

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์การเชื่อม ต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค ของการเชื่อม โลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (AISI 2205) กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (AISI 304) ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมมิก ประกอบด้วยเนื้อหาที่สำคัญและเกี่ยวข้องในการวิจัย ดังนี้

2.1 แก๊สปกคลุม (Shielding Gas)

แก๊สปกคลุม ใช้ปกคลุมบริเวณแนวเชื่อมและบ่อหลอมละลาย เพื่อไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือ สกปรก เนื่องจากวัสดุงานรวบตัวกับไนโตรเจน ออกซิเจน และไอน้ำในอากาศไนโตรเจนที่ฝังตัวอยู่ในแนวเชื่อม จะทำให้แนวเชื่อมมี Ductility และ Impact Strength ลดลงทำให้แตกง่าย ถ้าไนโตรเจนมี ปริมาณมากจะทำให้แนวเชื่อมเกิดรูพรุน ออกซิเจนที่มีอยู่มากในเหล็กจะรวมตัวกับคาร์บอน เป็น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งแก๊สนี้จะฝังตัวในโลหะ ทำให้เกิดเป็นรูพรุน ออกซิเจนที่อยู่ในเหล็ก สามารถรวมตัวกับธาตุอื่นๆ ที่อยู่ในเนื้อเหล็กได้ ซึ่งจะอยู่ในรูปของสารประกอบฝังตัวภายในแนว เชื่อม ส่วนไฮโดรเจนที่อยู่ในไอน้ำเมื่อแยกตัวออกมา จะรวมตัวกับหรืออะลูมิเนียมหรือเหล็กทำให้เกิด รูพรุนและแตกได้แนวเชื่อมได้ การหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวทำได้โดยการใช้แก๊สปกคลุมซึ่งเดิมใช้ แก๊สเฉื่อยจำพวกอาร์กอนและฮีเลียม ปัจจุบันใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และออกซิเจนผสม กับแก๊สเฉื่อย สำหรับแก๊สอาร์กอน ฮีเลียมและ CO₂ สามารถใช้ได้เลย โดยไม่ต้องผสมกับแก๊สอื่นใด หรืออาจจะผสมกับแก๊สอื่น เพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่มีความสมบูรณ์

2.1.1 แก๊สอาร์กอน

กระบวนการเชื่อมโดยใช้แก๊สคลุม ใช้อาร์กอนซึ่งเป็นแก๊สเฉื่อยมาใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม และอะลูมิเนียม ในบรรยากาศจะมีอาร์กอนอยู่ประมาณ 0.94% โดยปริมาตร หรือ 1.3% โดยน้ำหนักมี จุดหลอมที่ -189.2 °C จุดเดือด -185.7 °C หนักกว่าฮีเลียมประมาณ 10 เท่า หนักกว่าอากาศประมาณ 1.4 เท่า อาร์กอนที่นำมาใช้ในการเชื่อม จะต้องมีความบริสุทธิ์ประมาณ 99.995% ถ้าต้องการความ บริสุทธิ์มากขึ้น ให้ใช้วิธีทำความสะอาดทางเคมีเพิ่มเติมอีก ก็จะได้อาร์กอนบริสุทธิ์ถึง 99.999% อาร์กอนมีศักย์การเกิดไอออนต่ำ (low ionization potential) ความเสถียรต่อการอาร์กสูง การอาร์กเรียบ สม่ำเสมอถึงแม้ความยาวการอาร์กไม่คงที่ ก็ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกระแสเชื่อมมาก ลดการเกิด ประกายโลหะ ทำให้รูปหน้าตัดของรอยเชื่อมลึกลงและลึกลงด้วยตะปู เมื่ออาร์กอนมีศักย์การเกิดไอออน ต่ำ แรงดันการอาร์กจึงอยู่ในเกณฑ์ต่ำสามารถอาร์กใน กระแสไฟฟ้าต่ำได้ [3] การเลือกใช้อัตราการ ไหลของแก๊สคลุมต่ำ เพราะอาร์กอนมีความหนาแน่นสูง ทำให้การปั่นป่วนของเปลวเชื่อมน้อย ความเสถียรของการอาร์กขึ้นอยู่กับศักย์ของการเกิดไอออนด้วย แต่ถ้าอาร์กอนมีศักย์การเกิดไอออนต่ำ

อะตอมจึงหลุดเข้าไปในออรอนได้ง่าย ทำให้การอาร์กเสถียรและสม่ำเสมอเมื่อเทียบกับฮีเลียมซึ่งมีศักย์การเกิดออรอนสูงกว่าจึงต้องใช้พลังงานถึง 24.5 eV เพื่อขับอิเล็กตรอนตัวแรกออกจากอะตอม และใช้พลังงานถึง 54.4 eV สำหรับอิเล็กตรอนที่สอง ซึ่งสูงกว่าอาร์กอนที่ใช้พลังงานเพียง 15.76 eV ในการขับอิเล็กตรอนตัวแรกและอิเล็กตรอนที่สองเพียง 27.6 eV เท่านั้นพลังงานเชื่อมต่ำ เพราะอาร์กอนทำให้อะตอมเหลวแข็งตัวเร็ว การหลอมเข้าด้วยกันของเนื้อโลหะเชื่อมกับขอบตะเข็บเชื่อมไม่ค่อยดี จึงไม่นิยมใช้กับงานเชื่อมอะลูมิเนียม ทองแดง นิกเกิลและไทเทเนียม เป็นแก๊สเฉื่อยที่นำความร้อนต่ำ จึงเกิดเปลวอาร์กแคบและมีความเข้มข้นสูง ทำให้งานได้รับพลังงานและความร้อนสูง แนวเชื่อมที่ได้จะแคบและซึมลึกดี การที่แก๊สอาร์กอนให้เปลวอาร์กที่เข้มข้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาทำความสะอาดออกไซด์บนผิวของชิ้นงานเชื่อม โดยเฉพาะการเชื่อมอะลูมิเนียม แก๊สอาร์กอนใช้เป็นแก๊สปกคลุมสำหรับการเชื่อม MIG ซึ่งใช้ในการเชื่อมโลหะที่ไม่ใช่เหล็กและโลหะผสม ได้แก่ อะลูมิเนียม แมกนีเซียม อะลูมิเนียมผสมกับแมกนีเซียมและทองแดง [4]

2.1.2 แก๊สฮีเลียม

แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สเฉื่อย ที่มีน้ำหนักเบาว่าแก๊สอาร์กอนแต่นำความร้อนดีกว่า ดังนั้นเปลวการอาร์กที่เกิดจากการใช้แก๊สฮีเลียมปกคลุมกว้าง และมีความเข้มข้นของการอาร์กต่ำกว่าใช้แก๊สอาร์กอน จึงทำให้ได้แนวเชื่อมที่กว้างและซึมลึกลึกน้อยกว่าใช้แก๊สอาร์กอนแก๊สฮีเลียม จะให้อาร์กโวลต์เตตสูงกว่าอาร์กอนเมื่อใช้ระยะอาร์กเท่ากัน แก๊สฮีเลียมได้มาจากการผลิตแก๊สธรรมชาติ โดยการอัดแก๊สธรรมชาติแล้วทำให้เย็นตัวลงด้วยขบวนการของแก๊สเหลว จากนั้นแยกเอาไฮโดรคาร์บอน ไนโตรเจน ออกทำให้ได้แก๊สฮีเลียม การเริ่มอาร์กจะเกิดขึ้นยากในบรรยากาศของแก๊สฮีเลียม เมื่อทำการเชื่อม TIG แต่การเชื่อมด้วย MIG จะง่ายขึ้น แก๊สฮีเลียมใช้เป็นแก๊สปกคลุมสำหรับการเชื่อมโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก ได้แก่ ทองแดง อะลูมิเนียม แมกนีเซียม แก๊สฮีเลียมนี้ยังใช้ผสมกับแก๊สชนิดอื่นเพื่อใช้เป็นแก๊สปกคลุมการเชื่อมได้

2.1.3 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ใช้เป็นแก๊สปกคลุมมักจะเกิดเม็ดโลหะกระเด็น และการอาร์กไม่สม่ำเสมอสามารถแก้ไขด้วยการผสมกับอาร์กอน ลักษณะของเปลวอาร์กและแนวเชื่อมจะแตกต่างกัน ตามความแตกต่างของอัตราส่วนผสมของแก๊สทั้งสอง ส่วนสมบัติทางกลนั้นการใช้แก๊สอาร์กอนผสมกับ CO₂ จะให้ผลดีกว่าการใช้แก๊ส CO₂ อย่างเดียว แก๊สผสมชนิดนี้เหมาะสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าละมุน ซึ่งจะทำให้การซึมลึกดี ลวดเชื่อมจะหลอมละลายดีกว่าใช้แก๊ส CO₂ ซึ่งอยู่ในลักษณะของสารประกอบที่ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์กับออกซิเจน ซึ่งมีไฮโดรเจนเหมือนกับอาร์กอนและฮีเลียม ดังนั้นบริเวณการอาร์กที่มีความร้อนสูง จะเกิดออกซิเจนอิสระ เมื่อใช้แก๊ส CO₂ เป็นแก๊ส ปกคลุม เปลวอาร์กที่เกิดขึ้นจะกว้างกว่าการใช้แก๊สอาร์กอน แต่จะแคบกว่าใช้แก๊สฮีเลียม [5] แก๊ส CO₂ เป็นผล

ที่ได้จากการเผาแก๊สธรรมชาติ ถ่านโค้กหรือน้ำมัน สำหรับแก๊ส CO₂ ที่ได้จากการผลิตแอมโมเนียและการหมักแอลกอฮอล์ จะมีความบริสุทธิ์สูงถึง 100% แนวเชื่อมที่ปกคลุมด้วย CO₂ จะมีความกว้างปานกลางมีการซึมลึกดี การหลอมละลายดี ลักษณะแนวเชื่อมไม่เกิดการกัดแหว่งบริเวณขอบแนวเชื่อม แต่มีข้อเสีย คือ จะเกิดเม็ดโลหะและการอาร์กไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะเมื่อใช้กับการถ่ายเทโลหะลวดเชื่อมแบบ Open Arc ดังนั้น การใช้แก๊ส CO₂ ปกคลุม จึงเหมาะกับการเชื่อมแบบ Micro-Wire ใช้สำหรับเชื่อมเหล็กถมน แก๊ส CO₂ มีราคาถูกกว่าแก๊สปกคลุมชนิดอื่น จึงทำให้ต้นทุนในการเชื่อมต่ำ โดยบรรจุในถังอาจจะเป็นรูปของเหลวหรือแก๊ส สำหรับแก๊สที่ใช้ในการเชื่อมจะมีความชื้นต่ำ ปริมาณแก๊สที่ใช้ปกคลุมแนวเชื่อมโดยทั่วไปจะใช้ 25 C.F.H. (ลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง) ถ้าต้องการใช้อัตราการไหลของแก๊สเกินกว่า 25 C.F.H. ควรจะใช้แบบ Manifold ที่ต่อแก๊ส CO₂ 2 ถังขนานกันหรือติดตั้งทำความร้อนไว้ระหว่างถังแก๊สกับ Regulator การใช้ปริมาณการไหลของแก๊สมากเกินไปอาจจะเป็นต้นเหตุให้แก๊ส CO₂ เหลวภายในถังไหลออกได้

2.1.4 อาร์กอน-ฮีเลียม

การนำแก๊สอาร์กอนผสมกับแก๊สฮีเลียมเพื่อรวมเอาสมบัติในการเชื่อม ของแก๊สทั้งสองเข้าด้วยกันโดยผสมฮีเลียม 20-90% หรือมากกว่า อัตราส่วนในการผสมจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ การผสมกระทำได้หลายวิธี โดยการต่อแก๊สจากถังแก๊สแต่ละชนิดเข้าผสมกันที่ชุดผสม ซึ่งชุดผสมนี้สามารถควบคุมเปอร์เซ็นต์ของแต่ละชนิดได้ตามต้องการ

2.1.5 อาร์กอน+ออกซิเจน

การใช้แก๊สอาร์กอนกับการเชื่อม MIG จะให้การซึมลึกกลางแนวเชื่อมไม่ดี เกิดการกัดแหว่งที่ขอบแนวเชื่อม การป้องกันทำได้โดยผสมด้วยออกซิเจน 1-5% กับแก๊สอาร์กอน โดยออกซิเจนที่ผสมลงไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเหมือนเป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้กับลวดเชื่อมที่หลอมละลาย ทำให้สามารถซึมเข้าถึงกลางของแนวเชื่อมลดการกัดแหว่งที่ขอบแนวเชื่อม เปลวอาร์กที่เกิดขึ้นสม่ำเสมอ แนวเชื่อมจะสวยงามไม่ม่นจนเกินไป แก๊สผสมชนิดนี้จะใช้กับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถใช้เชื่อมเหล็กถมนและเหล็กกล้าผสมต่ำได้ แต่ราคาของแก๊สนี้ค่อนข้างสูง

