

บทที่ 9

กรณีศึกษา :

การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก Welding Austenitic Stainless Steels



ที่มา : *Inverter Welding Technology, Introduction to Welding Stainless Steels, 2018*

จุดประสงค์การเรียนรู้ บทที่ 9 กรณีศึกษา : การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

- รู้และเข้าใจถึงชนิดและประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก
 - เข้าใจและอธิบายถึงการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกชนิดเดียวกันและต่างชนิดกัน
 - เข้าใจและอธิบายถึงพฤติกรรมทางโลหะวิทยาของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก
 - เข้าใจและอธิบายถึงอิทธิพลของแก๊สปกคลุมของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก
 - เข้าใจและอธิบายถึงสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก
 - เข้าใจและอธิบายถึงกลไกการกัดกร่อนของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก
 - มีจรรยาบรรณในการวิเคราะห์และประเมินผลคุณภาพของเนื้อเชื่อมเมื่อต้องทำการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก
-

“Case Study : Welding Austenitic Stainless Steels” บทเรียนนี้ว่า ด้วยกรณีศึกษาของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ที่เป็นผลงานวิจัยวิจัยเฉพาะทาง ซึ่งเป็น ความเชี่ยวชาญและเป็นความสนใจของผู้เขียนตลอดมา โดยผลงานวิจัยทดลองที่นำมาเสนอไว้เป็น กรณีศึกษาในบทเรียนนี้ ทุกงานวิจัยได้ผ่านการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ (Peer review) ของวารสารและ ได้ทำการเผยแพร่สู่สาธารณะในระดับนานาชาติเป็นที่เรียบร้อยแล้ว (Publication)

วัสดุในงานวิศวกรรมประเภทโลหะ (Metal materials) ไม่ว่าจะเป็นโลหะกลุ่มที่เป็นตระกูลเหล็ก (Ferrous metals) และเป็นโลหะกลุ่มที่ไม่ใช่เหล็ก (Non-ferrous metals) เห็นได้ชัดเจนว่ามีการนำมา ประยุกต์ใช้งานกันหลากหลายรูปแบบงานที่มากกว่าวัสดุวิศวกรรมประเภทอื่น ๆ ก็คงด้วยเหตุผลที่มี ข้อดีมากมายของวัสดุประเภทโลหะเป็นสำคัญ หนึ่งในข้อดีของเหตุผลในการเลือกใช้งานวัสดุที่เป็น โลหะ คือ ความสามารถในการประกอบเป็นโครงสร้างงานหรือผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ดี ได้ง่าย ได้สะดวก ได้ รวดเร็ว ได้คุณภาพ และได้ทุกชนิดของวัสดุโลหะ ก็คือการประกอบต่อติดกันด้วยกรรมวิธีการเชื่อม (Joint welding)

วัสดุโลหะกลุ่มเหล็ก ได้แก่จำพวก เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) เหล็กกล้าผสม (Alloy steel) และเหล็กหล่อ (Cast iron) ก็จะมีปริมาณการเลือกนำมาใช้งานมากกว่าวัสดุกลุ่มที่ไม่ใช่เหล็กอื่น ได้แก่จำพวกโลหะอลูมิเนียม (Aluminum) ทองแดง (Copper) ทองเหลือง (Brass) ดีบุก (Tin) ตะกั่ว (Lead) สังกะสี (Zinc) และโลหะผสมเหล่านี้ (Alloy) เป็นต้น โดยเฉพาะในงานที่ต้องนำมาทำการ ประกอบด้วยการเชื่อม ก็ด้วยเหตุเพราะว่าโลหะจำพวกเหล็กโดยภาพรวมมีแนวโน้มด้านความสามารถ ในการนำมาเชื่อมจะสูงกว่า มีปัญหาน้อยกว่าจึงมีความต้องการที่มากกว่า ดังนั้น ไม่น่าแปลกใจว่าทำไม งานวิจัยต่าง ๆ ส่วนใหญ่เป็นการแก้ปัญหาและพัฒนาการเชื่อมโลหะที่เป็นเหล็ก เป็นสำคัญ

โลหะเหล็กกล้าไร้สนิมหรือโลหะเหล็กที่ปราศจากสนิม ที่มีชื่อเรียกกันจนเป็นที่เข้าใจว่า “Stainless steel” จัดว่าเป็นโลหะกลุ่มเหล็กพิเศษที่มีสมบัติโดดเด่นที่ต่างไปจากสมบัติพื้นฐานต้น ตระกูลของเหล็ก คือไม่เป็นสนิม (Passive film protective) และบางเกรดไม่ดูดติดกับแม่เหล็ก (Non-magnetic) โดยเฉพาะความไม่เป็นสนิม (ไม่เกิดออกไซด์สีแดง) จึงเหมาะแก่การนำไปใช้กับงานที่ ต้องการความสะอาด ความปลอดภัยด้านอาหารและยา สภาพงานที่ต้องทนต่อสภาพการกัดกร่อน นอกจากนี้เหล็กกล้าไร้สนิมยังมีความราบเรียบเป็นเงาที่สวยงาม จึงเป็นที่ต้องการนำไปประกอบเป็น โครงสร้างอาคารหรือชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเน้นความสวยงาม แต่มีความแข็งแรงและคงทน เหมือนกับโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนเกรดอื่น ๆ ทุกประการ บางเกรดที่มีความโดดเด่นด้านไม่ดูดติดกับ แม่เหล็ก (Austenitic stainless steel) จะเหมาะกับงานที่ต้องปราศจากคลื่นแม่เหล็กربกวน และต้อง สะอาด เช่น งานด้านอุปกรณ์และเครื่องมือทางการแพทย์ หรืองานทางด้านระบบอิเล็กทรอนิกส์ควบคุม บางเกรดมีสมบัติเด่นด้านความเหนียวขึ้นรูปได้ง่าย บางเกรดมีลักษณะเฉพาะด้านความแข็งแรง และ บางเกรดก็สามารถนำไปปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ เป็นต้น อย่างไรก็ตามโลหะ เหล็กกล้าไร้สนิมนี้ด้วยพื้นฐานที่เป็นโลหะประเภทเหล็ก การเชื่อมต่อหรือประกอบ (Joint) ก็จำเป็นที่

จะต้องใช้เทคโนโลยีการเชื่อมเช่นเดียวกันกับโลหะเหล็กทั่ว ๆ ไป ดังนั้น เนื้อหาสาระหลักของบทเรียนนี้จะเป็นการรวบรวมองค์ความรู้จากงานวิจัยของผู้เขียนและจากผลงานวิจัยเผยแพร่จากแหล่งต่าง ๆ ผสมกับประสบการณ์ด้านเทคโนโลยีงานเชื่อมที่ได้ลงมือปฏิบัติมาด้วยตนเองในด้านการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก โดยจะกล่าวและรวบรวมถึงองค์ความรู้ใหม่ เทคนิคปฏิบัติการเชื่อมที่พัฒนาขึ้น และข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากบทสรุปของผลการวิจัยการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกของผู้เขียน ดังต่อไปนี้

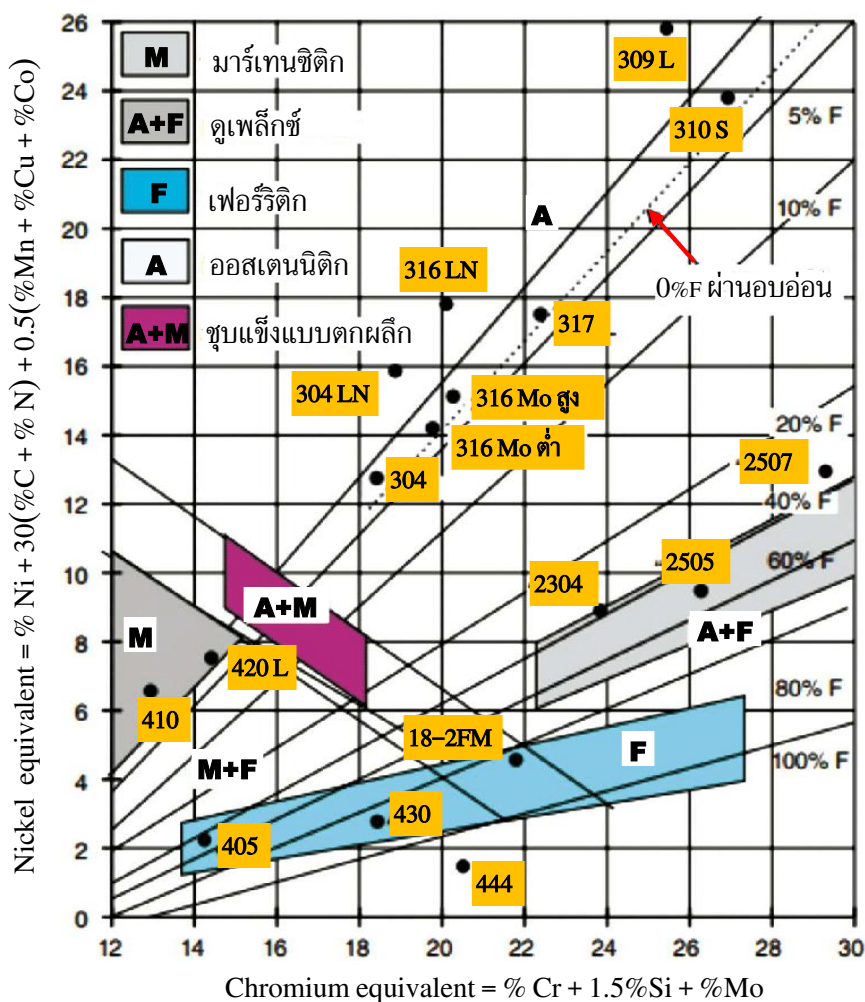
9.1 การแบ่งประเภทของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม (Type of stainless steels)

วัสดุกลุ่มเหล็กเป็นวัสดุที่มีสมบัติด้านความทนทานต่อการกัดกร่อนต่ำมาก จึงมักพบเห็นอยู่บ่อย ๆ ว่าเหล็กเมื่อนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้น มีสภาพเป็นกรด ด่าง หรือน้ำทะเลจะเกิดการกัดกร่อนขึ้น ซึ่งถือว่าเป็นจุดด้อยของวัสดุประเภทโลหะเหล็กที่จะนำไปใช้งาน จึงได้พยายามคิดค้นเพื่อที่จะแก้ปัญหาด้านการกัดกร่อนมาตลอดเวลาโดยนักโลหะวิทยา ซึ่งในปี ค.ศ.1913 Harry Brearly ได้คิดค้นเหล็กกล้าผสมที่จะนำไปใช้งานชนิดหนึ่ง ที่มีปริมาณของคาร์บอน 0.35% และโครเมียม 14% (ปัจจุบันคือ AISI 430) แล้วต้องการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคแต่มีปัญหาไม่สามารถกัดกรดเห็นโครงสร้างได้ เพราะเนื้อเหล็กทนการกัดของกรดได้ จากปัญหาดังกล่าวได้เกิดความคิดใหม่ว่าคงเป็นสมบัติที่ดี ถ้าจะนำไปใช้สำหรับงานที่ต้องการทนกรด จึงได้นำข้อดีของเหล็กผสมชนิดนี้มาใช้งาน และได้มีการพัฒนามาเรื่อย ๆ จนเกิดเหล็กกล้าผสมที่ทนการกัดกร่อนได้ดี จนถึงปัจจุบันที่รู้จักเหล็กกล้าผสมกลุ่มนี้ในชื่อของเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steels) ซึ่งจะได้อธิบายถึงรายละเอียดของเหล็กกล้าผสมชนิดนี้ต่อไป

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เป็นเหล็กกล้าที่ผสมธาตุโครเมียมที่มากกว่า 12% โดยโครเมียมที่ผสมลงไปเมื่อได้สัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจนก็จะรวมตัวกันกลายเป็นสารประกอบโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ที่เกิดอยู่ตามผิวของเหล็กที่มีลักษณะเป็นชั้นบาง ๆ (Thin film) ที่บางครั้งเรียกว่า ออกไซด์ฟิล์ม (Oxide film) โดยออกไซด์ฟิล์มนี้จะมีสีใส มีความเหนียว และเคลือบติดแน่นอยู่ที่ผิวเหล็ก จากสมบัติดังกล่าวเกิดเป็นข้อดีที่สามารถนำมาใช้เพื่อปกปิดพื้นผิวของเหล็กไม่ให้สัมผัสกับออกซิเจนในบรรยากาศ ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการกัดกร่อนที่ผิวเหล็กขึ้นอีก ซึ่งตามหลักการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) จะเรียกออกไซด์ฟิล์มนี้ว่า เป็นขั้วแคโทด (Cathode) จากการวิจัยพบว่าประสิทธิภาพของออกไซด์ฟิล์มจะขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุโครเมียมที่ผสมต้องมากเพียงพอในการเกิดฟิล์ม ซึ่งส่วนผสมปกติจะต้องมากถึง 12% เหตุผลเพราะมีโครเมียมบางส่วนจะไปรวมตัวกับคาร์บอนกลายเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr_7C_3 หรือ Cr_{23}C_6) ซึ่งไม่ได้ช่วยในการสร้างฟิล์ม ดังนั้น โครเมียมที่เหลืออาจไม่มากเพียงพอที่สร้างฟิล์มได้ดี ในทางปฏิบัติเหล็กกล้าไร้สนิมจึงต้องเติมธาตุโครเมียมให้มากขึ้น (ตามมาตรฐานจะผสมอยู่ระหว่าง 12–28%) นอกจากโครเมียมแล้วยังมีธาตุนิกเกิล (Nickel) โมลิบดีนัม (Molybdenum) ไทเทเนียม (Titanium) และนีโอเบียม (Niobium) ที่ผสมเพิ่มเติมเข้าไปอยู่รวมกันในเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อเจตนาต้องการสมบัติพิเศษบางอย่างในเหล็กกล้าไร้สนิม เช่น สมบัติที่ไม่ดูดติดกับ

แม่เหล็ก (Non-magnetic) จากบทบาทของธาตุผสมนิกเกิลเป็นต้น

เหล็กกล้าไร้สนิมได้มีการผลิตออกมาใช้งานกันมากมายตามความต้องการที่เหมาะสมกับงาน และเพื่อความเข้าใจที่ตรงกันของการเรียกชื่อเหล็กกล้าไร้สนิม จึงได้พยายามจำแนกกลุ่มของเหล็กกล้าไร้สนิมโดยอาศัยลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกันได้ 5 กลุ่ม ซึ่งสามารถพิจารณาการแบ่งกลุ่มได้จาก Schaeffler diagram ดังในรูปที่ 9.1



รูปที่ 9.1 แผนภาพแสดงขอบเขตการแบ่งกลุ่มของเหล็กกล้าไร้สนิม (Schaeffler diagram)

ที่มา : ASM Internation : Alloy Digest Sourcebook, Introduction to Stainless Steels, 2000

จากการศึกษารวบรวมข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกลุ่มของเหล็กกล้าไร้สนิมพบว่า ปัญหาของเหล็กกล้าไร้สนิมที่พบมาก คือ มักเกิดการกัดกร่อนขึ้นตามบริเวณขอบเกรน (Grain boundary) ของเนื้อเหล็ก ซึ่งเรียกรากกัดกร่อนแบบนี้ว่า Intergranular corrosion โดยปัญหานี้มักเกิดขึ้นกับเหล็กกล้าไร้สนิมทุกกลุ่มที่มีระดับปริมาณของโครเมียมที่ผสมอยู่ในเหล็กกล้านั้นลดต่ำลง (ต่ำกว่า 12%) ซึ่ง

สาเหตุที่โครเมียมลดต่ำลงก็เกิดจากการที่โครเมียมเกิดการฟอร์มตัวเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ขึ้นตามขอบเกรนทำให้บริเวณใกล้ขอบเกรนมีปริมาณของโครเมียมลดต่ำลง (Chromium depletion) ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีความต้านทานการกัดกร่อนลดลง จึงเป็นเหตุให้เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนขึ้น ดังแสดงกลไกการกัดกร่อนในรูปที่ 9.2 และ รูปที่ 9.3 เป็นตัวอย่างโครงสร้างชิ้นงานโลหะที่เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนที่อ้างอิงจากผลการวิจัยทดลอง โดย Wichan Chuaiphan et al. (2020) การกัดกร่อนในลักษณะนี้เนื้อเหล็กจะหลุดออกไปที่ละเกรนไปเรื่อย ๆ อย่างไรก็ตาม ปัญหาการกัดกร่อนตามขอบเกรนนี้ ได้มีข้อสรุปถึงวิธีการแก้ไขและป้องกันได้ดังนี้

1) ใช้หลักการเพิ่มปริมาณโครเมียมที่ผสมให้สูงขึ้น ซึ่งอาจผสมสูงถึง 20% เป็นหลักการเพื่อโครเมียมให้คงเหลืออยู่ตามขอบเกรนในเนื้อเหล็กมากกว่า 12%

2) ใช้หลักการลดปริมาณคาร์บอนในเหล็กให้มีปริมาณต่ำ ๆ จนถึงระดับปริมาณ 0.03% เพราะที่ปริมาณคาร์บอนระดับนี้สามารถละลายในเฟสเฟอร์ไรต์ได้หมด ไม่มีคาร์บอนส่วนเกินที่จะมารวมกับโครเมียมเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ได้ จึงทำให้มีโครเมียมที่ขอบเกรนเหลือเพียงพอ

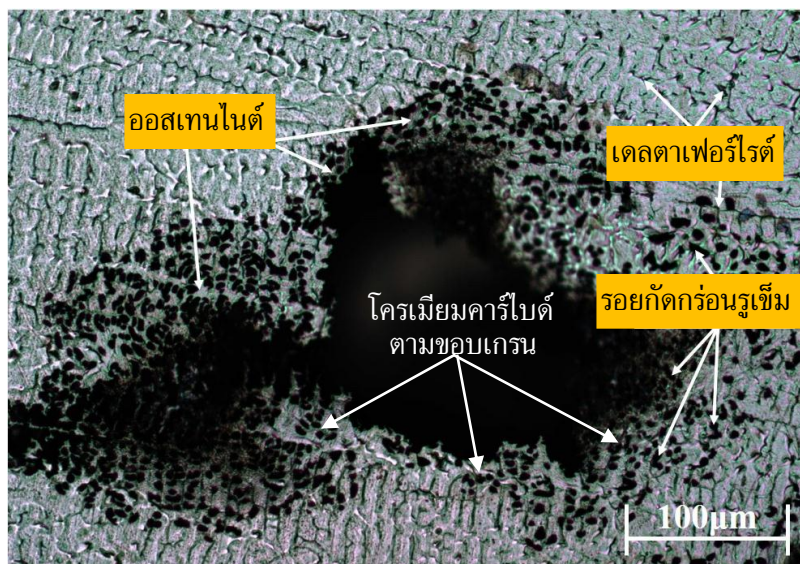
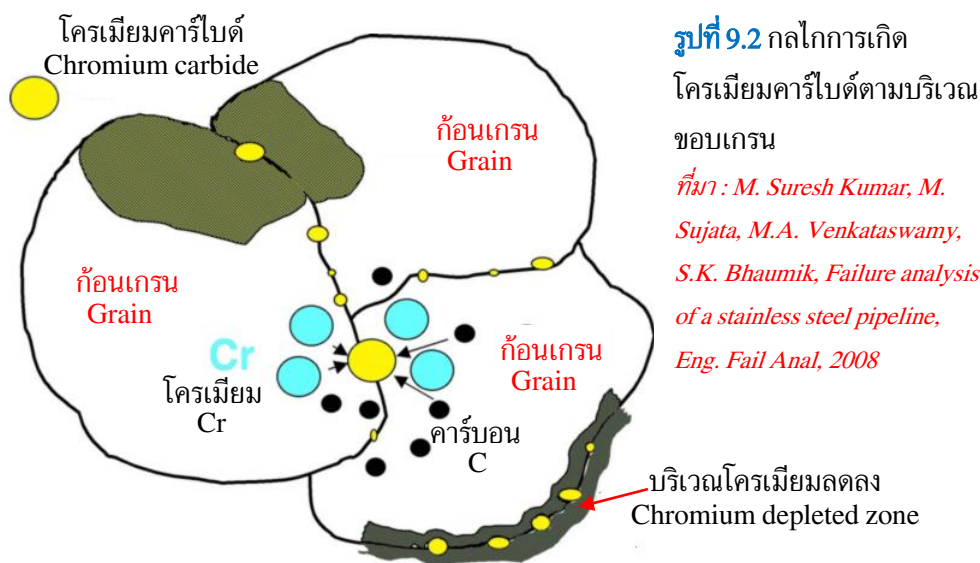
3) ใช้หลักการเติมธาตุผสมตัวอื่น ๆ ลงไป เพื่อให้ทำหน้าที่รวมตัวกับคาร์บอนแทนโครเมียม ช่วยทำให้โครเมียมที่ผสมยังคงมีอยู่ในปริมาณที่เพียงพอ ธาตุอื่น ๆ ที่ผสมต้องเป็นธาตุที่มีความไวในการรวมตัวกับคาร์บอนมากกว่าโครเมียม ได้แก่ ธาตุไทเทเนียม (Ti) โมลิบดีนัม (Mo) นีโอเบียม (Nb) วาเนเดียม (V) และทังสแตน (W) วิธีนี้มีความนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม

4) ใช้หลักการอบชุบทางความร้อน โดยวิธีการนำชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการขึ้นมาแล้วมาอบที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้โครเมียมคาร์ไบด์สลายตัวกลายเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มลงในสารชุบ ทำให้คาร์บอนไม่สามารถรวมตัวกับโครเมียมเป็นคาร์ไบด์ได้อีก จึงแยกกันอยู่ ส่งผลให้ปริมาณโครเมียมที่ขอบเกรนมีมากพอที่จะป้องกันการกัดกร่อนได้

5) ใช้หลักการหลีกเลี่ยงการให้ความร้อนแก่เหล็กในช่วงอุณหภูมิในประมาณ 650–700°C อาจเป็นการอบคืนตัว (Tempering) หรือเผาเหล็กให้ร้อนเพื่องานต่าง ๆ เพราะช่วงอุณหภูมินี้จะอะตอมคาร์บอนสามารถแพร่ซึม (Diffusion) ไปรวมตัวกับอะตอมของโครเมียมแล้วเกิดเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ได้ เมื่อโครเมียมบางส่วนกลายเป็นคาร์ไบด์ทำให้ปริมาณลดลง ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนขึ้น

6) กรณีของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเชื่อมมา พบว่าบริเวณถัดจากขอบของแนวเชื่อมจะเกิดเป็นแนวกว้าง (Band) โดยประมาณ 25 มิลลิเมตร ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความร้อนในการเชื่อม โดยความร้อนที่เกิดขึ้นในช่วงประมาณ 650 – 700°C ที่ระดับอุณหภูมินี้จะเกิดปรากฏการณ์การแพร่ซึมของอะตอมคาร์บอนและโครเมียมทำให้เกิดเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ขึ้น ส่งผลให้ปริมาณโครเมียมในเนื้อเหล็กมีปริมาณลดลง เมื่อนำเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเชื่อมนี้ไปใช้งานมักเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนในบริเวณดังกล่าว วิธีการแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมไปทำการอบชุบเพื่อสลายโครเมียมคาร์ไบด์ก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งสามารถทำได้กับชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก ๆ แต่สำหรับงานภาคสนามหรืองานติดตั้งขนาดใหญ่ ๆ สามารถแก้ปัญหาได้โดยการเลือกเกรดของลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของ

โครเมียมสูง ๆ คาร์บอนต่ำ ๆ หรือมีธาตุผสมจำพวกที่รวมกับคาร์บอนแทนโครเมียมได้มาทำการเชื่อม ก็ สามารถลดปัญหาการกัดกร่อนตามขอบเกรนได้



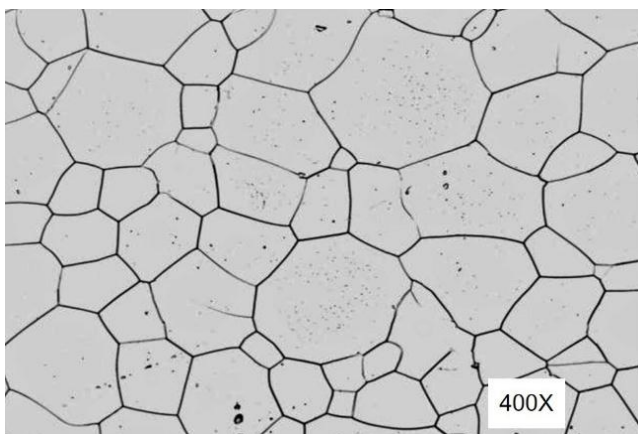
รูปที่ 9.3 ตัวอย่างการกัดกร่อนบนผิวนานที่เกิดตามบริเวณขอบเกรน

ที่มา : Wichan Chuaiphan et. al. *Journal of Advance Joining Processes.*, 2020

9.1.1 เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steel)

เป็นเหล็กกล้าที่มีโครงสร้างพื้น (Matrix structure) เป็นเฟสเฟอร์ไรต์ ที่มีรูปแบบระบบผลึกเป็น BCC ทุกช่วงระดับอุณหภูมิ เนื่องจากไม่มีสมบัติในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก ที่เรียกกันว่า

Non-allotropic property ดังนั้น เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยการอบชุบได้ เหตุผลหลักมาจากบทบาทของโครเมียมที่มีปริมาณผสมสูงถึง 10.5–30% ซึ่งโครเมียมเป็นตัวที่ทำให้เกิดโครงสร้างเฟอร์ไรต์ได้ง่าย (Ferrite stabilizer) นอกจากนี้โครเมียมยังเป็นตัวการสำคัญในการต้านทานการกัดกร่อน เพิ่มความแข็งแรง ซึ่งสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้จะสูงขึ้นเมื่อปริมาณของโครเมียมที่ผสมเพิ่มขึ้น นอกจากโครเมียมแล้วยังมีธาตุผสมอื่น ๆ ได้แก่ ซิลิกอน โมลิบดีนัม และแมงกานีส ที่ช่วยส่งเสริมให้เกิดสมบัติดังกล่าว ดังแสดงส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ใน **ตารางที่ 9.1(ก)** โดยพบว่าโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้านี้ประกอบไปด้วยเฟสเฟอร์ไรต์เป็นหลัก ดังแสดงรูปโครงสร้างใน **รูปที่ 9.4** และมีเฟสคาร์ไบด์ที่เกิดจากคาร์บอนและคาร์ไบด์ที่เกิดจากธาตุผสมอื่นกระจายอยู่ทั่วไป จนทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกมีสมบัติที่แตกต่างกันเพื่อตอบสนองความต้องการที่จะนำไปใช้งาน โดยเฉพาะสมบัติทางกลดังใน **ตารางที่ 9.1 (ข)** ซึ่งถือว่าผู้ใช้ให้ความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง



รูปที่ 9.4 โครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์ (Matrix ferrite structure) ของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก
ที่มา : Vac Aero International Inc.
Grain Size Measurement : The Jeffries Planimetric Method, 2013

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติกนี้ยังแยกออกได้เป็น 2 ประเภท ตามความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งาน คือ ประเภทเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก-คาร์บอนต่ำ (Ferritic stainless steel – low carbon) กับประเภทเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก-ทนความร้อนสูง (Ferritic stainless steel – refractory) โดยจะได้กล่าวถึงรายละเอียดแต่ละประเภทดังนี้

1. ประเภทเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก-คาร์บอนต่ำ (Ferritic stainless steel – low carbon)

มีส่วนผสมของโครเมียม 15–18% และคาร์บอนไม่เกิน 0.12% เหล็กประเภทนี้เหมาะใช้ทำพวกอุปกรณ์ในห้องครัว ชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ไม่เกิดความร้อน งานโครงสร้างประเภทที่ตกแต่งสวยงามหรืองานอื่น ๆ ที่ใช้ในอาคาร เป็นต้น จากลักษณะการใช้งานจะไม่เน้นความแข็งแรงแต่เน้นความทนทานการกัดกร่อน จึงพยายามลดคาร์บอนให้ต่ำลงเพื่อไม่ให้ไปรวมตัวกับโครเมียมจนกลายเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ที่จะทำให้โครเมียมลดต่ำลงแล้วเกิดการกัดกร่อนได้ง่าย ในทางปฏิบัติบางครั้งอาจมีคาร์ไบด์เกิดขึ้นบ้าง ถ้าต้องการให้ได้เฟสเฟอร์ไรต์อย่างสมบูรณ์สามารถทำได้โดยการนำไปอบให้ร้อนประมาณ 1,000 °C เพื่อ

ตารางที่ 9.1 (ก) ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก

ที่มา : EN 10088 Stainless steels Part 1: List of stainless steels.CEN, 2005

เกรด AISI	ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)					
	Cr	C	Mn	Si	P	S
429	14–16	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03
430	16–18	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03
430F	16–18	0.12	1.25	1.0	0.06	0.15
430FSe	16–18	0.12	1.25	1.0	0.06	0.06
434	16–18	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03
436	16–18	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03
439	17.75–18.75	0.07	0.60	0.60	0.04	0.03
442	18–23	0.20	1.0	1.0	0.04	0.03
443	18–23	0.20	1.0	1.0	0.04	0.03
444	17.5–19.5	0.025	1.0	1.0	0.04	0.03
446	23–27	0.20	1.5	1.0	0.04	0.03
26–1S	25–27	0.06	0.75	0.75	0.04	0.02

ตารางที่ 9.1 (ข) สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก

ที่มา : EN 10088 Stainless steels Part 1: List of stainless steels.CEN, 2005

เกรด	Tensile Strength	Yield Strength 0.2%	Elongation	Hardness
AISI	(MPa)	Office (MPa)	(%)	(Rockwell –B)
429	486	293	30	76
430	517	310	30	82
430F	551	379	25	86
430Fse	551	379	25	86
434	531	365	23	83
436	531	365	23	83
439	482	280	30	80
442	551	310	25	90
443	551	345	25	86
444	483	276	30	83
446	551	345	25	86
26–1S	482	345	30	85

สลายคาร์ไบด์จากนั้นจุ่มลงสารชุบน้ำมันที่ การเย็นตัวเร็วทำให้เกิดคาร์ไบด์ได้ไม่ทัน สุดท้ายจะได้เฟสเฟอร์ไรต์ทั้งหมดอย่างสมบูรณ์ แต่ต้องระวังขณะนำไปใช้งานอย่าให้สัมผัสความร้อนสูงถึง 650–700 °C จะเกิดการแพร่ซึมของอะตอมเกิดเป็นคาร์ไบด์ได้อีก ทำให้เหล็กสูญเสียสมบัติความเหนียวไป การเชื่อมเหล็กกล้าประเภทนี้มีปัญหาค่อนข้างน้อยเพราะมีคาร์บอนต่ำ เช่น จะไม่เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่แนวเชื่อมและมีโอกาสเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ได้น้อยมาก ความสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้สูงมากในบรรยากาศทั่ว ๆ ไป แต่ไม่ดีในบรรยากาศที่เป็นน้ำทะเลหรือสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดสูง

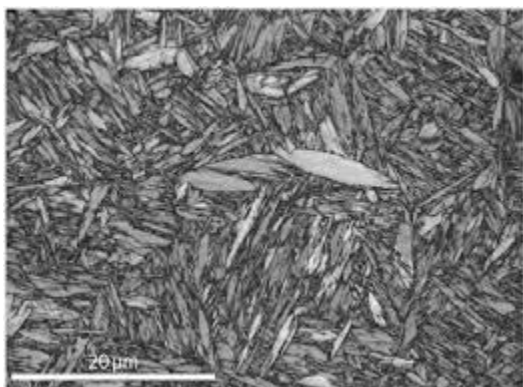
2. ประเภทเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก-ทนความร้อนสูง (Ferritic stainless steel-refractory)

เป็นเหล็กที่ส่วนผสมของโครเมียมสูงมากถึง 25–30% และคาร์บอน 0.3% ผลิตขึ้นเพื่อเน้นให้มีสมบัติทนต่อความร้อนได้สูงถึง 1,000 °C และอาจสูงถึง 1,300 °C ถ้าปริมาณโครเมียมที่ผสมสูงขึ้น โดยพบว่าโครงสร้างพื้นฐานของเหล็กประเภทนี้เป็นเฟอร์ไรต์ และมีโครเมียมคาร์ไบด์ตกผลึกกระจายอยู่ทั่วไป ดังนั้น สมบัติโดยรวมของเหล็กประเภทนี้มีความแข็งแรงสูง มักนิยมนำไปตีขึ้นรูป (Forging) หรือรีดขึ้นรูป (Rolling) เพื่อใช้ทำพวกชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเตา ท่อแก๊สร้อน ท่อไอน้ำ หรือชิ้นส่วนของงานที่ต้องสัมผัสความร้อน ข้อควรระวังในการนำไปใช้งานเนื่องจากมีโครเมียมผสมสูงและเมื่อได้รับความร้อนสูงถึง 550–750 °C จะเกิดปรากฏการณ์การแพร่ซึมของอะตอมโครเมียมไปรวมกับอะตอมของคาร์บอนกลายเป็นคาร์ไบด์ ที่เรียกกันว่า Sigma phase โดยเกิดขึ้นเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่อง จนในที่สุดเนื้อเหล็กเกิดความแข็งเปราะ มีความเหนียวลดลง และเกิดการแตกร้าวหรือแตกหักขณะใช้งาน เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทเฟอร์ริติก-ทนความร้อนสูงนี้บางเกรดมีคาร์บอนสูงมากจนมีลักษณะคล้ายกับเหล็กหล่อโครเมียมสูง (High chromium cast iron) ซึ่งสามารถนำมาใช้ทดแทนกันได้

