัวเป็นเนื้อแก้ว มีความโปร่งแสงได้ดี ซึ่งใช้ประกอบกับอุปกรณ์ทำโคมไฟ และได้มีการนำอะลูมินา มาผสมในเนื้อดินทำถ้วยชาม (Tableware) ด้วย อย่างไรก็ตาม การนำอะลูมินามาใช้ ก็มีผลเสียในบางกรณี เช่น อัตราการขยายตัวของดินต่ำ ไม่เท่ากับอัตราการขยายตัวของเคลือบ เพราะเมื่อผลึกอะลูมินา เมื่อเผาผ่านความร้อน ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปผลึกซับซ้อน เหมือนซิลิกา นอกจากนี้ อะลูมินาเป็นวัสดุที่มีความถ่วงจำเพาะหนักถึง 3.95 ถ้าใช้ผสมเนื้อดินปริมาณ 35 % จะทำให้เนื้อดินหลังการเผา มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นถึง 20% และอะลูมินามีค่าความแข็งแรงสูงถึง 9 ซึ่งรองจากเพชร ทำให้การบดย่อยให้เป็นผงละเอียด ทำได้และค่อนข้างยาก [21]

2.14.2 ธาตุซิลิกอนออกไซด์

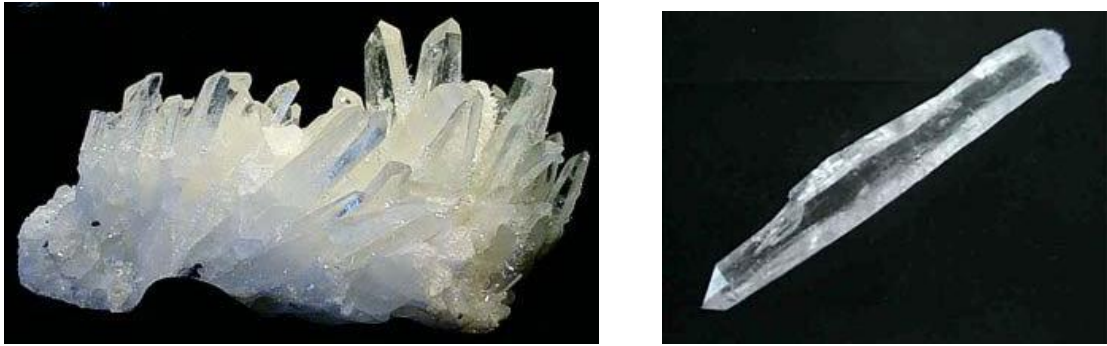
ซิลิกอนเป็นธาตุเบาที่มีคุณสมบัติกึ่งโลหะ ตามปกติในธรรมชาติ พบว่าซิลิกอนจะรวมกับออกซิเจน และอะตอมของธาตุอื่นๆ เกิดเป็นซิลิเกต (Silicates) พบได้ในชั้นเปลือกโลกมากกว่าร้อยละ 26 โดยที่ซิลิกา (silica : SiO_2) เองนั้นก็เป็ซิลิเกตชนิดหนึ่ง แต่มีเพียงอะตอมของซิลิกอน และออกซิเจนเป็นส่วนประกอบเท่านั้น ซิลิกา หรือ ททราย ที่รู้จักกันทั่วไป คือ ควอตซ์ หรือ ควอตซ์ไสต์ ซึ่งนำมาใช้ผลิตเป็น Si metal สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมผลิตอะลูมิเนียม และอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ ทั้งนี้ การพิจารณาสัดส่วนของซิลิกอนที่ผสมอยู่ในเนื้อวัสดุเป็นหลัก จะสามารถแบ่งประเภทของซิลิกอน และประโยชน์ที่จะนำไปใช้ได้แก่

- เฟอโรซิลิคอน Ferrosilicon (Si > ร้อยละ 50) เหมาะสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเหล็ก เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับเนื้อโลหะ ตลอดจนความทนทานสำหรับใช้งานด้านโครงสร้าง
- Silicon (regular : Si ร้อยละ 97) เป็นเกรดที่เหมาะสมสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมโดยทั่วไป
- Semiconductor (Hyperpure : Si ร้อยละ 99.97) ซิลิคอนความบริสุทธิ์สูงนี้ เหมาะสำหรับการงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ การผลิตสารกึ่งตัวนำ และเซลล์แสงอาทิตย์