2.1.6 อาร์กอน-ไฮโดรเจน

การผสมแก๊สไฮโดรเจนกับอาร์กอน ทำให้เพิ่มความเร็วการเชื่อมได้สูงขึ้น เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มศักย์การอาร์ค (Arc Voltage) และการเหนี่ยวนำความร้อน (Thermal Conductivity) แต่ถ้าผสมแก๊สไฮโดรเจนในปริมาณมาก จะก่อให้เกิดโพรง (Porosity) ขึ้นในเนื้อโลหะรอยเชื่อมได้ ดังนั้น การเลือกใช้แก๊สปกคลุมที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อม GMAW จึงมีความสำคัญ แก๊สอาร์กอนผสมกับแก๊ส

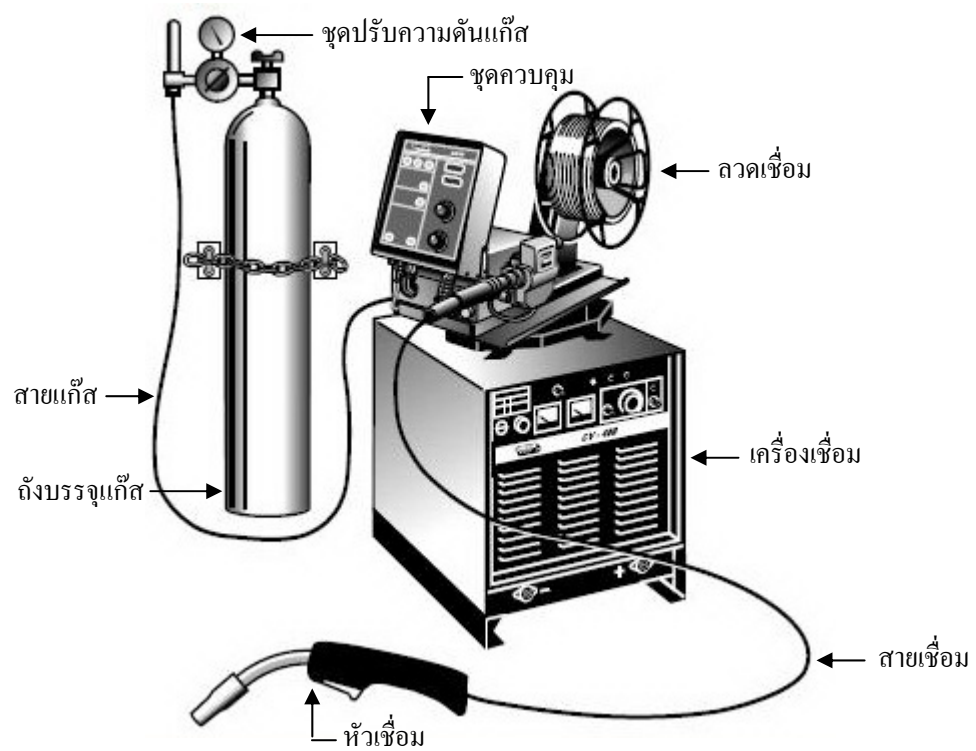
ไฮโดรเจน จะนำไปใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม, Inconel Monel และโลหะที่มีปัญหาเนื่องจากรูพรุน จุดประสงค์ของการใช้แก๊สผสมชนิดนี้ เพื่อช่วยเพิ่มความร้อนในการเชื่อมให้สูงขึ้น ช่วยควบคุมรูปร่างของรอยเชื่อมการไหลตัวของน้ำโลหะในบ่อหลอมละลายดี และรอยเชื่อมสม่ำเสมอ แก๊สผสมชนิดนี้ไม่ใช่แก๊สเฉื่อยที่สมบูรณ์ ดังนั้น จึงไม่ควรนำไปเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนหรือเหล็กกล้าผสมต่ำ ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถใช้แก๊สผสมนี้ ที่มีอัตราส่วนผสมของไฮโดรเจนสูงถึง 15% ตัวอย่างอัตราส่วนผสมที่ใช้ อาร์กอน 95 % และไฮโดรเจน 5% [6]

2.1.7 อาร์กอน-ฮีเลียม-CO₂

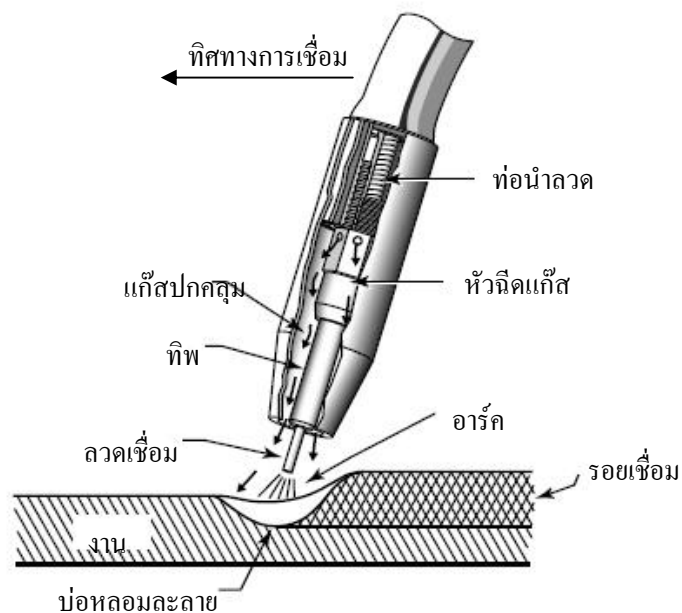
แก๊สผสมชนิดนี้ใช้สำหรับเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กความแข็งแรงสูง ด้วยวิธี Short Arc ซึ่งปริมาณของแก๊สแต่ละชนิดจะมีสมบัติทำให้งานทนต่อการกัดกร่อนดี การอาร์ก สม่ำเสมอซึมลึกดี และช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อม การใช้แก๊สปกคลุมผสมอาจจะใช้แก๊สดังกล่าวผสมกันหลายชนิดก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติตามที่ใช้ต้องการ และอัตราส่วนจะเปลี่ยนแปลง ตามต้องการ ด้วย

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

เป็นกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย พลังงานความร้อนเกิดจากการอาร์คระหว่างลวดเชื่อม (Filler wire or Solid Electrode wire) ที่ไหลป้อนอย่างต่อเนื่องกับชิ้นงาน (Base Metal) โดยมีแก๊สเฉื่อย (Inert gas) หรือ แก๊สผสม (Mixer gas) หรือแก๊สปฏิกิริยา (Active gas) ปกคลุมการอาร์คป้องกันมิให้แก๊สออกซิเจนหรือแก๊สไนโตรเจน เข้ามารวมตัวกับโลหะที่กำลังหลอมละลาย การเรียกชื่อกระบวนการเชื่อมมิกหรือแม็ก ขึ้นอยู่กับแก๊สที่ใช้ปกคลุม



รูปที่ 2.1 แสดงเครื่องเชื่อมสำหรับกระบวนการเชื่อมแบบเมทัลอาร์ค



รูปที่ 2.2 แสดงพื้นฐานหลักการอาร์คของกระบวนการเชื่อมแบบเมทัลอาร์ค

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

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

2.2.2 MIG (Metal Inert Gas Welding)

เมื่อใช้แก๊สเฉื่อยเป็นแก๊สปกคลุม เช่น แก๊สอาร์กอน (Ar) แก๊สฮีเลียม (He) หรือแก๊สอาร์กอนผสมกับแก๊สฮีเลียม สามารถใช้เชื่อมกระแสไฟสูงๆ สามารถทำให้เกิดการส่งถ่ายน้ำโลหะ (Metal transfer) จากลวดเชื่อม (wire electrode) สู่ชิ้นงานแบบ Spray Arc ได้

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

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

2.2.4 อิทธิพลของกระแสเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม (Current and Speed)

กระแสไฟเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม มีอิทธิพลอย่างมากต่อปริมาณของบ่อหลอมละลายและการซึมลึกของรอยเชื่อม การที่ใช้กระแสไฟเชื่อมสูงจะมีผลต่อรูปร่างของบ่อหลอมละลาย (Weld pool) ให้มีขนาดเพิ่มมากขึ้น ทำให้ชิ้นงานมีโอกาสที่จะหดตัวมากขึ้น จะส่งผลต่อการเกิดรอยแตกร้าวและโพรงตรงกลางแนวเชื่อม

2.2.5 ลวดเชื่อม (Wire Reel)

ลวดเชื่อมที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมมิก/แม็ก ต้องเลือกชนิดที่มีสมบัติเดียวกัน หรือมีส่วนผสมทางเคมีใกล้เคียงกับวัสดุงานที่เชื่อม จึงจะได้แนวเชื่อมมีคุณภาพและส่วนผสมทางเคมี ที่ได้มาตรฐาน

2.2.5.1 การเลือกใช้ลวดเชื่อม

การเลือกใช้ลวดเชื่อมจะต้องพิจารณาชนิดโลหะงานเชื่อม ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกล เป็นตัวประกอบหลัก การเลือกลวดเชื่อมที่ถูกต้องเหมาะสมงานเชื่อมจึงจะสมบูรณ์ ถ้าไม่รู้ชนิดโลหะงาน

เชื่อมจะต้องทำการตรวจสอบด้วยตาเปล่า ชั่งน้ำหนัก การดูด้วยแม่เหล็ก ทดสอบด้วยประกายไฟ การแตกหักหรือวิธีทางเคมี ข้อพิจารณาในการเลือกใช้ลวดเชื่อมมีดังนี้

1) สมบัติทางกลของโลหะชิ้นงาน ลวดเชื่อมที่เลือกใช้ ต้องมีความต้านแรงดึงสูงสุดที่เข้ากันได้กับโลหะชิ้นงาน

2) ส่วนผสมทางเคมีของโลหะชิ้นงาน ต้องเหมาะสมกับส่วนผสมทางเคมี ของโลหะลวดเชื่อม และเข้ากันได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานที่ต้องการความต้านทานต่อการกัดกร่อน การนำความร้อนหรือ ไฟฟ้า วัสดุงานเชื่อมที่ไม่ใช่เหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้าเจืออื่นๆ ควรเลือกส่วนผสมทางเคมี ของโลหะชิ้นงานกับโลหะลวดเชื่อม ที่เข้ากันได้

3) ความหนาและรูปทรงโลหะชิ้นงาน งานเชื่อมที่มีความหนาและรูปทรงแตกต่างกัน เมื่อนำมาเชื่อมต่อประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งต้องการความเหนียวสูงสุด เพื่อป้องกันงานเชื่อมเกิดรอยร้าว โลหะงานเชื่อม ควรมีสมบัติด้านความเหนียวด้วย

4) สภาพการใช้งานและข้อกำหนดรายละเอียดสภาพการใช้งานเชื่อม อาจแตกต่างกัน เช่น ที่ อุณหภูมิต่ำ-สูง การรับแรงกระแทก ดังนั้น ลวดเชื่อมต้องมีส่วนผสมที่เข้ากันได้กับโลหะงานเชื่อม ต้องเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีสมบัติด้านความเหนียวและต้านทานต่อแรงกระแทก

2.2.5.2 ขนาดลวดเชื่อม

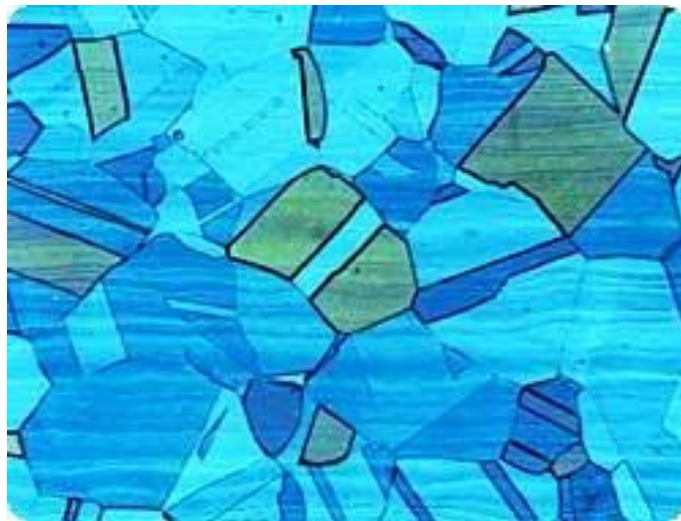
ลวดเชื่อมของกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม จะเป็นเส้นยาวทำเป็นม้วนหรือขด เพื่อใช้งาน เชื่อมได้อย่างต่อเนื่อง จะมีน้ำหนักประมาณ 0.9-27 กิโลกรัม (2-60 ปอนด์) ลวดเชื่อมมีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางเล็ก เมื่อเทียบกับลวดเชื่อมกระบวนการเชื่อมแบบอื่น มีขนาดตั้งแต่ 0.8-1.6 มิลลิเมตร (0.030-1/16 นิ้ว) ซึ่งเป็นขนาดที่นิยมใช้กันแพร่หลาย และยังมีขนาดเล็กที่สุดซึ่ง คือ 0.5 มิลลิเมตร (0.020 นิ้ว) และโตสุด 3.2 มิลลิเมตร (1/8 นิ้ว) เพราะเป็นลวดเชื่อมขนาดเล็ก จึงต้องใช้กระแสเชื่อมสูง เพื่อให้ได้อัตราการหลอมเหลวของลวดเชื่อมอยู่ในช่วงประมาณ 40-255 มิลลิเมตร/วินาที (100-600 นิ้ว/นาติ) ดังนั้นผิวลวดเชื่อมต้องสะอาดไม่เป็นสนิม ฝุ่นละออง น้ำมันหรือสารมลทินซึ่งเกาะติดผิว ลวดเชื่อม เพราะจะเป็นสาเหตุของการเกิดจุดบกพร่องในเนื้อโลหะเชื่อม เช่น ความพรุน รอยร้าว ยังมี ผลต่อปริมาตรโลหะที่ได้รับจากการหลอมละลาย