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติกทุกประเภท มีข้อดีหลาย ๆ ด้าน ได้แก่ ด้านการกัดกร่อน ซึ่งทนทานต่อการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (Uniform corrosion) แบบรูเข็ม (Pitting corrosion) แบบภายใต้รอยซอ (Crevice corrosion) ทนทานต่อการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นในสภาพกัดกร่อนที่มีคลอไรด์ (SCC) และทนต่อสภาพแวดล้อมที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบที่อุณหภูมิสูง ส่วนทางด้านสมบัติทางกลมีค่าความสามารถในการยืดตัวและต้านทานแรงดึงสูง ความเหนียวปานกลาง แต่ก็มีข้อด้อยเหมือนกับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มอื่น ๆ เช่นกัน ได้แก่ เกิดการฟอร์มตัวของโครเมียมคาร์ไบด์ขึ้นตามบริเวณขอบเกรน (Grain boundary) ทำให้บริเวณที่ใกล้กับขอบเกรนมีปริมาณของโครเมียมลดลง (Chromium depletion) ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำลง จึงมักเกิดการกัดกร่อนขึ้นตามขอบเกรน (Intergranular corrosion) ความง่ายในการฟอร์มตัวของโครเมียมคาร์ไบด์และไนไตรด์ยังมีผลทำให้หลังการเชื่อมเกิดการแตกเปราะขึ้น ซึ่งเรียกพฤติกรรมนี้ว่าความไวต่อการเกิดคาร์ไบด์ สำหรับสมบัติทางด้านกลการดูดตีดแม้เหล็กยังคงเหมือนกับเหล็กกล้าคาร์บอน จากสมบัติที่ดีที่กล่าวมาของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก ทำให้การเลือกใช้งานของเหล็กกล้าผสมกลุ่มนี้มีหลากหลายงานมากขึ้น มีแนวโน้มสูงขึ้นเหตุผลเพราะมีราคาถูกกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มอื่นที่มีนิยกรวมซึ่งมีราคาแพงมากจะมีปัญหาบ้างในเรื่องของการสูญเสียความแข็งแรงหลังผ่านการเชื่อม

9.1.2 เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic stainless steel)

เหล็กกล้ากลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่ผลิตขึ้นเพื่อต้องการเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความแข็งแรงสูง ซึ่งมีค่าความแข็งแรงสูงกว่ากลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมทุก ๆ กลุ่ม โดยกำหนดให้มีโครงสร้างพื้นเป็นมาร์เทนไซต์ ดังแสดงลักษณะของโครงสร้างในรูปที่ 9.5 โดยโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนและโครเมียมที่ผสมอยู่ เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 0.15–1.20% และมีโครเมียมอยู่ระหว่าง 11–20% ซึ่งสามารถทำให้ได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ 100% ที่ปริมาณคาร์บอนเพียง 0.1% เท่านั้น แต่มีข้อแม้ว่าต้องมีโครเมียมที่ผสมอยู่ด้วยมากเพียงพอ ดังนั้น การแบ่งประเภทของเหล็กกล้ากลุ่มนี้จึงอาศัยหลักการแบ่งตามระดับของปริมาณคาร์บอนและโครเมียมที่ผสม ดังแสดงส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ในตารางที่ 9.2. ส่วนสมบัติเด่นด้านความแข็งแรงและทนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ก็ขึ้นอยู่กับระดับปริมาณของคาร์บอนและโครเมียมที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็ก รวมถึงสมบัติทางกลต่าง ๆ ดังแสดงเป็นตัวอย่างบางเกรดในตารางที่ 9.3 และนอกจากนี้ ยังสามารถจัดแบ่งเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติกนี้ได้เป็น 4 ประเภทดังรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 9.5 ลักษณะของโครงสร้างพื้น

มาร์เทนไซต์ (Matrix martensite structure) ในเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทกลุ่มมาร์เทนซิติก

ที่มา : H. Kitahara et al., *Crystallographic of Martensite in Carbon and Alloy Steels*, 2006

1. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก คาร์บอนต่ำ (Martensitic stainless steel–low carbon)

เหล็กกล้ากลุ่มนี้เน้นต้องการให้มีคาร์บอนผสมต่ำที่ไม่เกิน 0.15% และมีโครเมียมผสมอยู่ระหว่าง 12–14% เมื่อนำไปชุบแข็งด้วยสารชุบน้ำมัน จะได้โครงสร้างหลังการชุบเป็นมาร์เทนไซต์แต่เป็นมาร์เทนไซต์ของโครเมียม เป็นเพราะในส่วนผสมมีคาร์บอนต่ำมาก โครงสร้างมาร์เทนไซต์ของโครเมียมจะแตกต่างจากมาร์เทนไซต์ของคาร์บอน ระดับค่าความแข็งแรงจะต่ำกว่า 50 HRC โดยมีค่าความเค้นแรงดึงสูงถึง 140 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร ค่าความเค้นจุดครากสูง 120 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร และมีอัตราการยืดตัวค่อนข้างสูงถึง 10–15% ถ้านำไปทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิประมาณ 450–500 °C ค่าความสามารถในการยืดตัวจะสูงเพิ่มขึ้น โดยที่ไม่ทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง สำหรับในกรณีที่ทำทำการอบอ่อน (Annealing) ที่อุณหภูมิประมาณ 800–900 °C ใช้เวลาประมาณ 1–3 ชั่วโมง ระดับค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดเพียง 50–70 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร แต่พบว่าอัตราการยืดตัวเพิ่มสูงขึ้นถึง 25–30% การใช้งาน

ตารางที่ 9.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก

ที่มา : J.R. Davis, ASM Specialty Handbook Carbon and Alloy Steels, 1996

เกรด AISI	ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)					
	Cr	C	Mn	Si	P	S
403	11.5–13	0.15	1.0	0.5	0.04	0.03
410	11.5–13.5	0.15	1.0	1.0	0.04	0.03
410S	11.5–13.5	0.08	1.0	1.0	0.04	0.03
414	11.5–13.5	0.15	1.0	1.0	0.04	0.03
416	12–14	0.15	1.25	1.0	0.06	0.15
416Se	12–14	0.15	1.25	1.0	0.06	0.06
420	12–14	0.15	1.0	1.0	0.04	0.03
420F	12–14	0.38	1.25	1.0	0.06	0.15
422	11–13	0.20–0.25	1.0	0.75	0.02	0.02
431	15–17	0.20	1.0	1.0	0.04	0.03
440A	16–18	0.60–0.75	1.0	1.0	0.04	0.03
440B	16–18	0.75–0.95	1.0	1.0	0.04	0.03
440C	16–18	0.95–1.20	1.0	1.0	0.04	0.03
440F	16–18	0.95–1.20	1.25	1.0	0.04	0.1–0.35
440FSe	16–18	0.95–1.20	1.25	1.0	0.04	0.03

ตารางที่ 9.3 ตัวอย่างสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติกบางชนิด

ที่มา : Technical Data BLUE SHEET, Allegheny Ludlum Corporation, Pittsburgh, PA 2010

เกรด AISI	Mechanical properties				
	Tensile strength ksi (MPa)	0.2% Offset yield Strength ksi (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRC)	Hardness (HRB)
440A	62(427)	104(717)	20	57–60	95
425Mod**	55(379)	94(648)	24	57–60	93
420HC*	45(310)	87(600)	28	56–59	88
420	45(310)	85(586)	29	53–57	87
410HC*	43(310)	78(538)	30	45–52	83
410	42(290)	74(510)	34	38–45	82

* เกรดพิเศษที่มีคาร์บอนผสมมากกว่าเกรดมาตรฐาน

** เกรดพิเศษผสมโมลิบดีนัม

ของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้จะป็นงานที่ทนแรงดึงสูง ๆ และเป็นงานที่เน้นทนการกัดกร่อน จำพวก เพลาของ Gas turbine เพลาข้อเหวี่ยง วาล์ว และจำพวกใบมีดตัดต่าง ๆ ที่ต้องปราศจากสนิม เป็นต้น

2. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก คาร์บอนปานกลาง (Martensitic stainless steel-medium carbon) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทที่เน้นความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยปรับคาร์บอนให้สูงขึ้นเป็น 0.2–0.4% และโครเมียมผสมอยู่ระหว่าง 13–15% โครงสร้างมาร์เทนไซด์ที่ได้หลังการชุบลงในน้ำ ได้เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซด์ของคาร์บอนซึ่งมีความแข็งแรงอยู่ระหว่าง 50–55 HRC โดยมีค่าความเค้นแรงดึงประมาณ 100–110 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร และมีอัตราการยืดตัวอยู่ระหว่าง 10–12% แต่ถ้านำไปทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 °C ใช้เวลาประมาณ 1–3 ชั่วโมง ระดับค่าความเค้นแรงดึงลดลงที่ 60–70 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตรขึ้นเล็กน้อย แต่พบว่าอัตราการยืดตัวเพิ่มสูงขึ้นถึง 25% การใช้งานของเหล็กกล้าประเภทนี้จะเน้นเป็นอุปกรณ์หรือเครื่องมือสำหรับตัด เช่น จำพวกใบมีดผ่าตัด หรือใบมีดในงานอุตสาหกรรมที่เรียกกันว่า Cutlery stainless เป็นต้น

3. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก คาร์บอนสูง (Martensitic stainless steel-high carbon) เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้มีคาร์บอนผสมสูงถึง 0.6–1% และโครเมียมผสมอยู่ระหว่าง 14–16% ซึ่งทั้งคาร์บอนและโครเมียมจะผสมสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทอื่น ๆ เป็นเหตุทำให้เหล็กประเภทนี้เกิดการฟอร์มตัวเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง เมื่อนำไปทำการอบให้ร้อนเพื่อให้คาร์ไบด์ละลายตัวเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมด ก็พบว่ามีคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัว (Non-dissolved carbide) ตกค้างอยู่ในที่ปริมาณมาก เมื่อชุบลงในสารชุบน้ำก็จะได้มาร์เทนไซด์ที่ไม่สม่ำเสมอและมีจำนวนไม่มากเพราะมีคาร์บอนในออสเทนไนต์ต่ำเกินไป (คาร์บอนไปรวมตัวกับโครเมียมเป็นโครเมียมคาร์ไบด์) ส่งผลให้ความสามารถในการชุบแข็งของเหล็กลดลง แต่อย่างไรก็ตาม ระดับของค่าความแข็งที่ได้ก็ยิ่งสูงกว่าประเภทอื่น ๆ ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 55–60 HRC คาร์ไบด์ที่เป็นปัญหาไม่ละลายตัวจะเป็นลักษณะของโครงสร้างยูเทกติก (Eutectic structure) ซึ่งเรียกว่า “โครงสร้างเลเดอร์ไบต์ (Lederburite structure)” นอกจากนี้ ยังพบว่าคาร์บอนกับโครเมียมรวมตัวกลายเป็นคาร์ไบด์มาก ๆ นั้นมักเกิดปัญหาค่าความต้านทานการกัดกร่อนลดลง เพราะโครเมียมลดลงจนเหลือไม่เพียงพอ วิธีการแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยเติมธาตุไทเทเนียม หรือนิโอเบียมลงไปเล็กน้อยเพื่อไปทำหน้าที่รวมกับคาร์บอนแทนโครเมียมสำหรับการใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้ นิยมนำไปทำเป็นเครื่องมือหรืออุปกรณ์งานตัด เช่นเดียวกันกับประเภทคาร์บอนปานกลาง แต่มีสมบัติที่มีความแข็งแรงสูงกว่า มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า และอาจแตกหักได้ง่าย ถ้าไม่นำไปผ่านขั้นตอนการอบคืนตัว (Tempering)

4. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิดิก คาร์บอนต่ำ โครเมียมสูง (Martensitic stainless steel-low carbon-high chromium) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทพิเศษ ที่พัฒนาปรับปรุงจากข้อด้อยของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทคาร์บอนต่ำที่มีปัญหาด้านค่าความแข็ง โดยทำการเพิ่มธาตุผสมนิกเกิล 2–4% และเพิ่มปริมาณโครเมียมสูงขึ้นเป็น 15–20% เพื่อต้องการที่จะให้เกิดโครงสร้างออสเทนไนต์ 100%

ขณะทำการอบให้ร้อน เพราะนิเกิลเป็นตัวช่วยทำให้เกิดเสถียรภาพออสเทนไนต์มากขึ้น เมื่อชุบลงในสารชุบน้ำมัน ก็จะได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่สม่ำเสมอ ส่งผลทำให้มีสมบัติความเค้นแรงดึงสูงสุด 120 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร ค่าความเค้นจุดคราก 100 กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร และมีอัตราการยืดตัว 11% ค่าความเหนียวของเหล็กประเภทนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 °C หรือถ้าต้องการที่จะเพิ่มความสามารถในด้านการทนทานต่ออุณหภูมิสูง แนะนำให้เพิ่มธาตุผสมทั้งสแตนเลสและโมลิบดีนัมเข้าไปเล็กน้อย การนำไปใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้นิยมนำไปใช้กับงานที่ต้องสัมผัสกับน้ำหรือน้ำทะเล

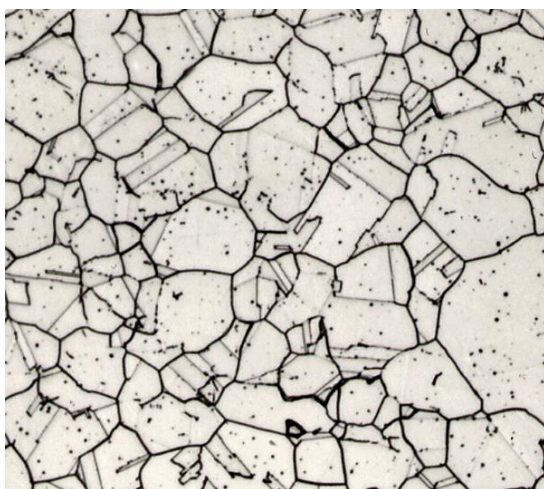
9.1.3 เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic stainless steel)

เหล็กกล้า

ไร้สนิมกลุ่มนี้นิยมนำมาใช้งานกันมาก มีสมบัติพิเศษไม่ติดติดกับแม่เหล็กเพราะมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นออสเทนไนต์ที่มีระบบผลึกเป็นแบบ FCC ดังแสดงลักษณะของโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 9.6 เว้นแต่การนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปเย็น (Cold work) ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างรุนแรงทำให้เกิดความเค้นตกค้าง (Residual stress) และไม่ได้นำไปผ่านกระบวนการอบอ่อน หรือเกิดจากการมีโครงสร้างเดลตาเฟอร์ไรต์ (Delta ferrite) อยู่ในโครงสร้างพื้นออสเทนไนต์ของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมหรือหล่อขึ้นรูปมาเกินไป ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดสมบัติติดติดกับแม่เหล็กได้ ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีส่วนผสมสูงที่เรียกว่า Super austenitic เช่น เกรด AISI 904L จะไม่เกิดสมบัติที่ติดติดแม่เหล็กแน่นอนไม่ว่าจะผ่านกระบวนการใด ๆ มากก็ตาม เมื่อพิจารณาจากส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกนี้พบว่าสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก ประเภทโลหะผสมโครเมียม-นิเกิล (Cr-Ni Austenitic stainless steel) เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้มีส่วนผสมของโครเมียมและนิเกิลเป็นหลักโดยรู้จักกันในนามของเหล็กกล้าไร้สนิม Series 300 ดังแสดงในตารางที่ 9.4 ตามมาตรฐานของ AISI และ UNS พร้อมแสดงสมบัติทางกลดังในตารางที่ 9.5 เป็นที่ทราบกันดีว่าเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้ทนการกัดกร่อนได้ดีกว่ากลุ่มเฟอร์ริติกและกลุ่มมาร์เทนซิติก แต่ถ้านำไปใช้งานที่อุณหภูมิระหว่าง 480–860 °C มักเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรน ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนได้ง่าย และถ้านำไปทำการเชื่อมแบบหลอมละลายเมื่อแนวเชื่อมแข็งตัว มักเกิดเฟสโครงสร้างเดลตาเฟอร์ไรต์ (Delta ferrite) ขึ้น และทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) ตามขอบเกรน ซึ่งในกระบวนการเชื่อมต้องควบคุมการเย็นตัวให้เกิดเป็นโครงสร้างเดลตาเฟอร์ไรต์อยู่ระหว่าง 3–8% ในโครงสร้างพื้นออสเทนไนต์ ซึ่งช่วยควบคุมไม่ให้เกิดการกัดกร่อนขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่าปริมาณโครงสร้างเดลตาเฟอร์ไรต์น้อย ๆ จะช่วยป้องกันการแตกร้าขณะร้อนได้ (Hot crack) ได้ดี และยังเป็นที่ยอมรับกันว่าเหล็กกล้าประเภทนี้มีโครงสร้างออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิห้องซึ่งไม่สามารถทำการชุบแข็งได้ แต่พบว่าถ้าทำการอบให้ร้อนที่อุณหภูมิที่ 1,000 °C แล้วจุ่มลงในสารชุบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 °C ก็สามารถทำให้เกิดโครงสร้างเฟสมาร์เทนไซต์ขึ้นได้ เพราะนิเกิลที่ละลายอยู่ในเฟสออสเทนไนต์ มีบทบาทที่จะทำให้เกิดเป็นเฟส

มาร์เทนไซต์ได้เกิดขึ้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนเฟสในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ นอกจากการชุบแล้ว พบว่าการเพิ่มความแข็งแรงยังสามารถทำได้โดยอาศัยความเครียดภายหลังผ่านการขึ้นรูปเย็น หรือที่เรียกกันว่า “ความเครียดแข็ง (Strain hardening)” โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างเฟสออสเทนไนต์ไปเป็นเฟสออสเทนไนต์ผสมมาร์เทนไซต์ ซึ่งมีค่าความเค้นแรงดึงสูงขึ้นกว่าการอบชุบถึง 3 เท่า (ผ่านการอบชุบ 61 กก./มม² ส่วนความเครียดแข็งสูงถึง 180 กก./มม²) ปัจจุบันมีวิธีการใหม่ที่ยอมรับใช้กันเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้ คือ การชุบแข็งด้วยการตกผลึก (Precipitation hardening) ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มใหม่ที่เรียกกันว่า เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มชุบแข็งโดยการตกผลึก (Precipitation hardening stainless steel) โดยจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 9.6 โครงสร้างพื้นออสเทนไนต์ของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก

ที่มา : Wichan Chuaiphan, Metallurgical Investigation of Dissimilar Weldment between AISI 304 Stainless Steel and Some Other Steels, D.Eng., TGGS, KMUTNB, 2011

2. เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก ประเภทโลหะผสมโครเมียม-แมงกานีส-ไนโตรเจน (Cr-Mn-N Austenitic stainless steel) เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้เกิดขึ้นหลังมีการใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทโลหะผสมโครเมียม-นิกเกิลมาเป็นเวลานาน โดยเกิดจากสภาวะที่โลหะนิกเกิลมีราคาแพงมากขึ้นส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงมาก ผลิตภัณฑ์เหล็กกล้าไร้สนิมผสมโครเมียม-นิกเกิลก็มีราคาสูงตามไปด้วย เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้พยายามคิดค้นหาโลหะผสมตัวอื่นที่สามารถทดแทนนิกเกิลได้ ซึ่งได้พบว่าโลหะแมงกานีส (Mn) มีคุณลักษณะทางโลหะวิทยาใกล้เคียงมากที่สุด ที่สามารถควบคุมให้เกิดโครงสร้างออสเทนไนต์ (FCC structure) ที่อุณหภูมิห้องได้ ขั้วยังมีราคาถูกและเติมไนโตรเจนเข้าไปเพื่อช่วยให้เกิดเสถียรภาพออสเทนไนต์ได้มากยิ่งขึ้น เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้มีสมบัติใกล้เคียงกับเกรด AISI 304 มากที่สุด หรืออาจเรียกได้ว่าเป้าหมายหลักของการผลิตขึ้นมาก็เพื่อทดแทนเกรด AISI 304 ที่นิยมใช้งานกันแพร่หลาย ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้รู้จักกันในนามของเหล็กกล้าไร้สนิม Series 200 หรือเรียกกันว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดทางเลือก (Alternative stainless steel) ดังแสดงเกรดต่าง ๆ ของเหล็กกลุ่มนี้พร้อมแสดงปริมาณส่วนผสมทางเคมีใน **ตารางที่ 9.6**

ตารางที่ 9.4 เกรดและส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก ประเภทโลหะ
ผสมโครเมียม-นิกเกิล (Series 300)

ที่มา : ASM International, *Stainless Steels for Design Engineering* (#05231G), 2008

เกรด AISI	เกรด UNS	ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)						
		Cr	Ni	C	Mn	Si	P	อื่น ๆ
301	S30100	16-18	6-8	0.15	2.0	1.0	0.045	-
302	S30200	17-19	8-10	0.15	2.0	1.0	0.45	-
302B	S30215	17-19	8-10	0.15	2.0	2-3	0.045	-
303	S30300	17-19	8-10	0.15	2.0	1.0	0.20	Mo 0.60
304	S30400	18-20	8-10	0.08	2.0	1.0	0.045	-
304N	S30451	18-20	8-10.5	0.08	2.0	1.0	0.045	N 0.1-0.16
304L	S30403	18-20	8-12	0.03	2.0	1.0	0.045	-
304LN	S30453	18-20	8-12	0.03	2.0	1.0	0.045	N 0.1-0.16
305	S30500	17-19	10.5-13	0.12	2.0	1.0	0.045	-
308	S30800	19-21	10-12	0.08	2.0	1.0	0.045	-
309	S30900	22-24	12-15	0.20	2.0	1.0	0.045	-
309S	S30908	22-24	12-15	0.08	2.0	1.0	0.045	-
310	S31000	24-26	19-22	0.25	2.0	1.5	0.045	-
310S	S31008	24-26	19-22	0.08	2.0	1.5	0.045	-
314	S31400	23-26	19-22	0.25	2.0	1.5-3.0	0.045	-
316	S31600	16-18	10-14	0.08	2.0	1.0	0.045	Mo 2-3
316F	S31620	16-18	10-14	0.08	2.0	1.0	0.20	Mo 1.75-2.5
316L	S31603	16-18	10-14	0.03	2.0	1.0	0.045	Mo 2-3
316N	S31651	16-18	10-14	0.08	2.0	1.0	0.045	Mo 2-3 N 0.1-0.14
316LN	S31653	16-18	10-14	0.03	2.0	1.0	0.045	Mo 2-3 N 0.1-0.14
317	S31700	18-20	11-15	0.08	2.0	1.0	0.045	Mo 3-4
317L	S31703	18-20	11-15	0.03	2.0	1.0	0.045	Mo 3-4
321	S32100	17-19	9-12	0.08	2.0	1.0	0.045	-
347	S34700	17-19	9-13	0.08	2.0	1.0	0.045	-
348	S34800	17-19	9-13	0.08	2.0	1.0	0.045	-
384	S38400	15-17	17-19	0.08	2.0	1.0	0.045	-

AISI = American Iron and Steel Institute

UNS = Unified Numbering System

ตารางที่ 9.5 สมบัติทางกลเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกประเภทโลหะผสมโครเมียม-นิกเกิล

ที่มา : ASM International, *Stainless Steels for Design Engineering* (#05231G), 2008

เกรด AISI	Tensile strength (MPa)	0.2%Offset yield strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness Rockwell-B
301	758	276	60	85
302	612	276	50	85
302B	655	276	55	85
303 ^a	620	241	50	76
303Se ^b	620	241	50	76
304	579	290	55	80
304L	558	269	55	79
302Cu ^c	503	214	70	70
304N	620	331	50	85
304LN	594	300	60	85
305	586	262	50	80
308 ^c	793	552	40	80
309	620	310	45	85
309S	620	310	45	85
310	655	310	45	85
301S	655	310	45	85
314	690	345	40	85
316	579	290	50	79
316F	586	262	60	85
316L	517	220	50	79
316N	620	331	48	85
316LN	573	279	52	80
317	620	276	45	85
317L	593	262	55	85
317LMN	662	373	49	88
321	620	241	45	80
330	552	262	40	80
347	655	276	45	85
348	655	276	45	85
384 ^c	517	241	55	70

a = Annealed sheet and strip, b = Annealed bars, c = Wire, 1 MPa = 145.03 psi

อย่างไรก็ตามสมบัติโดยรวมก็ยิ่งด้อยกว่าเกรด AISI 304 เช่น ด้านทานการกัดได้ต่ำกว่า ทนความร้อนได้น้อยกว่า แต่จุดเด่นของเหล็กกล้าประเภทนี้มีความสามารถในการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์สูงเหมาะสำหรับผลิตเป็นเครื่องมือเครื่องใช้ในครัวเรือน หรืองานประกอบสวยงามภายในอาคาร รวมไปถึงงานที่ไม่สัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด-ด่าง ดังแสดงลักษณะการนำไปใช้งานในรูปที่ 9.7 ส่วนความสามารถในการเพิ่มความแข็งแรงสามารถทำได้เหมือนกันกับประเภทแรก ถ้าพิจารณาถึงความแตกต่างของลักษณะพื้นผิวพบว่าไม่มีความแตกต่างที่สามารถแยกได้ เพราะมีความเรียบ ความเงามันวาว และความสวยงามที่เหมือนกัน แต่ถ้าผ่านการใช้งานไประยะหนึ่งจะมีผิวที่แตกต่างสามารถแยกได้ เหล็กกล้าไร้สนิม Series 200 จะมีฟิล์มที่เกิดเป็นออกไซด์มากกว่าและมีความเงาน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้ต้องได้รับการขัดผิวอยู่เสมอ ๆ จึงจะมีผิวที่เงาและสวยงาม

ตารางที่ 9.6 เกรดและส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก ประเภทโลหะ

ผสมโครเมียม-แมงกานีส-ไนโตรเจน (Series 200)

ที่มา : AK Steel Corporation, Austenitic Stainless Steel, 2014

เกรด AISI	เกรด UNS	ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)						อื่น ๆ
		Cr	Ni	Mn	N	C	S	
201	S20100	16.0–18.0	3.5–5.5	5.5–7.5	0.25max	0.15max	0.030max	
	S20103	16.0–18.0	3.5–5.5	5.5–7.5	0.25max	0.03max	0.030max	
201LN	S20153	16.0–17.5	4.0–5.0	6.4–7.5	0.10–0.25	0.03max	0.030max	Cu1.0max
	S20161	15.0–18.0	4.0–6.0	4.0–6.0	0.08–0.20	0.15max	0.040max	
202	S20200	17.0–19.0	4.0–6.0	7.5–10.0	0.25max	0.15max	0.030max	
203	S20300	16.0–18.0	4.0–6.0	5.0–6.5	–	0.08max	0.18–0.35	Cu1.75– 2.25
204	S20400	15.0–17.0	1.5–3.0	7.0–9.0	0.15–0.30	0.03max	0.030max	
	S20430	15.5–17.5	1.5–3.5	6.5–9.0	0.05–0.25	0.15max	0.030max	Cu2.0– 4.0
205	S20500	15.5–17.5	1.5–3.5	14.0– 15.5	0.32–0.40	0.12–0.25	0.030max	
214	S21400	17.0–18.5	1.0max	14.0– 16.0	0.35min	0.12max	0.030max	
216	S21600	17.5–22.0	5.0–7.0	7.5–9.0	0.25–0.50	0.08max	0.030max	Mo2.0– 3.0
	S21603	17.5–22.0	5.0–7.0	7.5–9.0	0.25–0.50	0.03max	0.030max	Mo2.0– 3.0
	S24000	17.0–19.0	2.25– 3.75	11.5– 14.5	0.20–0.40	0.08max	0.030max	

AISI = American Iron and Steel Institute

UNS = Unified Numbering System



รูปที่ 9.7 ตัวอย่างการนำไปใช้งานของ เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก ประเภท โลหะผสม โครเมียม-แมงกานีส-ไนโตรเจน

ที่มา : วิชาญ ช่วยพันธ์ เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีการเชื่อม, 2015

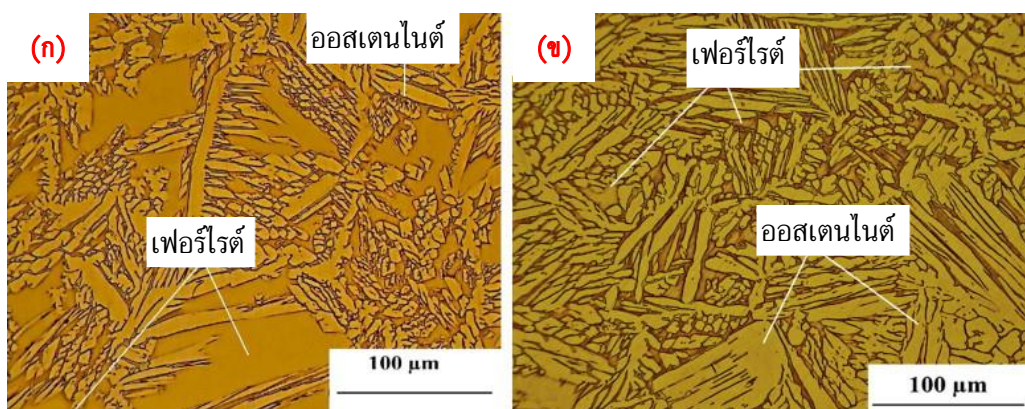
9.1.4 เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex stainless steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้พัฒนาขึ้นมาครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1927 และได้มีการผลิตออกมาใช้งานกันอย่างจริงจังเมื่อปี ค.ศ. 1930 ข้อมูลจาก Lian-Fu Li et al. (2005) โลหะประเภทนี้มีโครงสร้างพื้นที่แตกต่างจากเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มอื่น ๆ โดยประกอบขึ้นด้วยสองโครงสร้างที่ผสมเท่า ๆ กันระหว่างเฟสเฟอร์ไรต์ (Ferrite) กับเฟสออสเทนไนต์ (Austenite) ดังแสดงลักษณะของโครงสร้างในรูปที่ 9.8 ซึ่งเป็นที่มาของการตั้งชื่อ เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในตารางที่ 9.7 รุ่นแรก ๆ จะเป็นเกรด AISI 239 ใช้งานได้ดีแต่มีขีดจำกัดในการเชื่อม โดยบริเวณ HAZ มีความเหนียวต่ำ และยังทำให้เกิดเฟสเฟอร์ไรต์มากไม่ทนต่อการกัดกร่อน ขั้วยังมีแนวโน้มเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนได้ง่ายเพราะมีคาร์บอนผสมอยู่สูง ต่อมาได้พัฒนาเป็นรุ่นที่สอง ได้แก่ เกรด AISI 2304 โดยลดธาตุผสมนิกเกิลที่มีราคาแพง มาใช้ธาตุแมงกานีสแทน และทำการหลอมด้วยเตาแบบเออาร์ดี (Argon oxygen decarburization: AOD) ที่ควบคุมปริมาณคาร์บอนให้ต่ำ ซึ่งใช้เป็นตัวช่วยเพิ่มความเหนียวและลดการกัดกร่อนตามขอบเกรน และการเพิ่มธาตุไนโตรเจนที่ช่วยทำให้เกิดเฟสของออสเทนไนต์เสถียรมากขึ้น แต่พบว่า ถ้านำไปใช้งานที่มีความเข้มข้นของสารเคมีสูง ๆ หรือในน้ำทะเล จะมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ไม่ดี จึงได้มีการพัฒนาโดยการผสมทั้งแมงกานีส นิกเกิล และไนโตรเจน จนได้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความเหนียว ทนการกัดกร่อนตามขอบเกรนและสภาพแวดล้อมที่เข้มข้น ซึ่งใช้งานกันแพร่หลาย เรียกเกรดเหล็กนี้ว่า เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรดมาตรฐาน ได้แก่ เกรด AISI 2205 นอกจากนี้ที่กล่าวมาแล้ว ยังมีเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์ที่ผลิตขึ้นใช้กับงานเฉพาะประเภทอุตสาหกรรมน้ำมันและแก๊ส (Oli & Gas) ที่ต้องทนต่อการกัดกร่อนและทนต่อแรงดัน โดยเพิ่มปริมาณของธาตุผสมที่สูงขึ้น ซึ่งเรียกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมซูเปอร์ดูเพล็กซ์ (Super duplex stainless steel) ได้แก่ AISI 2507 และเหล็กกล้าไร้สนิมไฮเปอร์ดูเพล็กซ์ (Hyper duplex

stainless steel) ได้แก่ AISI 3207 และ AISI 2707 โดยเกรดพิเศษเหล่านี้มีสมบัติโดยรวมที่ดีกว่า AISI 2205

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์เกรดมาตรฐาน AISI 2205 ที่ใช้งานกันทั่ว ๆ ไปนี้ มีส่วนผสมของธาตุหลักได้แก่ โครเมียม นิกเกิลและโมลิบดีนัม (Cr-Ni-Mo) จากการศึกษาวิจัยพบว่า เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มดูเพล็กซ์ที่มีสมบัติที่ดีที่สุดและมีความต้านทานการกัดกร่อนสูง ต้องมีส่วนโครงสร้างระหว่างเฟสเฟอร์ไรต์กับเฟสออสเทนไนต์เท่ากัน (50% ต่อ 50%) แต่ที่ใช้งานกันในปัจจุบันมีความหลากหลายสัดส่วนที่แปรผันไป เช่น เฟสเฟอร์ไรต์กับเฟสออสเทนไนต์ (30% ต่อ 70%) หรือ (40% ต่อ 60%) ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุผสมหลักข้างต้น ที่พบมากส่วนใหญ่เป็นสัดส่วน 40% ต่อ 60% ที่มีสมบัติดัดดัดแม่เหล็กได้ มีความแข็งแรงสูง ทนต่อการกัดกร่อน และสึกกร่อนจากความล้า (Corrosion and erosion fatigue) มีค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion) ที่ต่ำและมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูง มีความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ทนความร้อนได้สูงมากกว่า 300 °C แต่ความแข็งแรงลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า -50 °C ค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากอยู่ระหว่าง 550–690 MPa โดยจะสูงขึ้นเมื่อผ่านการอบอ่อน จากที่กล่าวมาสมบัติที่ดีร่วมกันระหว่างความต้านทานการกัดกร่อนที่สูงกับการมีสมบัติทางกลที่ดีเยี่ยม นั้น เกิดจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์กับออสเทนไนต์ที่ผสมกันในสัดส่วนที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน