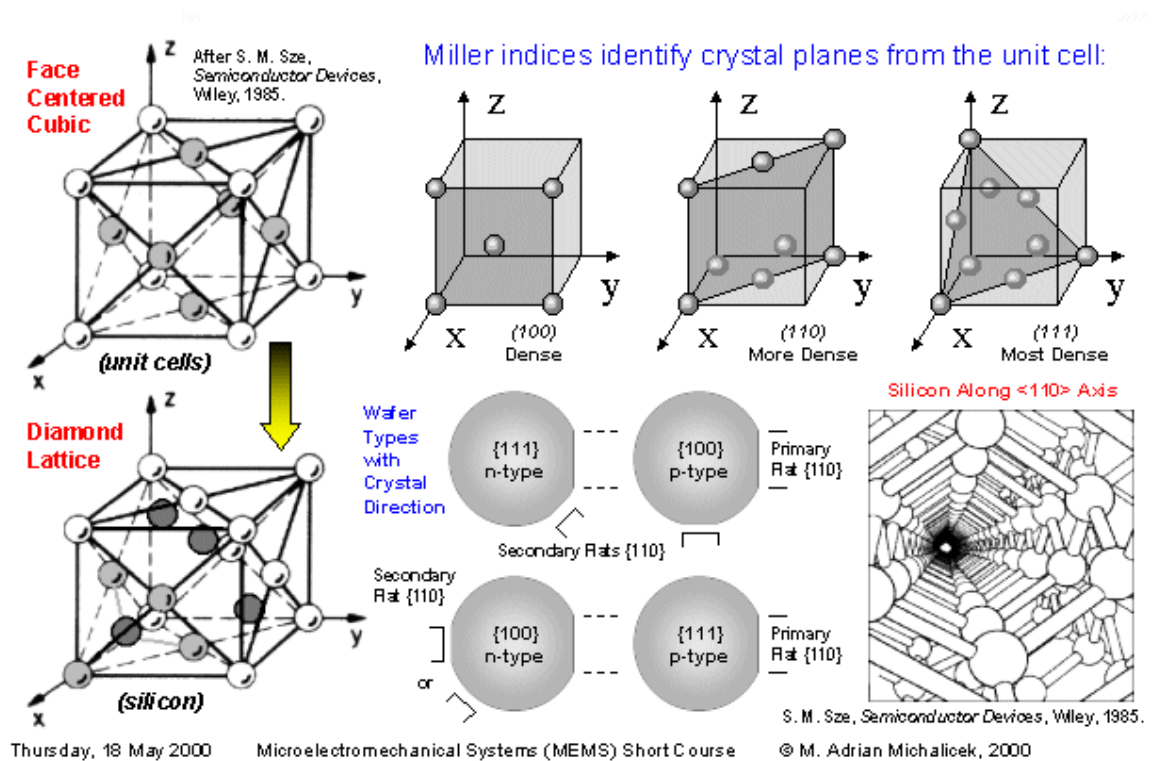
หรับผลิตภัณฑ์ประเภท Si metal นั้น เหมาะสำหรับการอุตสาหกรรมต้นน้ำ (Primary Industry) และกลางน้ำ (Secondary Industry) เพื่อการผลิตอะลูมิเนียม และอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์เช่น การผลิตซิลิคอน (Silicone) ส่วน Ferrosilicon เกือบทั้งหมดจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก และเหล็กกล้า ซึ่ง Ferrosilicon ที่นิยมนำไปใช้มีด้วยกัน 2 เกรดมาตรฐาน คือ Ferrosilicon ที่มีซิลิคอนเป็นส่วนผสมร้อยละ 50 และ 75 ตามลำดับ Si metal ที่นำ มาใช้ในอุตสาหกรรมต้นน้ำ โดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงมากกว่าที่ใช้ในอุตสาหกรรมกลางน้ำ นอกจากนี้ อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ยังต้องการ Si metal ในรูปผง (powder) มากกว่าแบบก้อน ซึ่งนิยมนำใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอะลูมิเนียม สำหรับ Si metal ที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ จำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพ และความบริสุทธิ์ให้สูงขึ้นด้วยการนำไปผ่านกรรมวิธีต่างๆ ทั้งทางฟิสิกส์ และเคมี เพื่อให้ได้ซิลิคอน (silicon metal) เกรดที่เหมาะสมสำหรับใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วน อุปกรณ์ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์ อาทิสารกึ่งตัวนำ ในวงจรคอมพิวเตอร์ ไมโครโปรเซสเซอร์ ฯลฯ ต่อไป