2.3 การจำแนกประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิมหรือเหล็กกล้าสเตนเลส (Stainless Steel) สามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ โดยอาศัยหลักการแตกต่างกัน อาจแบ่งตามปริมาณธาตุผสม ลักษณะโครงสร้างจุลภาค กรรมวิธีการผลิต การแบ่งชนิดตามลักษณะของโครงสร้าง เป็นวิธีที่นิยมกันมากที่สุด สามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.3.1 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic stainless steels)

เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดที่นิยมใช้กันมากที่สุด มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ต่ำ โครเมียมประมาณ 17–25% มีนิกเกิลผสม 8–22% เพื่อให้เปลี่ยนจาก Matrix Ferrite เป็น Austenite แม่เหล็กดูดไม่ติด แต่หากผ่าน Cold Working อาจมีสมบัติแม่เหล็กได้เล็กน้อยขึ้นรูปได้ดี มีสมบัติไม่เป็นแม่เหล็ก (Non-Magnetic) ตัวอย่าง เช่น มีส่วนผสมของโครเมียม 18% มีส่วนผสมของนิกเกิล 8% เพื่อเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน เป็นเกรดที่ใช้งานแพร่หลายมากที่สุด



รูปที่ 2.3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

2.3.2 เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steels)

มีสมบัติในการเป็นแม่เหล็ก (Magnetic) มีธาตุคาร์บอนผสมปริมาณที่ต่ำและมีโครเมียมเป็นธาตุผสมหลักที่สำคัญ ตัวอย่างเช่น มีส่วนผสมโครเมียม 12 % และ 18%

2.3.3 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค (Martensitic stainless steels)

มีสมบัติเป็นแม่เหล็ก (Magnetic) ตัวอย่าง ชนิดที่มีส่วนผสมของโครเมียม 12-18% และมีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ปานกลาง สามารถปรับความแข็งได้โดย การให้ความร้อนแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) และการอบคืนตัว (Tempering) สามารถลดความแข็งได้คล้ายกับเหล็กกล้าคาร์บอนและพบการใช้งานที่สำคัญในการผลิตเครื่องตัด อุตสาหกรรมเครื่องปั้นและงานวิศวกรรมทั่วไป

2.3.4 เหล็กกล้าไร้สนิมพรีซิปปิเตชันฮาร์ดเดนนิ่ง (Precipitation hardening stainless steels)

มีส่วนผสมของโครเมียม 17% โดยการเพิ่มส่วนผสมของนิกเกิล ทองแดงและไนโอเบียม ชนิดที่มีส่วนผสมของโครเมียมต่ำสุด 17% และมีธาตุอื่นผสม สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้โดยกลไกเพิ่มความแข็งแรงจากการตกผลึก (Precipitation hardening mechanism) โดยสามารถเพิ่มความแข็งแรงสูงมาก มีค่าความเค้นพิสูจน์ (Proof stress) อยู่ระหว่าง 1,000 ถึง 1,500 เมกาสกาล (MPa) ขึ้นอยู่กับชนิดและกรรมวิธีปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน (Heat treatment)

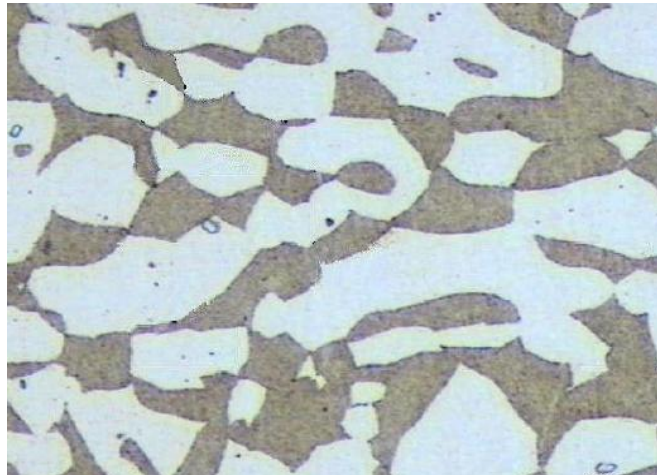
2.3.5 เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex Stainless Steels)

มีโครงสร้างผสมระหว่างเฟอร์ริคและออสเทนนิค มีโครเมียมเป็นธาตุผสมอยู่ระหว่าง 18-28% และมีนิกเกิลผสม 4.5% ถึง 8% ใช้กันมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบรรยากาศแวดล้อมของคลอไรด์

2.4 เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex Stainless Steel)

เป็นเหล็กกล้าผสมโครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัมและไนโตรเจน ซึ่งนิกเกิลและไนโตรเจนจะทำให้โครงสร้างออสเทนไนท์เสถียร อยู่ในภาวะสมดุลกับโครงสร้างเฟอร์ไรท์ ทำให้โครงสร้างทั้งสองเฟสอยู่ร่วมกันได้อย่างเหมาะสม สมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์จึงผสมผสานกันคือ ได้ความเหนียวจากโครงสร้างออสเทนไนท์ มีความต้านทานต่อการแตกร้าว ภายใต้แรงเค้นจากโครงสร้างเฟอร์ไรท์ ธาตุผสมโมลิบดีนัมทำให้ฟิล์มบาง (passive film) แข็งแรง จึงมีความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือสนิมขุมสูง จากการมีแนวโน้มที่จะเกิดการตกตะกอนโครเมียมคาร์ไบด์ ที่รอยต่อขอบเกรนของทั้งสองเฟส จึงลดความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนตามแนวขอบเกรน ดังนั้น เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์จึงใช้ได้ในพื้นที่แวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง ทั้งจากอุณหภูมิและคลอไรด์ที่เหล็กกล้าไร้สนิมทั่วไป มีความเสี่ยงจะเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม แบบได้รอยร้าวและแบบแตกร้าวจากการกัดกร่อน ภายใต้แรงเค้น คำว่าเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ มาจากความหมายของเหล็กกล้าที่โครงสร้างผ่านการปรับปรุงคุณภาพอบเหนียว (annealed structure) ด้วยความร้อนมีโครงสร้างผสมระหว่าง ออสเทนไนท์และเฟอร์ไรท์เท่ากัน ขอบเขตที่ยอมรับได้ก็คือโครงสร้างแต่ละอย่างต้องมีผสมอยู่อย่างน้อยที่สุด 30%

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์จะมีข้อดีกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก คือ เกรดดูเพล็กซ์มีความต้านทานแตกร้าวจากการกัดกร่อนในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ ร่วมกับความเค้น (Cl⁻ SCC) สูงกว่า มีความต้านทานการกัดกร่อนแบบ pitting และแบบ crevice ได้ดีเยี่ยม มีความแข็งแรงสูงกว่า 2 เท่า และมีส่วนผสมของนิกเกิลน้อยกว่าเกรดออสเทนนิติก ประมาณครึ่งหนึ่ง ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงราคาเนื่องจากปริมาณนิกเกิลที่ใช้จึงไม่มาก



รูปที่ 2.4 โครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex Stainless Steels)

2.4.1 วิวัฒนาการเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

Ralph M. Davison and James D. Redmond (1990) [7] กล่าวถึงวิวัฒนาการเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ว่ามี 2 ยุค ในยุคแรกเรียกว่า First-Generation ผลิตขึ้นในปี ค.ศ. 1930 เช่น เกรด 329 (UNS S32900) มีข้อดีจำกัดเฉพาะ มีความต้านทานการกัดกร่อนดี เพราะมีส่วนผสมของโครเมียมและ โมลิบดีนัมสูง แต่เมื่อไปทำการเชื่อมจะเสียคุณสมบัติของโครงสร้างออสเทนไนต์และเฟอร์ไรต์ไป มีผลทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนและความเหนียวแน่น (Toughness) ลดลง ขณะที่สมบัติด้านอื่นๆ สามารถแก้ไขได้ โดยการให้ความร้อนหลังการเชื่อม (Post Weld Heat Treatment : PWHT) เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ First-Generation จึงนิยมใช้งานหลังกรรมวิธีอบอ่อนเต็มที่ หรืออบอ่อนสองขั้นตอน (Fully annealed) ไม่ใช่ในงานเชื่อม

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ในยุคที่สอง เรียกว่า Second-Generation ในปี ค.ศ. 1970 ได้แก้ปัญหที่เกิดขึ้นโดยการเติมธาตุไนโตรเจนเข้าไปในส่วนผสม การปรับปรุงกรรมวิธีการผลิตใช้เทคโนโลยีเตาสถุญญากาศ เตาแก๊สคลุมกำจัดออกซิเจนและคาร์บอน ทำให้สามารถควบคุมปริมาณไนโตรเจนได้เที่ยงตรงมากขึ้น ในระยะแรกการนำไนโตรเจนเข้ามาใช้เป็นส่วนผสม เนื่องจากเป็นธาตุที่ให้โครงสร้างออสเทนไนต์ เสริมกับนิกเกิลและมีราคาถูก ต่อมาทดลองพบว่าไนโตรเจนยังช่วยเพิ่มค่า

ความต้านแรงดึง ช่วยทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนแบบ pitting และแบบ crevice เพิ่มขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามธาตุไนโตรเจนจะเป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้าง จากออสเทนไนต์เป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์ ที่อุณหภูมิสูงและกลับคืนเป็นโครงสร้างสมดุลออสเทนไนต์และเฟอร์ไรท์ได้อีกครั้ง หลังจากการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วในบริเวณผลกระทบร้อน (heat-affected zone :HAZ) หลังการเชื่อม ข้อดีของธาตุไนโตรเจนในประเด็นนี้ก็คือ ทำให้สามารถนำเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ไปใช้งานในสภาวะหลังการเชื่อมได้ (as welded) โดยไม่ต้องปรับปรุงคุณภาพความร้อนใดๆ

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ มีสมบัติต้านทานการกัดกร่อน ในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนอย่างกว้างขวาง มีปริมาณโครเมียมผสมอยู่สูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก และมีส่วนผสมของโมลิบดีนัม อีกประมาณ 4.5% ทำให้มีความต้านทานการกัดกร่อนแบบ Pitting และแบบ Crevice สูง และเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ส่วนมาก มีความต้านทานการกัดกร่อนในสิ่งที่แวดล้อมด้วยคลอไรด์ สูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก แม้ในเกรดออสเทนนิติก 904L (UNS N08904) ที่มีส่วนผสม 6% Mo ก็มีความต้านทานการกัดกร่อนเทียบได้กับเกรดดูเพล็กซ์ SAF 2507 (UNS S32750) ที่มีส่วนผสมเพียง 4% Mo

การทำให้เฟสเฟอร์ริติกและออสเทนนิติกสมดุล โดยการจำกัดส่วนผสมของธาตุนิกเกิล มีผลดีทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ในหลายๆ สิ่งแวดล้อม ดังนั้น เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์จะมีสมบัติดีเด่นพิเศษผสมผสาน ระหว่างสมบัติเด่นของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic Stainless Steel) และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิติก

ข้อดีของเหล็กกล้าไร้สนิมโครงสร้างเฟอร์ริติก

- มีความต้านทานการกัดกร่อนสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ร่วมกับความเค้นตึงมาก
- ใช้งานที่อุณหภูมิสูงโดยขึ้นกับปริมาณส่วนผสมของโครเมียมและโมลิบดีนัม โดยเฉพาะถ้าปริมาณส่วนผสมโครเมียมยิ่งสูงมาก จะเสี่ยงต่อการแตกร้าวเนื่องจากการเกิด σ -phase
- มีความแข็งแรง (strength) สูงกว่าเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าออสเทนนิติก

ข้อเสียของเหล็กกล้าไร้สนิมโครงสร้างเฟอร์ริติก

- มีความสามารถรับการเชื่อมต่ำ (poor weldability)
- มีความเหนียวแน่นต่ำ (poor toughness) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะงานเชื่อม

ข้อดีของเหล็กกล้าไร้สนิมโครงสร้างออสเทนนิติก

- มีความสามารถรับการเชื่อมดีเลิศ (excellent weldability)
- ทนต่อแรงกระแทกได้ดีมีความเหนียวแน่น (toughness) ที่อุณหภูมิปกติสูง
- สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ (cryogenic temperature) โดยยังคงความแข็งแรง
- สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้จากการขึ้นรูปหรือจากการใช้งาน (hardened by cold working)