การมีเฟสเฟอร์ไรต์ในเนื้อโลหะทำให้มีสมบัติดัดดัดแม่เหล็ก แต่มีสมบัติที่มีอัตราการขยายตัวต่ำเนื่องจากความร้อนต่ำ และยังมีค่าความสามารถในการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ด้วยเหตุนี้เหล็กกล้าไร้สนิมแบบสองเฟส (Dual phase) นี้จึงมีขีดความสามารถในการนำมาประกอบกันด้วยกรรมวิธีการเชื่อมได้ดีมาก และปัจจุบันเป็นที่นิยมนำมาใช้เชื่อมกันมากขึ้น โดยเฉพาะการเชื่อมแบบต่างเกรดกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดอื่น ๆ (Dissimilar weld joint)



(ก) เกรด UNS S32750

(ข) เกรด SDSS API X-65

รูปที่ 9.8 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex stainless steel)

ที่มา : M. Sadeghian et al., Journal of Materials & Design, Vol. 60, pp. 678–684, 2014

ตารางที่ 9.7 เกรดและส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

ที่มา : Outokumpu : Stainless steel & High performance alloy, Duplex stainless steel, 2013

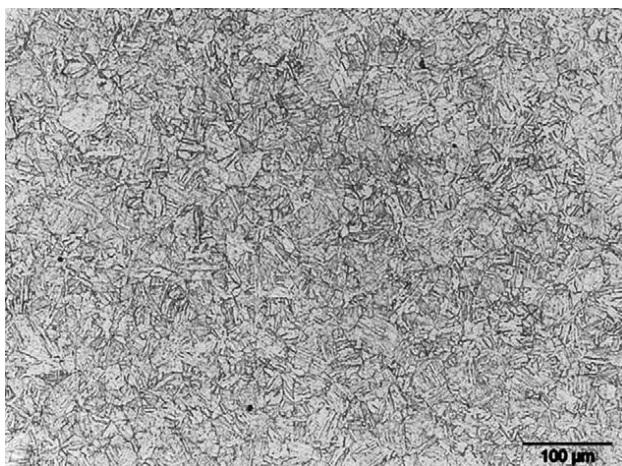
เกรด	เกรด	ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)							
UNS	EN	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu	W
Wrought duplex stainless steels									
First-generation duplex grades									
S32900	1.4460	0.08	23.0–28.0	2.5–5.0	1.0–2.0	–	1.00	–	–
S31500	1.4424	0.03	18.0–19.0	4.3–5.2	2.5–3.0	0.05–0.1		–	–
S32404		0.04	20.5–22.5	5.5–8.5	2.0–3.0	0.20	2.00	1.0–2.0	–
Second-generation duplex grades									
Lean									
S32001	1.4482	0.03	19.5–21.5	1.0–3.0	0.6	0.05–0.17	4.0–6.0	1.0	–
S32101	1.4162	0.04	21.0–22.0	1.35–1.7	0.1–0.8	0.20–0.25	4.0–6.0	0.1–0.8	–
S32202	1.4062	0.03	21.5–24.0	1.0–2.8	0.45	0.18–0.26	2.00	–	–
S82011		0.03	20.5–23.5	1.0–2.0	0.1–1.0	0.15–0.27	2.0–3.0	0.5	–
S32304	1.4362	0.03	21.5–24.5	3.0–5.5	0.05–0.6	0.05–0.20	2.50	0.05–0.60	–
	1.4655	0.03	22.0–24.0	3.5–5.5	0.1–0.6	0.05–0.20	2.00	1.0–3.0	–
Standard									
S32003		0.03	19.5–22.5	3.0–4.0	1.5–2.0	0.14–0.20	2.00	–	–
S31803	1.4462	0.03	21.0–23.0	4.5–6.5	2.5–3.5	0.08–0.20	2.00	–	–
S32205	1.4462	0.03	22.0–23.0	4.5–6.5	3.0–3.5	0.14–0.20	2.00	–	–
25 Cr									
S31200		0.03	24.0–26.0	5.5–6.5	1.2–2.0	0.14–0.20	2.00	–	–
S31260		0.03	24.0–26.0	5.5–7.5	2.5–3.5	0.10–0.30	1.00	0.2–0.8	0.1–0.5
S32506		0.03	24.0–26.0	5.5–7.2	3.0–3.5	0.06–0.20	1.00	–	0.05–0.30
S32520	1.4507	0.03	24.0–26.0	5.5–8.0	3.0–4.0	0.20–0.35	1.50	0.5–2.0	–
S32550	1.4507	0.04	24.0–27.0	4.5–6.5	2.9–3.9	0.10–0.25	1.50	1.5–2.5	–
Super duplex									
S32750	1.4410	0.03	24.0–26.0	6.0–8.0	3.0–5.0	0.24–0.32	1.20	0.5	–
S32760	1.4501	0.03	24.0–26.0	6.0–8.0	3.0–4.0	0.20–0.30	1.00	0.5–1.0	0.5–1.0
S32808		0.03	27.0–27.9	7.0–8.2	0.8–1.2	0.30–0.40	1.10	–	2.1–2.5
S32906		0.03	28.0–30.0	5.8–7.5	1.5–2.6	0.30–0.40	0.80–1.5	0.8	–
S32950		0.03	26.0–29.0	3.5–5.2	1.0–2.5	0.15–0.35	2.00	–	–
S39274		0.03	24.0–26.0	6.8–8.0	2.5–3.5	0.24–0.32	1.0	0.2–0.8	1.5–2.5
S39277		0.025	24.0–26.0	6.5–8.0	3.0–4.0	0.23–0.33	0.80	1.2–2.0	0.8–1.2
	1.4477	0.03	28.0–30.0	5.8–7.5	1.5–2.6	0.30–0.40	0.80–1.50	0.8	–
Hyper duplex									
S32707		0.03	26.0–29.0	5.5–9.5	4.0–5.0	0.30–0.50	1.50	1.0	–
S33207		0.03	29.0–33.0	6.0–9.0	3.0–5.0	0.40–0.60	1.50	1.0	–

UNS = Unified Numbering System

EN = European Norms

9.1.5 เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มชุบแข็งโดยการตกผลึก (Precipitation hardening stainless steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้เกิดขึ้นครั้งแรกในราวปี ค.ศ. 1940 เป็นโลหะที่มีโครเมียมและนิกเกิลเป็นธาตุผสมหลักพร้อมกับมีธาตุผสมอื่น ๆ อีกหลายธาตุ ความแตกต่างของธาตุผสมอื่น ๆ เมื่อนำไปเพิ่มความแข็งแรงโดยการผ่านกระบวนการทางความร้อน ด้วยวิธีอบให้เกิดการตกผลึกของธาตุที่ผสม (Precipitation hardening) โครงสร้างสุดท้ายที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากออสเทนไนต์ (Austenite) ไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) ตามอัตราความเร็วของการเย็นตัวของการชุบแข็ง (M_{Start} และ M_{Finish}) จะนำมาเรียกเชื่อมเกรดนั้น ๆ เช่น เกรด 17-4PH (AISI 630) ทำให้เกิดเป็นเกรดหรือชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ ดังแสดงใน **ตารางที่ 9.8** โดยมีลักษณะของโครงสร้างจุลภาคพื้นฐานดังตัวอย่างเกรด 17-4PH แสดงใน **รูปที่ 9.9** ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้สามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีการตกตะกอน โดยเป็นการตกตะกอนของสารประกอบในโครงสร้างพื้น เกิดขึ้นในระหว่างการบ่มด้วยความร้อน (Aging treatment) ซึ่งสารประกอบจะเกิดจากธาตุผสม ซึ่งได้แก่ โลหะอลูมิเนียม ทองแดง โมลิบดีนัม และนีโอเบียม ตัวอย่างเช่น เกรด 17-4PH ที่เพิ่มธาตุผสมทองแดง หรือเกรด PH15-7Mo ที่เพิ่มธาตุผสมอลูมิเนียมก็เพื่อทำหน้าที่ตกตะกอนเพิ่มความแข็งแรง เหล็กกล้ากลุ่มนี้มีสมบัติที่พิเศษหลายด้านได้แก่ มีความสามารถแปรรูปได้ง่าย มีความแข็งแรงสูง มีความเหนียวค่อนข้างสูง มีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี มีอัตราการบิดเบี้ยวน้อย และมีความสามารถในการเชื่อมสูง ซึ่งสมบัติที่กล่าวมาเป็นสมบัติด้านโดยรวมกันของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกกับออสเทนนิติก กล่าวคือ สามารถทำให้แข็งแรงขึ้นได้ด้วยกระบวนการทางความร้อนเหมือนกับเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก และในขณะเดียวกันก็มีสมบัติที่ต้านทานการกัดกร่อนได้ดีคล้ายกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก แต่อย่างไรก็ตามสมบัติที่โดดเด่นที่สุดของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้เน้นที่ความสามารถแปรรูปได้ง่าย จึงเห็นได้ว่าการนำไปใช้งานส่วนใหญ่เป็นลักษณะที่แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ลักษณะเป็นแท่ง เป็นเส้นลวด เป็นแผ่น และก็เป็นผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ เป็นต้น



รูปที่ 9.9 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมชุบแข็งโดยการตกผลึก (เกรด 17-4PH)

ที่มา : J.D. Bressan et al., *Journal of Materials Processing Technology* 205, 2008

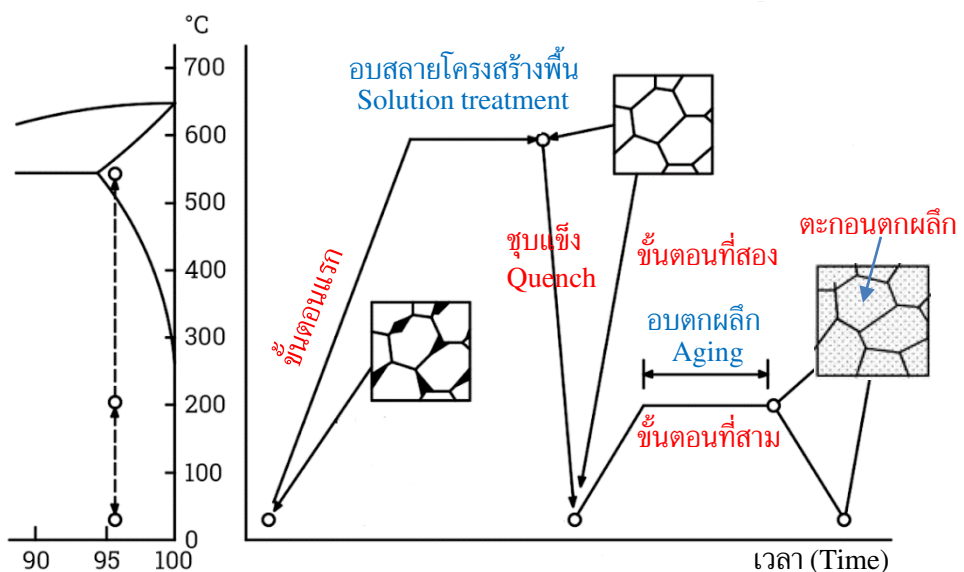
ตารางที่ 9.8 เกรดและส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมชุบแข็งโดยการตกตะกอน

ที่มา : AK Stainless Steels : Precipitation hardening stainless steel, 2016

เกรด (Common name)	ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)									
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb
15-5PH	0.07	1.00	0.04	0.03	1.00	14.00–	3.50–	–	2.50–	0.15–
	max	max	max	max	max	15.50	5.50		4.50	0.45
PH15-7Mo	0.09	1.00	0.04	0.04	1.00	14.00–	6.50–	2.00–	2.00–	0.75–
	max	max	max	max	max	16.00	7.75	3.00	3.00	1.50
PH14-8Mo	0.05	1.00	0.04	0.04	1.00	13.75–	7.75–	2.00–	2.00–	0.75–
	max	max	max	max	max	15.00	8.75	3.00	3.00	1.50
17-4PH	0.07	1.00	0.04	0.03	1.00	15.00–	3.00–	–	3.00–	0.15–
	max	max	max	max	max	17.50	5.00		5.00	.045
17-7HP	0.09	1.00	0.04	0.03	1.00	16.00–	6.50–	–	0.75–	–
	max	max	max	max	max	18.00	7.75		1.50	
AM-350	0.11	0.50–	0.04	0.03	0.05	16.00–	4.00–	2.50–	0.75–	0.15–
	max	1.25	max	max	max	17.00	5.00	3.25	1.50	.045
AM-355	0.15	0.50–	0.04	0.03	0.05	15.00–	4.00–	2.50–	0.75–	0.15–
	max	1.25	max	max	max	16.00	5.00	3.25	1.50	.045

Common name = ชื่อที่ใช้เรียกตามเกรดตามโครงสร้างที่ได้หลังจากผ่านขบวนการอบตกผลึก

ขบวนการทางความร้อนในการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มี 3 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 9.10



รูปที่ 9.10 กรรมวิธีการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนของเหล็กกล้าไร้สนิม

ที่มา : F.E Mariani, et al., ASTM, Materials Performance and Characterization, Vol.5, (1), 2016

ขั้นตอนที่แรก เป็นขั้นตอนการให้ความร้อนเพื่อทำให้เป็นสารละลายเนื้อเดียว (Solution heat treatment : SHT) ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมจะใช้อุณหภูมิช่วงประมาณ 980–1,120 °C เพื่อให้สารประกอบที่ตกตะกอนและธาตุผสมเกิดการละลายเป็นเนื้อเดียวกันในลักษณะของสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated solution) ในทางปฏิบัติขั้นตอนนี้สามารถทำได้ในระหว่างการขึ้นรูป เช่น ในระหว่างการรีดขึ้นรูปร้อน ซึ่งเรียกขั้นตอนนี้ว่า “Mill annealing”

ขั้นตอนที่สอง เป็นขั้นตอนการชุบแข็งหรือการเย็นตัว (Quenching or cooling) ในขั้นตอนนี้จะนำโลหะผสมที่อยู่ในสภาพเป็นสารละลายเนื้อเดียวยิ่งยวด จุ่มลงในสารชุบที่อาจเป็นได้ทั้ง อากาศ น้ำ หรือน้ำมัน ที่มีอัตราการเย็นตัวสูงมากพอที่จะทำให้เนื้อโลหะยังคงอยู่ในสภาพของสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด อัตราการเย็นตัวมีผลต่อขนาดของเกรน โดยอัตราการเย็นตัวต่ำเกรนจะหยาบ (Coarse grain) อัตราการเย็นตัวสูงเกรนจะละเอียด (Fine grain) ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของโลหะโดยตรง

ขั้นตอนที่สาม เป็นขั้นตอนการตกตะกอนหรือการบ่มแข็ง (Precipitation or age hardening) ขั้นตอนนี้ จะให้ความร้อนเพื่อให้สารละลายของแข็งที่อิ่มตัวยิ่งยวดเกิดการแยกตัวของเฟสที่สอง (Secondary phase) ที่มีลักษณะเป็นกลุ่มของอนุภาคที่ตกตะกอนเล็ก ๆ กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพื้นหลัก โดยขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิ ซึ่งตะกอนเล็ก ๆ เหล่านี้มีบทบาทหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของเนื้อโลหะไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายขณะถูกแรงกระทำจากภายนอก หรือเรียกว่าแรงต้านภายในก็ได้ (Internal force) ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเป็นการเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงให้กับโลหะ สำหรับโลหะผสมบางชนิดอาจเกิดการตกตะกอนที่อุณหภูมิห้องหลังจากเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้องไปแล้วระยะหนึ่ง ซึ่งเรียกการตกตะกอนแบบนี้ว่า “Natural aging” แต่ถ้ามีการให้ความร้อนเพื่อเร่งหรือส่งเสริมให้เกิดการตกตะกอนขึ้นเรียกการตกตะกอนนี้ว่า “Artificial aging” โครงสร้างที่ได้จะมีผลึกจากธาตุโลหะที่ผสมอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิม เช่น Ni_3Al หรือ Ni_3Ti หรือ Ni_3Cu ถ้าเกิดอยู่ในโครงสร้างเฟสมาร์เทนไซต์ จะเป็นเกรด AISI 17–4PH ถ้าเกิดอยู่ในโครงสร้างเฟสเฟอร์ไรต์จะเป็นเกรด AISI 17–7PH และ AISI 600 เป็นต้น เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีความแข็งแรงสูงมาก และไม่เกิดการบิดเบี้ยวหลังจากการอบชุบ

ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการแยกประเภทและอธิบายถึงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดต่าง ๆ ถึงความเหมือนกันในบางประการและแตกต่างกันในบางประการ เพื่อเป็นพื้นฐานในการสร้างความรู้และความเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงของเหล็กกล้าไร้สนิมเมื่อต้องนำไปทำการประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ โดยเฉพาะการที่จะต้องนำความรู้ไปใช้ในการพิจารณาเลือกใช้ขบวนการเชื่อมที่เหมาะสม และการกำหนดปัจจัยการเชื่อมที่ถูกต้อง ที่จะไม่เกิดข้อบกพร่องของแนวเชื่อม รวมไปถึงกรณีที่เกิดข้อบกพร่องจากการเชื่อมหรือเกิดปัญหาใด ๆ ที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนหรือวิธีการเชื่อม ก็สามารถที่จะนำความรู้พื้นฐานของเหล็กกล้าไร้สนิมที่กล่าวมาข้างต้นไปใช้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งในหัวข้อถัดไปนี้เป็นการกล่าวถึงการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมที่เป็นองค์ความรู้ใหม่ เทคนิคใหม่ จากผลการวิจัยของผู้เขียนเองและนักวิจัยท่านอื่น ๆ ที่ได้เผยแพร่งานวิจัยไว้ในวารสารงานวิจัยต่าง ๆ

บทนำการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Welding of austenitic stainless steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกพบว่าเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีปริมาณการใช้งานมากที่สุดเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มอื่น ๆ โดยมีการนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นโครงสร้างอาคารและประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย และมีจำนวนมากเช่นกันที่ต้องประกอบให้เป็นชิ้นเดียวกันด้วยกรรมวิธีการเชื่อม (Welding joints) ความหลากหลายของงานที่ต้องเชื่อมก็ส่งผลให้เกิดปัญหาที่หลากหลายของขบวนการเชื่อมเช่นกัน จึงได้เกิดงานวิจัยมากมายที่เกี่ยวกับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มไม่ดูดติดแม่เหล็กชนิดนี้ โดยมีทั้งวิจัยเพื่อแก้ปัญหาของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่เกิดขึ้นแล้วในอดีตจนถึงปัจจุบัน และทำการวิจัยเพื่อพัฒนาขีดความสามารถในการเชื่อมโลหะชนิดนี้ให้มีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น โดยเฉพาะความสนใจและความเชี่ยวชาญของผู้เขียนที่ได้ศึกษาและทำงานวิจัยในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกตลอดมา โดยได้ทำการรวบรวมและสรุปข้อมูลผลการวิจัยทั้งหมดมาเผยแพร่ในบทเรียนนี้ ซึ่งจะจัดหมวดหมู่ขององค์ความรู้ในแง่มุมต่าง ๆ จากผลการวิจัยที่ผ่านมาสรุปและเรียบเรียงให้ง่ายต่อการศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้งานของผู้ที่สนใจ โดยผลการวิจัยของผู้เขียนที่รวบรวมนำมาเขียนมีวัตถุประสงค์การวิจัยหรือเป้าหมายที่ต้องการแก้ปัญหาที่แตกต่างกัน เช่น ในบางเรื่องวิจัยมุ่งเน้นถึงสิ่งที่ต้องระมัดระวังป้องกันไม่ให้เกิดขึ้นในขบวนการเชื่อม (Prevention) เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก หรือบางเรื่องก็จะใช้ผลการวิจัยเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้งานที่เหมาะสม (Optimization) และบางเรื่องก็เป็นศึกษาพัฒนาเพื่อการนำมาประยุกต์ใช้งานในอนาคต ดังที่จะได้อธิบายในหัวข้อประเด็นต่าง ๆ ที่สำคัญ ดังนี้

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกทุกเกรดที่กล่าวมาตอนต้นล้วนเป็นโลหะกลุ่มเหล็กกล้า (Steels) ดังนั้น ความสามารถพื้นฐานทางการเชื่อมจึงไม่แตกต่างกันมาก ความหมายคือ สามารถทำการเชื่อมได้ทุกขบวนการเชื่อมไม่ว่าเป็นการเชื่อมแบบหลอมละลายเต็มลวดและไม่เต็มลวด (Fusion welding) หรือการเชื่อมแบบไม่หลอมละลาย (Non-fusion welding) โดยการเชื่อมที่ต่างขบวนการ ต่างปัจจัย การเชื่อม และต่างกันในเรื่องประกอบอื่น ๆ ย่อมส่งผลต่อประสิทธิภาพของแนวเชื่อม ต่อคุณภาพของรอยต่อ และข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้น ดังที่จะได้กล่าวถึงสาระสำคัญและผลงานการวิจัยที่สำคัญต่อการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกดังต่อไปนี้

9.2 โลหะวิทยาการเชื่อม (Welding metallurgy)

การเชื่อมวัสดุที่เป็นประเภทโลหะ (Welding metals) ความรู้ความเข้าใจในพื้นฐานทางโลหะวิทยาของโลหะที่นำมาเชื่อมที่เราเรียกว่าโลหะหลัก (Base metal) มีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง เพราะโดยหลักพื้นฐานของการเชื่อมเป็นการนำโลหะมาต่อเข้าด้วยกัน ถ้าวัสดุโลหะนั้นมีองค์ประกอบทางโลหะวิทยาที่เหมือนกันทุกประการ (Similar metal) โอกาสที่จะได้รอยเชื่อมต่อที่มีประสิทธิภาพสูงและเกิดข้อบกพร่องน้อยก็มีโอกาสเป็นได้มาก แต่ก็เป็นที่ทราบกันดีว่าเนื้อเชื่อมที่ได้จากขบวนการเชื่อมจะแตกต่างจากโลหะหลักก่อนเชื่อม โดยเฉพาะการเชื่อมแบบหลอมละลายที่ใช้ความร้อนหลอมละลาย

โลหะและให้เย็นตัวติดกันเป็นแนวเชื่อม กลไกในลักษณะนี้จะมีผลกระทบในทางโลหะวิทยาของเหล็กที่นำมาเชื่อมทั้งกายภาพภายนอกของรูปร่างแนวเชื่อม (Weld bead shape) และโครงสร้างจุลภาคภายในของเนื้อเชื่อม (Microstructure) โดยจะรวบรวมเอาผลงานวิจัยของผู้เขียนเองและผลงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องมานำเสนอเพื่อเป็นแนวทางและข้อปฏิบัติที่ถูกต้อง รวมถึงองค์ความรู้ใหม่ ๆ เทคนิคใหม่ ๆ และเทคโนโลยีสมัยใหม่ของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกในแต่ละด้านแต่ละแง่มุม ดังต่อไปนี้

1. บ่อหลอมละลายและโครงสร้างภายใน (Weld pool and microstructure)

การเชื่อมแบบหลอมละลายที่อาศัยการอาร์กเพื่อการหลอมละลายจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องสร้างและควบคุมบ่อหลอมละลายขณะทำการเชื่อม เพราะขนาดและรูปแบบของส่วนที่เกิดจากการหลอมละลายจะเป็นที่มาของขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อม ส่วนโครงสร้างจุลภาคภายในเนื้อเชื่อมจะเกี่ยวข้องกับส่วนผสมทางเคมีของโลหะที่เชื่อมกับกลไกการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายจนกลายเป็นของแข็ง (Solidification) ที่เรียกว่า “แนวเชื่อม (Weldment)”

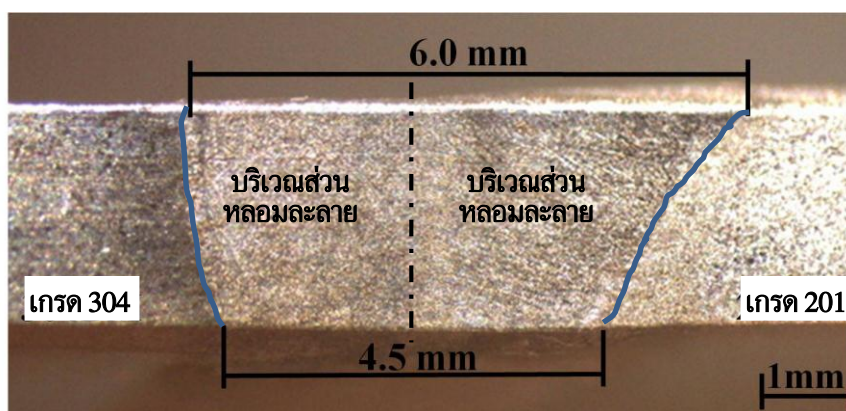
บ่อหลอมละลายของการเชื่อมจะถูกควบคุมด้วยปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่การเชื่อม ที่เรียกกันว่า “Heat input” ที่มีความสัมพันธ์กันของ กระแสไฟเชื่อม (Welding current) แรงดันเชื่อม (Arc volt) และความเร็วในการเชื่อม (Welding speed) ซึ่งมีอิทธิพลต่อขนาดของแนวเชื่อมทั้งในด้านความกว้าง (Fusion zone width : W) และในด้านความลึก (Penetration depth : D) หรือที่รู้จักและเรียกกันว่า D/W ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าเพื่อการอาร์กที่สูงก็จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อการทำให้แนวเชื่อมมีขนาดที่กว้างขึ้น และมีการซึมลึกที่มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยเชิงทดลองของ Wichan Chuaiphan และ Loeshpahn Srijaroenpramong (2014) ที่ทำการวิจัยทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด AISI 201 โดยขบวนการเชื่อม GTAW ด้วยปัจจัยความเร็วเชื่อมที่ต่างกันที่ต้องการทำให้ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าไม่เท่ากัน โดยพบว่าที่ความเร็วเชื่อมที่สูงขึ้นปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าจะลดลง และส่งผลทำให้ขนาดความกว้างและความลึกของแนวเชื่อมลดลง ดังแสดงผลการทดลองใน **ตารางที่ 9.9** ข้อมูลนี้เป็นผลของการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกประเภทแผ่นบาง (3 มม.) ด้วยวิธีการเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม (Autogenously welding) ซึ่งสามารถนำไปใช้อ้างอิงเพื่อเป็นแนวโน้มในการพยากรณ์ขนาดของแนวเชื่อมได้กับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกเกรดอื่น ๆ ทั้งซีรีย์ 200 และซีรีย์ 300

ตารางที่ 9.9 อิทธิพลของความร้อนจากการอาร์กที่มีต่อขนาดของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, 2014

ชิ้นงานทดสอบ (ความเร็วในการเชื่อม)	ความร้อนที่ป้อนเข้า (Heat input)	ขนาดของแนวเชื่อม (Weld bead size)	
		แนวนอน (Width face weld)	แนวล่าง (Width root weld)
A (1.5 mm/s)	0.850 kJ/mm	6.4 mm	5.1 mm
A (1.5 mm/s)	0.850 kJ/mm	5.5 mm	4.5 mm
A (1.5 mm/s)	0.850 kJ/mm	4.2 mm	3.6 mm

นอกจากนี้ Wichan Chuaiphan และ Loeshpahn Srijaroenpramong (2019) ยังได้ทำการวิจัยทดลองถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแนวเชื่อมที่สัมพันธ์กันของสัดส่วน D/W ในกรณีการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกแบบต่างเกรดด้วยวิธีการไม่เติมลวด (Autogenously dissimilar welding) โดยการทดลองเชื่อมระหว่างตระกูลซีรีย์ 200 เกรด 201 กับตระกูลซีรีย์ 300 เกรด 304 ซึ่งทั้งสองเกรดเป็นที่นิยมนำมาใช้งานกันในปริมาณที่สูงมาก เป้าหมายเพื่อต้องพิสูจน์ทราบว่าการเชื่อมแบบโลหะต่างชนิดกันพฤติกรรมของการเกิดของบ่อหลอมละลายจะเป็นอย่างไร โดยพบว่า บ่อหลอมละลายมีรูปร่างที่ไม่สมมาตร บ่อหลอมละลายด้านโลหะเกรด 201 จะกว้างกว่าด้าน 304 เหตุผลเพราะโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 201 ที่มีธาตุแมงกานีสผสมสูง ซึ่งมีสมบัติด้านค่าความจุความร้อน (Volumetric heat capacities) ที่ต่ำกว่าโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ที่มีธาตุนิเกิลผสมสูง คือ ที่ความจุความร้อน 3905 และ $4015 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ ตามลำดับ จากเหตุผลดังกล่าวมีอิทธิพลทำให้รูปร่างของแนวเชื่อมไม่สมมาตรเกิดขึ้น (Asymmetric) โดยเกิดเป็นลักษณะพื้นที่บริเวณส่วนหลอมละลาย (Fusion zone) ทางด้านโลหะ 201 จะมีมากกว่าทางด้านโลหะ 304 ดังแสดงในรูปที่ 9.11 จากผลการวิจัยดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าค่าความจุความร้อนที่เป็นค่าสมบัติเฉพาะตัวของโลหะแต่ละชนิดจะมีผลกระทบต่อความสามารถในการหลอมละลายจากการอาร์กเชื่อม โดยเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญต่อการพิจารณาในการออกแบบการเชื่อมโลหะในกรณีที่ต้องการเชื่อมต่อโลหะที่ต่างชนิดกัน



รูปที่ 9.11 แนวเชื่อมที่เกิดจากการหลอมของเหล็กกล้าไร้สนิม

ที่มา : F.E Mariani, et al., ASTM, Materials Performance and Characterization, Vol.5, (1), 2016

ปัจจัยในการสร้างบ่อหลอมละลายด้วยการอาร์ก (Factor of arc fusion)

มีหลายปัจจัยพอจะสรุปจากผลการวิจัยที่หลากหลายดังนี้

- ปัจจัยจากขบวนการเชื่อม (Factor of welding processes) ปัจจัยข้อนี้เป็นที่ทราบกันดีว่าการเชื่อมด้วยกรรมวิธีที่ต่างกันจะมีกลไกในการอาร์กเพื่อสร้างบ่อหลอมละลายที่ต่างกัน เช่น การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) จะสร้างบ่อหลอมละลายด้วยการอาร์กกระหว่างลวดเติมกับ

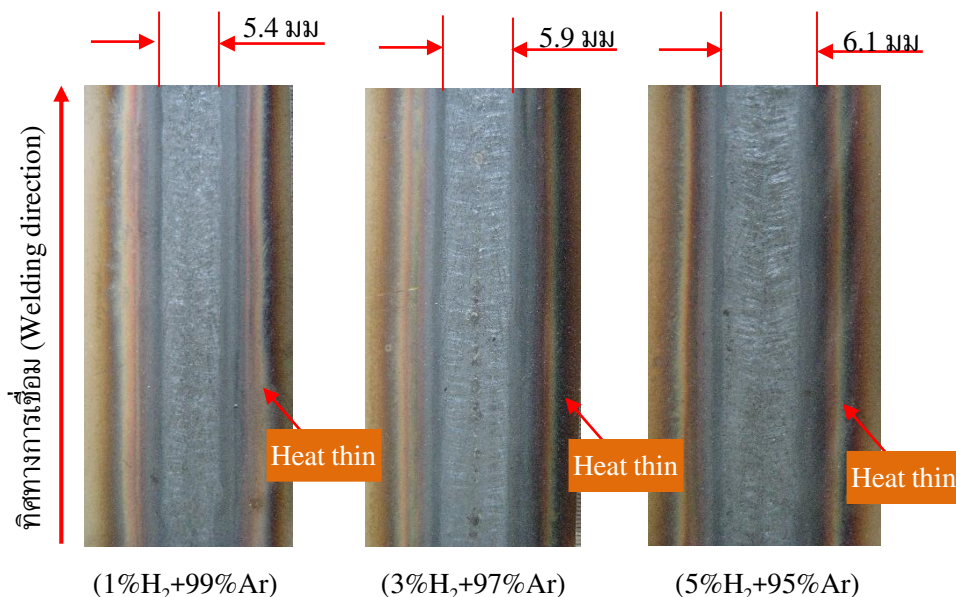
ชิ้นงาน บ่อหลอมละลายมีขนาดใหญ่และกว้างไปตามขนาดของลวดเชื่อมที่ใช้ แต่สำหรับการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมทิก (GTAW) สร้างบ่อหลอมละลายด้วยการอาร์กจากลวดทั้งสแตนซึ่งไม่ใช่ลวดเติม ดังนั้น บ่อหลอมละลายจึงแคบ ส่วนการเชื่อมแบบหลอมละลายด้วยลำแสงต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นลำแสงของเลเซอร์หรือลำแสงของอิเล็กตรอน กรรมวิธีการเชื่อมประเภทนี้จะเกิดบ่อหลอมละลายที่มีขนาดเล็กมาก เหตุเพราะปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานสูงมาก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าขนาดของบ่อหลอมละลายจะมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันและส่งผลทำให้ได้ขนาดของแนวเชื่อมที่แตกต่างกันออกไป ดังงานวิจัยเชิงทดลองเปรียบเทียบของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 ด้วย 3 ขบวนการเชื่อม คือ ขบวนการเชื่อม SMAW ขบวนการเชื่อม EBW และ ขบวนการเชื่อม LBW ดังแสดงในรูปที่ 9.12 เห็นได้ชัดเจนมากกว่าขนาดของพื้นที่ส่วนที่หลอมละลาย (Fusion area) ของแต่กรรมวิธีการเชื่อมแตกต่างกันมาก ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าขนาดหรือพื้นที่ของบ่อหลอมละลายสามารถควบคุมได้จากการเลือกชนิดของขบวนการเชื่อม