คุณสมบัติของซิลิคอน

1. ซิลิคอนมีลักษณะโครงสร้างแบบผลึก มีสีเทา สมบัติกึ่งโลหะ และเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี มีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ Si ซิลิคอนเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับ 2 ในโลก ปริมาณร้อยละ 25.7 (โดยน้ำหนัก) รองจากออกซิเจน โดยทั่วไปจะไม่พบซิลิคอนบริสุทธิ์ในธรรมชาติ แต่จะพบเป็นสารประกอบออกไซด์ หรือซิลิเกต (มีโลหะผสมอยู่ เช่น แกรไฟต์ แร่ใยหิน เฟลสปาร์ และ ไมกา เป็นต้น) ในรูปของผลึก ซึ่งมีซิลิคอน 1 อะตอม และออกซิเจน 2 อะตอม ที่เรารู้จักกันดี คือ ซิลิกา หรือ ควอตซ์ (SiO_2) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ประมาณ 1,710 องศาเซลเซียส [21]



รูปที่ 2.33 ลักษณะแร่ควอทซ์ [21]



รูปที่ 2.34 โครงสร้างผลึกซิลิคอน[21]

2.14.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium oxide)

สูตรทางเคมี คือ TiO_2 ธาตุโลหะไทเทเนียมเป็นที่รู้จักกันว่าเป็นธาตุที่มีอัตราความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง เป็นโลหะที่แข็งแรงแต่มีความหนาแน่นต่ำสามารถทำให้เป็นแผ่นบางๆ ได้ (โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีออกซิเจน), มันวาว, และมีสีขาวโลหะ มีจุดหลอมเหลวสูง (มากกว่า $1,650^\circ\text{C}$ หรือ $3,000^\circ\text{F}$) จึงมักนำไปใช้เป็นโลหะทนไฟ ไทเทเนียมเป็นพาราแมกเนติกมีสภาพนำไฟฟ้าและสภาพนำความร้อนต่ำ เกรดของไทเทเนียมในเชิงการค้า (บริสุทธิ์ 99.2%) มีความทนแรงเค้นดึงสูงสุดประมาณ 63,000 psi (434 MPa) เท่ากับโลหะผสมเกรดต่ำทั่วไป แต่เบากว่า 45% ไทเทเนียมมีความ

หนาแน่นมากกว่าอลูมิเนียม 60% แต่แข็งกว่าสองเท่าของโลหะผสมอลูมิเนียม 6061-T6 ที่นิยมใช้กันทั่วไป โลหะผสมไทเทเนียมบางชนิด (เช่น บีตาซี, Beta C) ทนแรงเค้นดึงสูงกว่า 200,000 psi (1,400 MPa) อย่างไรก็ตาม ไทเทเนียมจะสูญเสียความแข็งแรงเมื่อได้รับความร้อนสูงกว่า 430 °C (806 °F)

ไทเทเนียมนั้นแข็งพอใช้ (แม้ว่าจะไม่แข็งเท่ากับเหล็กกล้าอบชุบบางเกรด) ไม่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก และเป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนที่คุณภาพเลว การใช้กับเครื่องจักรต้องทำอย่างระมัดระวัง เพราะวัสดุจะอ่อนตัวและถูกครูดเป็นรอยถ้าเครื่องมือมีความแหลมคมและไม่ได้ใช้วิธีการระบายความร้อนที่เหมาะสม เครื่องมือที่ทำจากไทเทเนียมคล้ายกับเครื่องมือที่ทำจากเหล็ก โครงสร้างของไทเทเนียมนั้นมีขีดจำกัดความล้าซึ่งจะกำหนดช่วงชีวิตของการนำไปใช้งานบางประเภท คุณสมบัติความแข็งแรง (stiffness) ของโลหะผสมไทเทเนียม ปกติแล้วไม่ดีเท่าวัสดุอื่น เช่น โลหะผสมอลูมิเนียมและคาร์บอนไฟเบอร์ ดังนั้น จึงไม่ค่อยจะมีการนำไทเทเนียมไปใช้ในโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงสูง ไทเทเนียมมีสองอัญรูปคือรูปแบบแอลฟาหกเหลี่ยมที่จะเปลี่ยนเป็นรูปแบบบีตาแบบลูกบาศก์กลางตัว (body-centered cubic, แลตทิซ) ที่ 882 °C (1,620 °F) ความร้อนจำเพาะของรูปแบบแอลฟาจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับความร้อนเพื่อส่งผ่านระดับความร้อนนี้แต่จะตกลงแลเกือบจะคงที่ในรูปแบบบีตาโดยไม่คำนึงถึงอุณหภูมิ ส่วนรูปแบบโอเมกาที่เพิ่มขึ้นมาจะคงอยู่และเสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ความดันสูงคล้ายกับเซอร์โคเนียมและแฮฟเนียม แต่จะอุปเสถียร (metastable) ที่ความดันบรรยากาศ รูปแบบนี้ปกติจะเป็นรูปหกเหลี่ยม (อูคมคติ) หรือสามเหลี่ยม (บิคเบียว)