ข้อเสียของเหล็กกล้าไร้สนิมโครงสร้างออสเทนนิติก

- ทนต่อการกัดกร่อนในสารละลายคลอไรด์ร่วมกับความเค้นต่ำ
- ความแข็งแรงต่ำเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก

กรณีเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์โครงสร้างมีปริมาณเฟอร์ไรต์สูง จะมีผลทำให้มีความเหนียวแน่นที่อุณหภูมิต่ำไม่ดี (poor toughness at low temperature) ถ้าโครงสร้างมีส่วนผสมออสเทนไนต์สูง จะมีผลทำให้ความแข็งแรงต่ำ และความต้านทานการกัดกร่อนในคลอไรด์ร่วมกับความเค้นลดลง

2.4.2 โลหะวิทยาพื้นฐาน (Basic Metallurgy)

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ มีโครงสร้างผสมระหว่าง bcc ferrite และ fcc austenite (เฟอร์ริติก-ออสเทนนิติก) ถูกออกแบบให้มีจำนวนเฟสเฟอร์ไรต์และออสเทนไนต์อย่างละเท่ากัน หลังจากการผ่านขั้นตอนการอบเหนียว (annealed) เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์จะแข็งตัว ในขณะที่มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ 100% ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1300°C. (2370°F.) นิวคลีของออสเทนไนต์จะก่อตัวเป็นครั้งแรกตามขอบเกรน (grain boundary) ของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ ต่อมาก็จะเติบโตกลายเป็นผลึก (crystal) หรือเรียกว่าเกรน (grain) ตามทิศทางของเกรนเฟอร์ไรต์ กระบวนการแพร่ของธาตุผสมเพื่อทำให้เกิดโครงสร้างผสม จะค่อยๆ เปลี่ยนโครงสร้างจากเฟอร์ไรต์เป็นออสเทนไนต์เพิ่มขึ้น จนกระทั่งสมดุลหรือสิ้นสุดการแข็งตัว ต้องพยายามควบคุมโครงสร้างเฟอร์ไรต์และออสเทนไนต์ให้สมดุล หรือเรียกว่า balance phase เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์จะมีธาตุผสมหลัก คือ โครเมียมและนิกเกิล ธาตุที่อาจผสมเข้าไป เพื่อช่วยทำให้เกิดโครงสร้างออสเทนไนต์เสถียร (austenite-stabilizing) เช่น คาร์บอน นิกเกิล ไนโตรเจนและทองแดง ธาตุเหล่านี้จะรวมกันอยู่ในโครงสร้างออสเทนไนต์ ธาตุที่ผสมเข้าไปเพื่อช่วยให้โครงสร้างเฟอร์ไรต์เสถียร (ferrite-stabilizing) ได้แก่ โครเมียม โมลิบดีนัมและทังสเตน ธาตุเหล่านี้จะรวมกันอยู่ในโครงสร้างเฟอร์ไรต์ ขอบเขตการเปลี่ยนโครงสร้างจากเฟอร์ไรต์ไปเป็นออสเทนไนต์ไม่ได้ ทำให้เฟสสมดุลของธาตุผสมที่ช่วยให้โครงสร้างเฟอร์ไรต์ และออสเทนไนต์เสถียรเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการแพร่และสมบัติเฉพาะของธาตุผสม ของธาตุแต่ละตัว การทำให้โครงสร้างเย็นอย่างรวดเร็ว (quenching) จากอุณหภูมิที่ใกล้อุณหภูมิห้อง จะทำให้ได้เฟอร์ไรต์ใกล้ 100% ที่อุณหภูมิห้องและการทำให้โครงสร้างเย็นตัวอย่างช้า ๆ จากกรรมวิธีอบเหนียวหรือ

การทำให้ร้อน (hot working) ช่วยเพิ่มการแพร่ (diffusion) เปลี่ยนรูปจากเฟอร์ไรต์เป็นออสเทนไนต์ได้เร็วขึ้น

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เฟอร์ริติก-ออสเทนนิติก การทำให้เฟสสมดุลที่เหมาะสมที่สุด คือ ทำให้จำนวนเฟอร์ไรต์และออสเทนไนต์เท่ากัน การปรับส่วนผสมทางเคมีของธาตุผสม ให้ได้โครงสร้างเฟสสมดุล จะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 1040°C . (1900°F .) หลังจากการทำให้ร้อน (hot working) หรือกรรมวิธีอบเหนียว (annealing)

ผลของธาตุผสมหลังจากการทำให้เฟสสมดุล ธาตุคาร์บอนจะเป็นธาตุที่ไม่ต้องการ เพราะจะทำให้ค่าความต้านทานการกัดกร่อนลดลง ธาตุผสมอื่นจะค่อยๆ แพร่จากโครงสร้างเฟอร์ไรต์เข้าไปแทนที่ธาตุอื่นในโครงสร้างออสเทนไนต์ยกเว้นธาตุไนโตรเจน โดยธาตุอื่นจะเป็นตัวช่วยกำหนดให้เฟสสมดุล แต่ธาตุไนโตรเจนจะเป็นตัวสำคัญมากที่สุด ในการกำหนดความสัมพันธ์ที่จะทำให้เฟสใกล้เคียงสมดุลมากที่สุด เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่พัฒนาในระยะแรก เช่น 329 และ CD-4MCu ไม่ได้นำไนโตรเจนมาใช้เป็นธาตุผสมผลก็คือ เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในยุค First-generation จะมีสมบัติทางกลต่ำและมีความต้านทานการกัดกร่อนไม่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับยุคพัฒนาที่มีการผสมธาตุไนโตรเจนเข้าไป เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์โครงสร้างจุลภาค สัดส่วนของเฟอร์ไรต์และออสเทนไนต์ประมาณเท่ากัน มีพื้นโครงสร้าง (matrix) เป็นเฟอร์ไรต์

2.4.3 สมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Properties)

มีข้อดีที่เป็นลักษณะเด่น คือ ความแข็งแรงสูงกว่ากลุ่ม 300 Series ประมาณ 2 เท่า มีความต้านทานการกัดกร่อนร่วมกับความเค้นในบรรยากาศคลอไรด์ (chloride SCC resistance) ต้านทานการกัดกร่อนแบบจุด (pitting corrosion resistance) สูงกว่ากลุ่ม 300 series เช่นกัน อุณหภูมิการใช้งานที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง -60°C . ถึง 300°C . (-75°F . ถึง 570°F .) นอกจากนี้ยังมีความต้านทานการกัดกร่อนในกรดและสารละลายคลอไรด์ที่ประกอบด้วยน้ำ (aqueous chloride) เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ชนิดรีด (wrought duplex stainless steel) มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วงปี ค.ศ.1970–1980 โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตจากกรรมวิธีการหล่อ (casting) เกรดที่มีการพัฒนาในช่วงยุคแรก จะมีส่วนผสมหลักของธาตุโครเมียม (Cr) 18%, นิกเกิล (Ni) 4% – 6% และบางครั้งมีการผสมธาตุโมลิบดีนัม (Mo) ส่วนปัจจุบันเกรดที่ใช้ทั่วไป จะมีส่วนผสมธาตุโครเมียม 22%-26% นิกเกิล (Ni) 4–7% โมลิบดีนัม (Mo) จากนั้นอาจสูงถึง 4.5% ทองแดง (Cu) 0.7% และทังสเตน (W) เล็กน้อย ไนโตรเจน (N) 0.08%-0.35% ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ในยุคปัจจุบันเพิ่ม ความต้านทานการกัดกร่อน ความสามารถในการใช้งาน (workability) และความสามารถรับการเชื่อมได้ (weldability) สูงขึ้น โดยเฉพาะ การเพิ่มไนโตรเจนเข้าไปจะเป็นการปรับปรุงความต้านทานการกัดกร่อนแบบจุด (pitting corrosion) และความสามารถรับ

การเชื่อม (weldability) ให้สูงขึ้นมาก เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ที่ใช้งานทั่วไปในปัจจุบันแบ่งออกได้ 4 กลุ่ม ส่วนผสมเพิ่มตามค่าความต้านทานการกัดกร่อน คือ

- Fe – 23Cr – 4N – 0.1N นิยมเรียกว่า alloy 2304
- Fe – 22Cr – 5.5Ni – 3Mo – 0.15N นิยมเรียกว่า alloy 2205
- Fe – 25Cr – 5Ni – 2.5Mo – 0.17N – Cu นิยมเรียกว่า alloy 2505
- Fe – 25Cr – 7Ni – 3.5Mo – 0.25N – W – Cu นิยมเรียกว่า alloy 2507

ส่วนผสมกลุ่มสุดท้ายนิยม เรียกว่า ซุปเปอร์ดูเพล็กซ์ (Super duplex) ค่าสมมูลต้านทานการกัดกร่อนแบบจุดต่ำสุด (minimum pitting resistance equivalent) ที่ 40 จะใช้เป็นค่ากำหนดเกรด Super duplex

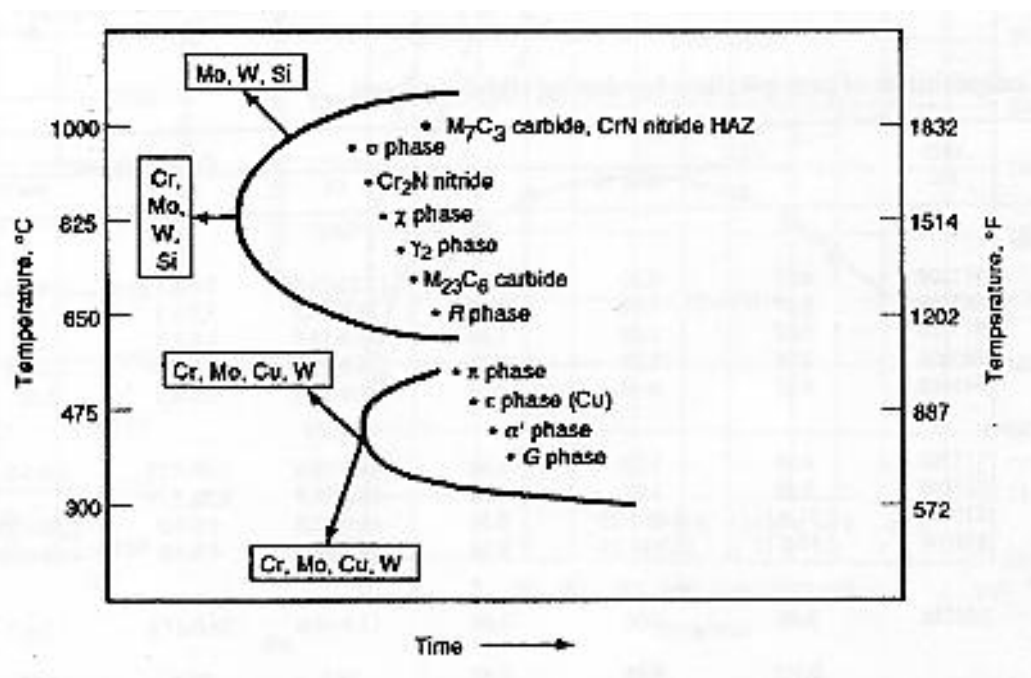
สมบัติทางกลของของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ มีค่าความเค้นที่จุดครากสูง (high yielded strength) สามารถใช้ผลิตวัสดุผนังบาง ใช้ในการทำภาชนะบรรจุทนแรงดัน มีความสามารถรับแรงได้สูง (load-bearing capacity) ที่สำคัญสามารถลดน้ำหนักและลดการเชื่อมลงได้มาก ชนิด Fe – 22Cr – 5.5Ni – 3Mo – 0.15N มีค่าความแข็งแรงที่จุดครากตัว (yielded strength) สูงเป็น 2 เท่าของเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติกและสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก ค่าความแข็งเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์จะเปลี่ยนแปลงตามกรรมวิธีการผลิต มีความแข็งมากขึ้นถ้าผลิตด้วยกรรมวิธีไม่ใช้ความร้อน (cold working) ซึ่งโดยทั่วไปค่าความแข็งโดยเฉลี่ยจะอยู่ประมาณ 260 HV 10 (25 HRC)

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ที่ไม่ได้เชื่อมจะมีความเหนียวแน่น (toughness) ที่อุณหภูมิ -100°C. (150°F.) ดีมากแต่ถ้าเป็นงานเชื่อม เนื้อเชื่อม (weld metal) และบริเวณผลกระทบร้อน (heat affected zone : HAZ) ค่าความเหนียวแน่น (toughness) จะลดลงและบ่อยครั้ง จะเป็นข้อจำกัดในการใช้งาน เนื้อโลหะงานก็จะเปลี่ยนสมบัติจากเหนียวเป็นเปราะ (ductile-to-brittle) เล็กน้อยการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้ไม่ปรากฏชัดในเหล็กกล้าอื่นที่มีโครงสร้างผลึก bcc เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่ทำการเชื่อมไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในงานที่มีความเย็นจัด (cryogenic) การที่เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ มีค่าความแข็งแรงที่จุดครากตัว (yielded strength) สูง ดังนั้น จึงขึ้นรูปเย็น (cold working) ได้ยากกว่าเกรดออสเทนนิติก การแตกที่อุณหภูมิสูง (high-temperature embrittlement) จะเกิดขึ้นกับเกรดดูเพล็กซ์ได้ง่ายกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ในกระบวนการขึ้นรูปเดียวกัน เช่นการ forging การขึ้นรูปร้อน (hot-working process)