รูปที่ 9.12 แนวเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมที่สร้างบ่อหลอมละลายได้แตกต่างกัน

- ปัจจัยจากแก๊สปกคลุม (Factor of shielding gases) แก๊สปกคลุมแนวเชื่อมจะใช้แก๊สเฉื่อย (Inert gas) แก๊สประเภทนี้ไม่มีอิทธิพลต่อการสร้างขนาดบ่อหลอมละลาย แต่มีแก๊สประเภทที่เป็นแอคทีฟ (Active gas) ที่มีสมบัติในการเพิ่มความร้อนในขณะอาร์กที่นิยมนำมาผสมกับแก๊สเฉื่อย ซึ่งจะเป็นตัวการทำให้การอาร์กง่ายขึ้น และส่งผลต่อการบ่อหลอมละลายได้รวดเร็วทำให้สามารถเพิ่มความเร็วในการเชื่อมได้ดี แต่ขณะเดียวกันก็จะส่งผลให้ขนาดของบ่อหลอมกว้างและลึกมากขึ้น จึงต้องควบคุมปัจจัยการเชื่อมอื่น ๆ ควบคู่ไปด้วย ได้แก่ กระแสไฟเชื่อม (Welding current) ความเร็วในการเชื่อม (Welding speed) และระยะอาร์กเชื่อม (Arc welding) เป็นต้น ดังรายงานสรุปผลการวิจัยของ Wichan Chuaiphan et al. (2020) ที่ทำการทดลองใช้แก๊สแอคทีฟไฮโดรเจนผสมกับแก๊สอาร์กอนที่ (1% H₂+99% Ar) ที่ (3% H₂+97% Ar) (5% H₂+95% Ar) เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกเกรด AISI 201 ด้วยขบวนการเชื่อมทิก (TIG) และปัจจัยการเชื่อมเดียวกันพบว่าเมื่อปริมาณ

แก๊สแอคทีฟไฮโดรเจนที่ผสมมากขึ้นจะทำให้ขนาดของแนวเชื่อมกว้างและลึกมากขึ้น และยังพบว่า ขบวนการเชื่อมอาร์กได้ง่ายขึ้น เกิดบ่อหลอมละลายได้รวดเร็วสามารถทำการเชื่อมได้ความเร็วยิ่งสูงมากขึ้น ดังแสดงลักษณะและขนาดของแนวเชื่อมในรูปที่ 9.13 และยังพบว่าบริเวณรอบแนวเชื่อมเกิดการเผาไหม้ของโครเมียมออกไซด์ (Heat tint) เป็นแนวที่กว้างขึ้นเมื่อใช้ปริมาณแก๊สแอคทีฟที่ผสมมากขึ้น



รูปที่ 9.13 ขนาดแนวเชื่อมที่เกิดจากผลของแก๊สแอคทีฟของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

ที่มา : Wichan Chuaiphon, et al., Journal of Advance Joining Processes, Vol.1, 2020

โครงสร้างของแนวเชื่อม (Microstructure of fusion weld)

โครงสร้างจุลภาคที่ได้หลังจากการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายจะถูกควบคุมโดยกลไกการแข็งตัวของน้ำโลหะ (Solidification of metal) สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกจะมีความแตกต่างจากการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทอื่น ๆ ที่กลไกการแข็งตัวต้องควบคุมจำนวนปริมาณของโครงสร้างเฟสเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ที่จะเกิดขึ้นท่ามกลางโครงสร้างพื้นของเฟสออสเทนไนต์ (Austenite) ให้อยู่ในเกณฑ์ปริมาณมาตรฐานที่ยอมรับได้ คือ 3–8 % เพื่อรักษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) หรือป้องกันไม่ให้เกิดการกัดกร่อนที่บริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เฟสโครงสร้างเฟอร์ไรต์ดังกล่าวจะเรียกกันว่า “เดลตาเฟอร์ไรต์ (Delta-ferrite)”

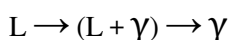
การเกิดเฟสโครงสร้างเดลตาเฟอร์ไรต์รวมอยู่กับเฟสโครงสร้างออสเทนไนต์ในเนื้อโลหะเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ถูกกำหนดโดยสัดส่วนของธาตุโครเมียม (Cr) กับธาตุนิกเกิล (Ni) ที่ผสมอยู่ในส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อม ซึ่งอยู่ในรูปของ Chromium equivalent (Cr_{eq}) กับ Nickel equivalent (Ni_{eq}) ซึ่งคำนวณได้จากสมการซึ่งอ้างอิงจาก Schaeffler ดังนี้

$$\text{Chromium equivalent (Cr}_{\text{eq}}) = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 1.5\% \text{Si} + 0.5\% \text{Nb} + 2\% \text{Ti}$$

$$\text{Nickel equivalent (Ni}_{\text{eq}}) = \% \text{Ni} + 30\% \text{C} + 0.5\% \text{Mn}$$

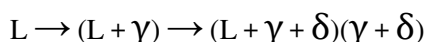
โดยค่าสัดส่วน $\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}}$ ที่ได้สามารถทำนายถึงรูปแบบการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายได้ ซึ่งรูปแบบการเย็นตัวนี้เรียกว่า โหมดการแข็งตัว (Solidification Mode) ซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดขึ้นได้ 4 โหมด ดังนี้

- ออสเทนไนต์โหมด **Austenite mode (A)** :



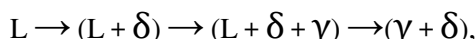
การแข็งตัวรูปแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อ $(\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}}) < 1.25$

- ออสเทนไนต์-เฟอร์ไรต์โหมด **Austenite – Ferrite mode (AF)** :



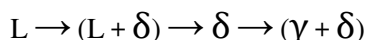
การแข็งตัวรูปแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อ $1.25 < (\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}}) < 1.48$

- เฟอร์ไรต์-ออสเทนไนต์โหมด **Ferrite – Austenite mode (FA)** :



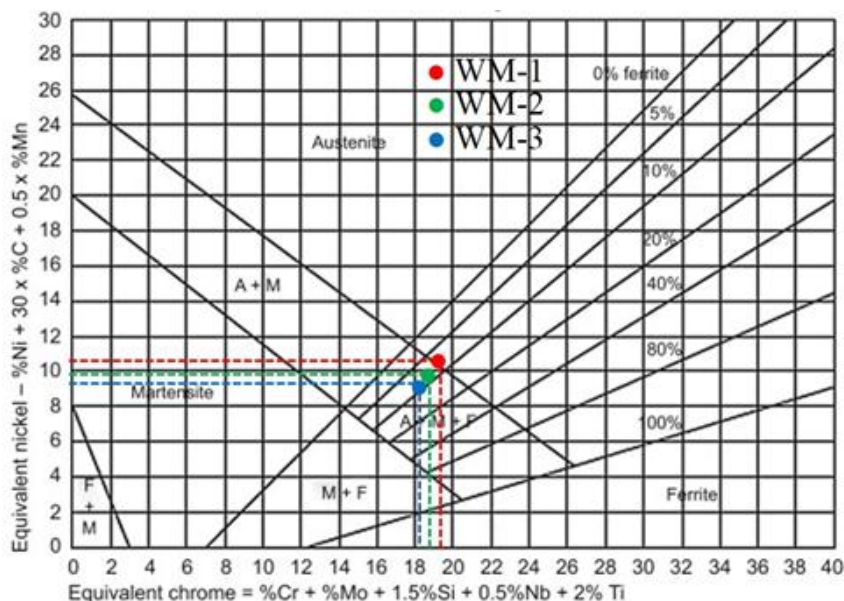
การแข็งตัวรูปแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อ $1.48 < (\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}}) < 1.95$

- เฟอร์ไรต์โหมด **Ferrite mode (F)** :



การแข็งตัวรูปแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อ $(\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}}) > 1.95$

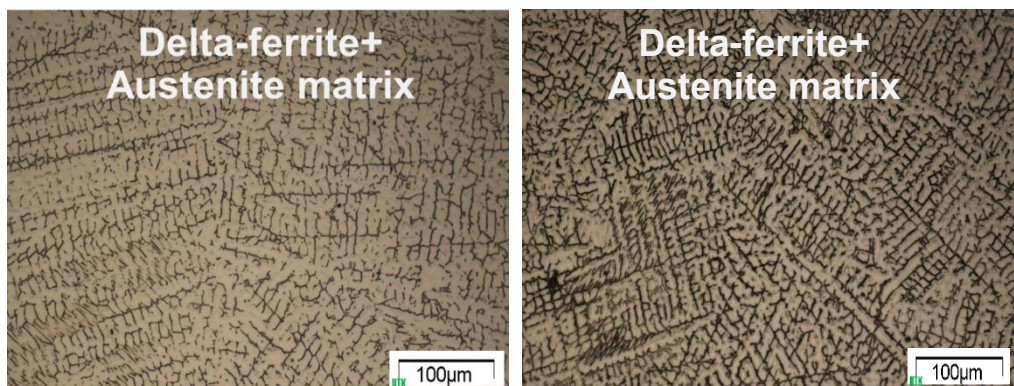
จากโหมดการเปลี่ยนเฟสเมื่อเกิดการเย็นตัวที่กล่าวมา ทำให้สามารถทราบถึงลำดับกลไกของการเปลี่ยนแปลงเฟสของบ่อหลอมละลาย และสามารถทำนายโครงสร้างสุดท้ายที่จะได้หลังสิ้นสุดการเย็นตัว อย่างไรก็ตาม โหมดการเย็นตัวสามารถบอกชนิดโครงสร้างที่ได้ แต่ไม่สามารถบอกถึงปริมาณหรือสัดส่วนที่แน่นอนได้ โดยเฉพาะในโหมดของ AF กับ FA ที่เกิดขึ้นสองเฟสโครงสร้างร่วมกัน ซึ่งมี Schaeffer A.L. (1949) ได้คิดค้นสร้างแผนภาพขึ้นมาเพื่อใช้ในการทำนายถึงปริมาณสัดส่วนของเฟสโครงสร้างที่จะเกิดขึ้นที่ได้รับอิทธิพลจากสัดส่วนผสมทางเคมี $(\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}})$ ที่เรียกกันว่า Schaeffler diagram ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 9.14 เป็นผลทดลองการวิจัยของ Wichan Chuaiphan et al. (2020) ที่ทำนายถึงปริมาณของเฟสเฟอร์ไรต์ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างพื้นออสเทนไนต์ภายในเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 216 ที่มีสัดส่วน $(\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}})$ ที่ต่างกัน คือ ชี้นงาน WM-1=1.82 ชี้นงาน WM-2=2.01 และชี้นงาน WM-3=2.04 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัดส่วนของ $(\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}})$ ที่สูงขึ้นทำนายได้ว่าโอกาสที่เกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ก็จะมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามหลักทฤษฎีของโหมดการแข็งตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติก



รูปที่ 9.14 Schaeffler diagram ทำนายเฟอร์ไรต์เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 216

ที่มา : Wichan Chuaiphon, et al., *Journal of Advance Joining Processes*, Vol.2, 2020

จากตัวอย่างผลการวิจัยทดลองและจากคำอธิบายข้างต้นพิสูจน์ให้เห็นได้ว่าการควบคุมปริมาณสัดส่วนผสมทางเคมีที่อยู่ในรูปของ Equivalent (eq) ก็จะสามารถกำหนดปริมาณของสัดส่วนเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ได้ ดังนั้น จึงมีนักวิจัยด้านโลหะวิทยางานเชื่อมได้ทำการวิจัยเชิงทดลองเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติกด้วยการเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมทางเคมีที่ต่างกัน (ซึ่งก็คือเกรดต่างกัน) เพื่อเปรียบเทียบพิสูจน์ระหว่างผลวิจัยที่ได้จากการทำนาย (Prediction) กับผลจากการทดลอง (Experiment) ดังตัวอย่างงานวิจัยของ Wichan Chuaiphon et al. (2020) ได้ทำการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกระหว่างซีรีย์ 200 กับซีรีย์ 300 ด้วยเกรด AISI 200Cu กับเกรด AISI 304 โดยการเลือกใช้ลวดเชื่อมเกรด ER 309L กับเกรด ER 316L ด้วยขบวนการเชื่อมทิก (TIG) ผลการวิจัยพบว่าเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดชนิดที่มีส่วนผสมของโครเมียมที่สูงกว่า (309L) จะมีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์เกิดขึ้นน้อยกว่าที่เชื่อมด้วยลวดที่ผสมโครเมียมต่ำกว่า ซึ่งก็เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับหลักทฤษฎีโหมดการแข็งตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติก ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า เนื้อเชื่อมที่ต้องการลดปริมาณการเกิดของเปอร์เซ็นต์เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ ให้เลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของโครเมียมสูงเป็นสำคัญ ดังตัวอย่างเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่มีเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์แตกต่างกันในรูปที่ 9.15 โดยในรูป (ก) แสดงถึงโครงสร้างที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมที่มีโครเมียมผสมสูง (ER 309L) ซึ่งมีผลทำให้เกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ต่ำ (5.56%) ส่วนรูป (ข) เป็นโครงสร้างที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมที่มีโครเมียมผสมต่ำ (ER 316L) จะเห็นได้ชัดเจนว่าส่งผลทำให้เกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่สูง (7.37%)



(ก) เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ 5.56%

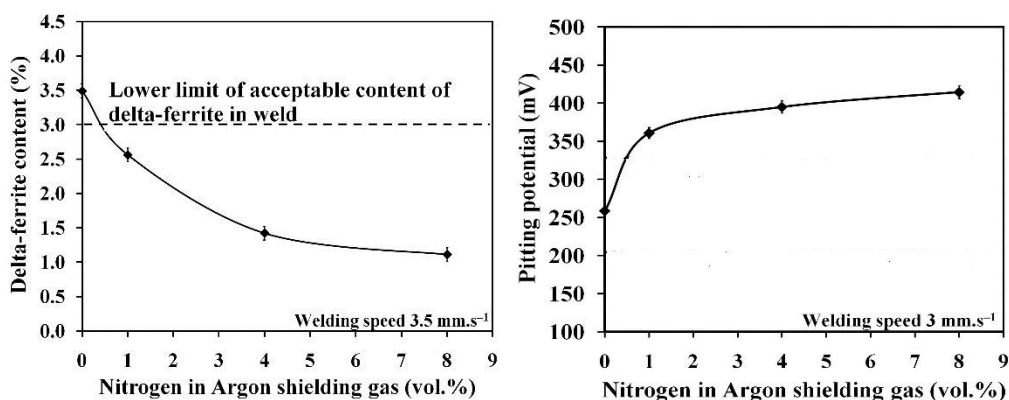
(ข) เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ 7.37%

รูปที่ 9.15 โครงสร้างที่มีเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

ที่มา : Wichan Chuaiphan, et al., *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9(3), 2020

การควบคุมปริมาณเฟสเฟอร์ไรต์ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติกมีความจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่ง เพราะมีผลกระทบโดยตรงต่อความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนแบบรูเข็ม โดยวิธีการป้องกันด้วยการเพิ่มหรือรักษาปริมาณของธาตุโครเมียมที่ได้จากลวดเชื่อมเติมเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากและมีประสิทธิภาพค่อนข้างดี ซึ่งได้กล่าวเป็นตัวอย่างมาแล้วข้างต้น ปัจจุบันได้มีการวิจัยทดลองหาวิธีการควบคุมปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในวิธีการต่าง ๆ กรณีที่เชื่อมจำพวกโลหะแผ่นบาง โดยที่ไม่ได้ใช้ลวดเชื่อมเติม (Autogenous welding) การเชื่อมกรณีแบบนี้มีโอกาสที่จะเกิดปริมาณของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ได้มาก เพราะกรรมวิธีของการเชื่อมจะเกิดการสูญเสียธาตุโครเมียมไปบางส่วนทำให้โครเมียมลดลงเสมอ ได้มีการวิจัยเชิงทดลองใช้แก๊สไนโตรเจน (N_2) ผสมกับแก๊สอาร์กอน (Ar) ใช้ในการปกคลุมแนวเชื่อม (Shielding gas) โดยเกิดจากหลักทฤษฎีทางด้านโลหะวิทยาที่ว่า แก๊สไนโตรเจนมีความเสถียร (Stabiliser) กับโครงสร้างออสเทนไนต์มากกว่าเฟอร์ไรต์ ดังนั้น จึงต้องการเติมไนโตรเจนลงไปในเรื่องเชื่อมผ่านทางแก๊สปกคลุมเพื่อเข้าไปช่วยฟอร์มตัวเฟสออสเทนไนต์ให้มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้สัดส่วนของเฟสเฟอร์ไรต์ลดลง ดังตัวอย่างผลการวิจัยของ Wichan Chuaiphan et al. (2019) ที่ทำการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกแบบไม่เติมลวดเชื่อม โดยใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมกับไนโตรเจนที่ปริมาณ ($1\%N + 99\%Ar$) ($4\%N + 96\%Ar$) และ ($8\%N + 92\%Ar$) จากผลการทดลองได้ข้อสรุปว่า เมื่อเพิ่มปริมาณไนโตรเจนเข้าไปในเนื้อเชื่อมมากขึ้นส่งผลกระทบทำให้สัดส่วนปริมาณของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ลดลงอย่างชัดเจน ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 9.16 (ก) ซึ่งผลการวิจัยทดลองนี้ได้ขยายผลนำไปพิสูจน์ทดสอบความสามารถต่อการทนต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) พบว่าเมื่อปริมาณของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ลดลง ความต้านทานการกัดกร่อนจะสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9.16 (ข) ด้วยเพราะกลไกการเกิดกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitted) จะเกิดขึ้นได้ไวและง่ายมากที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์กับเฟสออสเทนไนต์ (Grain boundary) ดังนั้น การลดหรือการกำจัดปริมาณของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ก็เป็นการลดหรือกำจัดโอกาสที่จะมีจุดเริ่มต้นของการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

เชื่อม ส่งผลให้เนื้อเชื่อมนั้นมีประสิทธิภาพในการต้านทานการกัดกร่อนได้สูงขึ้น ดังแสดงตัวอย่างลักษณะรูปแบบของการกัดกร่อนแบบรูเข็มดังกล่าวในรูปที่ 9.17

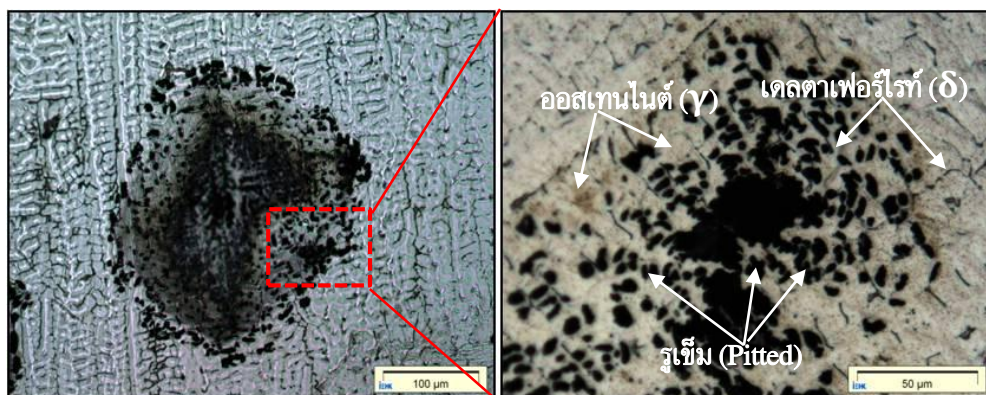


(ก) เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ลดลงเมื่อเพิ่ม N_2

(ข) ความต้านทานกัดกร่อนเพิ่มขึ้น

รูปที่ 9.16 การใช้แก๊สไนโตรเจนควบคุมเดลตาเฟอร์ไรต์และการกัดกร่อน

ที่มา : Wichan Chuaiphan, et al., Journal of Defence Technology, Vol. 15, 2019



(ก) ลักษณะรูปแบบการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

(ข) ขยายรูปแบบการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

รูปที่ 9.17 ลักษณะรูปแบบการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion)

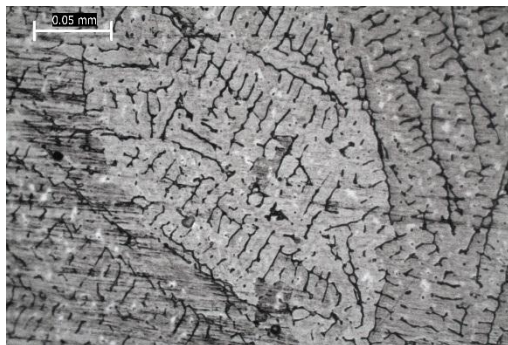
ที่มา : Wichan Chuaiphan, et al., Journal of Defence Technology, Vol. 15, 2019

นอกจากนี้วิธีการควบคุมสัดส่วนปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อม ยังมีเทคนิคจากการควบคุมปัจจัยการเชื่อม โดยอาศัยหลักการเพิ่มอัตราเร็วของการเย็นตัวของบ่อหลอมละลาย เพราะโดยปกติการเย็นตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกโครงสร้างสุดท้ายต้องเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ทั้งหมด แต่ถ้าบ่อหลอมละลายมีอัตราการเย็นตัวที่ช้าลง เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ก็มีเวลามากพอที่จะฟอร์มตัวขึ้นปะปนอยู่ในเฟสออสเทนไนต์ แต่ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิของบ่อหลอมละลายมีอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วขึ้น เวลาสำหรับการฟอร์มตัวของเฟสเฟอร์ไรต์ก็จะไม่เพียงพอ ส่งผลให้โอกาสที่จะเกิด

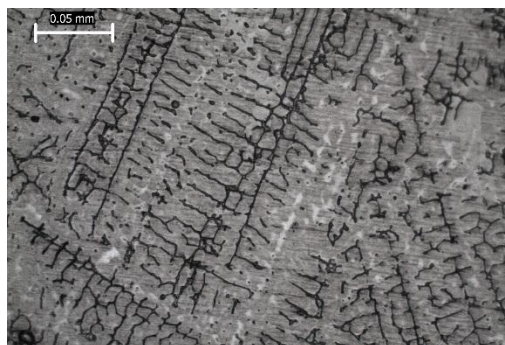
เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ก็น้อยลงหรือเกิดยากขึ้น แต่ในบางตำแหน่งที่อาจเกิดขึ้นได้บ้างแต่ก็ปริมาณที่น้อย ดังนั้น ปัจจัยการเชื่อมเรื่องของการความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ขบวนการอาร์ก (Heat input) จึงเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการเย็นตัวของน้ำโลหะ กล่าวคือ ถ้าปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ (High heat input) อัตราการเย็นตัวย่อมช้า โอกาสที่จะเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ก็มากขึ้น แต่ถ้าปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าต่ำ (Low heat input) อัตราการเย็นตัวจะเร็วโอกาสที่จะเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ก็น้อยลง ดังนั้นการกำหนดปัจจัยการเชื่อมของความร้อนที่ป้อนเข้าจึงใช้เป็นเทคนิคการควบคุมปริมาณการเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติกได้เป็นอย่างดี

ในทางปฏิบัติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตจึงมักปรับปัจจัยเพิ่มความเร็วในการเชื่อม (Welding speed) เพราะการเชื่อมที่เร็วขึ้นทำให้ความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานต่ำลง นอกจากจะสามารถเชื่อมงานได้รวดเร็วขึ้นแล้ว ยังสามารถลดความร้อนที่ป้อนเข้าซึ่งช่วยในการลดปริมาณของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ได้ด้วย ดังตัวอย่างผลการวิจัยของ Wichan Chuaiphan et al. (2014) ที่ทำการทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกซีรีส์ 200 เกรด AISI 201 ด้วยขบวนการเชื่อมทิก โดยใช้กำหนดความเร็วในการเชื่อมที่ต่างกัน (1.5 mm/s, 2.5mm/s และ 3.5mm/s) ซึ่งปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าอยู่ที่ 0.850 kJ/mm, 0.494 kJ/mm และ 0.345 kJ/mm ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าเมื่อความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าลดลง ส่งผลทำให้ขนาดความยาวของแขนเดนไดรต์ (Dendrite length) สั้นลงและระยะห่างของแขนเดนไดรต์ (Interdendrite spacing) ก็แคบลง ซึ่งโดยภาพรวม หมายถึงปริมาณสัดส่วนของเดลตาเฟอร์ไรต์ที่อยู่ในโครงสร้างพื้นออสเทนไนต์ลดลง จึงสามารถสรุปได้ว่าความเร็วที่สูงขึ้นทำให้ความร้อนป้อนเข้าต่ำลง สามารถที่จะใช้ในการควบคุมลดการเกิดสัดส่วนปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมได้ ดังแสดงโครงสร้างจุลภาคที่ปริมาณเดลตาเฟอร์ไรต์ต่างกันที่เกิดจากความร้อนที่ป้อนเข้าไม่เท่ากันในรูปที่ 9.18

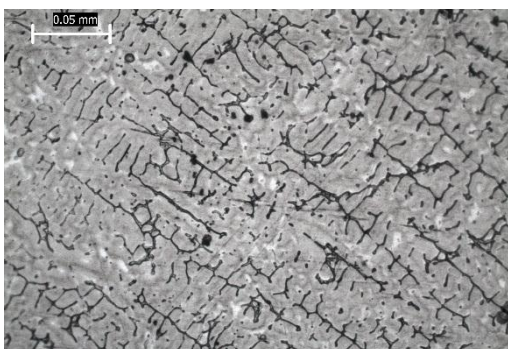
สำหรับกรณีที่เชื่อมโลหะต่างชนิด (Dissimilar welding) ที่ทำการเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติกต่างซีรีส์ ระหว่างซีรีส์ 200 กับ ซีรีส์ 300 เช่น ทำการเชื่อมระหว่างเกรด AISI 201 กับ AISI 304 พบว่าความสามารถในการละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของโลหะเหล็กประเภทนี้ดีมาก การกระจายตัวของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์จะกระจายไปในแต่ละตำแหน่งอย่างสม่ำเสมอของโลหะทั้งคู่ ซึ่งวิธีการตรวจวัดปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์จะใช้เครื่องวัด FERITSCOPE-FMP30 ที่ใช้หลักการสะท้อนกลับของสมบัติความเป็นแม่เหล็กของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่เป็นระบบผลึกแบบ BCC ในหลายตำแหน่งของเนื้อเชื่อมแล้วหาค่าเฉลี่ยทั้งหมด ซึ่งค่าที่วัดได้ของแต่ละบริเวณมีความแตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้น การรายงานผลการวิจัยเรื่องของการเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในโครงสร้างพื้นฐานของออสเทนไนต์จึงเป็นค่าเฉลี่ยจากทดสอบ สำหรับกรณีที่เป็นการเชื่อมกับโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกซีรีส์เดียวกัน เช่น การเชื่อมระหว่างเกรด AISI 205 กับ AISI 216 หรือ AISI 304 กับ AISI 309 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเชื่อมมีการเกิดและกระจายตัวของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์สม่ำเสมอทั่วบริเวณ อาจมีบางในบางกรณีที่ชิ้นงานที่นำมาเชื่อมต่อมีความหนาบางแตกต่างกัน



(ก) เดลตาเฟอร์ไรต์ที่ ความเร็ว 1.5 mm/s



(ข) เดลตาเฟอร์ไรต์ที่ ความเร็ว 2.5 mm/s



(ค) เดลตาเฟอร์ไรต์ที่ ความเร็ว 3.5 mm/s

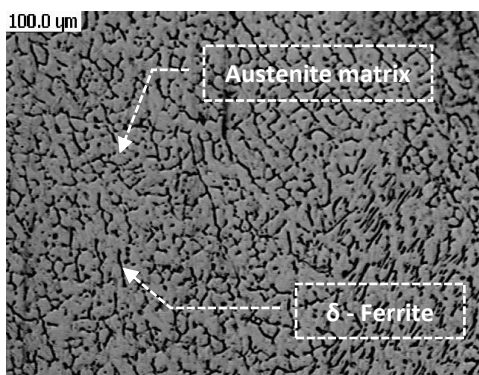
รูปที่ 9.18 สัดส่วนของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์
ในโครงสร้างพีนออสเทนไนต์ที่ระดับ
ความเร็วในการเชื่อมต่างกัน

ที่มา : Wichan Chuaiphan, et al., *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, 2014

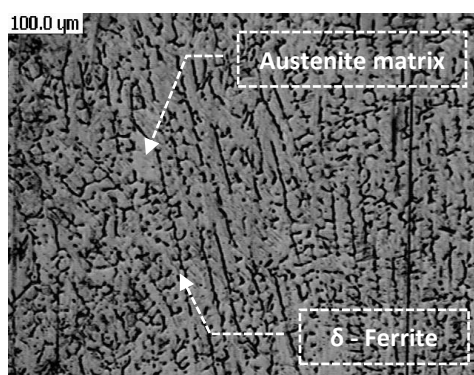
2. โครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกกับโลหะชนิดอื่น (Microstructure of ASS welding with other steels)

เหล็กกล้าไร้สนิมทุกประเภทเป็นที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้งานกันหลากหลาย สำหรับชิ้นงานโครงสร้างส่วนใหญ่มักเป็นการเชื่อมประกอบ ซึ่งกรณีที่เชื่อมโลหะชนิดเดียวกันที่เหมือนกันทุกประการ จะมีปัญหาน้อยมาก มักมีปัญหากับการเชื่อมโลหะที่ต่างชนิดกัน ซึ่งได้แก่การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ASS กับ เหล็กกล้าคาร์บอน หรือกับเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทอื่น เช่น ประเภท Martensitic Stainless steel : MSS ประเภท Ferritic Stainless steel : FSS หรือ ประเภท Duplex Stainless steel : DSS และรวมไปถึงประเภท Precipitation Stainless steel : PSS ซึ่งเนื้อเชื่อมที่เป็นการหลอมละลายรวมกันจากโลหะต่างชนิดก็จะมีสมบัติและองค์ประกอบภายในที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้น จึงได้เกิดการวิจัยเชิงทดลองหาความเหมาะสมของการเชื่อมแบบโลหะต่างชนิดกันที่เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละคู่ของการเชื่อมจำนวนมาก ดังตัวอย่างการวิจัยทดลองของ Wichan Chuaiphan et al. (2009) ที่ทดลองเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 กับเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1020 การเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีปริมาณโครเมียมผสมต่างกัน โดยมีเป้าหมายต้องการเติมโครเมียมลงไปในส่วนหลอมละลายเพื่อเข้าไปสร้างแนวเชื่อมให้เกิดเป็นเกรตเหล็กกล้าไร้สนิมทนการกัดกร่อนนำไปใช้แก้ปัญหาการเชื่อมต่อของระบบของหม้อไอน้ำ ผลการวิจัยได้คำตอบว่าเนื้อเชื่อมที่ได้มีสมบัติเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติก

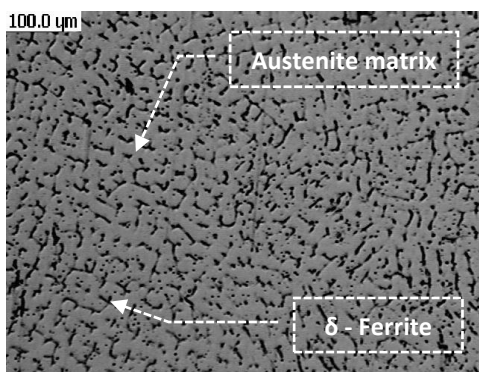
โดยเกิดเฟสโครงสร้างเดลตาเฟอร์ไรต์ (δ -ferrite) ในโครงสร้างพื้นออสเทนไนต์ ดังแสดงลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมที่เลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีโครเมียมผสมต่างกัน ในรูปที่ 9.19 และเมื่อนำไปทดสอบหาความสามารถต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็ม พบว่ามีสมบัติใกล้เคียงกับเกรด AISI 304 โดยเนื้อเชื่อมที่ใช้ลวดเชื่อม ER 309L จะให้สมบัติที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีปริมาณโครเมียมผสมอยู่ในลวดเชื่อมสูง (26%Cr) ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการเชื่อมถ้าต้องการเชื่อมต่อระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม ASS กับเหล็กกล้าคาร์บอนสามารถเชื่อมได้โดยแนะนำให้เลือกลวดเชื่อมที่มีโครเมียมผสมสูง