2.15 คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

เมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จนมีการเปลี่ยนแปลงที่ตัววัสดุโลหะ อาจทำให้ความสามารถ หรือคุณสมบัติทางกลของวัสดุ เช่น ความแข็งแรง, ความแข็ง, ความเหนียว และโมดูลัสของความยืดหยุ่น เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ วัสดุโลหะแต่ละชนิด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะมีคุณสมบัติทางความร้อนไม่เท่ากัน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างกะทันหันจนเกิดการเปลี่ยนแปลงความร้อน (อาจรวมไปถึงความเย็นจัดด้วยก็ได้) ความร้อนจะส่งไปในรูปของ การส่งผ่านความร้อน (Heat transfer) ไปที่ตัวโลหะ จนโลหะบางชนิดอาจสูญเสียความเหนียว, ความแข็งแรงต่อการดึง หรือความแข็งแรงต่อการกระแทกเมื่อโลหะเกิดความร้อนขึ้น มันจะเกิดการยืดแผ่ขยายตัว โลหะบางชนิดจะขยายตัวอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

2.15.1 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of thermal expansion)

จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการขยายตัวทางความร้อน เปรียบเทียบกันในวัสดุโลหะที่ต่างชนิดกัน ยิ่งค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนมีค่ามาก วัสดุก็จะขยายตัวได้มากกว่า มีสมการในการคำนวณขนาดของการเปลี่ยนความยาวสำหรับวัสดุโลหะ

2.15.2 จุดหลอมเหลว

จุดหลอมเหลว (Melting point) เป็นคุณสมบัติทางความร้อนอย่างหนึ่ง โดยจุดนี้คืออุณหภูมิที่วัสดุจะเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลว ตัวอย่างเหล็กกล้าจะมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 1,700 K (องศาเคลวิน) ส่วนวัสดุอื่น ๆ

2.15.3 การนำความร้อน

ถ้าความร้อนสามารถเคลื่อนที่ผ่านเนื้อวัสดุได้อย่างรวดเร็ว เราเรียกวัดนี้ว่ามี คุณสมบัติในการนำความร้อน (Thermal conductivity) วัสดุที่มีระดับในการนำความร้อนที่สูงความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวมันเองอย่างรวดเร็ว ข้อดีก็คือสามารถเลือกวัสดุนำไปใช้ในการระบายความร้อน แต่ถ้าต้องการกักเก็บความร้อนเอาไว้ก็ให้เลือกวัสดุที่มีการนำความร้อนที่น้อย วัสดุโลหะที่มีค่าการนำความร้อน วัสดุโลหะที่นำความร้อนที่ดีที่สุดก็คือ เงิน (แต่ไม่นิยมใช้งานทั่วไปเพราะว่ามันมีราคาสูง) รองลงมาก็คือ อลูมิเนียม และทองแดง ทั้งคู่มีคุณสมบัติในการนำความร้อนที่สูง จึงเหมาะในการนำไปทำเป็นวัสดุระบายความร้อน

2.15.4 ความจุความร้อน

ความจุความร้อน (Heat capacity) คือ วัสดุได้รับปริมาณความร้อนจนอุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนแปลงไปหนึ่งหน่วยองศา ซึ่งมันจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาความร้อนจำเพาะของวัสดุ หน่วยที่นิยมใช้วัดปริมาณความร้อนก็คือ BTU (British Thermal Unit: ปริมาณความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 ปอนด์มีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง 1 องศาฟาเรนไฮต์) หรือในหน่วยเอสไอ จูล ($J = Nm$) หรือกิโลแคลอรี (kcal)

2.15.5 ความร้อนจำเพาะ

ความร้อนจำเพาะ (Specific heat: C_p) คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดจากการรับ หรือสูญเสียอุณหภูมิความร้อน โดยคิดต่อหนึ่งหน่วยมวล และหนึ่งหน่วยอุณหภูมิ โดยที่สารนั้นจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ หน่วยของความร้อนจำเพาะก็คือ Btu/lb/°F หรือหน่วย kcal/kg K ค่าความร้อนจำเพาะในวัสดุโลหะ [22]