โลหะชนิดผสมสูง (high alloy) ตัวอย่าง เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ที่มีพื้นโครงสร้างเป็นเฟอร์ริติก (ferritic matrix) จะมีความไวต่อการแตกเปราะ (susceptible embrittlement) ทำให้สูญเสียสมบัติเชิงกลโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความเหนียวแน่น (toughness) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สาเหตุเกิดจากการ

ตกผลึกของสารประกอบโลหะ (precipitation of intermetallic phase) หลักได้แก่ σ -phase, χ -phase η -phase (Laves phase) ด้วยเหตุผลดังกล่าว เกิดขึ้นกับโครงสร้างเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ที่ไม่ได้เชื่อมที่อุณหภูมิใช้งานสูงกว่า 280°C. (535°F) เกิดขึ้นกับโครงสร้างเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ในงานเชื่อมที่อุณหภูมิใช้งานสูงกว่า 250°C. (480°F)

เหล็กกล้าผสมสูงมากกว่า alloy 2205 ตัวอย่าง เช่น Fe – 25Cr – 5Ni – 2.5Mo – 0.17N – Cu, Fe – 25Cr – 7Ni – 3.5Mo – 0.25N – W – Cu มีโอกาสจะเกิดอันตรายที่จะเกิดการตกผลึกของสารประกอบดังกล่าว



รูปที่ 2.5 แสดงไดอะแกรมการเปลี่ยนแปลงเวลา – อุณหภูมิ ที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาการตกผลึกของธาตุผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

2.4.4 การนำไปใช้งาน (Applications)

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ใช้มากในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี น้ำมันและแก๊ส อุตสาหกรรมเชื้อกระดาษ และระบบควบคุมมลภาวะในงานอุตสาหกรรม งานที่เกี่ยวข้องสารเคมีที่ประกอบด้วยน้ำ สิ่งแวดล้อมที่ประกอบด้วยคลอไรด์ ใช้แทนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ที่ต้องต้านทานการกัดกร่อนในคลอไรด์ ร่วมกับความเสี่ยง (chloride SCC) หรืองานที่ต้องทนการกัดกร่อนแบบจุด (pitting) ระหว่างการใช้งาน เกรดที่มีส่วนผสมสูงที่เรียกว่า Super duplex stainless steel จะต้านทานการกัดกร่อนในงานที่ใช้ผสมออกซิเจนหรือคลอไรด์ในน้ำทะเล แต่ไม่ทนเชื่อยในน้ำทะเลโดยตรงเพราะจะเกิดการกัดกร่อนแบบ

จุด เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์หลายเกรดที่เหมาะสมสำหรับใช้งานส่งของเปียก ทำถังบรรจุแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์เพราะต้านทานการกัดกร่อนทั่วไปได้ดี

2.5 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ มีปริมาณนิกเกิลผสมอยู่ประมาณ 8-20% โดยน้ำหนักและมีปริมาณโครเมียมผสมอยู่ประมาณ 16-25 % โดยน้ำหนักมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Face-centered cubic (fcc) เรียกว่า ออสเทนไนท์ ซึ่งจะคงลักษณะโครงสร้างนี้ไว้ในทุกอุณหภูมิ เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่ไม่สามารถเหนียวทำให้เป็นแม่เหล็ก ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติทำให้แข็งได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน เช่นเดียวกับกลุ่มเฟอร์ริติก ตามมาตรฐาน America Iron and Steel Institute (AISI) ซึ่งกำหนดไว้อยู่ใน ตระกูล 200 และตระกูล 300 เป็นกลุ่มที่มีความยืดหยุ่นและมีความเหนียวดีมาก มีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดีสามารถทำให้แข็งได้ด้วยวิธี Cold work การที่โครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ จะสามารถคงลักษณะเป็นออสเทนไนท์ได้ตลอดทุกอุณหภูมิ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีธาตุที่ผสมที่สามารถทำให้โครงสร้างออสเทนไนท์เสถียรในเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยคือ นิกเกิลเป็นธาตุหลักนอกจาก นั้นแล้วยังมีคาร์บอนและไนโตรเจนอีกด้วย เนื่องจากเป็นธาตุที่สามารถละลายอยู่ในโครงสร้าง fcc ได้ตามธรรมชาติ เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกสามารถแบ่งย่อยได้อีกเป็น 2 กลุ่มย่อยได้ตามลักษณะการผสมระหว่างโครเมียมกับธาตุอื่นคือ กลุ่มโลหะผสมโครเมียม-นิกเกิล (Chromium-nickel alloys) ได้แก่ เกรด AISI 304, AISI 316 และกลุ่มโลหะผสมโครเมียม-แมงกานีส-ไนโตรเจน (Chromium-manganese-nitrogen alloys) ได้แก่ เกรด AISI 201, AISI 241 กลุ่มหลังนี้จะมีปริมาณส่วนผสมของนิกเกิลน้อย จะใช้ปริมาณไนโตรเจนที่สูงเป็นตัวรักษาโครงสร้าง เพิ่มความสามารถในการละลายในออสเทนไนท์ และป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ การเพิ่มปริมาณไนโตรเจน ยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงแก่เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้

ธาตุผสมที่ส่งผลให้มีสมบัติทางกลดีขึ้น เช่น การผสมโมลิบดีนัมในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316 และ AISI 317 ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดการกัดกร่อนในสภาพที่มีคลอไรด์ หรือในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มที่มีโครเมียมสูง เช่น AISI 309 และ AISI 310 จะใช้ในลักษณะงานในสภาพที่มีการ oxidation และการทำงานที่ระดับอุณหภูมิสูง ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนิกเกิลสูง เช่น กลุ่ม AISI 20Cb-3 จะใช้ในงานที่มีสภาพความเป็นกรดรุนแรง หรืองานที่ต้องการป้องกันมิให้เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion) ส่วนงานที่งานมีระดับอุณหภูมิสูง จะผสมไทเทเนียมหรือนิโอเบียม เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่ม AISI347 และ AISI321

สมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก สรุปได้ดังนี้

1. ไม่สามารถเหนียวนำไปเป็นแม่เหล็กได้
2. สามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนทั่วไปได้ในระดับดี
3. ไม่สามารถเพิ่มความแข็งหรือความแข็งแรง ด้วยกระบวนการทางความร้อนได้
4. สามารถทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้ด้วยวิธี Cold work
5. มีความยืดหยุ่นตัวและความเหนียวดี ทั้งอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ
6. มีความต้านทานต่อสิ่งดังต่อไปนี้ไม่ดี
 - ก. Stress corrosion cracking
 - ข. Pitting corrosion
 - ค. Crevice corrosion

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก เกรด AISI 304

Density	(g/cm ³)	8.0
Thermal conductivity @ 100 ⁰ C	(W/m.k)	16.2
@ 500 ⁰ C	(W/m.k)	21.5
Mean coefficient of thermal expansion from 0 ⁰ C –538 ⁰ C	(μm/m.°C)	18.4
Specific heat	(J/kg.k)	500
Magnetic permeability	(b)	1.02
Melting range	(°C)	1400-1450
Rockwell hardness (Scale B)	(HR _B)	81
Yield Strength , 0.2% offset	(ksi)	35
Ultimate Tensile Strength	(ksi)	85

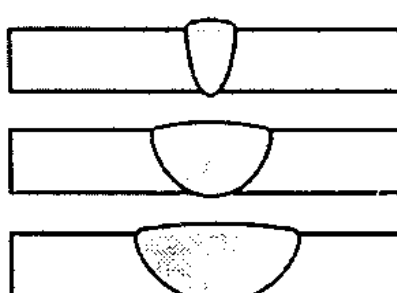
2.6 สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมต่อความสามารถในการเชื่อม

เหล็กกล้าไร้สนิมมีสมบัติทางกายภาพ (physical properties) สำคัญที่แตกต่างจากเหล็กกล้าคาร์บอนอยู่สองประการ คือ การนำความร้อนและการขยายตัวเนื่องจากความร้อน

2.6.1 การนำความร้อน

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก มีความสามารถในการนำความร้อนประมาณ 1/3 ของเหล็กกล้าคาร์บอน ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน ด้วยค่าการเชื่อม

เดียวกัน พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีการถ่ายเทความร้อนออกไปจากบริเวณแนวเชื่อมช้ากว่าเหล็กกล้าคาร์บอน ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีการบิดตัวมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน ส่วนการเพิ่มธาตุผสม เช่น โครเมียม นิกเกิลหรือทองแดง ลงในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก จะทำให้ความสามารถในการนำความร้อนลดลง [8]

Type of Stainless	Thermal 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

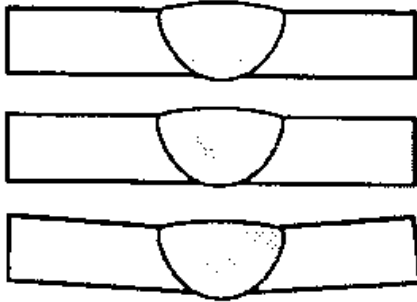
รูปที่ 2.6 แสดงผลของสมบัติทางกายภาพต่อการเชื่อม

2.6.2 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

ขณะทำการการเชื่อมโลหะ จะมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อน ทำให้เกิดการบิดงอของโลหะที่ทำการเชื่อมมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนจะเป็นสิ่งที่บ่งบอกว่า โลหะนั้นจะมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนและหดตัวเมื่อเย็นตัวลงเพียงใด หากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวมาก จะมีการขยายตัวและหดตัวมาก จะส่งผลให้เกิดการบิดตัวมากขึ้นด้วย เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกมีสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนประมาณ 50% ขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติกและเฟอร์ริติก จะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอน ดังนั้นถ้าทำการปรับเปลี่ยนค่าการเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก เพื่อให้ได้ขนาดรอยเชื่อมใกล้เคียงกับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนหรือมาร์เทนซิติก จะพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกจะมีการบิดตัวมากขึ้น และการเพิ่มธาตุผสม เช่น นิกเกิลหรือทองแดงลงในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก จะทำให้มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนลดลง

การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมจะต้องใช้เทคนิคการเชื่อม ที่แตกต่างจากการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนทั่วไป เนื่องจากการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม มีโอกาสเสี่ยงต่อการบิดตัวสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน ดังนั้น การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมต้องควบคุมปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน (heat input) ให้ต่ำที่สุด โดยการใช้กระแสเชื่อมที่ต่ำและใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็ก ใช้ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมให้เร็วขึ้น การเชื่อม

ชิ้นงานที่บางกว่า 0.25 นิ้ว (6.35 มม.) ควรใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ส่วนการเชื่อมชิ้นงานที่หนาอาจจะใช้เทคนิคการเชื่อมแบบเว้นระยะ (Step Welding) หรือการใช้แผ่นโลหะที่นำความร้อนสูงประกบได้ ชิ้นงานที่ทำการเชื่อม [8]

Type of Stainless	Main Coefficient of 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)

รูปที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบการขยายตัว เนื่องจากความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน

2.7 ผลของธาตุผสมในเหล็กกล้าไร้สนิม

2.7.1 โครเมียม (Chromium)

โครเมียม (Cr) มีสมบัติช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนในสภาพบรรยากาศทั่วไป โดยผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างน้อย 10.5% เพื่อให้มั่นใจว่าเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม มีการกระจายของโครเมียมอย่างน้อย 10.5% อย่างสม่ำเสมอ จึงมักผสมโครเมียมมากกว่าเล็กน้อย เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมโครเมียมอยู่ 2 ช่วง คือ 12%(10.5-14.0%) และ 17% (16.0-24.0%) ถ้าผสมโครเมียมเกินกว่า 30 % จะทำให้เหล็กเปราะ

2.7.2 คาร์บอน (Carbon)

คาร์บอน (C) เป็นธาตุที่มีอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิม โดยทั่วไปจะผสมอยู่ไม่เกิน 0.15% (ยกเว้นเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิก) เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีคาร์บอนต่ำ จะเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรน เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็น ตลอดจนเพิ่มความสามารถในการเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมคาร์บอนอยู่ 2 ช่วง คือ 0.02%(≤0.03%) และ 0.07%(0.04-0.15%) นอกจากนี้ การ

ผสมไทเทเนียมหรือไนโอเบียมในเหล็กกล้าไร้สนิม จะช่วยให้จับตัวกับคาร์บอนและให้ผลดีต่อสมบัติทั้งสามข้อที่กล่าวมา เหมือนเหล็กกล้าไร้สนิมคาร์บอน 0.02% เหล็กกล้าไร้สนิมเกรดที่มีอักษร “L” กำกับจะควบคุมคาร์บอนไม่ให้เกิน 0.03% ทำให้สามารถเชื่อมได้ดี มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion) และความสามารถในการขึ้นรูปเย็นสูงกว่าเกรดที่มีคาร์บอนสูงกว่า