(ก) เชื่อมด้วยลวดเชื่อม AISI 308L



(ข) เชื่อมด้วยลวดเชื่อม AISI 309L



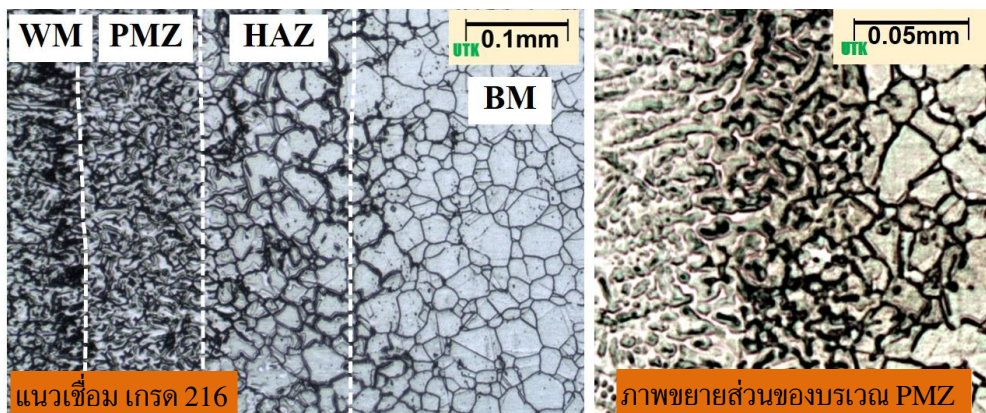
(ค) เชื่อมด้วยลวดเชื่อม AISI 316L

รูปที่ 9.19 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม ASS กับเหล็กกล้าคาร์บอน

ที่มา : Wichan Chuaiphan, et al., *Journal of Applied Mechanics and Materials* . Vol. 238–270 หน้า 283–290, 2012

การเชื่อมโลหะต่างชนิดปัญหาของ Interface zone จะเป็นจุดอ่อนแอของการเชื่อมโลหะต่างชนิด (Dissimilar welding) ความหมายของ Interface zone จะหมายถึง บริเวณที่เป็นแนวรอยต่อของระหว่างโลหะหลัก (Base metal) ที่ยังไม่หลอมละลายกับแนวเชื่อมที่หลอมละลาย (Fusion metal) ซึ่งปกติในกรณีของการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรดเดียวกันแนวรอยต่อของ Interface zone เนื้อเกรนที่เปลี่ยนแปลงจะผสมกลมกลืน ดังตัวอย่างผลการวิจัยของ Wichan Chuaiphan et al. (2020) ที่ทำการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนิกเกิลต่ำเกรด AISI 216 ด้วยขบวนการเชื่อมทิก จะเห็นได้ชัดเจนว่าบริเวณของ Interface zone เกิดการผสมกันระหว่างส่วนที่หลอมละลายกับส่วนที่ไม่หลอมละลาย (Partially metal zone) หรือที่เรียกกันว่า PMZ ซึ่งลักษณะของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแบบ

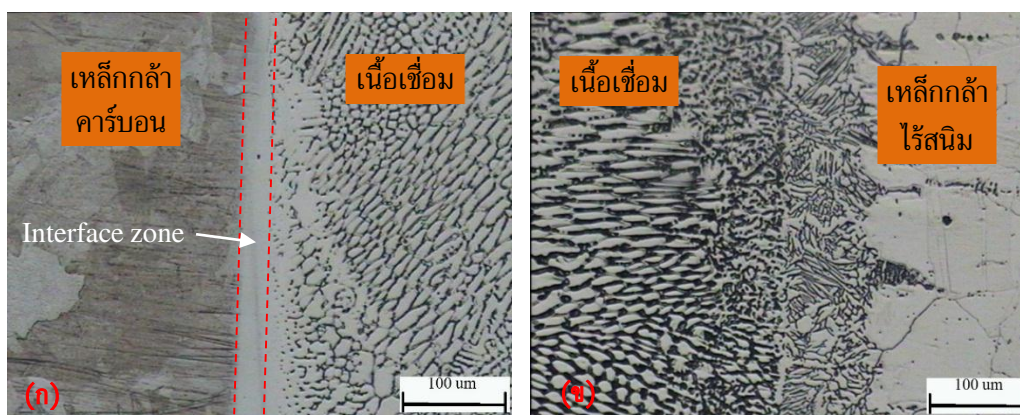
นี้จะไม่เกิดแนว Interface zone ที่เป็นแนวขอบยาวตลอดแนวเชื่อม ดังแสดงลักษณะของโครงสร้างดังกล่าวในรูปที่ 9.20 เหตุผลเนื่องมาจากโลหะที่ทำการเชื่อมกับน้ำโลหะที่หลอมละลายในบ่อหลอมละลายเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเดียวกัน หรืออาจใช้ลวดเชื่อมเติมชนิดเดียวกัน (Similar welding)



รูปที่ 9.20 Interface zone ของแนวเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316

ที่มา : Wichan Chuaiphan, et al., *Journal of Advanced Joining Processes*. Vol. 2, 2020

สำหรับกรณีที่เชื่อมโลหะต่างชนิดที่ไม่ใช่เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเดียวกัน หรือต่างประเภทของโลหะ เช่น การเชื่อมกับโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน แนว Interface zone จะเกิดเป็นขอบที่ชัดเจนยาวตลอดแนวเชื่อม ซึ่งสอดคล้องกับเป็นผลการวิจัยระดับปริญญาเอกของ Wichan Chuaiphan (2011) ที่ทำการทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 กับเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1020 ด้วยลวดเชื่อม E 316 พบว่าแนว Interface zone ด้านเหล็กกล้าคาร์บอนเกิดขึ้นชัดเจนมากดังแสดงในรูปที่ 9.21(ก) ส่วนในรูป (ข) จะเห็นได้ว่าแนว Interface zone จะผสมผสานกันไม่มีขอบที่แบ่งแนวด้วยเพราะบ่อหลอมละลายเติมลวดเชื่อมที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม น้ำโลหะเชื่อมกับโลหะหลักด้าน AISI 304 จึงเป็นโลหะชนิดเดียวกัน



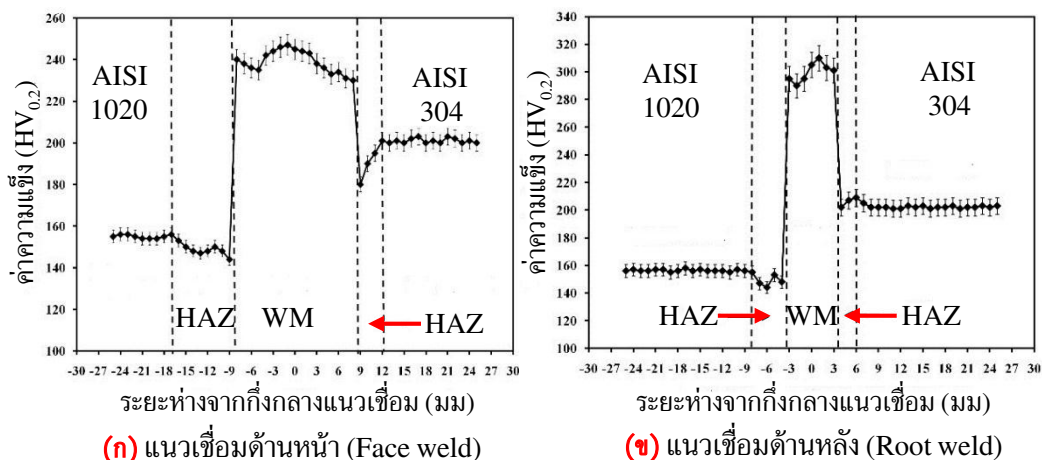
รูปที่ 9.21 Interface zone ของแนวเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน

ที่มา : Wichan Chuaiphan, et al., *Journal of Advanced Joining Processes*. Vol. 2, 2020

3. บริเวณผลกระทบจากความร้อน (Heat affecter zone) : HAZ

ขบวนการเชื่อมแบบหลอมละลายจำเป็นต้องสร้างความร้อนเพื่อการหลอมละลายให้โลหะติดเป็นเนื้อเดียวกัน จึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากอิทธิพลของความร้อนได้ ซึ่งเรียกกันว่า บริเวณกระทบร้อน (Heat affecter zone) หรือที่รู้จักกันในคำย่อว่า HAZ ปัจจัยสำคัญคือ ปริมาณของความร้อนที่ป้อนเข้าสู่การอาร์กแบบหลอมละลาย มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องควบคุมค่าปริมาณความร้อนที่เหมาะสม เพราะจะมีผลกระทบต่อคุณภาพของเนื้อโลหะเชื่อมโดยตรง ดังผลงานวิจัยทดลองของ Himanshu Vashishtha et al. (2014) ที่ได้ทำการทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกชนิดผสมโครเมียม-แมงกานีส (Cr-Mn) ด้วยขบวนการเชื่อม MMAW โดยเชื่อมด้วยปัจจัยใช้ปริมาณความร้อนป้อนเข้าไปต่างกัน พบว่าขบวนการเชื่อมที่รับความร้อนจากการอาร์กที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและยังส่งผลทำให้ความกว้างของบริเวณผลกระทบร้อน (Heat affected zone : HAZ) และบริเวณของการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ (Sensitized zone : SZ) ซึ่งรวมไปถึงบริเวณของการเผาไหม้ของออกไซด์ฟิล์มที่เรียกกันว่า “Heat Tint” ขยายกว้างขึ้นตามไปด้วย โดยเป็นที่ทราบกันดีว่างานเชื่อมที่ดีควรจะต้องมีบริเวณผลกระทบจากความร้อนที่แคบที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งในทางหลักการของโลหะวิทยาสามารถอธิบายได้ว่า ขนาดความกว้างของบริเวณผลกระทบร้อน หรือที่เรียกกันว่า HAZ เป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) อันเนื่องมาจากอิทธิพลความร้อนของบ่อหลอมละลายถ่ายโอนผ่านบริเวณดังกล่าวด้วยระดับอุณหภูมิที่สูงมากพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง โดยที่บริเวณดังกล่าวไม่เกิดการหลอมละลาย และเมื่อโครงสร้างเปลี่ยนแปลงทางกลก็เปลี่ยนตาม ซึ่งจะเปลี่ยนไปในทางที่ด้อยลง ขนาดความกว้างของ HAZ นอกจากได้รับผลจากความร้อนที่ป้อนเข้ามา พบว่าสมบัติการนำความร้อนของโลหะที่นำมาเชื่อม (Heat conductivity) จะมีอิทธิพลร่วมด้วยอย่างมากต่อความกว้างของบริเวณกระทบร้อนหรือ HAZ กล่าวคือ ถ้าโลหะที่เชื่อมมีค่าการนำความร้อนที่สูง (High heat conductivity) จะส่งผลทำให้ขนาดของ HAZ เล็กลงและแคบ เนื่องจากมีอัตราการแพร่กระจายของความร้อนได้สูงและดี ความร้อนถูกกระจายออกไปเป็นวงกว้าง เป็นเหตุให้ไม่เกิดความร้อนสะสมที่สูงและไม่มากเพียงพอต่อการสร้างผลกระทบในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะหลัก ซึ่งในทางตรงกันข้ามถ้าโลหะที่เชื่อมมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ (Low heat conductivity) ประสิทธิภาพในการระบายความร้อนต่ำส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมในปริมาณที่สูงและมากเพียงพอต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่บริเวณ HAZ ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการวิจัยของ Wichan Chuaiphan et al. (2009) ที่ทำการวิจัยทดลองเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 กับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1020 ที่มีค่าการนำความร้อนที่ 0.142 และ 0.015 W/mk ตามลำดับ ผลการทดลองพิสูจน์ให้เห็นได้ชัดเจนว่าบริเวณ HAZ ด้านเหล็กกล้าไร้สนิมมีขนาดที่แคบกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังแสดงผลการวิจัยทดลองในรูปที่ 9.22 ด้วยเหตุเพราะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่มีส่วนผสมทางเคมีที่ต่างไปจากเหล็กกล้าคาร์บอน มีระบบผลึกเป็นแบบ FCC ที่มีความสามารถในการเป็นตัวกลางนำความร้อนได้ดีกว่า ความร้อนที่ระบาย

ออกไปกระจายตัวไปได้ดีไม่เกิดความร้อนสะสม จึงเป็นผลทำให้เกิดพื้นที่ที่กระแทกที่เล็กกว่าหรือแคบกว่า โดยเป็นไปในรูปแบบเดียวกันทั้งแนวเชื่อมด้านหน้าและแนวเชื่อมด้านหลังหรือด้านราก ดังใน **รูป (ก) และ (ข)** ตามลำดับ



รูปที่ 9.22 อิทธิพลของความร้อนจากการอาร์กเชื่อมต่อขนาดของ HAZ

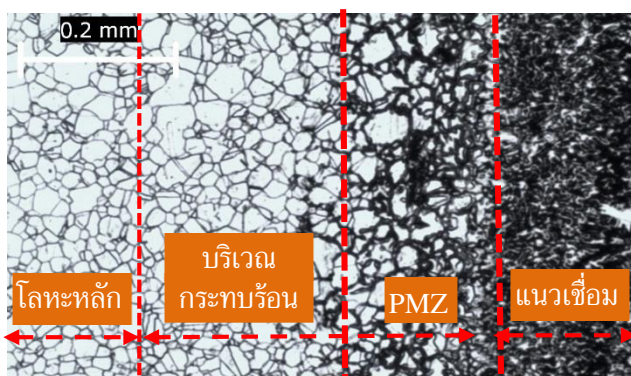
ที่มา : Wichan Chuaiphan et al., *Key Engineering Material*, Vol. 410–411, pp. 533–541, 2009

- ผลกระทบร้อนสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกต่างชนิด (HAZ of dissimilar welding ASS welding) : ซีรีย์ 200 กับ ซีรีย์ 300

การเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ใช้วิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายด้วยความร้อน จึงเกิดบริเวณที่กระทบจากความร้อนเกิดขึ้นเสมอ นอกจากจะส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคภายในแล้ว ยังมีผลกระทบต่อความสวยงามของพื้นผิวที่เป็นเงาแวววาวโดดเด่นของเหล็กกล้าไร้สนิมอีกด้วย

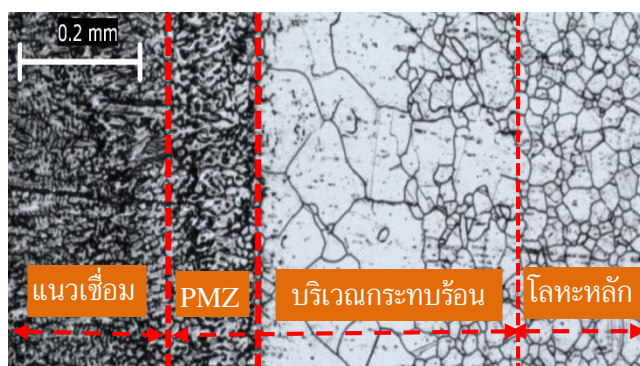
สำหรับผลกระทบด้านโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากผลกระทบของความร้อนที่เกิดขึ้นบนบริเวณไม่เกิดการหลอมละลาย หรือบริเวณ HAZ ของการเชื่อมโลหะที่ต่างชนิดหรือต่างเกรด แต่ละด้านของโลหะหลักจะมีรูปแบบของ HAZ ที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับกลไกความสามารถในการระบายความร้อนหรือการเป็นตัวนำความร้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งเหตุผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวิจัยเชิงทดลองของ Wichan Chuaiphan et al. (2019) ที่ได้ทำการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติก ระหว่างซีรีย์ 200 โดย AISI 201 กับซีรีย์ 300 โดย AISI 304 พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคในแต่ละบริเวณ (Zone) มีความแตกต่างกัน กล่าวคือ ด้านฝั่งโลหะหลัก 201 บริเวณของ PMZ หรือบริเวณที่เกิดการหลอมละลายบางส่วนจะกว้างมาก เหตุผลเพราะเนื้อของโลหะมีค่าความสามารถในการนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่สูงกว่า ความร้อนจึงแพร่กระจายไปทำให้เกิดการหลอมละลายในบางส่วนมากกว่าและเป็นพื้นที่บริเวณกว้าง จึงส่งผลทำให้โซนหรือบริเวณถัดไปมีระดับความร้อนที่ลดต่ำลง ซึ่งไม่มากพอที่จะ

ทำให้ขนาดของเกรนเกิดการเปลี่ยนแปลงโตขึ้น โดยเห็นได้ชัดเจนว่าขนาดเกรนบริเวณกระตบร้อนมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดเกรนเดิมของโลหะหลัก ดังแสดงในรูปที่ 9.23 (ก) ส่วนด้านฝั่งโลหะหลัก 304 บริเวณของ PMZ จะแคบกว่าด้วยเพราะมีค่าความสามารถในการนำหรือกระจายความร้อนได้ดีต่ำกว่าความร้อนจากบ่อหลอมละลายระบายออกไปสะสมสูง ทำให้บริเวณ PMZ มีสัดส่วนที่หลอมละลายมากกว่าที่ไม่หลอมละลายอย่างเห็นได้ชัดเจน และด้วยการกระจายความร้อนที่ช้าทำให้บริเวณถัดไปยังมีระดับความร้อนที่สูงมากพอที่จะให้เกรนเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดที่โตขึ้น ซึ่งแตกต่างจากขนาดของเกรนเดิมของโลหะหลัก ดังแสดงในรูปที่ 9.23 (ข)



(ก) HAZ ด้านโลหะหลัก AISI 201

รูปที่ 9.23 พฤติกรรมของการเกิด HAZ ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกแบบต่างชนิด
ที่มา : Wichan Chuaiphan et al.,
Defence Technology, Vol. 15 pp.
170–178, 2019

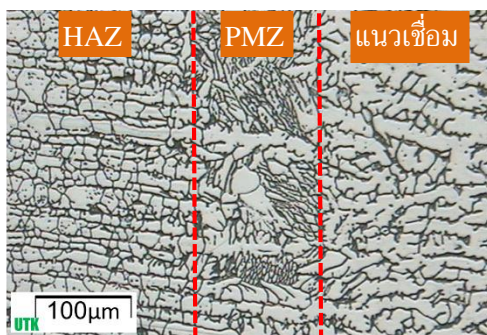


(ข) HAZ ด้านโลหะหลัก AISI 304

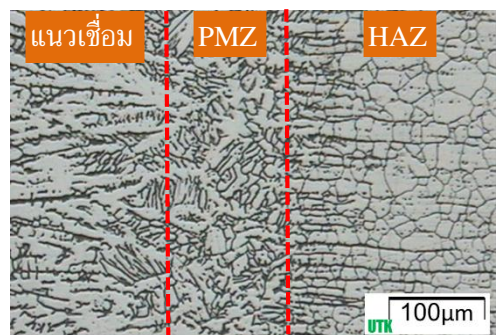
● ผลกระทบร้อนสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกต่างชนิด (HAZ of dissimilar welding ASS welding different grade) : ซีรีย์ 200 ต่างเกรด

ด้วยเหตุที่ผู้เขียนมีความสนใจในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกผสมแมงกานีส (นิเกิลต่ำ) หรือซีรีย์ 200 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมราคาถูกจนมักเรียกกันว่า Alternative stainless steel เพื่อศึกษาขีดความสามารถในการประยุกต์ใช้งาน จึงได้ทำการวิจัยเชิงทดลองจำนวนหลายงาน จำนวนหนึ่งเป็นการวิจัยทดลองเชื่อมซีรีย์ 200 ต่างเกรด ดังตัวอย่างทดลองทำการเชื่อมเกรด AISI 205 กับเกรด AISI 216

โดยขบวนการเชื่อมทิก ด้วยเทคนิคการเติมลวด AISI ER 307 จากผลการวิจัยพบว่าการเชื่อมโลหะซีรีย์เดียวแต่ต่างเกรด บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจากเชื่อมทั้งสองข้างมีความแตกต่างกันน้อยมากอย่างมีนัยสำคัญ ไม่ว่าจะเป็นบริเวณของ PMZ และขนาดของเกรนที่บริเวณ HAZ ดังรูปแสดงการเปรียบเทียบในรูปที่ 9.24 (ก) และ (ข) ซึ่งผลดังกล่าวเป็นเพราะโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งคู่เป็นประเภทออสเทนนิติกซีรีย์ 200 ที่เกิดจากธาตุผสมแมงกานีสเป็นหลักเหมือนกัน มีค่าสมบัติทางกายภาพ โดยเฉพาะค่าความสามารถในการนำความร้อนที่เท่ากัน คือ 15 W/m.k จึงสรุปได้ว่าถึงแม้จะเป็นการเชื่อมโลหะต่างชนิดแต่ถ้าโลหะคู่กันมีค่าความสามารถในการนำความร้อนที่ไม่แตกต่างกันหรือเท่ากัน ก็เกิดพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคที่เกิดจากผลกระทบร้อนที่ไม่แตกต่างกัน



(ก) ผลกระทบร้อน ด้านโลหะหลัก AISI 205



(ข) ผลกระทบร้อน ด้านโลหะหลัก AISI 216

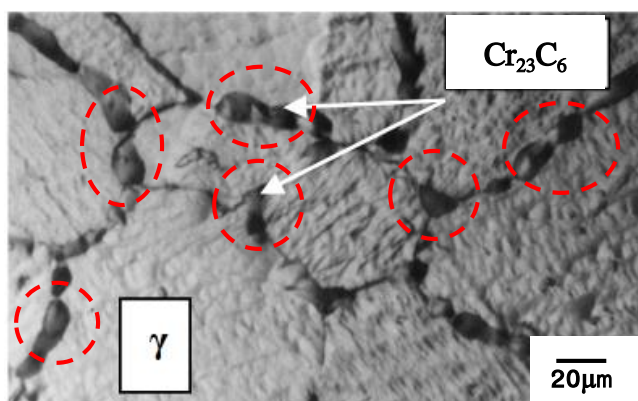
รูปที่ 9.24 การเกิด HAZ ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่มีค่าการนำความร้อนเท่ากัน

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 58, pp. 163–178, 2020

4. การเกิดโครเมียมคาร์ไบด์บริเวณกระทบร้อน (Chromium carbide at HAZ)

เหล็กกล้าไร้สนิมทุกประเภทมีธาตุโครเมียมเป็นธาตุผสมหลักที่เหมือนกัน เพื่อทำหน้าที่ในการสร้างออกไซด์ฟิล์มป้องกันการกัดกร่อนที่เรียกกันว่า ฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) โดยต้องมีสัดส่วนผสมในปริมาณที่มากเพียงพอในการสร้างฟิล์ม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติกต้องมีโครเมียมผสมอยู่มากกว่า 12% ซึ่งถ้าน้อยกว่านี้ประสิทธิภาพของฟิล์มจะต่ำ ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนก็จะลดลง โดยส่วนใหญ่ผสมอยู่ที่ 20–30% ดังนั้น การรักษาระดับปริมาณของโครเมียมไม่ให้ลดลงหรือสูญเสียไปเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกแบบหลอมละลายเป็นขบวนการขึ้นรูปที่มีโอกาสทำให้เกิดการสูญเสียโครเมียมได้มากที่สุด โดยจะสูญเสียไปในรูปของการที่โครเมียมไปรวมตัวกับคาร์บอนกลายเป็นสารประกอบโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr_{23}C_6) ขึ้นที่บริเวณกระทบร้อน (HAZ) ของรอยเชื่อม เพราะบริเวณนี้ได้รับความร้อนสูงสุดถึง $1,350^\circ\text{C}$ (ติดกับบ่อหลอมละลาย) แต่ไม่เกิดการหลอมละลาย โดยความร้อนจะลดลงตามระยะห่างจากขอบของบ่อหลอมละลาย ในระยะที่ระดับความร้อนอุณหภูมิระหว่าง $815\text{--}426^\circ\text{C}$ ธาตุโครเมียม (Cr) จะเคลื่อนตัวไปรวมกับธาตุคาร์บอน (C) และเกิดการตกผลึกในระดับจุลภาคเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr_{23}C_6) ขึ้นที่ขอบเกรน

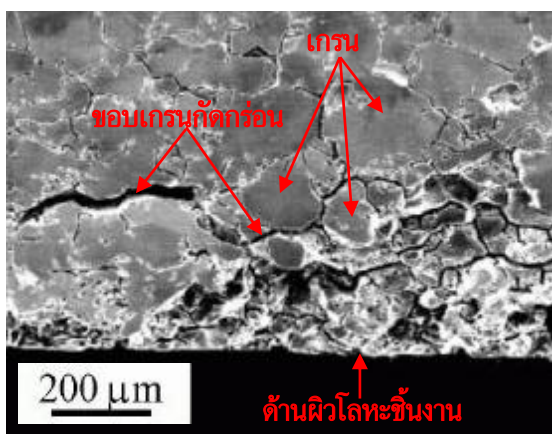
และกระจายตัวไปตามขอบของเกรน กลไกการเกิดลักษณะนี้เรียกว่า “Sensitization” ซึ่งสมบัติของโครเมียมคาร์ไบด์มีความแข็งแรงสูงและเปราะที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล ประเด็นที่สำคัญมีศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วคาโทด (Cathode) ที่อยู่ท่ามกลางขั้วแอโนด (Anode) ซึ่งเมื่อนำไปใช้งานที่ต้องสัมผัสกับสารละลายที่นำไฟฟ้า (Electrolyte) จะเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นที่เนื้อโลหะที่มีสภาพเป็นขั้วแอโนด ดังตัวอย่างของโครเมียมคาร์ไบด์ที่ตกผลึกอยู่ตามขอบเกรนในรูปที่ 9.25



รูปที่ 9.25 การเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ที่ตกผลึกตามขอบเกรนของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติก

ที่มา : มนูญ เลิศวิจิตรพันธุ์ บทความรู้วิชาการ วารสารวิชาการเทคโนโลยี

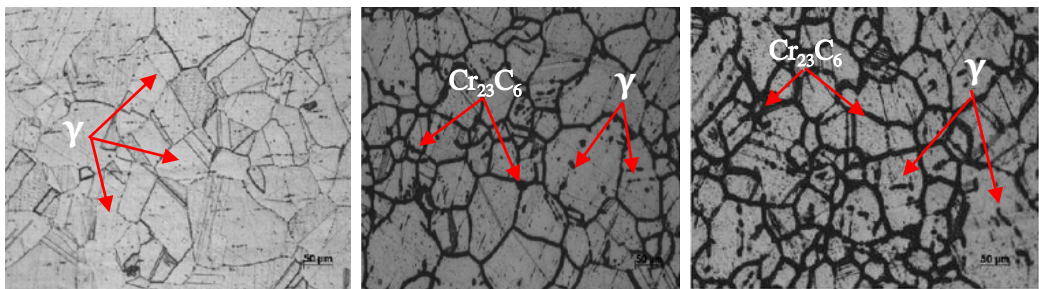
กลไกการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่บริเวณขอบเกรนไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะได้รับความร้อนจากการเชื่อมเท่านั้น แต่สามารถเกิดขึ้นได้เสมอเมื่อนำโลหะเหล็กชนิดนี้ไปใช้งานที่สภาพแวดล้อมอุณหภูมิสูงถึง 426 °C เป็นเวลานานอย่างต่อเนื่องก็จะทำให้สามารถเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรนได้ เมื่อโครเมียมส่วนหนึ่งไปรวมตัวกับคาร์บอนที่ขอบเกรน ทำให้บริเวณที่ติดกับขอบเกรนเหลือปริมาณโครเมียมที่ต่ำกว่า 12 % ซึ่งไม่สามารถที่จะต้านทานการกัดกร่อนได้จึงเกิดการกัดกร่อนขึ้น โดยจะกัดกร่อนตลอดแนวตามขอบเกรนที่มีโครเมียมต่ำ (Chromium depleted zone) พฤติกรรมการกัดกร่อนลักษณะนี้เรียกว่า “การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion)” จะเกิดขึ้นได้ง่ายในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ดังแสดงลักษณะรูปแบบของการกัดกร่อนตามขอบเกรนในรูปที่ 9.26



รูปที่ 9.26 การกัดกร่อนตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่เกิดจากโครเมียมคาร์ไบด์ตกผลึกตามขอบเกรน

ที่มา : M. Shimada et al. Acta Materialia Vol. 50, pp. 2331–2341, 2002

Ravindra Vasantrao Taiwade et al. (2014) ได้ทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ถึงพฤติกรรมของการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรนในกรณีที่ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมอุณหภูมิสูง โดยเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304L ทำการทดลองให้ความร้อนที่ 750 °C ที่ระยะเวลาต่างกัน ผลการทดลองสามารถเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนเป็นเวลานานขึ้นจะเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ได้มากขึ้น ดังแสดงปริมาณของ Cr_{23}C_6 เพิ่มขึ้นตามขอบเกรนในรูปที่ 9.27 โดยบริเวณที่ธาตุโครเมียมแพร่ออกไปรวมกับคาร์บอนมากขึ้น ส่งผลทำให้บริเวณนั้นมีโครเมียมลดลง บริเวณดังกล่าวถูกเรียกว่า Chromium depleted region ซึ่งอยู่รอบ ๆ คาร์ไบด์ตามขอบเกรน ดังแสดงในรูปที่ 9.28



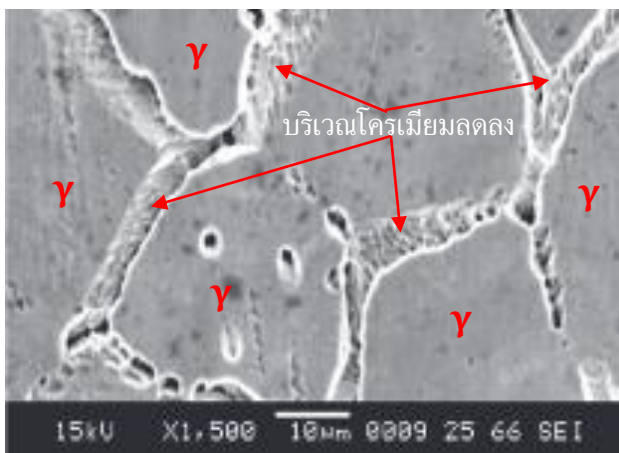
(ก) 750 °C เวลา 1 วัน

(ข) 750 °C เวลา 8 วัน

(ค) 750 °C เวลา 24 วัน

รูปที่ 9.27 ปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์ตกผลึกตามขอบเกรนเมื่อเวลานานขึ้น

ที่มา : Ravindra Vasantrao Taiwade ISIJ International Vol. 54, No. 8, pp. 1898–1906, 2014

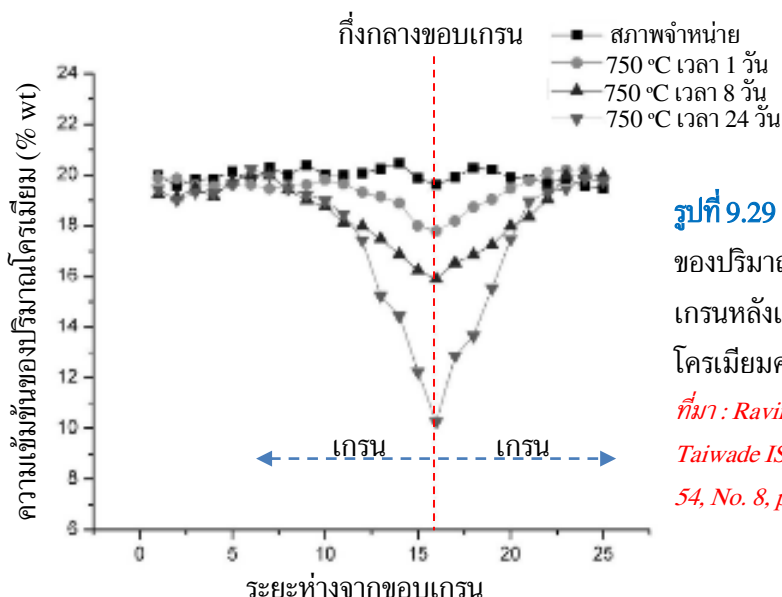


รูปที่ 9.28 การกัดกร่อนตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่เกิดจากโครเมียมคาร์ไบด์ตกผลึกตามขอบเกรน

ที่มา : Ravindra Vasantrao Taiwade ISIJ International Vol. 54, No. 8, pp. 1898–1906, 2014

Chromium depleted region เป็นตำแหน่งที่มีความอ่อนแอต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม เพราะสูญเสียโครเมียมไปในรูปของโครเมียมคาร์ไบด์ และเกิดความเสียหายจากการกัดกร่อนตามขอบเกรน โดยมีการพิสูจน์ทราบถึงรูปแบบการสูญเสียโครเมียมของบริเวณดังกล่าวจากผลการวิจัยทดลองในกราฟรูปที่ 9.29 ที่ทำการตรวจวัดการลดลงของโครเมียมจะเห็นได้ว่าปริมาณ

ของโครเมียมที่จุดกึ่งกลางของขอบเกรนจะเหลือปริมาณโครเมียมต่ำที่สุดและเหลือในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อห่างออกไปจากขอบเกรน ซึ่งสอดคล้องกับการที่ชิ้นงานได้รับความร้อนเป็นเวลานานการสูญเสียโครเมียมไปกับสารประกอบโครเมียมคาร์ไบด์ก็สูงขึ้น เหลือโครเมียมน้อยลง



รูปที่ 9.29 ระดับความเข้มข้นของปริมาณโครเมียมตามขอบเกรนหลังเกิดการตกผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์

ที่มา : Ravindra Vasantrao
Taiwade ISIJ International Vol. 54, No. 8, pp. 1898-1906, 2014

● แนวทางการป้องกันหรือลดการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรนที่บริเวณกระแทกร้อน

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรน (Sensitization) คือ 1. ความร้อนจากการเชื่อม (Heat input) 2. ธาตุคาร์บอนที่จะรวมตัวเป็นสารประกอบ (Carbon content) และ 3. ปัจจัยทางความร้อนหลังการเชื่อม (Heat treatment) ดังนั้น จึงต้องควบคุมปัจจัยสำคัญด้วยวิธีการดังนี้