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่เป็นโลหะ [22]

วัสดุโลหะ	ความถ่วงจำเพาะ	การนำความร้อนที่ (0°C) W / (m .K)	สัมประสิทธิ์ การขยายตัวเชิง เส้น $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	จุด หลอมเหลว Kelvin (K)
อลูมิเนียม (Aluminum)	2.7	237	25	933
ซิลิกอน (Silicon)	2.33	83.5	3	1684
ไทเทเนียม (Titanium)	4.54	22	8.5	1943

2.16 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Heiple and Roper [4] ได้ศึกษาทิศทางการไหลของน้ำโลหะในบ่อหลอมละลายจะมีผลต่อลักษณะรูปร่างสัญญาณทางโลหะวิทยางานเชื่อม สัมประสิทธิ์อุณหภูมิ ความตึงผิวเป็นปัจจัยในการปลักดันทิศทางการไหลของเหลวในบ่อหลอมละลายบริเวณแนวเชื่อม ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 2205 ด้วยการเชื่อมทิกที่ใช้ฟลักซ์ SiO_2 , MoO_3 และ Cr_2O_3 จะเพิ่มการหลอมลึกของแนวเชื่อม ขณะที่ฟลักซ์ TiO_2 และ MnO_2 จะส่งผลต่อการหลอมลึกค่อนข้างกว้างและคืนของแนวเชื่อม

ซัชชัย อินนุมาตร [23] ได้ศึกษาอิทธิพลของอนินทรีย์ฟลักซ์ต่อการหลอมลึกและสมบัติทางกลในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบก๊าซทั้งสแตนอาร์ค จากการทดลองเบื้องต้นพบว่าฟลักซ์ที่ผู้วิจัยคิดค้นขึ้นนี้ประกอบด้วยสารเคมีอย่างน้อย 2 ชนิด ละลายใน isopropyl alcohol ในอัตราส่วนประมาณ 1: 4 เพื่อให้เจือจางและสามารถทาลงบนผิวชิ้นงานได้ง่าย ฟลักซ์จะถูกทาบนชิ้นงานบริเวณรอยต่อที่จะทำการเชื่อม แล้วจึงเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมด้วยวิธีปกติ พบว่าฟลักซ์ที่ทาไปนั้นจะทำหน้าที่เพิ่มระดับการซึมลึกของแนวเชื่อม ได้มากกว่าแนวเชื่อมปกติที่ไม่ใช้ฟลักซ์ถึง 3 เท่า โดยที่ใช้ความเร็วในการเชื่อมและกระแสเชื่อมเท่ากันกับการเชื่อมด้วยวิธีปกติ และไม่ต้องเติมโลหะเชื่อมอีกด้วย นอกจากนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงสมบัติเชิงกล และสมบัติทางโลหะวิทยาบริเวณแนวเชื่อม ทั้งชิ้นงานที่เชื่อมโดยใช้ฟลักซ์และชิ้นงานเชื่อมที่ไม่ใช้ฟลักซ์และเปรียบเทียบ ผลการทดลองที่ได้ เพื่อให้มั่นใจว่าฟลักซ์สำหรับการเชื่อมโลหะกลุ่มสแตนเลสนี้จะไม่ส่งผลเสียในการใช้งานจริงในอุตสาหกรรม

ได้ศึกษาผลของฟลักซ์ต่อกระบวนการเชื่อมตึก ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ 2205 ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะ โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมหนา 6 มิลลิเมตร ตัวแปรที่ศึกษาโดยใช้ผงฟลักซ์ออกไซด์ (TiO_2 , MnO_2 , SiO_2 , MoO_3 และ Cr_2O_3) ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรด 2205 โดยการเชื่อมทำแบบ bead-on-plate ผลการทดลองบ่งชี้ว่า การใช้ฟลักซ์ SiO_2 , MoO_3 และฟลักซ์ Cr_2O_3 ส่งผลให้ความสามารถในการหลอมลึกเพิ่มขึ้นของการเชื่อมตึก และสามารถเพิ่มอัตราการซึมลึกระหว่างความกว้างและความลึก และการบิดโค้งเชิงมุมมีแนวโน้มที่จะลดลง ของงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เกรด 2205 และส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงสูงขึ้น และผลของการอาร์คพลาสมาของการเชื่อม ซึ่งเป็นพื้นฐานของการกำหนดคุณลักษณะทางโลหะวิทยาของโลหะโดยการเชื่อมตึก