2.7.3 ไทเทเนียม (Ti) หรือไนโอเบียม (Nb)

ไทเทเนียม (Ti) หรือไนโอเบียม (Nb) ช่วยในการปรับปรุงความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบขอบเกรน (Intergranular corrosion) สารทั้งสองตัว จะช่วยป้องกันการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ นอกจากนี้ ไทเทเนียมหรือไนโอเบียม ยังเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็น และความสามารถในการเชื่อมด้วย

2.7.4 นิกเกิล (Nickel)

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

2.7.5 โมลิบดีนัม (Molybdenum)

โมลิบดีนัม (Mo) จะช่วยเสริมผลความต้านทานต่อการกัดกร่อนของโครเมียม โดยเฉพาะการกัดกร่อนแบบมุมอับและช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนในสภาพคลอไรด์ด้วย เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมโมลิบดีนัมอยู่ 2 ช่วง คือ 0% (ปริมาณเล็กน้อยติดมากับเหล็ก) และ 2% (1.0-3.0 %)

2.8 การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ คือ เหล็กกล้าผสมสูงที่มีโครงสร้าง 2 เฟส ส่วนผสมหลัก เหล็ก – โครเมียม – นิกเกิล (Fe – Cr – Ni) ประกอบด้วยโครงสร้าง bcc ferrite และ fcc austenite ในสัดส่วนเท่าๆ กันมีส่วนผสมของธาตุคาร์บอนต่ำไม่เกิน 0.03% นอกจากนั้นยังเพิ่มส่วนผสมของโมลิบดีนัม (Mo), ไนโตรเจน(N), ทังสเตน (W) และทองแดง (Cu) เป็นต้น ธาตุสำคัญที่ทำให้โครงสร้างเฟอร์ไรต์เสถียร (ferrite former) คือ โครเมียม (Cr), โมลิบดีนัม (Mo) ในทางตรงข้ามธาตุสำคัญที่ทำให้โครงสร้างออสเทนไนต์เสถียร (austenite former) ได้แก่ นิกเกิล (Ni) คาร์บอน (C) ไนโตรเจน (N) และทองแดง (Cu) ส่วนของธาตุโครเมียมอยู่ระหว่าง 20%-30% และนิกเกิล 5%-10% การสมดุลเฟส (balance phase) ระหว่างธาตุที่ทำให้โครงสร้างเฟอร์ไรต์และออสเทนไนต์เสถียร โดยพิจารณาตาม

โครงสร้างจุลภาคของวัสดุและปริมาณเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อม และการเลือกใช้ส่วนผสมของวัสดุที่เหมาะสม สามารถทำนายได้โดยใช้ไคอะแกรมส่วนผสมของธาตุ เช่น WRC – 1992

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์จะมีผลกระทบอย่างมากเมื่อทำการเชื่อม เนื่องจากต้องรักษาความสมดุลของโครงสร้างจุลภาค และหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนเป็นเฟสที่ไม่ต้องการในทางโลหะวิทยา การใช้ค่าตัวแปรในการเชื่อม (welding parameter) และเลือกใช้ลวดเชื่อม (filler metal) ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดหรือใกล้เคียงกับข้อเสนอแนะมากที่สุด การทำให้สัดส่วนระหว่างโครงสร้างเฟอร์ไรต์และออสเทนไนต์สมดุลเท่ากันจะมีผลมาจาก รอบการกระจายความร้อนที่เท่ากัน (thermal cycle) จากการเชื่อม ถ้าการสมดุลเฟส (balance phase) มีการเปลี่ยนแปลงมากและเฟสทั้งสองมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้สูญเสียสมบัติอย่างมากเพราะสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ มาจากสัดส่วนของโครงสร้างออสเทนไนต์และเฟอร์ไรต์เป็นสำคัญ

พิจารณาโครงสร้างผลึกเดี่ยว (Single phase) ในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์จะพบว่า แต่ละโครงสร้างจะมีลักษณะเด่นเฉพาะดังนี้

- เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์จะมีสมบัติรับการเชื่อมได้และความเหนียวแน่นที่อุณหภูมิต่ำดีเลิศ (excellent weldability and low-temperature toughness) ในทางตรงข้ามจะมีความต้านทานการกัดกร่อนในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ ร่วมกับความเค้นและความแข็งแรงต่ำ (poor chloride SCC resistance and strength)
- เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรต์จะมีความต้านทานการกัดกร่อนในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ ร่วมกับความเค้นสูง (high chloride SCC resistance) และมีค่าความเหนียวแน่นต่ำ (poor toughness)
- เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์โครงสร้างจุลภาคที่มีปริมาณเฟอร์ไรต์สูง เพราะฉะนั้นอาจจะมีผลทำให้ความเหนียวแน่นที่อุณหภูมิต่ำแย่ลง (poor low temperature notch toughness) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะงานเชื่อม ในทางตรงข้ามโครงสร้างที่มีปริมาณออสเทนไนต์สูง อาจเกิดผลเสียทำให้ความแข็งแรงต่ำ ความต้านทานการกัดกร่อนร่วมกับความเค้นในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ต่ำ เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ชนิดผสมสูง มีความไวต่อการเปลี่ยนรูปร่างเกิดการตกผลึก เป็นโครงสร้างสารประกอบโลหะ (intermetallic phase) ที่อุณหภูมิสูง โครงสร้างสารประกอบโลหะที่ตกผลึก จะขยายตัวกว้างออกไป ส่งผลให้สูญเสียความต้านทานการกัดกร่อนและความเหนียวแน่นไป (loss of toughness)

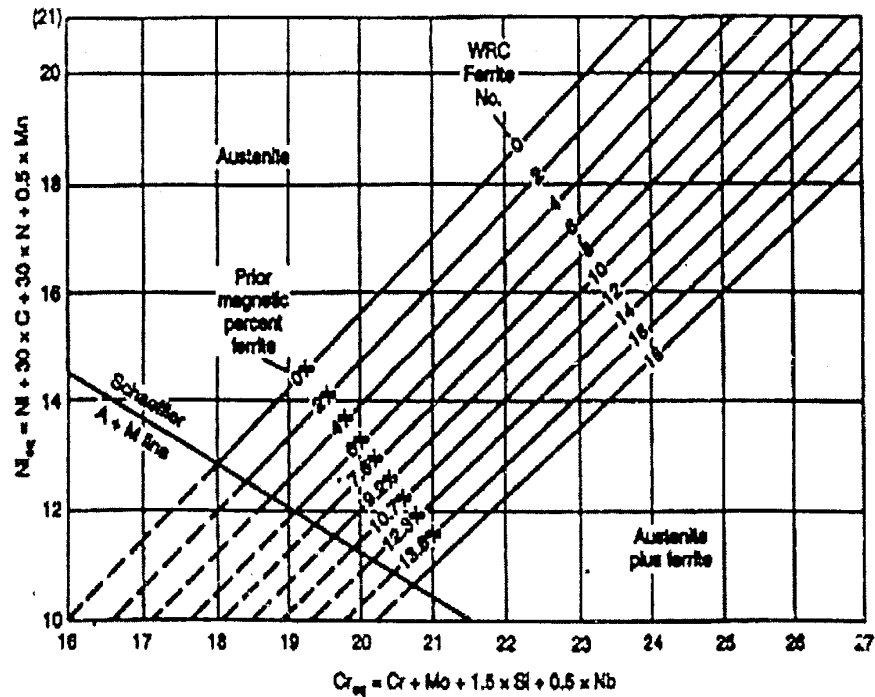
2.8.1 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค (Microstructural development)

สมมติว่าเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์มีส่วนผสม 68% Fe และส่วนผสมของธาตุอื่นอีก 32% (ธาตุผสมที่สำคัญคือ Cr และ Ni) เรียกว่าธาตุผสมที่ทำให้โครงสร้างออสเทนไนต์และเฟอร์ไรต์ (Austenite and

ferrite former) สามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาค (microstructure transformer) ที่เกิดขึ้นขณะได้รับความร้อน (heating) และเมื่อมีการเย็นตัว (cooling)

2.9 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ที่ได้หลังการเชื่อม

ชิ้นงานเชื่อมเมื่อได้รับความร้อนจากการเชื่อม ทำให้โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) เกิดการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคนี้ จะส่งผลให้สมบัติด้านความต้านทานการกัดกร่อนและสมบัติทางกลในการเชื่อม ส่วนผสมของโลหะรอยเชื่อมก็จะแปรเปลี่ยนไป การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ถือได้ว่าเป็นเรื่องสำคัญ เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย มีโอกาสเกิดโครงสร้างจุลภาคแบบดูเพล็กซ์ได้ ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เนื้อโลหะรอยเชื่อมมีโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกันคือ ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะรอยเชื่อม ดังนั้น ก่อนการเชื่อมประสานโลหะชนิดใดผู้ควบคุมการเชื่อม ควรรู้ส่วนผสมทางเคมีของโลหะชิ้นงานชนิดนั้นก่อน เพื่อสามารถเลือกกรรมวิธีการเชื่อมที่เหมาะสมได้ เพื่อได้โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่ดี เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบ GMAW และ GTAW มีการใช้แก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลายขณะทำการเชื่อม เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน แก๊สในโตรเจนจากสถานะแวดล้อมก็ยังสามารถผสมไปในบ่อน้ำโลหะได้ ดังนั้น การทำนายโครงสร้างจุลภาคที่เกิดในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก จึงใช้แผนภูมิ เดอลอง (Delong Diagram) เนื่องจากได้อธิบายผลของไนโตรเจนที่มีต่อค่านิเกิลเทียบเท่า มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเฟสเดต้าเฟอร์ไรท์ในโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เมื่อพิจารณาแผนภูมิเดอลอง ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนภูมิเดอลองแสดงอิทธิพลของส่วนผสมทางเคมี ต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเชื่อม

โลหะเชื่อมจะมีธาตุผสมหลักไม่น้อยกว่า 3 ชนิด เมื่อพิจารณาสถานะของโครงสร้างจากไดอะแกรมโลหะผสม 3 ธาตุ (Ternary Phase Diagram) ซึ่งต้องใช้ความรู้ ความชำนาญสูง ในการอ่านแปลผล เพื่อทำนายโครงสร้างที่นิยมใช้ คือ เซฟเฟอร์ไดอะแกรม (Schaeffler Diagram) แกนตั้งของไดอะแกรมจะแสดงค่า निकิลเทียบเท่า (Nickel Equivalent : N_{eq}) และแกนนอนของไดอะแกรม จะแสดงค่าโครเมียมเทียบเท่า (Chromium Equivalent : Cr_{eq}) ทั้งสองค่าจะแสดงสมการที่ใช้คำนวณหาค่าปรากฏอยู่ที่ด้านบนและด้านล่างของไดอะแกรม จุดพิกัดที่เกิดจากการตัดกันของทั้งสองค่าเป็น โครงสร้างที่เกิดจากอัตราการเย็นตัวที่เหมาะสมจากการเชื่อม

2.10 การควบคุมปริมาณความร้อนในการเชื่อม (Heat input)

ความร้อนที่เกิดขึ้นในการเชื่อมที่สูงเกินไปจะส่งผลเสียต่อสมบัติเชิงกล ปกติเหล็กกล้าไร้สนิมจะใช้ปริมาณความร้อนในการเชื่อมต่ำกว่าเหล็กคาร์บอน 20-30% เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่าการนำความร้อนต่ำ การแผ่กระจายความร้อนจึงช้าต้องแก้ไข โดยการใช้แผ่นทองแดงประกบชิ้นงานช่วยกระจายความร้อน นอกจากนี้อาจลดกระแสไฟเชื่อม ลดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า เพิ่มความเร็วการเดินแนวเชื่อมและเลือกใช้กระบวนการเชื่อมที่มีผลสะสมปริมาณความร้อนให้น้อยที่สุด

สมการที่ใช้คำนวณหาปริมาณความร้อนเข้าในการเชื่อม

$$\text{Heat input (Kj/mm)} = \frac{\text{โวลต์} \times \text{แอมป์} \times 60}{\text{ความเร็วเชื่อม (มม./นาที)} \times 1000}$$

- หมายเหตุ
- ปริมาณความร้อนเข้า [Heat input (Kj/mm)]
 - แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม [V = arc voltage]
 - กระแสไฟฟ้าเชื่อม [A = welding current (A)]
 - ความเร็วเชื่อม [S = welding speed (mm/ min)]

2.11 การทดสอบความแข็ง (Hardness test)

ความแข็ง คือ ความต้านทานต่อแรงกด การขีดสัและการกรัดของวัสดุ ดังนั้นการทดสอบความแข็งจึงสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในเชิงโลหะวิทยาการวัดความแข็ง จะเป็นการทดสอบความสามารถของโลหะในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดลงบนชิ้นงานทดสอบ โดยมีวิธีในการทดสอบที่นิยมใช้งาน ดังนี้

2.11.1 Brinell Hardness Test (H_B)

เป็นการวัดความแข็งโดยอาศัยแรงกดคงที่ กระทำกับลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งลงบนผิวชิ้นงานทดสอบ ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว โดยพื้นที่ผิวมีลักษณะเป็นผิวโค้ง ดังนั้นสามารถคำนวณค่าความแข็งได้ตามสูตร ดังนี้

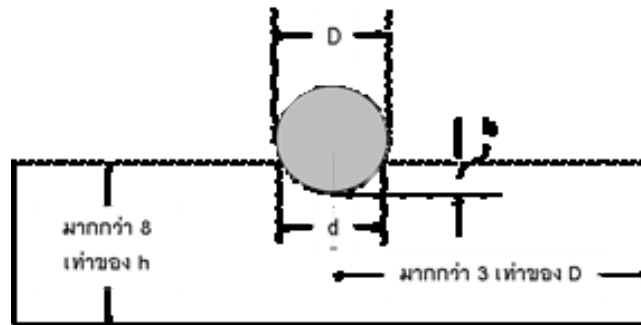
$$H_B = \frac{P}{\pi \frac{D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

โดยที่ H_B คือ ค่าความแข็งแบบ Brinell (kgf/mm²)

P คือ แรงกด (kgf)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลเหล็กกล้า (mm.)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (mm.)