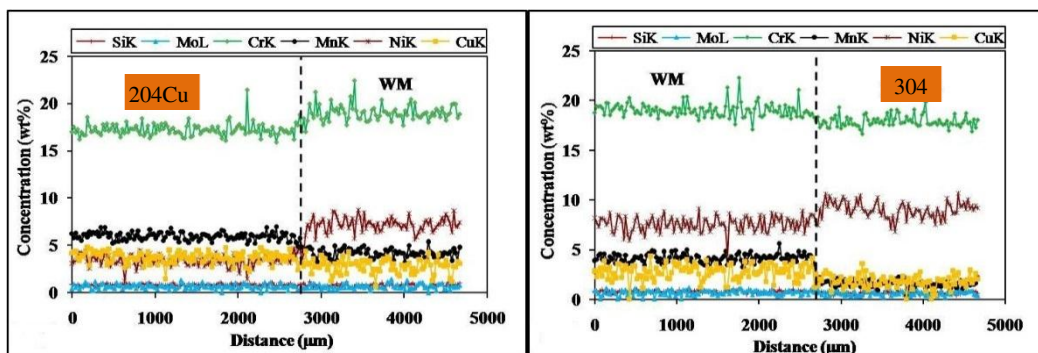
1. การควบคุมปริมาณความร้อนจากการเชื่อมแบบหลอมละลาย กรรมวิธีการเชื่อมแต่ละขบวนการมีกลไกการป้อนความร้อนสู่บ่อหลอมละลายแตกต่างกัน ควรจะเลือกขบวนการเชื่อมที่สามารถสร้างบ่อหลอมได้เร็วหรือลดเวลาในการเชื่อม เพื่อที่จะใช้พลังงานความร้อนป้อนเข้าไม่สูง ทำให้อุณหภูมิที่บริเวณกระแทกร้อนต่ำโอกาสหรือความสามารถที่โครเมียมจะเคลื่อนตัวไปรวมกับคาร์บอนก็น้อยลงหรือต่ำลงจะทำให้มีสารประกอบโครเมียมคาร์ไบด์ได้ ขบวนการเชื่อมที่เหมาะสม ได้แก่ ขบวนการเชื่อม GTAW ขบวนการเชื่อม PAW ขบวนการเชื่อม LBW ขบวนการเชื่อม EBW ด้วยเพราะขบวนการเชื่อมดังกล่าวนี้จะเกิดบ่อหลอมละลายจากการอาร์กที่เล็กและแคบ ที่สำคัญความร้อนจะกระทบต่อบริเวณรอบข้างของแนวเชื่อมน้อย

2. การควบคุมโดยการลดปริมาณคาร์บอน เป็นวิธีการค่อนข้างตรงประเด็นที่สามารถลดได้โดยตรงเพราะถ้าปริมาณคาร์บอนน้อยหรือต่ำโครเมียมก็ไม่สามารถรวมตัวเกิดเป็นคาร์ไบด์ได้ ซึ่งสามารถทำได้โดยการลดเชื่อมเติมที่มีคาร์บอนต่ำ เช่น เกรด 304L 316L หรือ 309L เป็นต้น หรือเลือก

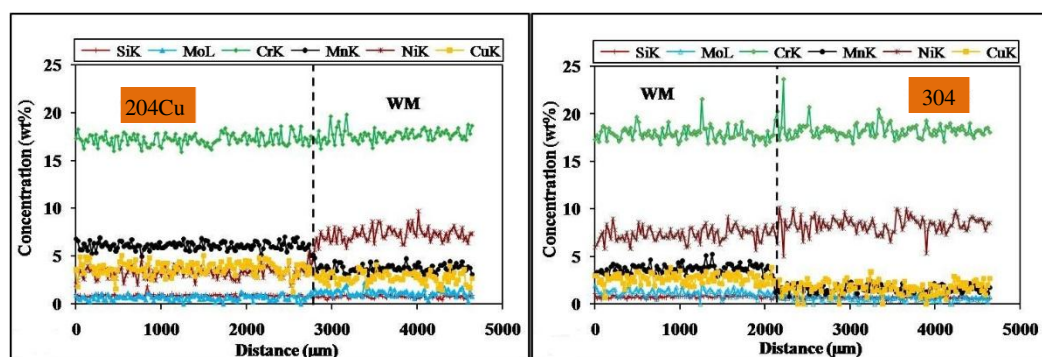
ลวดเชื่อมที่มีธาตุผสมพิเศษที่มีความไวต่อการรวมตัวกับธาตุคาร์บอนได้เร็วกว่าธาตุโครเมียม เช่น ธาตุไทเทเนียม (Ti) ในไนโอเบียม (Nb) เช่น เกรด 347 หรือ 321 ธาตุเหล่านี้จะทำหน้าที่ไปรวมตัวกับคาร์บอนแทนโครเมียม จะได้เป็นสารประกอบไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) หรือไนโอเบียมคาร์ไบด์ (NbC) เป็นต้น ทำให้ไม่เกิดปรากฏการณ์สูญเสียปริมาณของโครเมียมหรือไม่ลดลง

3. การอบสลายคาร์ไบด์ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Solution annealing) เป็นวิธีการสลายโครเมียมคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นแล้วให้โครเมียมกลับสู่สภาพดั้งเดิม ส่วนใหญ่จะใช้วิธีนี้กับโครเมียมคาร์ไบด์ที่เกิดบริเวณ HAZ ของแนวเชื่อม โดยวิธีการอบให้ความร้อนถึงอุณหภูมิประมาณ $1,050^{\circ}\text{C}$ และอบแช่ไว้เพื่อให้เวลาสำหรับการสลายตัวของคาร์ไบด์ จากนั้นก็ให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วป้องกันการรวมตัวกันอีก วิธีการนี้อาจเรียกว่า PWHT ก็ได้

จากหลักการแนวทางป้องกันหรือลดการคาร์ไบด์จากโครเมียมที่กล่าวมาได้มีการนำวิธีการเหล่านี้ไปทำการวิจัยทดลองกับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกทั้งที่เป็นแบบเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน (Similar welding) และแบบเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน (Dissimilar welding) ซึ่งก็ได้ผลการวิจัยที่เป็นไปตามหลักทฤษฎี ซึ่งอ้างอิงได้จากผลการวิจัยของ Wichan Chuaiphan et al. (2020) ที่ทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 204Cu กับเกรด AISI 304 ด้วยการเลือกใช้ลวดเชื่อมเกรดที่มีคาร์บอนผสมต่ำ คือ ER309L กับ ER316L โดยมีเจตนาที่ต้องการให้เหลือโครเมียมภายในเนื้อเชื่อมมากเพียงพอต่อการป้องกันการกัดกร่อน เพราะเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 204Cu มีโครเมียมผสมต่ำ (17.50 wt%) แต่มีคาร์บอนผสมสูง (0.1%) จากผลการวัดปริมาณโครเมียมในเนื้อเชื่อมเทียบกับในเนื้อโลหะหลัก จะเห็นได้ชัดเจนว่าการเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีปริมาณโครเมียมผสมสูงสามารถที่จะนำไปเจอในเนื้อเชื่อมที่มีโครเมียมต่ำได้อย่างสมบูรณ์ของลวดเชื่อมทั้ง ER309L และ ER316L ดังแสดงผลการตรวจวัดจาก EDS line สแกน ในรูปที่ 9.30 ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าวิธีการป้องกันการสูญเสียโครเมียมที่ไปอยู่ในรูปของคาร์ไบด์ตามขอบเกรนของแนวเชื่อม แล้วทำให้ขอบเกรนพร่องโครเมียมส่งผลทำให้เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรน สามารถป้องกันได้ด้วยการเติมโครเมียมเพิ่มลงไปจากที่ผสมอยู่ในลวดเชื่อม ซึ่งเหมาะสมสำหรับในกรณีที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดความร้อนจากการอาร์หลอมละลายได้ หรือมีขีดจำกัดในการเลือกขบวนการเชื่อมได้ โดยโครเมียมจะแพร่กระจายเข้าไปอยู่ทั้งในเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ (δ -ferrite) และเฟสออสเทนไนต์ (γ) แต่พบว่าละลายเป็นสารละลายของแข็งได้ในเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ได้มากกว่าเฟสออสเทนไนต์ ด้วยเหตุผลเพราะธาตุโครเมียมมีเสถียรภาพในการเกิดเฟสระบบผลึก BCC ได้ง่ายกว่า FCC ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Wichan Chuaiphan et al. (2020) ดังแสดงผลการทดลองในตารางที่ 9.10 ซึ่งจากผลการทดลองนี้ก็เป็นเหตุผลที่สนับสนุนหลักการที่ว่าถ้าเนื้อเชื่อมมีเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์จำนวนมากก็จะส่งผลลดความต้านทานการกัดกร่อนลง เพราะเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์เป็นตัวที่ดึงเอาโครเมียมไปทำให้ปริมาณโครเมียมที่ขอบเกรนด้านของ γ เกิดการสูญเสียโครเมียมและจะเกิดความอ่อนแอของออกไซด์ฟิล์ม ดังนั้น การเติมโครเมียมเข้าไปขณะเชื่อมจะช่วยทำให้เนื้อเชื่อมคงสมบัติความเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมได้ดี



(ก) การกระจายของธาตุโครเมียมในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวด ER309L



(ข) การกระจายของธาตุโครเมียมในเนื้อเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวด ER316L

รูปที่ 9.30 ผลการตรวจวัดธาตุผสมจากลวดเชื่อมที่เจอในเนื้อเชื่อมด้วย EDS line สแกน

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of JMR&T Vol. 9, No. 3, pp. 5174–1906, 5183, 2020

ตารางที่ 9.10 การละลายของโครเมียมและธาตุอื่น ๆ ในเฟส δ เฟส γ ในเนื้อเชื่อม

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of JMR&T Vol. 9, No. 3, pp. 5174–1906, 5183, 2020

แนวเชื่อม	เฟสโครงสร้าง	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)		
		Cr	Ni	Mn
ลวดเชื่อม ER309L	δ -Ferrite	22.11	8.84	1.28
	γ -Austenite	18.27	11.63	4.42
ลวดเชื่อม ER309L	δ -Ferrite	21.48	7.08	1.41
	γ -Austenite	18.31	10.94	4.24

9.3 อิทธิพลของแก๊สเชื่อมปกคลุม (Effect of shielding gases)

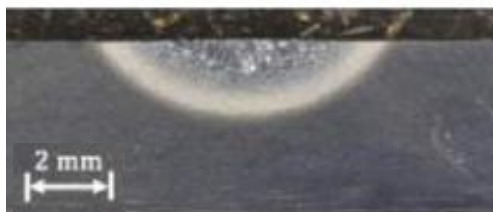
การเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกสามารถเชื่อมได้กับทุกขบวนการเชื่อมเนื่องจากพื้นฐานของโลหะชนิดนี้เป็นโลหะเหล็กกล้า (Steel) โดยแก๊สที่ใช้สำหรับทำหน้าที่ปกคลุมแนวเชื่อมก็

เป็นไปตามชนิดขององค์ประกอบของขบวนการเชื่อมที่เลือกใช้ แก๊สปกคลุมนอกจากทำหน้าที่หลักในการป้องกันบ่อหลอมละลายจากบรรยากาศภายนอกแล้ว ยังส่งผลกระทบต่อสมบัติของแนวเชื่อม (Weld properties) คุณภาพของแนวเชื่อม (Weld quality) ส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อม (Weld chemistry) รวมถึงรูปร่างและสีของแนวเชื่อม (Weld color and shape) และผลกระทบด้านอื่น ๆ ที่อาจเกิดได้จากขบวนการเชื่อมแต่ละกรรมวิธี จากประสบการณ์ของผู้เขียนกับการศึกษางานวิจัยพบว่า แก๊สที่ใช้สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกมี 3 จำพวก คือ 1. จำพวกที่เป็นแก๊สเฉื่อย (Inert gas) ใช้ทำหน้าที่ปกป้องบ่อหลอมละลาย (Shielding gas) 2. แก๊สจำพวกแอคทีฟ (Active gas) ใช้ทำหน้าที่เพิ่มประสิทธิภาพของการเชื่อมบางประการตามวัตถุประสงค์ และ 3. แก๊สผสม (Mixtures gas) ที่ผสมกันระหว่าง แก๊สเฉื่อยกับแก๊สแอคทีฟ ซึ่งแก๊สผสมนี้จะทำหน้าที่ตามสมบัติเฉพาะตัวของแก๊สชนิดนั้น โดยการเลือกใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของขบวนการเชื่อมเป็นสำคัญ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. แก๊สเฉื่อย (Inert gas) – แก๊สอาร์กอน (Ar) กับ แก๊สฮีเลียม (He)

หน้าที่หลักคอยปกคลุมบ่อหลอมละลายขณะเชื่อม โดยแก๊สอาร์กอนจะเป็นที่นิยมมากกว่าด้วย เพราะสามารถควบคุมคุณภาพแนวเชื่อมได้ดี มีราคาที่ไม่แพงมากและมีจำหน่ายทั่วไป ส่วนแก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สเฉื่อยที่มีความสามารถเพิ่มค่าความร้อนจากการอาร์กได้สูงกว่าแก๊สอาร์กอน แต่ราคาต้นทุนสูง จะเหมาะกับการเชื่อมที่ต้องการเพิ่มความรวดเร็ว เพราะอาร์กง่ายและสร้างบ่อหลอมละลายได้รวดเร็ว แก๊สทั้งคู่นี้ส่วนใหญ่จะใช้กับขบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสตีลแก๊สปกคลุม (GTAW) เป็นสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 9.31 ที่ทำการทดลองเชิงเปรียบเทียบโดยการเชื่อมด้วยแก๊สปกคลุมอาร์กอน (Ar) ฮีเลียม (He) และแก๊สผสมทั้งคู่ (Ar + He) จะเห็นได้ว่าการเชื่อมด้วยแก๊สฮีเลียมจะอาร์กสร้างบ่อหลอมละลายได้กว้างและลึกมากกว่าการใช้แก๊สอาร์กอน ส่วนกรณีที่เป็นแก๊สผสมก็แสดงผลที่ชัดเจนว่าอยู่ในเกณฑ์กว้างและลึกปานกลางตามอิทธิพลของแก๊สทั้งคู่ จากผลการวิจัยทดลองสามารถสรุปได้ว่าการใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุมแนวเชื่อมสามารถเลือกใช้ได้ทั้งแบบชนิดบริสุทธิ์ (Pure inert gas) หรือแบบชนิดผสม (Mixture inert gas) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอื่นที่ต้องพิจารณาร่วม เช่น กรณีที่ต้องการเชื่อมโลหะที่มีความหนาต้องการความร้อนในการหลอมละลายลึก หรือกรณีการเชื่อมโลหะบางแต่ต้องการเพิ่มความเร็วในการเชื่อม (Welding speed) ก็ควรเลือกใช้แก๊สฮีเลียมปกคลุมแนวเชื่อม เป็นต้น

แก๊สเฉื่อยที่กล่าวมาข้างต้นจะใช้ในขบวนการเชื่อมที่ปกคลุมทั้งด้านหน้าของแนวเชื่อม (Face weld) และด้านรากของการเชื่อม (Root weld) โดยเฉพาะขบวนการเชื่อมทิกของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกต้องใช้แก๊สปกคลุมด้านรากที่เรียกว่า “Backing gas” ซึ่งสามารถเลือกใช้แก๊สปกคลุมชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกับด้านหน้าก็ได้ ส่วนใหญ่ใช้แก๊สอาร์กอนเพราะประหยัดและบ่อหลอมละลายด้านรากมีขนาดเล็กโอกาสที่อากาศภายนอกเข้าไปรวมตัวจะน้อยกว่า



(ก) แนวเชื่อมแก๊สอาร์กอน (Ar)



(ข) แนวเชื่อมแก๊สฮีเลียม (He)



(ค) แนวเชื่อมแก๊สผสม Ar + He

รูปที่ 9.31 ขนาดแนวเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกใช้แก๊สปกคลุมต่างกัน ด้วยขบวนการเชื่อมทิก (TIG)

ที่มา : I. Bitharas et al. *Journal of Materials and Design* Vol. 91, pp. 424–431, 2016

2. แก๊สแอคทีฟ (Active gas)– แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

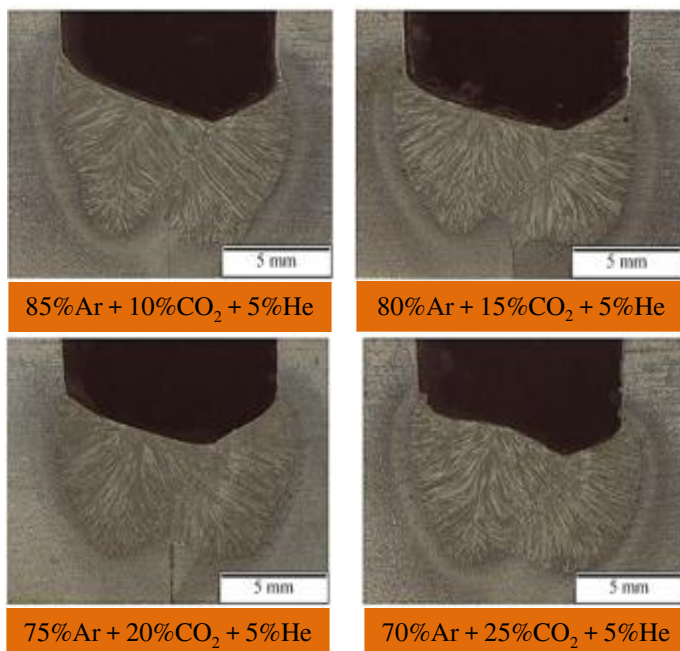
ขบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW) โดยปกติใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทำหน้าที่เป็นแก๊สปกคลุมแนวเชื่อมจนมีการเรียกขบวนการเชื่อมนี้ว่า การเชื่อมแก๊ส CO_2 โดยสมบัติเฉพาะตัวของแก๊สชนิดนี้ที่ระดับอุณหภูมิห้องมีสภาพเป็นแก๊สเฉื่อย (Inert) ที่มีน้ำหนักมากกว่าอากาศประมาณ 1.5 เท่าจึงสามารถใช้ปกคลุมบ่อหลอมละลายได้ดี ในขณะเดียวกันก็เป็นแก๊สที่สมบัติที่เป็นแอคทีฟแก๊ส (Active) เมื่อได้รับความร้อนจากการอาร์ก จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า กรณีที่ใช้แก๊ส CO_2 ปกคลุมเพียงชนิดเดียวผิวของแนวเชื่อมมักเกิดออกไซด์มาก ด้วยเพราะตัวของแก๊ส CO_2 มีสมบัติที่ไม่ได้เป็นแก๊สเฉื่อยที่สมบูรณ์เหมือนกับแก๊สอาร์กอน โอกาสที่ออกซิเจนจากภายนอกจะเข้าไปก็ง่ายขึ้น ประจวบกับมีออกซิเจนที่แตกตัวออกมาจากแก๊ส CO_2 เองมาร่วมด้วยจึงเป็นเหตุผลที่ทำให้การเกิดออกซิเดชันง่ายมากขึ้น จึงต้องใช้เทคนิคการเลือกลวดเชื่อมที่มีธาตุลดออกซิเจนเพื่อเติมลงไปแนวเชื่อม ลักษณะดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นกับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน ส่วนสำหรับกรณีการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเฉพาะประเภทออสเทนนิติกด้วยขบวนการเชื่อม MIG/MAG พบว่าไม่นิยมใช้แก๊ส CO_2 อย่างเดียวมักใช้ผสมกับแก๊สเฉื่อยอื่น ได้แก่ ($\text{Ar} + \text{CO}_2$) ($\text{Ar} + \text{He} + \text{CO}_2$) ($\text{Ar} + \text{O} + \text{CO}_2$) ($\text{Ar} + \text{H} + \text{CO}_2$) ($\text{Ar} + \text{He} + \text{O} + \text{CO}_2$) เป็นต้น ดังตัวอย่างผลการวิจัยของ Xiaoyu Cai et al. (2017) ที่ทำการพิสูจน์ถึงอิทธิพลของแก๊สฮีเลียมที่ผสมลงไปแก๊สปกคลุมร่วมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สอาร์กอน ($\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{He}$) ดังแสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดของแนวเชื่อมในรูปที่ 9.32 ซึ่งพบว่าแก๊สฮีเลียมที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้ขนาดของแนวเชื่อมโตขึ้น แนวซึมลึกมากขึ้น แต่เมื่อสูงมากเกินไป (25%He) จะเกิดข้อบกพร่องแบบเป็นรอยกัดแห้ว (Undercut) สำหรับแก๊สผสมปกคลุมแนวเชื่อมด้วยขบวนการเชื่อม MAG ซึ่งจากพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของแก๊สฮีเลียมก็เป็นไปตามเหตุผลที่ว่า แก๊สชนิดนี้ช่วยเพิ่มความร้อนแก่บ่อหลอมละลาย และยังสามารถ

พิสูจน์ถึงอิทธิพลของแก๊ส CO_2 ที่ผสมในปริมาณต่าง ๆ ดังแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของแนวเชื่อมในรูปที่ 9.33 จะเห็นได้ว่าเมื่อผสมแก๊ส CO_2 เพิ่มเข้าไปมากขึ้น



รูปที่ 9.32 อิทธิพลของแก๊สฮีเลียมที่ผสมใน Ar + CO₂ + He ของขบวนการเชื่อม GMAW

ที่มา : Xiaoyu Cai et al. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 244, pp. 225–230, 2017



รูปที่ 9.33 อิทธิพลของแก๊ส CO₂ ที่ผสมใน Ar + CO₂ + He ของขบวนการเชื่อม GMAW

ที่มา : Xiaoyu Cai et al. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 244, pp. 225–230, 2017

ขนาดของแนวเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก (น้อยมากอย่างมีนัยสำคัญ) ซึ่งก็สอดคล้องกับทฤษฎีสมบัติของแก๊ส CO_2 ที่จัดอยู่ในกลุ่มที่เป็นแก๊สเฉื่อยมากกว่าที่จะเป็นกลุ่มแก๊สแอคทีฟ ดังนั้นการปล่อยแก๊ส CO_2 ออกมาปกคลุมแนวเชื่อมมากเกินไปหรือผสมเข้าไปมากเกินไปก็ไม่เกิดประโยชน์ในการสร้างความร้อนมากนักแต่จะเกิดประโยชน์ในการทำหน้าที่ปกป้องบ่อหลอมละลายจากบรรยากาศภายนอกได้ดีมากยิ่งขึ้น โดยแนะนำให้ควบคุมการไหลของแก๊สไม่ควรเกิน 25 ลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง

นอกจากนี้การผสมแก๊ส CO_2 กับแก๊สชนิดอื่นก็เพราะลำพังแก๊สชนิดนี้ไม่สามารถถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละอองได้ (Spray transfer) ซึ่งมีความจำเป็นสำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งแก๊สผสมที่นิยมใช้จะเป็นแก๊สที่ผสม $\text{Ar} + \text{O} + \text{CO}_2$ ที่เรียกกันว่า แก๊สผสม ยูนิเวอร์แซล (Universal mixture gas) ซึ่งสามารถเชื่อมที่ถ่ายโอนน้ำโลหะได้ทุกแบบ (แบบละออง แบบลัดวงจร แบบหยดขนาดใหญ่ และแบบพัลส์) โดยรูปแบบการถ่ายโอนน้ำโลหะจะสัมพันธ์กับแก๊สผสมที่ปกคลุมดังแสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 9.34 โดยเฉพาะกรณีในส่วนผสม $\text{Ar} + 1-3\%\text{O} + 5-10\%\text{CO}_2$ ตัวออกซิเจนเป็นตัวช่วยให้เกิดการอาร์กที่สม่ำเสมอและเกิดการถ่ายโอนเป็นแบบละอองได้เป็นอย่างดี

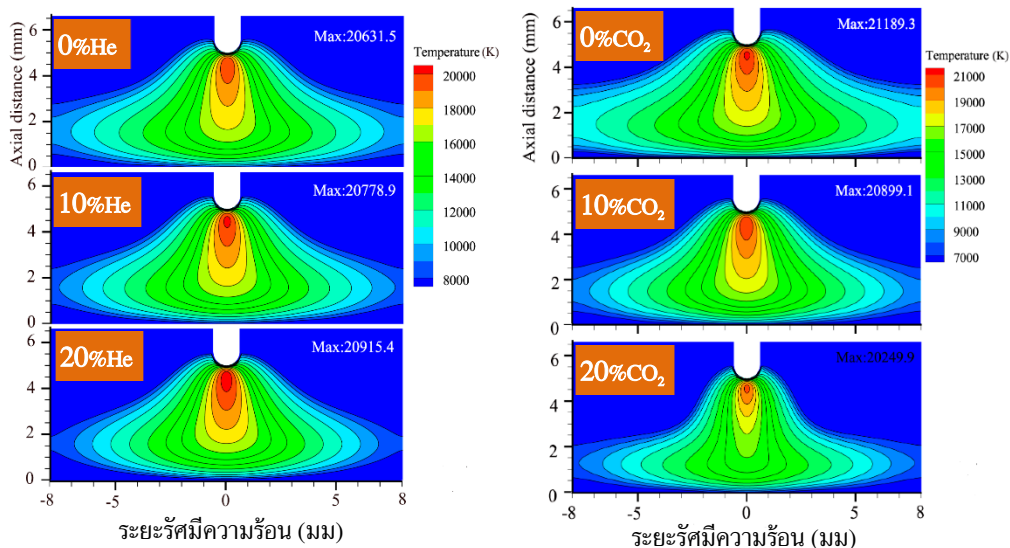
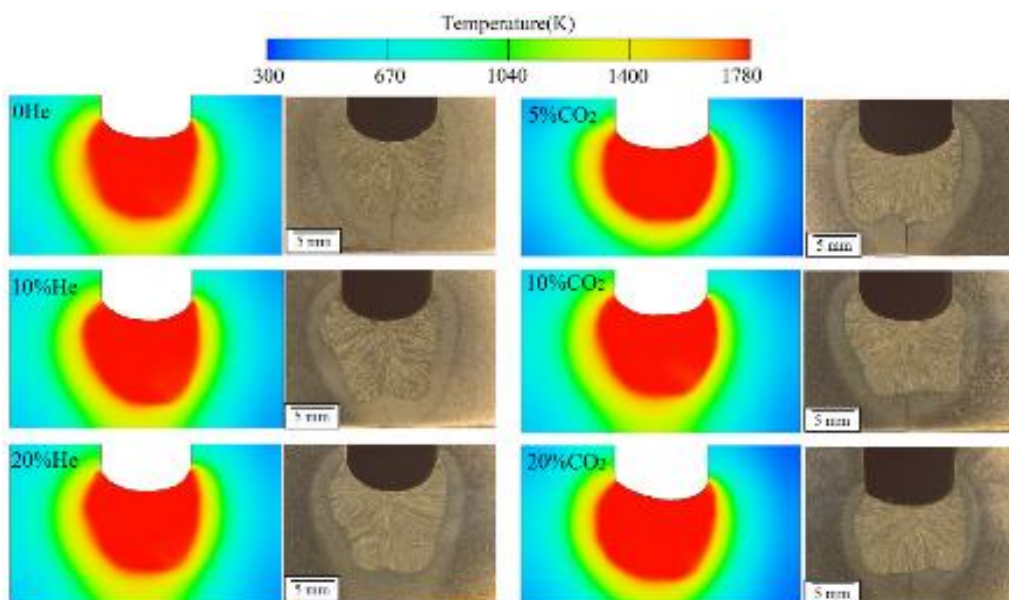


แบบลัดวงจร 100% CO_2 แบบละออง 90% $\text{Ar}+10\%\text{CO}_2$ แบบละออง 98% $\text{Ar}+2\%\text{O}_2$

รูปที่ 9.34 ความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะกับแก๊สผสมในการเชื่อม GMAW

ที่มา : Australian Stainless Steel Development Association, 2012

นอกจากเหตุผลของกลไกรูปแบบการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะของลวดเชื่อม ยังมีเหตุผลอื่น ๆ ที่ต้องผสมก็เพื่อวัตถุประสงค์บางประการในขบวนการเชื่อม เช่น เพิ่มประสิทธิภาพในการเชื่อม ควบคุมสมบัติของเนื้อเชื่อม รวมถึงการควบคุมการเกิดข้อบกพร่องของแนวเชื่อม ดังผลการวิจัยของ Xiaoyu Cai et al. (2019) ได้พิสูจน์ให้เห็นถึงรูปแบบการแพร่ของความร้อนที่เกิดจากอาร์กภายใต้แก๊สปกคลุมแบบผสมที่แตกต่างกัน โดยการเพิ่มปริมาณแก๊สฮีเลียมที่ผสมรวมอยู่ภายในแก๊สปกคลุมกับคาร์บอนไดออกไซด์คงที่ (10%) และสมดุลด้วยแก๊สอาร์กอน ($\text{Ar} + \text{CO}_2 + 0, 10, 20\%\text{He}$) ดังผลแสดงในรูปที่ 9.35 (ก) และได้เปรียบเทียบกับ การปรับเพิ่มปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกันกับแก๊สฮีเลียมคงที่ (5%) และสมดุลด้วยแก๊สอาร์กอน ($\text{Ar} + \text{He} + 0, 10, 20\%\text{CO}_2$) ดังผลแสดงในรูปที่ 9.35 (ข) ซึ่งเมื่อพิจารณาเชิงเปรียบเทียบเห็นได้ชัดเจนว่าชนิดและสัดส่วนของแก๊สผสมที่ใช้สำหรับการปกคลุมแนวเชื่อมมีอิทธิพลต่อขนาด รูปทรงและคุณภาพของแนวเชื่อม ดังแสดงผลการทดลองเชื่อมชิ้นงานจริงซึ่งได้ลักษณะของแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 9.35 (ค)

(ก) แก๊สผสม Ar + CO₂ + He ที่แตกต่างกัน(ข) แก๊สผสม Ar + He + CO₂ ที่แตกต่างกัน

(ค) ลักษณะรูปทรงของบ่อหลอมละลายและขนาดของแนวเชื่อมจริง

รูปที่ 9.35 การแพร่ของความร้อนจากการอาร์กภายใต้แก๊สผสมปกคลุมที่แตกต่างกัน

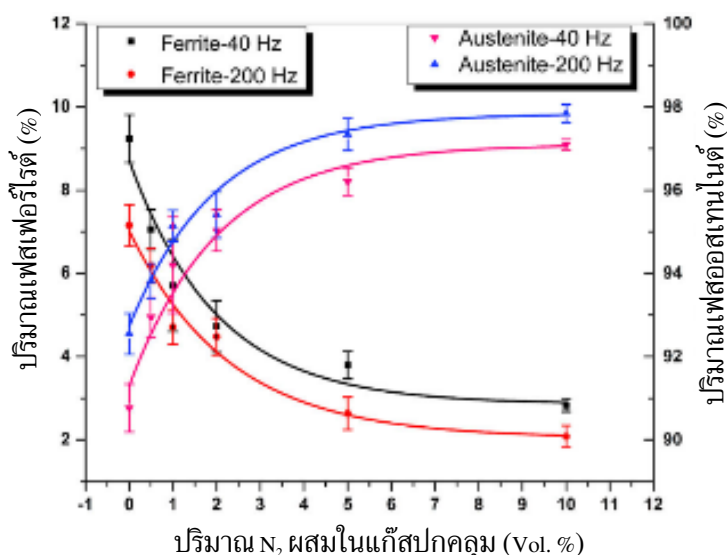
ที่มา : Xiaoyu Cai et al. Journal of MDPI-Materials Vol. 12, 1397, 2019

3. แก๊สแอคทีฟ (Active gas) – ไนโตรเจน (N₂) ไฮโดรเจน (H₂) และ ออกซิเจน (O₂)

แอคทีฟแก๊สกลุ่มนี้เป็นแก๊สที่จะนำไปผสม (Mixture) กับแก๊สเฉื่อยซึ่งอาจจะเป็น Ar หรือ He ที่มีทั้งแบบ 3 ชนิดแก๊สผสม และ 4 ชนิดแก๊สผสม โดยวิธีการผสมแก๊สสามารถใช้เครื่องผสมแก๊ส (Gas mixers) ในสถานที่เชื่อมวิธีนี้มีข้อดีที่สามารถปรับลดหรือเพิ่มสัดส่วนผสมของแก๊สได้ตามต้องการ แต่

แก๊สที่ผสมได้อาจไม่เป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอ ส่วนวิธีใช้แก๊สผสมแบบสำเร็จรูปที่ผ่านผสมเสร็จแล้วบรรจุถัง แก๊สถังผสมแบบนี้มีความเป็นเนื้อเดียวและสม่ำเสมอดีมากแต่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนส่วนผสมได้ตามต้องการ อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติก็สามารถสั่งผลิตแก๊สสำเร็จรูปได้ตามต้องการของผู้ใช้ได้ ซึ่งทั้งสองวิธีมีทั้งข้อดีและข้อด้อยการเลือกใช้ก็พิจารณาตามความเหมาะสมร่วมกับปัจจัยอื่น ๆ ในการเชื่อม