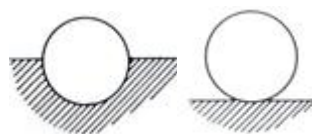


รูปที่ 2.9 แสดงการทดสอบแบบ Brinell

แรงกดสำหรับการทดสอบจะอยู่ในช่วง 500-3000 kgf ลูกบอลเหล็กกล้าจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 - 10 มม. โดยใช้ระยะเวลาในการกดประมาณ 10-15 วินาที สำหรับเหล็กหรือเหล็กกล้า และ 30 วินาที สำหรับโลหะนิ่ม (เช่น ตะกั่ว ดีบุก เป็นต้น) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโลหะมีความแข็งที่ต่างกัน หากโลหะที่ทดสอบนิ่มและใช้แรงกดมาก จะมีผลทำให้ระยะที่หัวกดจมลงไปลึกมาก จนอาจเกินกว่าครึ่งลูก ซึ่งจะมีผลต่อการคำนวณค่าความแข็งผิดพลาดได้ หรือหากเลือกแรงกดน้อยไปเมื่อเทียบกับขนาดของลูกบอลเหล็กกล้าก็จะทำให้การแปลผลทำได้ไม่แม่นยำเช่นกัน ดังนั้นการเลือกใช้แรงกดและขนาดลูกบอลแตกต่างกันไปด้วยเพื่อป้องกันข้อบกพร่อง ที่จะพบได้ในการทดสอบด้วยวิธีนี้ เราสามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วน P/D^2 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 แสดงอัตราส่วน P/D^2

โลหะ	ค่าความแข็งโดยประมาณ (HB)	อัตราส่วน P/D^2
เหล็กกล้าและเหล็กหล่อ	มากกว่า 100	30
ทองแดง, ทองแดงผสม, อะลูมิเนียมผสม	30-200	10
อะลูมิเนียม	15-100	5
ดีบุก, ดีบุกผสม, ตะกั่ว, ตะกั่วผสม	3-20	1



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะการทดสอบแบบ Brinell ที่ไม่ถูกต้อง

สำหรับการทดสอบเหล็กกล้าชุบแข็ง หรือโลหะที่มีความแข็งสูงมากๆ จะไม่สามารถทดสอบด้วยลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งได้ จะต้องใช้ลูกบอลทังสเตนคาร์ไบด์ขนาด 2.45 มม. แทนซึ่งจะใช้สำหรับทดสอบวัสดุที่แข็งตั้งแต่ 444 ถึง 627 H_B

ข้อควรระวังสำหรับการวัดความแข็งด้วยวิธีนี้ ได้แก่

- ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องเรียบ เพื่อให้ได้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่แน่นอน และที่ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องไม่มี oxide scale หรือสิ่งแปลกปลอม นอกจากนี้การเตรียมผิวต้องระวังอย่างมาก โดยหลีกเลี่ยงกรรมวิธีร้อน (heating) และกรรมวิธีเย็น (cold working)
- ต้องระวังตำแหน่งการทดสอบ โดยให้ระยะหัวกดอยู่ห่างจากขอบแต่ละด้าน ของชิ้นงานอย่างน้อย 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล ระยะห่างของแต่ละรอยกดห่างกันอย่างน้อย 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล และชิ้นงานต้องมีความหนาอย่างน้อย 8 เท่าของความลึกของการกด
- ควรวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด 2 ครั้งในแนวตั้งฉากกัน แล้วหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำไปคำนวณหาความแข็งต่อไป

การวัดความแข็งแบบ Brinell มีข้อดี คือ ในการกด 1 ครั้งจะครอบคลุมหลายๆ เฟสของชิ้นงาน ทำให้ได้ค่าความแข็งที่สม่ำเสมอ ซึ่งหากวัดด้วยวิธีที่ใช้หัวกดขนาดเล็กมาก อาจทำให้วัดได้เพียงเฟสเดียว ทำให้ค่าความแข็งที่ได้ไม่ได้เป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งของทั้งวัสดุนั้น แต่ข้อจำกัดของวิธีนี้ คือ ชิ้นงานต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะวัดกับหัวกดได้ และไม่ควรวัดกับชิ้นงานที่มีรัศมีผิวโค้งน้อยกว่า 1 นิ้ว

2.11.2 Vickers Hardness Test

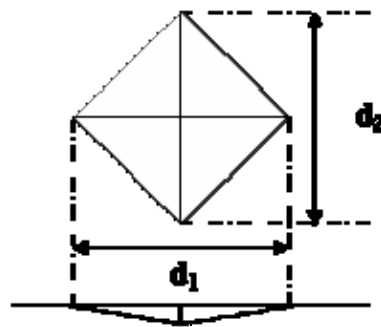
เป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา (เป็นมุมที่มีองศาใกล้เคียงกับหัวกดลักษณะกลมมากที่สุด) เป็นเวลา 10-15 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกด ที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวเช่นเดียวกับการทดสอบแบบ Brinell แต่วิธีนี้หัวกดเป็นเพชรซึ่งมีความแข็งสูงมาก ดังนั้น ในการใช้งานจึงสามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมาก (HV ประมาณ 5) จนถึงโลหะที่แข็งมาก (VHN ประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด เปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ ซึ่งทำให้วิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่า Brinell คือ ไม่ต้องคำนึงถึงอัตราส่วน P/D^2 และข้อจำกัดในด้านความหนาของชิ้นงานทดสอบ เนื่องจากหัวกดเพชรมีขนาดเล็กมาก

$$HV = \frac{1.854P}{d^2}$$

โดยที่ HV คือ ค่าความแข็งแบบ Vicker (kgf/mm^2)

P คือ แรงกด (kgf)

d คือ ขนาดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 เฉลี่ย (mm.)



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะรอยกดจากหัวเพชรของVickers Hardness Test

ข้อควรระวังสำหรับการวัดความแข็งด้วยวิธีนี้ ได้แก่

- การเลือกใช้น้ำหนักกดมีผลต่อความแข็งด้วย คือ ถ้าเลือกน้ำหนักน้อยเกินไป จะได้ค่าความแข็งที่ผิด แต่ถ้าใช้น้ำหนักมากเกินไป อาจทำให้เกิดปัญหากับหัวกดเพชรตอนคลายหัวกดได้

- ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องไม่มี oxide scale หรือสิ่งแปลกปลอม การเตรียมผิวของชิ้นทดสอบต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก และหลีกเลี่ยงกรรมวิธีร้อน (heating) หรือกรรมวิธีเย็น (cold working)

- ไม่ควรวัดความแข็งในบริเวณที่ใกล้กับตำแหน่งเดิม โดยควรเว้นระยะห่างไว้ไม่น้อยกว่า 2.5 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกด ทั้งตามแนวแกน x และ y

- ความหนาชิ้นงานทดสอบควรมากกว่าอย่างน้อย 1.5 เท่าของเส้นทแยงมุมของรอยกด และหลังจากการทดสอบวัดความแข็ง ไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ให้เห็นทางด้านหลัง (อีกด้านหนึ่ง) ของชิ้นงานทดสอบ

- การอ่านค่าความยาวเส้นทแยงมุม จะขึ้นกับสายตาของแต่ละคน ดังนั้นควรให้คนใดคนหนึ่งเป็นผู้อ่านค่า

วิธีการทดสอบนี้ไม่เป็นที่นิยมในการใช้งานสำหรับภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากข้อจำกัดที่ทดสอบได้ช้า ต้องมีเตรียมผิวที่ดี เพื่อให้ได้ค่าเส้นทแยงมุมของรอยกดที่แน่นอน และมีโอกาสผิดพลาดในการวัดระยะเส้นผ่านศูนย์กลางได้

2.11.3 Rockwell Hardness Test

เป็นวิธีวัดความแข็งของโลหะที่นิยมใช้มากที่สุด โดยจะวัดความแข็งจากความลึกระยะกดที่ถูกหัวกดกดด้วยแรงคงที่ ซึ่งจะแตกต่างจากแบบ Brinell และ Vicker ที่วัดจากแรงกดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ดังนั้น วิธีนี้จึงมีการวัดด้วยกันหลายสเกล เพื่อสามารถเลือกใช้วัดความแข็งได้เหมาะสมที่สุด แรงที่ใช้กดมี 2 ส่วน คือ minor load และ major load

Minor load เป็นแรงที่ยืดหัวกดลูกบอลเหล็กชุบแข็ง หรือหัวกดเพชรไว้บนผิวโลหะที่จะวัดความแข็ง Major load เป็นแรงที่มากกว่า minor load และกดลงภายหลังจากให้ minor load กับชิ้นงานสำหรับมาตรฐานความแข็งแบบ Rockwell มีอยู่ 15 สเกล (ไม่รวม superficial hardness scale) ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงการวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกลต่าง ๆ

สเกล	ประเภทหัวกด	Major load, kgf	การใช้งานทั่วไป
A	หัวกดเพชร (two scales-carbide and steel)	60	ซีเมนต์คาร์ไบด์, เหล็กกล้าที่มีขนาดบาง และเหล็กกล้าชุบแข็งผิวไม่ลึก (shallow case-hardening steel)
B	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/16 นิ้ว (1.588 มม.)	100	โลหะผสมของทองแดง (Copper alloys), เหล็กกล้าที่ไม่แข็งมาก (soft steels), โลหะผสมของอะลูมิเนียม (aluminum alloys) และเหล็กหล่ออบเหนียว (malleable iron)
C	หัวกดเพชร	150	เหล็กกล้า, เหล็กหล่อที่มีความแข็งสูง (hard cast irons), เหล็กหล่ออบเหนียวชนิดเพอร์ริติก, ไทเทเนียม, เหล็กกล้าชุบแข็งที่ผิวลึก และวัสดุอื่นๆ ที่มีความแข็งมากกว่า 100 HRB

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) แสดงการวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกลต่าง ๆ

สเกล	ประเภทหัวกด	Major load, kgf	การใช้งานทั่วไป
D	หัวกดเพชร	100	เหล็กกล้าที่มีขนาดบาง และเหล็กกล้าชุบแข็งที่ผิว และเหล็กหล่ออบเหนียวชนิดเพอร์ริติก
E	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.)	100	เหล็กหล่อ, โลหะผสมของอะลูมิเนียม โลหะผสมของแมกนีเซียม และโลหะสำหรับผลิตเบร้ง
F	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/16 นิ้ว (1.588 มม.)	60	โลหะผสมของทองแดงที่ผ่านการอบอ่อน และโลหะแผ่นบางที่ไม่แข็ง
G	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/16 นิ้ว (1.588 มม.)	150	บรอนซ์ผสมฟอสฟอรัส (Phosphor bronze), โลหะผสมทองแดง-เบริลเลียม (beryllium copper), เหล็กหล่ออบเหนียว. โดยความแข็งสูงสุดที่วัดได้จะต้องไม่เกิน 92 HRG เพื่อป้องกันหัวกดเสียหาย
H	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.)	60	อะลูมิเนียม, สังกะสี และตะกั่ว
K	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.)	150	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
L	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	60	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
M	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	100	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) แสดงการวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกลต่าง ๆ

สเกล	ประเภทหัวกด	Major load, kgf	การใช้งานทั่วไป
M	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	100	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
P	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	150	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
L	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	60	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
M	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	100	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
P	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	150	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
R	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/2 นิ้ว (12.70 มม.)	60	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
S	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/2 นิ้ว	100	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็ก

ค่าความแข็งจะแสดงเป็น 2 ส่วน คือ ตัวเลขค่าความแข็งที่วัดได้ และสัญลักษณ์ของสเกลที่ใช้วัด ตัวอย่าง เช่น 64.0 HRC หมายถึงค่า ตัวเลขความแข็งที่อ่านได้เท่ากับ 64.0 ด้วยการวัดแบบ Rockwell สเกล C ที่ใช้หัวกดเพชรและมีค่า major load เท่ากับ 100 kgf

ส่วนใหญ่การทดสอบเหล็กกล้า และวัสดุอื่นๆ จะใช้เป็น Rockwell สเกล C และ B อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการไม่ได้มีการกำหนดสเกลที่ชัดเจน ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงปัจจัยอื่นๆ ด้วย เพื่อให้เลือกใช้สเกลที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งปัจจัยต่างๆ ที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่

- ชนิดของวัสดุ โดยทั่วไปผลการทดสอบที่ดีที่สุด ได้จากการใช้แรงกดสูงที่สุดเท่าที่ชิ้นงานทดสอบจะสามารถรับได้ และจากตารางที่ 1 จะบอกได้ว่าวัสดุที่ทดสอบควรใช้สเกลแบบไหน เช่น วัสดุแข็ง เช่น เหล็กกล้าหรือทั้งสเตนคาร์ไบด์ จะต้องใช้สเกล A, C, D เท่านั้น

- ความหนาของชิ้นงานทดสอบ ควรมากกว่าความลึกของรอยกดอย่างน้อย 10 เท่า เพื่อให้ได้ค่าความแข็งที่ถูกต้อง ซึ่งการวัดความลึกรอยกด แบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

- ความลึกรอยกด = $(100 - \text{ค่าความแข็งที่วัดได้}) \times 0.002$ สำหรับหัวกดเพชร

- ความลึกรอยกด = $(130 - \text{ค่าความแข็งที่วัดได้}) \times 0.002$ สำหรับหัวกดบอล

นอกจากนี้ภายหลังการทดสอบจะต้องไม่มีรอยนูนเกิดขึ้นทางด้านหลังของชิ้นงานทดสอบด้วย

- รูปร่างของชิ้นงานทดสอบ และตำแหน่งในการวัด

- ชิ้นงานรูปทรงยาว จะต้องติดตั้งแท่นรองรับเพื่อให้มั่นใจได้ว่า ผิวทดสอบที่การวัดความแข็ง ตั้งฉากกับแนวกดของหัวกด

- ชิ้นงานทรงกระบอก การวัดค่าความแข็งให้ถูกต้องจะต้องใช้ค่า correction factor ช่วยปรับค่าความแข็งที่อ่านได้ เนื่องจากในการวัดความแข็งของผิวนูน (convex) หัวกดจะกดลงไปลึกมากกว่าปกติ ดังนั้นค่าที่อ่านได้จะน้อยกว่าความเป็นจริง ดังนั้นค่า correction factor จะถูกบวกเข้าไป เมื่อวัดความแข็งกับผิวชิ้นงานทรงกระบอก การวัดความแข็งชิ้นงานทรงกระบอกจะต้องใช้ แท่นตัววี (V anvil) เพื่อช่วยรองรับชิ้นงานทดสอบให้อยู่นิ่งกับที่

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

F.C.HULL [9] ผลของปริมาณเคลด้า-เฟอร์ไรท์ ที่มีผลต่อการเกิดรอยแตกร้าวขณะร้อนเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก พบว่า ปริมาณเคลด้า-เฟอร์ไรท์ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 5 หรือ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดรอยแตกร้าวขณะร้อนให้สูงขึ้น เนื่องจากซิลเฟอร์และฟอสฟอรัสละลายได้ดีในโครงสร้างเฟอร์ไรท์และเคลด้า-เฟอร์ไรท์ช่วยเพิ่มสมบัติความแข็งแรง (Strength) ในขณะที่ความแกร่ง (Toughness) และการยืดตัว (Ductility) ลดลงไม่มากนัก ตลอดจนช่วยลดปัญหาการกัดกร่อนของเนื้อโลหะรอยเชื่อมด้วย เมื่อปริมาณเคลด้า-เฟอร์ไรท์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายของเคลด้า-เฟอร์ไรท์และเกิดการกัดกร่อนในบริเวณตามแนวขอบตาข่ายระหว่างรอยต่อของเคลด้า-เฟอร์ไรท์กับออสเทนไนท์ เมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิประมาณ 600 หรือ 900 องศาเซลเซียส พบว่าเคลด้า-เฟอร์ไรท์สามารถเปลี่ยนเป็นซิกม่า (Sigma-Phase) ได้ ซึ่งมีสมบัติเปราะ ทำให้มีโอกาสเกิดรอยแตกร้าวได้มากยิ่งขึ้น

G.M.GOODWIN [10] ผลกระทบของปริมาณความร้อน ในระหว่างเชื่อมและกระบวนการเชื่อม ต่อการเกิดรอยร้าวในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ใช้วิธีการเชื่อม GTAW เปลี่ยนแปลงความเร็วเชื่อมและกระแสไฟฟ้าเชื่อม เพื่อให้ได้รอยซึมลึกที่สมบูรณ์เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316 พบว่า เมื่อใช้ความเร็วเชื่อมลดลงและกระแสไฟฟ้าเชื่อมเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้น จึงสรุปว่า อิทธิพลตัวแปรการเชื่อม GTAW เมื่อกำหนดให้ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมคงที่ รอยแตกร้าวจะเกิดขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของบ่อน้ำโลหะ การกระจายของความเค้น (Stress Distribution) ที่ด้านหลังของบ่อน้ำโลหะ เมื่อเพิ่มปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมสูงขึ้น ทำให้เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน

V.P.KUJANPAA [11] การเกิดรอยบกพร่องในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316 หนา 2 มม. เมื่อใช้ตัวแปรในการเชื่อมที่แตกต่างกันโดยในการศึกษามุ่งเน้นการพิจารณาปริมาณและขนาดของรอยบกพร่อง ที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงกระแสเชื่อม ความเร็วเชื่อม ใช้วิธีการเชื่อม GTAW โดยไม่ใช้ลวดเชื่อม เชื่อมในท่าราบ รอยต่อ 23 ชิ้นงานเป็นแบบต่อชน จากการศึกษาพบว่ารอยบกพร่องที่เกิดขึ้นมี 6 ชนิด คือ รอยแตก โพรงตรงกลาง(Cracked Center Cavities) Ripple Cavities รอยกินลึก (Undercut) และ Humps การแบ่งประเภท กำหนดได้จากตำแหน่งการเกิดรอยบกพร่อง ขนาดและรูปร่างของรอยบกพร่อง การเชื่อมที่ใช้กระแสเชื่อมสูง ทำให้ปริมาตรบ่อน้ำโลหะ (Weld Pool) มีขนาดเพิ่มมากขึ้น โอกาสที่เกิดการหดตัว (Shrinkage) เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการเกิดรอยแตกและโพรงตรงกลาง สำหรับการเชื่อมที่ความเร็วเชื่อมต่ำ ทำให้ลักษณะของบ่อหลอมละลายเปลี่ยนรูปทรงจากรูปไข่ (Ellipse) เป็นรูปร่างค่อนข้างกลม (Drop-Shapes) ทำให้เกิดการแยกตัว (Segregation) ของสารเจือปนได้มาก ส่งผลต่อการเกิดรอยแตกร้าวในเนื้อโลหะรอยเชื่อม ดังนั้นสรุปได้ว่า การเพิ่มระดับกระแสเชื่อมไม่มีผลต่อการเปลี่ยนชนิดรอยบกพร่อง แต่ทำให้รอยบกพร่องมีขนาดและปริมาณเพิ่มขึ้น สำหรับความเร็วเชื่อมมีผลต่อการเกิดลักษณะรอยบกพร่องดังนี้คือ รอยแตก และ Ripple Cavities เกิดขึ้นเมื่อใช้ความเร็วเชื่อมต่ำ ในขณะที่โพรงตรงกลาง รอยกินลึก และ Humps เกิดขึ้นเมื่อใช้ความเร็วเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น

R.K. OKAGAWA , R.D.DIXON และ D.L. OLSON [12] อิทธิพลของไนโตรเจน ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L โดยใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจน มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สไนโตรเจน 0 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าเมื่อใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนบริสุทธิ์ ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมจะเท่ากับโลหะพื้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนทำให้ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการลดปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรต์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อม จึงสรุปว่า แก๊สปกคลุมอาร์กอนที่ผสมแก๊สไนโตรเจน 0 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง

จุลภาค และสมบัติของเนื้อโลหะรอยเชื่อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะการกระจายตัวและปริมาณของ
เคลด้าเฟอร์ไรท์

T. OGAWA, K.SUAUKI และ T.ZAIZEN [13] ความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทน
นิติก ที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนผสมต่อการเกิดโพรง รอยร้าว (Cracking) และสมบัติการคืบ (Creep
Properties) โดยการใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนบริสุทธิ์ และแก๊สอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจน พบว่าเมื่อ
ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดปัญหาคือ 1) เกิดโพรงเพิ่มขึ้น 2) เกิดรอย
แตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking) เพิ่มขึ้น จากการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304
ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจน 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าเนื้อโลหะรอยเชื่อมมี
โพรงเกิดขึ้น เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ส่งผลต่อการ
เปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม ซึ่งปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่
เพิ่มขึ้น จะช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดแตกร้าวของรอยเชื่อม ในกรณีที่เนื้อโลหะรอยเชื่อมมี
โครงสร้างออสเทนไนท์ทั้งหมด เนื่องจากไนโตรเจนทำให้ขนาดเกรนออสเทนไนท์เล็กลง

E.J. Barnhouse and J.C. Lippold(1998) [14] ความเหนียวแน่น (toughness) และทดสอบความ
ต้านทานการกัดกร่อนแบบเป็นจุด (pitting corrosion) ของเนื้อเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดระหว่าง
เหล็กกล้าคาร์บอน (ASTMA36) และเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (alloy 2205) โดยวิธีการจุ่มชิ้นงาน
เชื่อม (immersing) ในสารละลาย 6%FeCl₃ ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมงตามมาตรฐาน ASTM
G48 ทำการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์ค (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW)
เปรียบเทียบการใช้ลวดเชื่อมสองชนิด คือ ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ER2209 และลวดเชื่อม
Ni-based Alloy 625 เงื่อนไขเนื้อเชื่อมต้องไม่ตรวจพบจุดบกพร่อง (defect-free welds) ผลการศึกษา
ปรากฏว่า ความเหนียวแน่น (toughness) ของเนื้อเชื่อมที่ได้จากลวดเชื่อม 2209 และ 625 มีค่ายอมรับ
ได้ทั้งคู่โดยที่ปริมาณความร้อนเข้า (heat input) สูงกว่าหรือต่ำกว่า ที่ใช้ในการเชื่อมมีผลน้อยมาก
หรือไม่มีผลต่อสมบัติทางกล และเกิดเขตมาร์เทนไซต์แบบๆ ตามแนวแบ่งเขตการหลอมละลายของ
เนื้อเชื่อม (fusion boundary) จากโลหะงานและลวดเชื่อม A36/2209 แต่ไม่พบใน A36/625 เนื้อเชื่อม
ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 2209 ความต้านทานการกัดกร่อน (corrosion resistance) จะสูงขึ้นตามปริมาณ
ความร้อนเข้าที่เพิ่มขึ้น (increase heat input) คือ ปริมาณความร้อนเข้า 2.60 kJ/mm. มีความต้านทาน
การกัดกร่อนแบบเป็นรู (pitting corrosion) สูงกว่าปริมาณความร้อนเข้าที่ 1.57 kJ/mm. เนื่องจากเป็น
เพราะว่ามีระดับของการเปลี่ยนเฟสเป็นปริมาณออสเทนไนท์สูงกว่า ทำให้มีการตกผลึกของโครเมียม
ไนไตรด์ (chromium nitride precipitation) ลดลง เนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม 625 จะมีการกัด
กร่อนรุนแรงที่แนวแรก (root pass) ขณะที่เนื้อเชื่อมทั้งหมดที่เหลือยังคงมีความต้านทานการกัดกร่อน
ดี สรุปว่าลวดเชื่อมทั้งสองชนิด สามารถใช้เชื่อมต่อเหล็กกล้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ได้

แต่จะ ต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ เมื่อจำเป็นต้องนำไปใช้งานที่มีสิ่งแวดล้อมกัดกร่อนรุนแรง อย่างไรก็ตาม การอัตราการหลอมเจือจาง (dilution) ระหว่างโลหะงานกับลวดเชื่อมในแนวแรกควรจะต่ำสุด เพื่อจำกัดการหลอมเจือจางเข้ารวมตัวจากเหล็กกล้าคาร์บอน ในเขตการหลอมละลาย (fusion zone) เป็นการป้องกันมิให้ความต้านทานการกัดกร่อนลดลง

การศึกษาการเชื่อมต่อเหล็กกล้าผสมต่างชนิดระยะแรก มุ่งเน้นความสำคัญของการศึกษาเพื่อป้องกันการเกิด

- ⇒ การแตกร้าวเส้นฝอยที่เนื้อเชื่อม (weld metal liquation cracking) หรือเรียกว่า microfissuring
- ⇒ การแตกร้าวที่บริเวณผลกระทบร้อน (heat-affected zone : HAZ cracking)
- ⇒ การอพยพของคาร์บอนเข้าไปในเหล็กกล้าไร้สนิม (carbon migration)
- ⇒ การเข้ารวมตัวของออกซิเจน (oxide penetration)