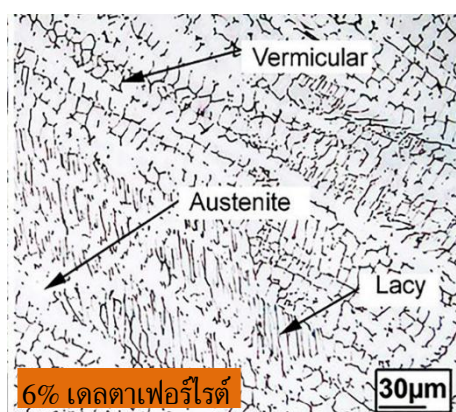
● **แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen : N_2)** เป็นแอคทีฟแก๊สที่ใช้ผสมร่วมกับแก๊สเฉื่อย เช่น ($Ar + N_2$) ($Ar + N_2 + H_2$) ($Ar + He + CO_2 + N_2$) สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกการผสมแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมมีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการควบคุมการเกิดปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ ด้วยเหตุผลเพราะธาตุไนโตรเจนมีเสถียรภาพในการรวมกับระบบผลึก FCC ได้ดีกว่า BCC จึงเป็นตัวช่วยในการฟอร์มตัวเฟสออสเทนไนต์ได้มากขึ้นในขณะเย็นตัว ซึ่งก็เป็นการลดโอกาสของการเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อม โดยสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Wichan Chuaiphan et al. (2012) ที่ทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กับ AISI 316L ที่พบว่า การเพิ่มไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนสามารถช่วยลดปริมาณเดลตาเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการวิจัยพิสูจน์ของ Saeed Hosseinzadeh et al. (2021) ที่เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกเกรด AISI 304L หนา 4 มม. ด้วยขบวนการเชื่อมแบบทิกพัลส์ (TIG-Pulsed) พบว่าสัดส่วนการเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อปริมาณไนโตรเจนที่ละลายเข้าไปในบ่อหลอมละลายได้มากขึ้น ดังแสดงสัดส่วนเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์กับเฟสออสเทนไนต์ที่เปลี่ยนแปลงจากอิทธิพลของการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สผสมปกคลุมใน **รูปที่ 9.36** และแสดงลักษณะของโครง



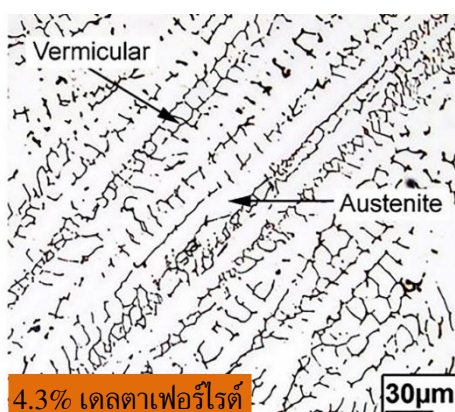
รูปที่ 9.36 การควบคุมของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ด้วยแก๊สไนโตรเจน

ที่มา : Saeed Hosseinzadeh et al. Journal of Trans. Indian Inst. Met. -IIM, 2021

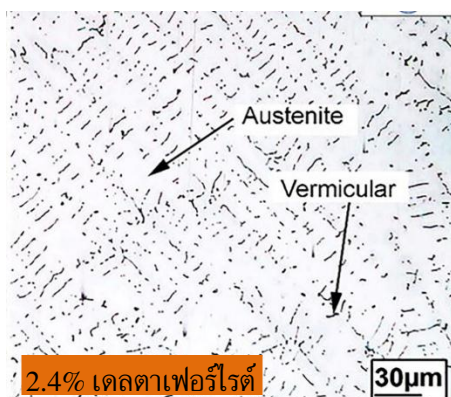
สร้างจุลภาคที่มีสัดส่วนการลดลงของเดลตาเฟอร์ไรต์ในรูปที่ 9.37 โดยรูปทรงของเดลตาเฟอร์ไรต์เป็นแบบลักษณะเส้น ๆ จึงเรียกว่า “Vermicular” อยู่กระจายไปทั่ว และมีปริมาณที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อจำนวนของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมเพิ่มขึ้น ซึ่งพิจารณาโครงสร้างร่วมกับเส้นกราฟที่ลดลงในรูปที่ 3.36 เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อผสมไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมที่เพิ่มสูงขึ้นมากสัดส่วนการลดลงของเดลตาเฟอร์ไรต์มีแนวโน้มคงที่ เหตุผลเป็นเพราะในทางโลหะวิทยาไนโตรเจนสามารถละลายได้ในเนื้อโลหะเหล็กในปริมาณจำกัดและละลายได้ไม่มาก ดังนั้น เมื่อไนโตรเจนมีขอบเขตของการละลายที่จำกัด การควบคุมให้เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์หมดไปก็เป็นเรื่องที่มีขอบเขตที่จำกัดเช่นเดียวกัน ในทางปฏิบัติจึงควรผสมแก๊สไนโตรเจนเท่าที่น้ำโลหะของบ่อหลอมที่สามารถละลายได้ ผสมมากเกินไปก็ไม่เกิดประโยชน์ และยิ่งอาจก่อให้เกิดข้อบกพร่องบางอย่างกับแนวเชื่อมได้



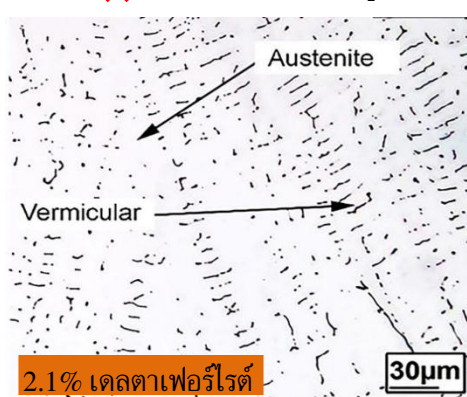
(ก) แก๊สผสม Ar + 0.5 %N₂



(ข) แก๊สผสม Ar + 2 %N₂



(ค) แก๊สผสม Ar + 5 %N₂

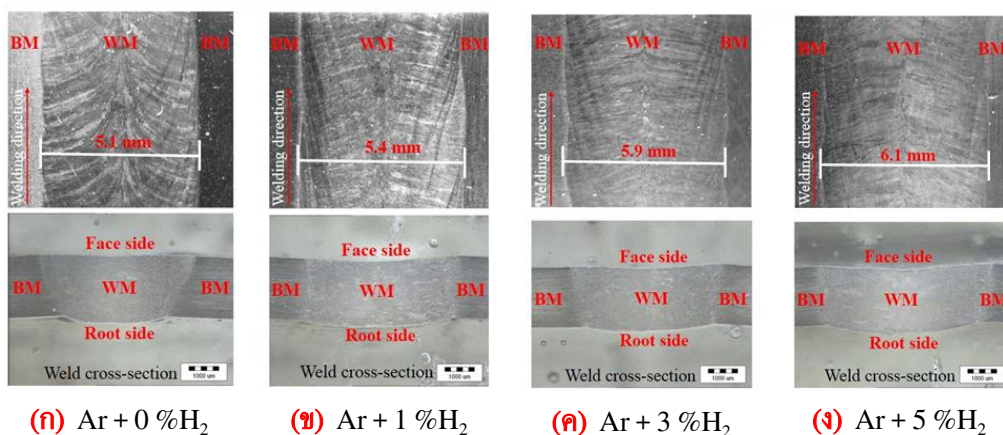


(ง) แก๊สผสม Ar + 10 %N₂

รูปที่ 9.37 ปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่ลดลงด้วยแก๊สไนโตรเจนจากแก๊สปกคลุม

ที่มา : Saeed Hosseinzadeh et al. Journal of Trans. Indian Inst. Met. -IIM, 2021

● **แก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen : H_2)** เป็นแอคทีฟแก๊สที่ใช้ผสมร่วมกับแก๊สเฉื่อยได้ทั้งแก๊สอาร์กอนและแก๊สฮีเลียม เช่น ($Ar + H_2$) ($Ar + H_2 + CO_2$) สมบัติเด่นของแก๊สไฮโดรเจนให้ความร้อนสูง จึงเหมาะที่จะผสมเพื่อเพิ่มความร้อนให้กับบ่อหลอมละลาย ช่วยให้โลหะไหลตัวได้ดี และเป็นแก๊สที่จับตัวกับออกซิเจนช่วยลดการเกิดออกไซด์ แต่มีน้ำหนักที่เบากว่าอากาศจึงต้องผสมร่วมกับแก๊สเฉื่อย สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกแก๊สไฮโดรเจนจะผสมกับแก๊สอาร์กอน ดังเช่น การวิจัยทดลองของ Wichan Chuaiphan et al. (2020) โดยมีจุดประสงค์ต้องการใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นตัวเสริมค่าความร้อนให้กับบ่อหลอมละลายขณะอาร์ก เพื่อต้องการเพิ่มความเร็วในการเชื่อม (Welding speed) ให้สูงขึ้น โดยทดลองผสมแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สอาร์กอนที่ปริมาณ 1% H_2 , 3% H_2 และ 5% H_2 พบว่า สามารถเพิ่มความเร็วในการเชื่อมได้สูงขึ้นตามปริมาณการเพิ่มของแก๊สไฮโดรเจน ที่ 3.0 มม./วินาที 3.5 มม./วินาที และ 4.0 มม./วินาที ตามลำดับ โดยที่ค่าความร้อนที่ป้อนเข้า (Heat input) ที่ได้จากการคำนวณซึ่งลดลงที่ 0.5 kJ/mm, 0.37 kJ/mm และ 0.26 kJ/mm ตามลำดับ ซึ่งสรุปได้ว่าแก๊สไฮโดรเจนที่ผสมอยู่ในแก๊สปกคลุมสามารถช่วยเพิ่มค่าพลังความร้อนให้แก่บ่อหลอมละลายได้เป็นอย่างดี แต่พบว่า เมื่อปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มสูงขึ้นบ่อหลอมละลายจะมีแรงดันอาร์กเกิดขึ้นจากอิทธิพลของไฮโดรเจนมีผลทำให้น้ำโลหะถูกดันสู่ด้านล่าง ผิวด้านบนของแนวเชื่อมจะยุบตัวเว้าลง ส่วนผิวแนวเชื่อมด้านล่างก็จะนูนออก ซึ่งในขณะเดียวกันแนวโน้มขนาดความกว้างแนวเชื่อมก็กว้างขึ้น ดังแสดงลักษณะของแนวเชื่อมในรูปที่ 9.38 ดังนั้นจึงต้องค่าปริมาณที่เหมาะสมของแก๊สผสมไฮโดรเจน

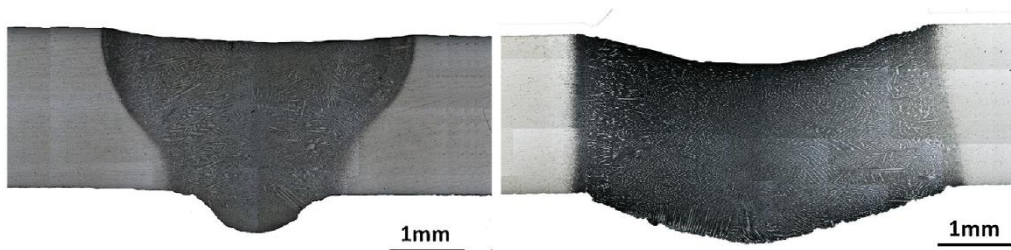


รูปที่ 9.38 ความกว้างที่เพิ่มขึ้นของแนวเชื่อมด้วยแก๊สไฮโดรเจนจากแก๊สปกคลุม

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. *Journal of Advanced Joining Processes*, Vol. 1, 2020

นอกจากนี้ยังมีผลการวิจัยของ Anbarasan N. et al. (2019) ที่สอดคล้องกันกับผลวิจัยข้างต้น ถึงอิทธิพลของแก๊สไฮโดรเจนที่มีผลต่อรูปทรงของแนวเชื่อม โดยได้ทดลองเปรียบเทียบเชื่อมโลหะเหล็กกล้าผสมโครเมียมสูงหนา 2 มม ระหว่างใช้แก๊สปกคลุม 100%Ar กับแก๊สผสม 95%Ar + 5% H_2

พบว่าแนวเชื่อมที่ใช้แก๊สผสมเกิดการเว้าของแนวเชื่อมด้านบนและนูนในแนวเชื่อมด้านล่างอย่างชัดเจน ดังแสดงภาพหน้าตัดของแนวเชื่อมในรูปที่ 9.39



(ก) แก๊สปกคลุม 100%Ar

(ข) แก๊สปกคลุม 95%Ar + 5%H₂

รูปที่ 9.39 อิทธิพลของแก๊สไฮโดรเจนจากแก๊สปกคลุมต่อรูปร่างของแนวเชื่อม

ที่มา : Anbarasan N. et al. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 263, 2019

● แก๊สออกซิเจน (Oxygen : O₂) เป็นแก๊สประเภทแอคทีฟที่มีประโยชน์ต่อขบวนการเชื่อม โดยวิธีการใช้งานต้องนำไปผสมร่วมกับแก๊สเฉื่อยอื่น ๆ เพื่อนำไปเป็นแก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลายขณะเชื่อม สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมจะใช้แก๊สเฉื่อยอาร์กอนผสมเป็นหลัก เช่น Ar + O₂ และ Ar + CO₂ + O₂ โดยสัดส่วนผสมของแก๊สออกซิเจนที่ผสมจะขึ้นอยู่กับ ขบวนการเชื่อม ชนิดและความหนาของโลหะชิ้นงาน และที่สำคัญรูปแบบการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะของขบวนการเชื่อม GMAW ซึ่งบทบาทของแก๊สออกซิเจนที่ผสมรวมอยู่กับแก๊สอาร์กอนในแก๊สปกคลุม ขึ้นอยู่กับระดับปริมาณที่ผสม กล่าวคือ ถ้าผสมในปริมาณที่น้อย จะช่วยให้การอาร์กสม่าเสมอ ช่วยเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าในการอาร์ก ช่วยลดฟองอากาศ และควบคุมการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะให้สม่ำเสมอ แต่ถ้าผสมในสัดส่วนปริมาณที่มากขึ้นก็จะเกิดข้อดีบางประการและมีข้อด้อยเพิ่มขึ้น เช่น 95%Ar + 5%O₂ ช่วยให้น้ำโลหะไหลตัวดี สร้างบ่อหลอมได้ง่าย เชื่อมได้รวดเร็ว แต่กระแสไฟฟ้าของการถ่ายโอนน้ำโลหะต่ำลง เหมาะสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนแต่ไม่เหมาะกับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมจะผสมที่ 99%Ar + 1%O₂ หรือ 98%Ar + 2%O₂ เป็นต้น

นอกจากนี้แก๊สออกซิเจนมักพบในรูปแบบที่ผสมแบบแก๊สสามชนิด คือผสมระหว่าง Ar + O₂ + CO₂ แก๊สผสมสูตรนี้มีความโดดเด่นด้านการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะ ซึ่งสามารถถ่ายโอนได้ทั้งแบบละอองแบบลัตวจร แบบหยดขนาดใหญ่ และแบบพัลส์ ตัวอย่างเช่น Ar + 1–3%O₂ + 5–10%CO₂ สูตรผสมนี้เหมาะสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าทุกชนิด โดยเฉพาะเหล็กกล้าไร้สนิมเพราะสามารถสร้างรูปแบบการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละอองได้ดี ในบางครั้งก็มีแก๊สผสมพิเศษสำหรับการเชื่อมผอผิวเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิมจะใช้แก๊สผสม Ar + He + O₂ หรือบางครั้งก็เชื่อมโลหะหนาต้องการเติมเนื้อลวดเชื่อมในปริมาณมากจะใช้แก๊สผสมแบบแก๊สสี่ชนิด คือ ผสมระหว่าง Ar + He + O₂ + CO₂ ซึ่งมักเรียกแก๊สผสมแบบนี้ว่า “Quad Mixture” เหมาะทั้งเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำ

9.4 สมบัติทางกลของแนวเชื่อม (Mechanical properties of weldments)

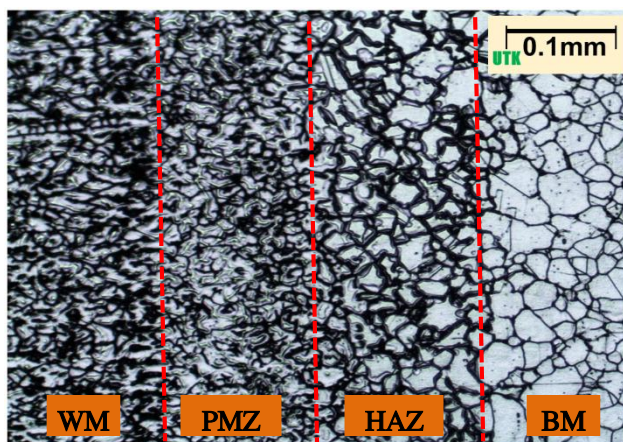
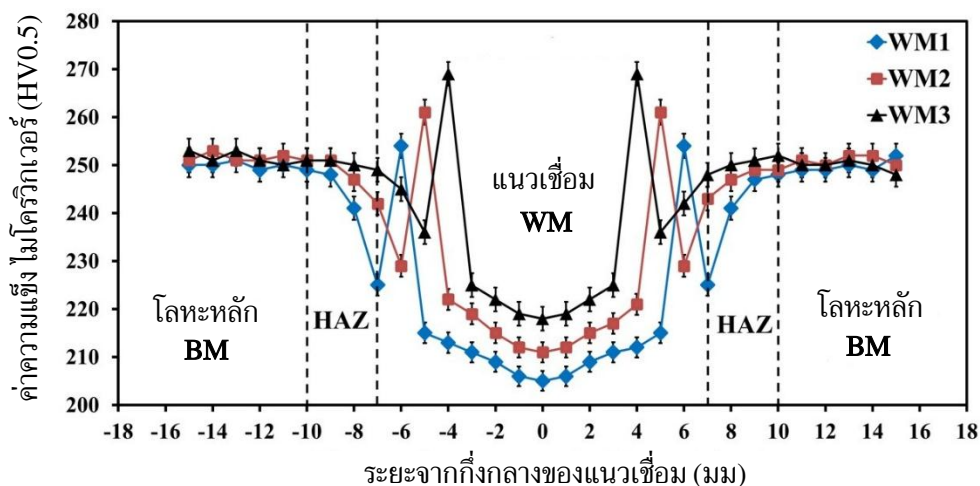
การเชื่อมแบบหลอมละลายเปรียบได้กับการหล่อโลหะ (Metal casting) ที่เป็นการทำให้โลหะหลอมละลายเป็นของเหลวแล้วปล่อยให้เย็นตัวกลับสู่สภาพเดิม ขบวนการเย็นตัวทำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ไม่เหมือนเดิม หรืออาจจะเรียกว่าเกิดเป็นโครงสร้างใหม่ ซึ่งสมบัติก็แตกต่างไปจากเดิมโดยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของการเชื่อม การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกก็เช่นเดียวกัน เนื้อเชื่อมที่ได้หลังจากการเชื่อมก็จะแตกต่างกันบนพื้นฐานปัจจัยที่ต่างกัน โดยเฉพาะสมบัติทางกลที่สำคัญมากสำหรับการประกอบโลหะด้วยขบวนการเชื่อม ดังที่จะได้กล่าวถึงในแต่ละด้านดังนี้

1. สมบัติด้านความแข็ง (Hardness properties) เป็นสมบัติทางกลพื้นฐานที่ต้องทดสอบหาค่าความแข็งเพราะมีผลกระทบโดยตรงต่อความสามารถรับแรงของแนวเชื่อม ในทางปฏิบัติจะทำการตรวจวัดบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการเชื่อมจะประกอบด้วย 3 บริเวณที่สำคัญ คือ บริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Metal : WM) บริเวณเนื้อเชื่อมหลอมละลายบางส่วน (Partially Melting Zone : PMZ) บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) และ บริเวณเนื้อโลหะหลัก (Base Metal : BM) โดยบริเวณเหล่านี้จะอยู่ติดกัน โดยปกติแนวเชื่อมที่สมมาตรกัน (Similar welding) สมบัติของแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นทุกบริเวณ (Zone) จะเหมือนกัน แต่ในกรณีที่เชื่อมโลหะต่างชนิดกัน (Dissimilar welding) สมบัติของแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นทุกบริเวณ (Zone) ของทั้งสองข้างจะไม่เหมือนกัน ซึ่งผู้เขียนจะนำผลการวิจัยเชิงทดลองมาแสดงเพื่อพิสูจน์ของการเชื่อมทั้งสองแบบดังนี้

● กรณีการเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน (Similar welding) โดยปกติสมบัติความแข็งของทั้งสองข้างจะต้องเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งพิสูจน์ได้จากผลการวิจัยของ Wichan Chuaiphan et al. (2020) ที่เชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกซีรีส์ 200 เกรด 216 โดยใช้ปริมาณความร้อนป้อนเข้า (Heat input) ต่างกัน ได้ค่าความแข็งของแต่ละบริเวณดังแสดงในรูปที่ 9.40 เมื่อพิจารณาถึงค่าความแข็งที่แบ่งครึ่งแนวเชื่อมจากกึ่งกลางแนวจะเห็นได้ว่ากลไกการเปลี่ยนแปลงความแข็งสมมาตรกันทั้งสองข้าง โดยที่บริเวณแนวเชื่อม (WM) มีค่าความแข็งที่ต่ำกว่าโลหะหลักเหตุผลเพราะเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ขึ้นในเนื้อเชื่อมซึ่งเฟสโครงสร้างนี้มีค่าความแข็งที่ต่ำ แต่บริเวณที่หลอมละลายบางส่วน (PMZ) และบริเวณกระทบร้อน (HAZ) กลับมีค่าความแข็งที่สูงขึ้นเหตุผลเพราะบริเวณนี้มีการตกผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr_2C_6) ในระหว่างการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายแนวเชื่อม

จากผลการทดลองในรูปที่ 9.40 ที่เชื่อมด้วยความเร็วต่างกัน ($\text{WM1}=1.6$, $\text{WM2}=2.7$ และ $\text{WM3}=3.9$ mm/s) พบว่าเมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้นค่าความแข็งของทุกบริเวณเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เหตุผลที่สนับสนุนผลการทดลองนี้ก็เพราะเมื่อความเร็วเชื่อมสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่าปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าลดลง ที่ 0.78, 0.52 และ 0.39 kJ/mm ส่งผลให้บ่อหลอมละลายเย็นตัวได้เร็วไม่มียาวนานพอที่เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์จะฟอร์มตัวได้ทัน จึงเกิดสัดส่วนปริมาณเฟอร์ไรต์ในเฟสออสเทนไนต์น้อย ค่าความแข็งที่ได้จึงสูงขึ้น ผลการทดลองนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 201 ด้วยขบวนการเชื่อมทิก แบบวิธีไม่เติมลวดเชื่อม (Autogenous welding)

ของ Wichan Chuaiphan et al. (2014) ที่ต้องการหาขีดความสามารถในการเชื่อมที่ความเร็วสูงสุด ก็พบว่าผลการทดลองของค่าความแข็งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการเชื่อมแบบเดิมลดเชื่อมดังที่กล่าวมา

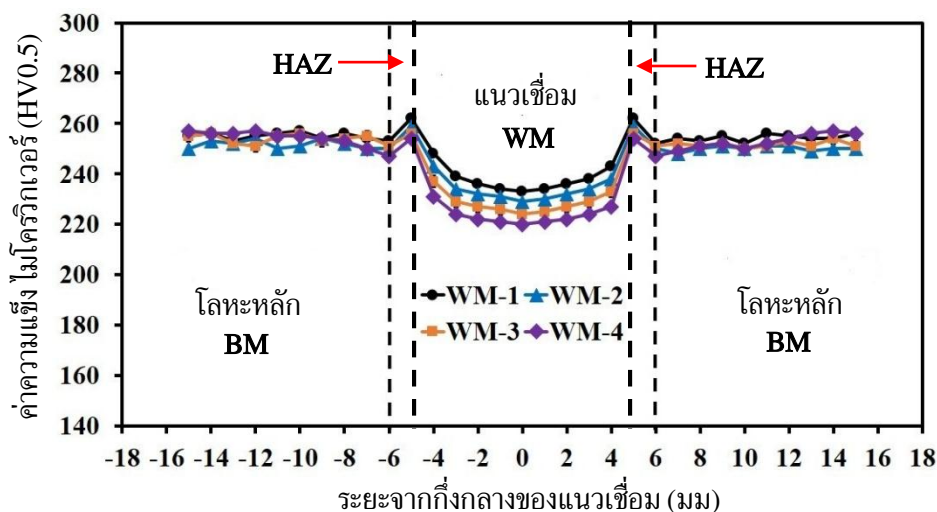


รูปที่ 9.40 ค่าความแข็งแนวเชื่อมของการเชื่อมแบบโลหะชนิดเดียวกัน (Similar welding)

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. *Journal of Advance Joining Processes*, Vol. 2, 2020

นอกจากนี้ Wicahn Chuaiphan et al. (2020) ยังได้ทำการพิสูจน์ถึงอิทธิพลของแก๊สปกคลุมที่มีต่อสมบัติทางกลด้านค่าความแข็งของแนวเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมซีรีย์ 200 เกรด 201 ด้วยการประยุกต์ใช้แก๊สผสม Ar + He ปกคลุมแนวเชื่อม โดยพบว่ากลไกของค่าความแข็งแต่ละบริเวณ (Zone) มีรูปแบบของการเกิดคล้ายกันหรือเหมือนกันก็ว่าได้ โดยมีความแตกต่างที่ขนาดของบริเวณหลอมละลายบางส่วน (PMZ) กับบริเวณกระทบร้อน (HAZ) จะแคบและเล็ก ด้วยเป็นเพราะบทบาทของแก๊สฮีเลียมที่สร้างความร้อนให้การอาร์กละลายได้สูงและรวดเร็ว ทำให้ความร้อนสะสมในน้ำโลหะเหลว

ต่ำ ไม่ส่งผลกระทบต่อบริเวณกระแทบร้อน และที่สำคัญเป็นการลดโอกาสที่จะเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรนได้มาก (อุณหภูมิไม่มากเพียงพอ) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบที่ค่าความแข็งบริเวณที่จะเกิดโครเมียมคาร์ไบด์สูงกว่าค่าความแข็งของโลหะหลักเพียงเล็กน้อย ดังแสดงใน **รูปที่ 9.41** โดยที่เส้นกราฟความแข็ง WM1=100%Ar, WM2=1%He, WM3=3%He, WM4=5%He



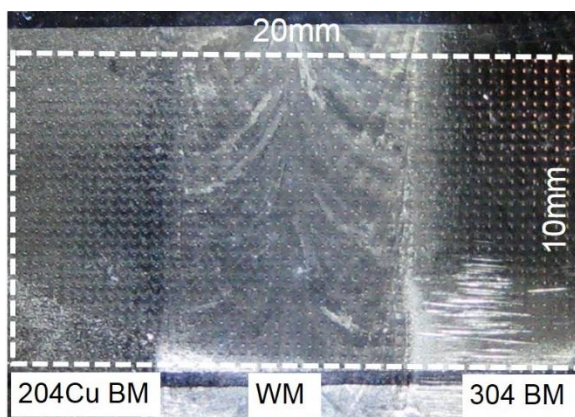
รูปที่ 9.41 ค่าความแข็งแนวเชื่อมที่ใช้แก๊สฮีเลียมช่วยสร้างความร้อนในการอาร์กเชื่อม

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. *Journal of Advance Joining Processes*, Vol. 1, 2020

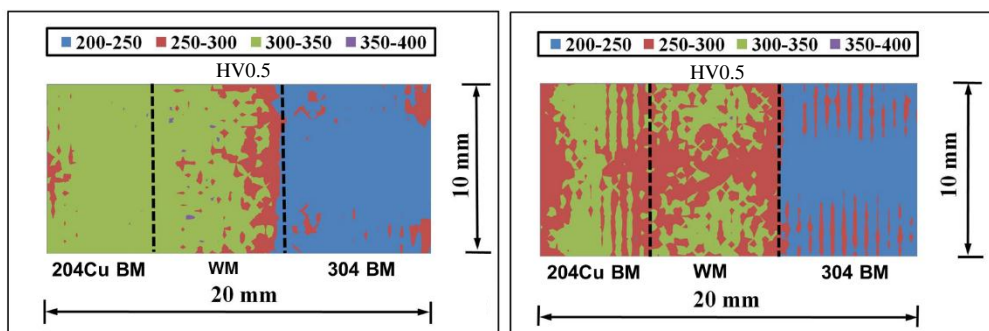
● **กรณีการเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน (Dissimilar welding)** การเชื่อมโลหะต่างชนิดเป็นการเชื่อมการเชื่อมที่ไม่พึงประสงค์ในขบวนการเชื่อมต่อโลหะ เพราะเป็นการเชื่อมที่ต้องพิจารณาถึงปัจจัยการเชื่อมหลายแง่มุมของโลหะทั้งคู่ที่ต่างชนิดกัน ซึ่งโอกาสที่จะเกิดความไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่องของแนวเชื่อมมีสูงมากแต่ด้วยเพราะเป็นสถานะที่สามารถหลีกเลี่ยงได้ด้วยเหตุผลต่าง ๆ ของการเชื่อม และด้วยปัจจุบันได้มีการพัฒนาวัสดุโลหะชนิดใหม่ ๆ ออกมาให้เลือกใช้งานที่มากขึ้น ดังนั้นโอกาสที่จะต้องเชื่อมต่อกันของโลหะต่างชนิดก็มีมากขึ้น โดยเฉพาะกลุ่มของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ซีรีย์ 300 ที่ได้มีการพัฒนา ซีรีย์ 200 ขึ้นมาแทนที่กับงานบางประเภทที่สามารถทดแทนกันได้ ซึ่งซีรีย์ 200 มีราคาที่ถูกกว่ามากและเหมาะกับการนำไปใช้งานในอาคาร (In door) ไม่เหมาะกับลักษณะงานภายนอกอาคาร (Out door) ด้วยเพราะมันคู่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทเดียวกันและทดแทนกันได้จึงมีลักษณะงานจำนวนมากที่ต้องเชื่อมโลหะคู่นี้เข้าด้วยกัน ผู้เขียนเล็งเห็นว่าการวิจัยทดลองหาความสามารถในการเชื่อมของโลหะต่างชนิดคู่นี้มีความสำคัญและจำเป็น จึงมีความสนใจและได้ทำการวิจัยเชิงทดลองในการเชื่อมบนพื้นฐานของปัจจัยการเชื่อมต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ของแนวเชื่อม

สมบัติทางกลด้านความแข็งของการเชื่อมโลหะต่างชนิดนี้มีมิติที่น่าสนใจ เพราะค่าความแข็งของทั้งสองด้านจะแตกต่างกันบนพื้นฐานที่โลหะหลักต่างชนิดกัน (Dissimilar base metal) ดังงานวิจัยที่

เผยแพร์ของ Wichan Chuaiphan et al. (2020) ที่ทำการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 204Cu กับ เกรด 304 ด้วยการเลือกใช้ลวดเชื่อมที่เน้นคาร์บอนต่ำ คือ ER309L กับ ER316L ทำการวัดค่าความแข็ง ด้วยวิธีแบบแผนที่ (Micro-hardness mapping) ดังแสดงในรูปที่ 9.42 ซึ่งเป็นวิธีการวัดความแข็งที่สามารถเห็นถึงการกระจายตัวของความแข็งแต่ละพื้นที่อย่างละเอียด เหมาะสำหรับการทดสอบแนวเชื่อมที่ต่างชนิด โดยเฉพาะการหลอมละลายที่ผสมผสานกันของส่วนผสมทางเคมีที่สามารถเห็นได้จากผลความแข็งแบบแผนที่ จากผลการทดสอบบริเวณเนื้อเชื่อม (WM) พบว่าค่าความแข็งไม่สม่ำเสมอเท่ากันทุกบริเวณ โดยค่าความแข็งจะได้รับอิทธิพลจากส่วนผสมทางเคมีของโลหะหลักด้านนั้น ๆ เป็นสำคัญ ซึ่งก็เป็นปรากฏการณ์ที่ปกติเพราะเนื้อเชื่อมก็จะละลายออกมาจากโลหะของทั้งสองฝั่ง อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถใช้เทคนิคการส่ายหัวเชื่อมเพื่อสร้างกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำโลหะเหลวทั้งสองฝั่งให้ผสมผสานกัน หรือเทคนิคการเชื่อมใด ๆ ที่สามารถกวนน้ำโลหะให้กลมกลืนเป็นเนื้อเดียวกันได้ก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการเพิ่ม % Dilution ของเนื้อเชื่อมโลหะแบบต่างชนิด



(ก) การวัดค่าความแข็งแบบ Mapping



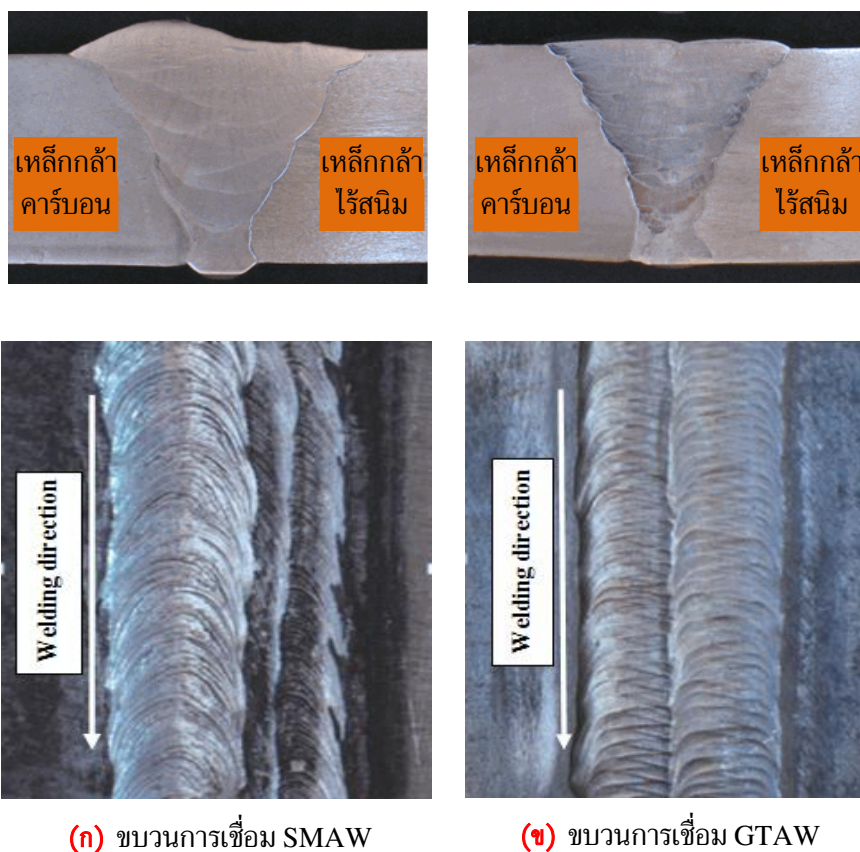
(ข) ค่าความแข็ง Mapping ER309L

(ค) ค่าความแข็ง Mapping ER316L

รูปที่ 9.42 ค่าความแข็งแนวเชื่อมของการเชื่อมโลหะต่างชนิด (Dissimilar welding)

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of JMR&T, Vol. 9, No. 3, pp. 5174–5183, 2020

สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic stainless steel) กับเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) เป็นการเชื่อมโลหะต่างชนิดที่มีความแตกต่างกันของส่วนผสมทางเคมี แต่มีพื้นฐานที่เป็นเหล็กกล้าเหมือนกันเบื้องต้นจึงสามารถเชื่อมต่อกันได้ จึงมีลักษณะงานที่จำเป็นที่จำต้องเชื่อมโลหะเหล็กกล้าเข้าด้วยกันอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จึงได้วิจัยทดลองถึงปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสม โดย Wichan Chuaiphan et al. (2012) ได้ทำการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 กับเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1020 โดยเลือกใช้ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ER316L เพื่อต้องการให้เนื้อเชื่อมเมื่อเย็นตัวจะได้แนวเชื่อมเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก พร้อมกับการทดลองเปรียบเทียบระหว่างขบวนการเชื่อมที่ต่างกันระหว่างขบวนการเชื่อม SMAW กับ GTAW เพื่อหาความสามารถในเชิงเทคนิคการเชื่อม จากผลการทดลองพบว่าลักษณะกายภาพภายนอกแนวเชื่อมมีลักษณะเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมตลอดทั้งแนวเชื่อมและสามารถเชื่อมได้อย่างสมบูรณ์ของทั้งสองขบวนการเชื่อม โดยมีความแตกต่างกันของรูปร่างแนวเชื่อมซึ่งเป็นไปตามลักษณะเฉพาะของแต่ละขบวนการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 9.43



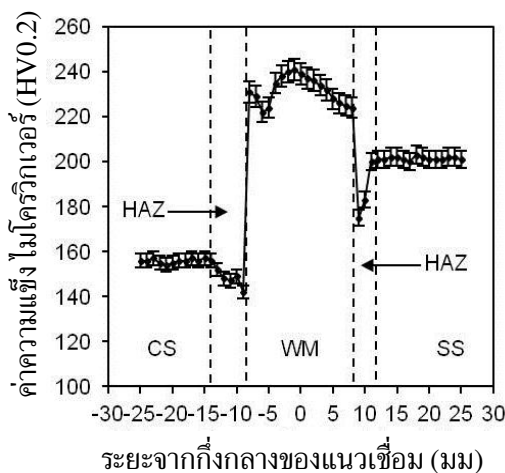
(ก) ขบวนการเชื่อม SMAW

(ข) ขบวนการเชื่อม GTAW

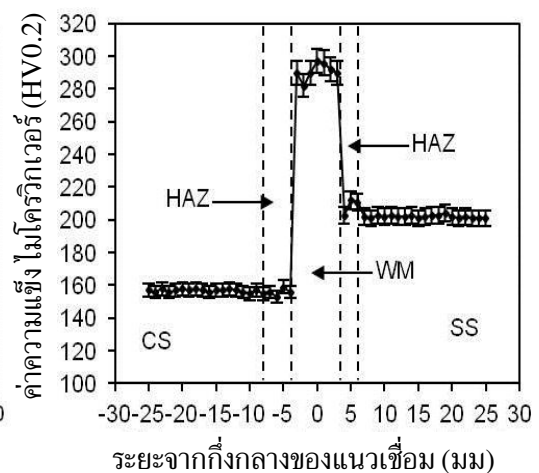
รูปที่ 9.43 รูปร่างแนวเชื่อมของโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. *Journal of Applied Mechanics and Materials*, Vol. 268–270, 2012

เมื่อทดสอบค่าความแข็งของแนวเชื่อมแบบเปรียบเทียบของแต่ละบริเวณ (Transverse section hardness) ดังแสดงในรูปที่ 9.44 เป็นผลของค่าความแข็งที่เชื่อมด้วยขบวนการเชื่อม GTAW ซึ่งมีรูปแบบที่เหมือนกันกับขบวนการเชื่อม SMAW พบว่าค่าความแข็งของบริเวณเนื้อเชื่อมสูงกว่าโลหะหลักทั้งคู่ทั้งด้านหน้าและด้านรากของแนวเชื่อม โดยจะสูงกว่าโลหะหลักด้านเหล็กกล้าคาร์บอนค่อนข้างมาก เหตุผลเพราะโครงสร้างเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นเฟสเฟอร์ไรต์ (Low hardness) ส่วนด้านเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเฟสออสเทนไนต์ (High hardness) ความแข็งสูงที่บริเวณเนื้อเชื่อมเพราะเกิดการเย็นตัวของน้ำโลหะที่มีรวดเร็วเกิดเป็นเกรนขนาดเล็กที่ผสมผสานกันระหว่างเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ บนโครงสร้างพื้นฐานของเฟสออสเทนไนต์และมีเฟสซีเมนไทต์ร่วมด้วย ส่วนความแข็งของบริเวณกระทบร้อนจะต่ำกว่าความแข็งของโลหะหลักทั้งสองด้าน โดยด้านโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนบริเวณ HAZ กว้างกว่าด้านโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม โดยเฉพาะบริเวณที่มีการหลอมละลายบางส่วน (PMZ) มีรูปแบบที่แตกต่างกันมากและมีผลต่อค่าความแข็งดังแสดงในรูปที่ 9.45 เหตุผลเกิดจากค่าการเป็นตัวนำความร้อน (Thermal conductivity) ของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมที่สูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งบทบาทของกลไกการถ่ายโอนความร้อนออกไปจากบ่อหลอมละลายผ่านโลหะหลัก มีผลกระทบต่อรูปแบบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของการเชื่อมโลหะต่างชนิดเป็นอย่างยิ่ง เพราะหมายถึงค่าปริมาณความร้อนสะสมในแต่ละบริเวณของการเชื่อม ถ้าโลหะคู่ที่นำมาเชื่อมมีค่าการนำความร้อนต่างกัน จุดหลอมเหลวเมื่อทำการอาร์กก็ต่างกัน ส่งผลให้อัตราการเย็นตัวก็ต่างกัน โครงสร้างสุดท้ายที่ได้ก็ต่างกัน สมบัติของเนื้อก็ต่างกัน ดังนั้นการที่จะต้องเชื่อมโลหะต่างชนิดกันไม่ใช่เรื่องยาก แต่ต้องศึกษาสมบัติโดยพื้นฐานของโลหะคู่เชื่อม หาค่าปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสมก็สามารถสร้างแนวเชื่อมที่มีประสิทธิภาพได้



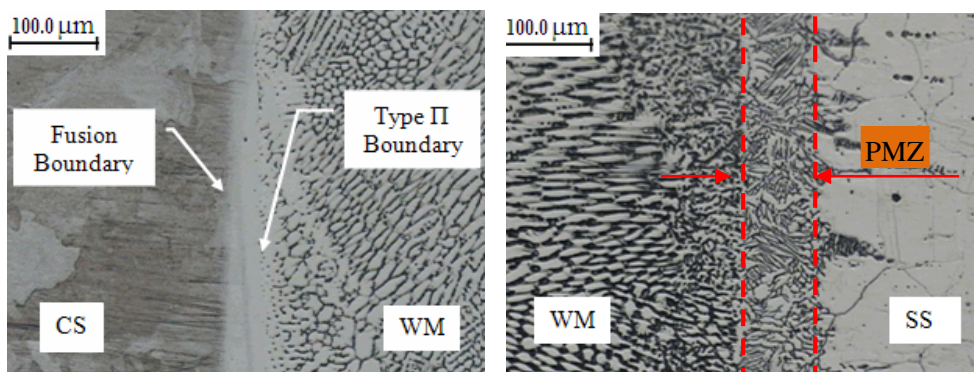
(ก) ค่าความแข็งด้าน Face weld



(ข) ค่าความแข็งด้าน Root weld

รูปที่ 9.44 ค่าความแข็งแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม (SS) กับเหล็กกล้าคาร์บอน (CS)

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Applied Mechanics and Materials, Vol. 268–270, 2012



รูปที่ 9.45 บริเวณ PMZ ของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม (SS) กับเหล็กกล้าคาร์บอน (CS)

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. *Journal of Applied Mechanics and Materials*, Vol. 268–270, 2012

2. สมบัติด้านความแข็งแรง (Strength properties) เป็นสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ซึ่งในการทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อมแบบทอมตามมาตรฐานมีทั้งทดสอบตามยาวของแนวเชื่อมที่เรียกว่า “Longitudinal tensile test” กับ ทดสอบแบบตามขวางของแนวเชื่อมที่เรียกว่า “Transverse tensile test” โดยทั้งสองแบบจะประมวลผลให้ค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมผ่านกราฟความเค้น–ความเครียด (Stress – Strain Curve) และยังสามารถนำผลของรอยขาด (Fracture) ของชิ้นทดสอบมาตรวจสอบและวิเคราะห์ร่วมได้ด้วย โดยเฉพาะการทดสอบแนวเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมโลหะต่างชนิด ซึ่งแนวเชื่อมที่ได้เกิดจากความแตกต่างของโลหะที่นำมาเชื่อมเข้าด้วยกัน แนวโน้มของการที่แนวเชื่อมจะเกิดความไม่สมดุลในแง่มุมต่าง ๆ ก็มีมาก จึงต้องมีการตรวจสอบหาสมบัติในหลายด้าน ในที่นี้จะกล่าวถึงความแข็งแรงของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่ผ่านการเชื่อมแบบโลหะชนิดเดียวกัน และเชื่อมแบบโลหะต่างชนิดกัน ทั้งแบบเติมลวดเชื่อมและไม่เติมลวดเชื่อม ดังนี้

- **กรณีการเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน (Similar welding)** เป็นที่ทราบกันดีว่าการเชื่อมโลหะคู่ที่เป็นชนิดเดียวกันแนวเชื่อมที่ได้จะค่อนข้างเป็นเนื้อเดียวกันทั้งแนวเชื่อม ดังนั้นค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมชนิดนี้ค่อนข้างที่จะเป็นค่าความแข็งแรงที่แท้จริงของเนื้อเชื่อม เพราะเนื้อเชื่อมมีความเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอ (Homogeneous weldment) โดยเฉพาะการกระจายตัวของเฟสโครงสร้าง การกระจายตัวของส่วนผสมทางเคมี และความสมดุลของการเย็นตัว ดังผลการวิจัยที่ทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ซีรีย์ 200 เกรด AISI 201 แบบไม่เติมลวดเชื่อม โดยเลือกใช้ความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้น ของทีมวิจัย Wichan Chuaiphan et al. (2014) โดยได้แสดงผลการทดลองไว้ว่า ค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการเชื่อมเร็วขึ้น เหตุผลเพราะบทบาทของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่เกิดในเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ที่เป็นตัวบ่งชี้ค่าความแข็งแรง กล่าวคือ เมื่อความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้นบ่อหลอมละลายเย็นตัวเร็ว เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในออสเทนไนต์เกิดได้น้อย สัดส่วนของเฟสโครงสร้างจึงเป็นออสเทนไนต์ที่มีความแข็งแรงและความแข็งแรงสูงกว่าเฟสเฟอร์ไรต์ และ

รอยแตกหักของชิ้นทดสอบเกิดที่บริเวณเนื้อเชื่อม เพราะเนื้อเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกมีพฤติกรรมที่ค่าความแข็งแรงต่ำกว่าโลหะหลักโดยปกติ จึงส่งผลต่อค่าความต้านแรงดึงที่ต่ำ ดังแสดงลักษณะของรอยแตกหักที่เกิดในบริเวณเนื้อเชื่อม (Fusion zone) ในรูปที่ 9.46



(ก) ความเร็วเชื่อม 1.5 มม/วินาที –526 MPa



(ข) ความเร็วเชื่อม 2.5 มม/วินาที –546 MPa



(ค) ความเร็วเชื่อม 3.5 มม/วินาที –565 MPa

รูปที่ 9.46 รอยแตกหักของรอยเชื่อม

แบบไม่เต็มลวดของเหล็กกล้าไร้สนิม

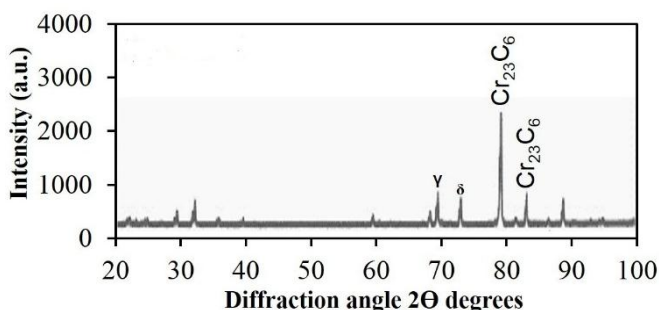
ออสเทนนิติก ซีรีย์ 200 เกรด AISI 201

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.

214, pp. 402–408, 2014

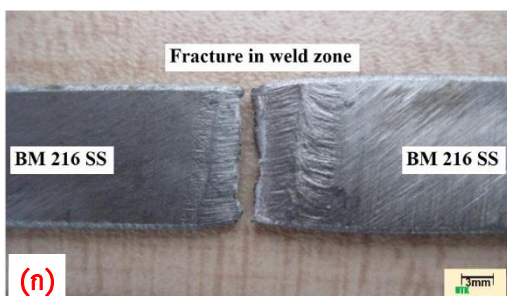
นอกจากผลการทดลองที่กล่าวมา Wichan Chuaiphan et al. (2020) ยังได้ทำการทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ซีรีย์ 200 เกรด AISI 216 ด้วยวิธีการเติมเนื้อลวดเชื่อมเพื่อประเมินผลค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมเพื่อเปรียบเทียบกับแบบไม่เติมลวดเชื่อม พบว่าพฤติกรรมการต้านแรงดึงของแนวเชื่อมเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ เกิดการแตกหักของชิ้นทดสอบที่บริเวณเนื้อเชื่อม ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมที่ต่ำกว่าโลหะหลัก และพบว่าค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อมมีค่าความแข็งแรงที่สูงกว่าแบบไม่เติมลวดอย่างชัดเจน เหตุผลเพราะปริมาณของเนื้อเชื่อมมีมากกว่า และยังมีการเติมส่วนผสมทางเคมีเข้าไปโดยเฉพาะธาตุโครเมียมที่เพิ่มมากขึ้นจนเกิดการฟอร์มตัวเป็นโครเมียมคาร์ไบด์มากขึ้นเสริมสมบัติด้านความแข็งแรง (Hardness) และความแข็งแรงของแนวเชื่อม ดังแสดงผลการตรวจหาเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr_{23}C_6) ด้วยวิธี X-ray diffraction ในรูปที่ 9.47 ที่เกิดขึ้นที่บริเวณหลอมละลายบางส่วน (PMZ) ที่อยู่ติดกับส่วนหลอมละลาย (Fusion area) ซึ่งบริเวณนี้มีเฟสที่รวมกันอยู่ของเฟสแกมมา (γ –Iron) เฟสเดลตา (δ –Iron) โครเมียมคาร์ไบด์ที่ตกผลึกผสมผสานกันส่งผลให้เนื้อโลหะบริเวณนี้ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non-homogeneous) โดยมีทั้งเฟสที่แข็งแรงและอ่อนมาก ดังนั้นเมื่อได้รับแรงดึงจึงต้านได้น้อย เนื้อโลหะเริ่มเกิดการเคลื่อนตัว บริเวณนี้จึงเป็นจุดเริ่มต้นของการเสียรูปและเกิดการแตกหัก ซึ่งสอดคล้องกับรอยแตกหักของชิ้นทดสอบที่เกิดบริเวณ

แนวเชื่อมชิดกับแนว PMZ ดังในรูปที่ 9.48 ของทุกระดับความเร็วในการเชื่อมไม่แตกต่างกัน จะมีที่ต่างกันเพียงเฉพาะความกว้างรอยเชื่อมยึดออก กล่าวคือ

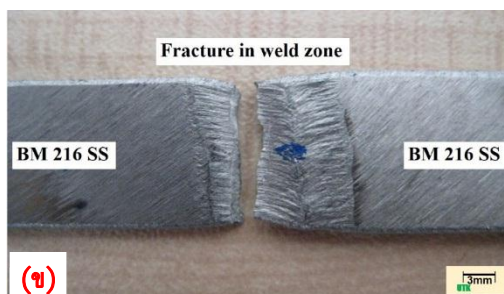


รูปที่ 9.47 การเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ซีรีย์ 200 เกรด AISI 216 ด้วยลวดเชื่อม AISI 316

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. *Journal of Advanced Joining Processes, Vol. 2, 2020*



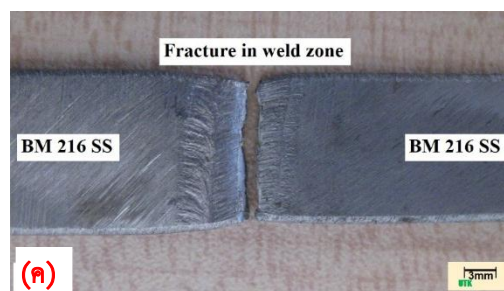
ความเร็วเชื่อม 1.6 มม/วินาที –670 MPa



ความเร็วเชื่อม 2.7 มม/วินาที –684MPa

รูปที่ 9.48 การแตกหักของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ซีรีย์ 200 เกรด AISI 216 ด้วยลวดเชื่อม AISI 316

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. *Journal of Advanced Joining Processes, Vol. 2, 2020*

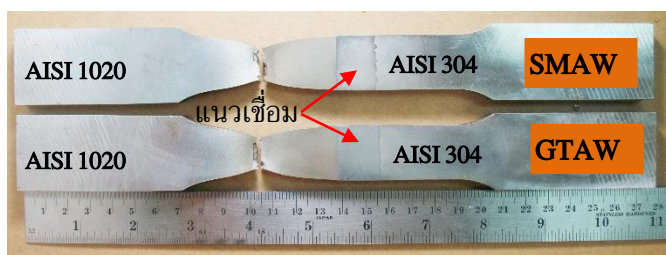


ความเร็วเชื่อม 3.9 มม/วินาที –703 MPa

● **กรณีการเชื่อมโลหะต่างชนิด (Dissimilar welding)** ความแข็งแรงของแนวเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมวัสดุโลหะต่างชนิดหรือต่างเกรด เป็นความแข็งแรงที่เกิดจากการหลอมรวมของเนื้อโลหะทั้งคู่ ซึ่งประสิทธิภาพของการหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมนั้น ในทางปฏิบัติต้องพิจารณาถึงค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่จะสามารถทำการเชื่อมโลหะทั้งคู่ให้หลอมเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งทำได้ค่อนข้างยาก ยิ่งไปกว่านั้นถ้าโลหะคู่ที่นำมาเชื่อมมีความแตกต่างกันในทางโลหะวิทยา

ก็จะยากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงได้มีงานวิจัยเชิงทดลองจำนวนไม่น้อยที่พยายามวิจัยเพื่อสรุปผลออกมาเป็นแนวทางในการกำหนดปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสม โดยจะอธิบายแยกเป็น 2 กรณี ดังนี้

1. กรณีของการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก กับเหล็กกล้าคาร์บอน ดังงานวิจัยเชิงทดลองของ Wichan Chauiphan et al. (2012) ได้ทำการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 กับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1020 ด้วยขบวนการเชื่อม SMAW กับขบวนการเชื่อม GTAW โดยเมื่อนำไปทดสอบรับแรงเค้นดึงเพื่อตรวจสอบระดับค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อม พบว่าขึ้นทดสอบเกิดการแตกหักที่ตำแหน่งของเนื้อโลหะหลักด้านเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งค่าความแข็งแรงที่ได้ไม่ใช่ค่าความแข็งแรงของเนื้อเชื่อม แต่เป็นค่าความแข็งแรงของโลหะหลักเหล็กกล้าคาร์บอน ดังแสดงตำแหน่งรอยแตกหักในรูปที่ 9.49 ผลรอยแตกหักจากการทดสอบแรงดึงนี้สอดคล้องกับผลของการวัดค่าความแข็ง (Hardness) ที่แนวเชื่อมมีค่าความแข็งสูงกว่าโลหะหลักเหล็กกล้าคาร์บอน และยังสอดคล้องกับค่าความแข็งแรง (Ultimate tensile strength) ของโลหะหลักสภาพจำเพาะของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ต่ำกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมที่ 262 MPa และ 505 MPa ตามลำดับ ผลการวิจัยทดลองนี้ไม่ใช่ความผิดพลาดของการเลือกปัจจัยการเชื่อมแต่เป็นปรากฏการณ์จริงที่เป็นขีดจำกัดของการทดสอบแรงดึงแบบตามขวางแนวเชื่อม (Transverse tensile test)

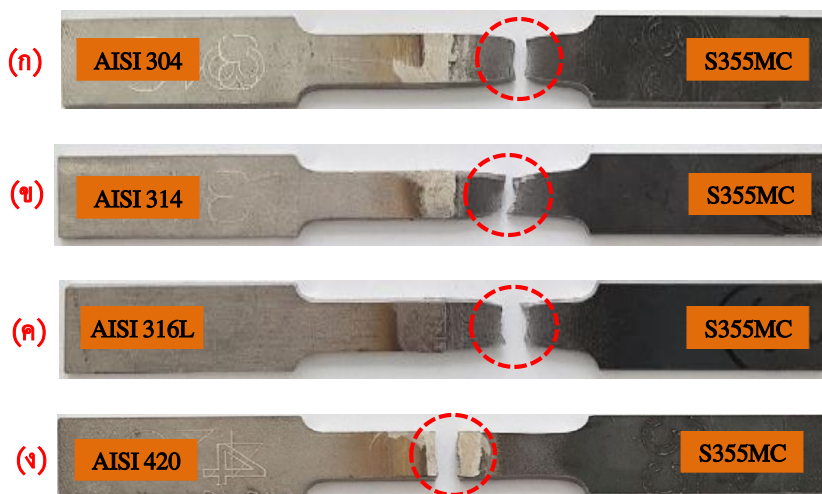


รูปที่ 9.49 รอยแตกหักขึ้นงาน

ทดสอบการเชื่อมเหล็กกล้า
ไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน

ที่มา : Wichan Chauiphan et al.
*Journal of Applied Mechanics
and Materials, Vol. 268–270,
2012*

นอกจากนี้ยังมีผลการวิจัยของ Saulius Baskutis et al. (2021) ที่ทำการทดลองเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 เกรด AISI 314 และเกรด AISI 316L กับเหล็กกล้าผสม S355MC ด้วยขบวนการเชื่อม MIG ผลการทดสอบแรงดึงเพื่อตรวจสอบวัดค่าความแข็งแรงพบว่า ขึ้นทดสอบของทุกเกรดเหล็กกล้าไร้สนิมที่นำมาเชื่อมเกิดการแตกหักที่บริเวณเนื้อโลหะหลักของด้านเหล็กกล้าคาร์บอนเหมือนกันทุกชิ้น ดังแสดงลักษณะของรอยแตกหักของชิ้นทดสอบในรูปที่ 9.50 ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้เหตุผลอธิบายสนับสนุนผลการทดลองนี้ว่า เกิดจากอิทธิพลด้านสมบัติความแข็งแรงของบริเวณแนวเชื่อม (Weld metals) และบริเวณของโลหะหลักเหล็กกล้าไร้สนิม (ASS base metals) ที่สูงกว่าบริเวณของเหล็กกล้าคาร์บอน เป็นเหตุให้เกิดแตกหักที่ตำแหน่งค่าความแข็งแรงที่ต่ำกว่า ซึ่งเหตุผลและผลการทดลองนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับเหตุผลของการวิเคราะห์ผลการวิจัยทดลองของ Wichan Chauiphan et al. (2012) ดังนั้นการเชื่อมโลหะต่างชนิดในรูปแบบดังกล่าวต้องใช้วิธีการทดสอบแรงดึงแบบตามยาวของแนวเชื่อม (Longitudinal tensile test)

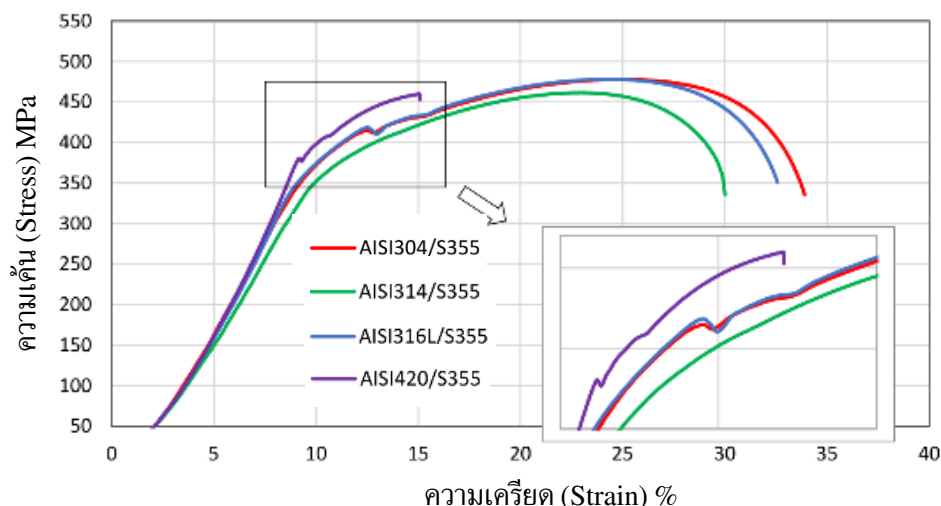


รูปที่ 9.50 รอยแตกหักชิ้นงานทดสอบการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าผสม

ที่มา : Saulius Baskutis et al. Journal of MDPI–Materials. Vol. 14, 6180, 2021

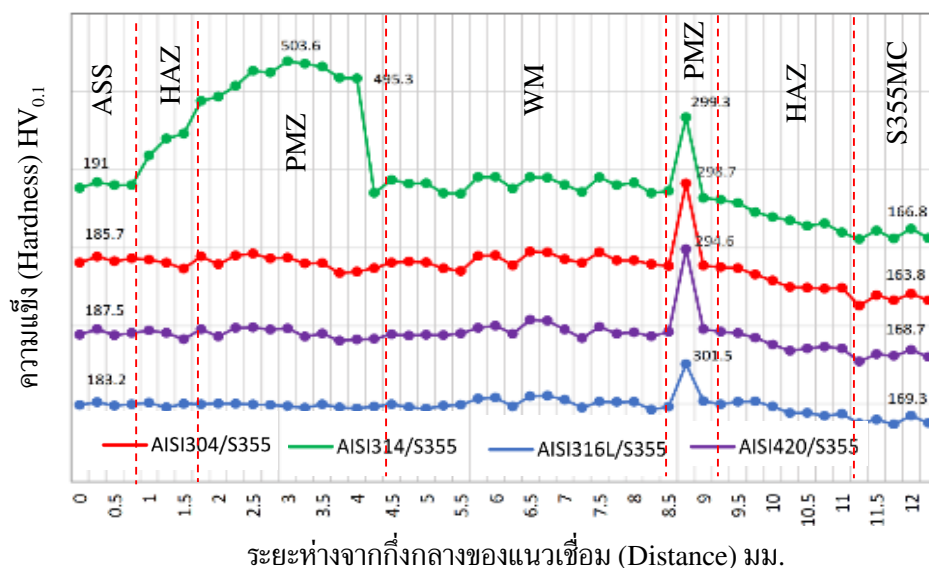
จากผลการทดลองที่เกิดการแตกหักของชิ้นทดสอบบนโลหะหลักด้านที่มีความแข็งแรงต่ำกว่า แนวเชื่อม Saulius Baskutis et al. (2021) ได้ทำการวิจัยทดลองเปรียบเทียบเพิ่มเติมโดยการเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก AISI 420 เชื่อมกับ S355MC แทนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เจตนาต้องการสร้างแนวเชื่อมที่มีความแข็งแรงที่สูงมากขึ้น โดยค่าความแข็งแรงสูงสุดอยู่ที่บริเวณ PMZ ของด้านโลหะหลัก AISI 420 ที่ 500 HV เทียบกับบริเวณเนื้อเชื่อมที่ 191 HV ซึ่งสูงกว่าโลหะหลักเหล็กกล้าผสมที่มีความแข็งแรง 166 HV ผลการทดสอบแรงดึงพบว่าเกิดการแตกหักที่บริเวณแนวเชื่อมที่ชิดติดกับขอบของเนื้อโลหะหลักด้านเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก ซึ่งก็คือบริเวณ PMZ ดังแสดงรูปรอยแตกหักจากการดึงในรูปที่ 9.50 (ง) เหตุผลเพราะเป็นบริเวณรอยต่อของค่าความที่แตกต่างกันมาก เกิดความไม่สมดุลของการยึดตัวเมื่อรับรับแรงดึง กล่าวคือ จุดที่เนื้อเชื่อมมีความแข็งแรงต่ำจะเคลื่อนตัวได้มาก แต่จุดที่มีความแข็งแรงสูงจะเคลื่อนตัวได้น้อย ความไม่สมดุลหรือความแตกต่างดังกล่าวเป็นบ่อเกิดของจุดเริ่มต้นของรอยแตกกว้างได้ง่าย ดังแสดงเปรียบเทียบกราฟทดสอบแรงดึงในรูปที่ 9.51 ซึ่งแสดงผลที่ชัดเจนว่าเส้นกราฟความเค้น-ความเครียดไม่แตกต่างกัน ของกรณีที่ชิ้นงานทดสอบเกิดการแตกหักที่โลหะหลักเหล็กกล้าความแข็งแรงต่ำ S355MC แต่มีความแตกต่างกรณีชิ้นงานแตกหักที่บริเวณแนวเชื่อม ซึ่งเหตุผลของตำแหน่งที่เกิดรอยแตกหักจะสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงของชิ้นทดสอบ ดังแสดงผลของความแข็งแรงของแต่ละบริเวณดังแสดงในรูปที่ 9.52

จากการนำเสนอตัวอย่างผลการวิจัยการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก กับเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยเหตุเพราะการเชื่อมต่อของโลหะคู่นี้มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแนวเชื่อมค่อนข้างมาก เพื่อเป็นข้อมูลและข้อสังเกตของผู้ปฏิบัติงานการเชื่อมที่ต้องพิจารณาให้ ความสำคัญไม่เช่นนั้นจะเกิดความผิดพลาดเสียหายต่อโครงสร้างงานเชื่อมได้



รูปที่ 9.51 กราฟทดสอบแรงดึงแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าผสม

ที่มา : Saulius Baskutis et al. Journal of MDPI–Materials. Vol. 14, 6180, 2021



รูปที่ 9.52 กราฟทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าผสม

ที่มา : Saulius Baskutis et al. Journal of MDPI–Materials. Vol. 14, 6180, 2021

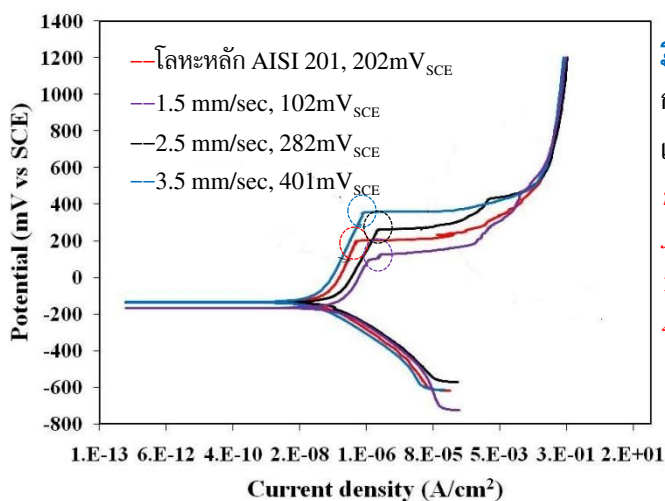
9.5 สมบัติด้านการกัดกร่อนของแนวเชื่อม (Corrosion resistance of weldments)

โลหะเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นกลุ่มโลหะตระกูลเหล็กที่มีความโดดเด่นด้านความต้านทานต่อการกัดกร่อนหรือทนต่อการเกิดสนิม (Oxide) จึงเป็นวัสดุตัวเลือกที่นิยมเลือกใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ต้องต้านทานต่อการเกิดการกัดกร่อนได้เป็นอย่างดีโดยเฉพาะโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่มีสมบัติพิเศษที่ไม่ดูดติดแม่เหล็ก (Non-Magnetic) ทั้ง ๆ ที่เป็นโลหะกลุ่มเหล็ก จากความสามารถที่ทนต่อการกัดกร่อนและไม่มีปฏิกิริยากับแม่เหล็กของโลหะเหล็กชนิดนี้ จึงมีการใช้งานกันมากมายหลายรูปแบบ

ซึ่งจำนวนงานไม่น้อยที่ต้องนำมาประกอบกันด้วยขบวนการเชื่อม โดยเฉพาะการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าการเชื่อมเป็นการสร้างเนื้อโลหะขึ้นมาใหม่หลังการอาร์กหลอมละลาย และเนื้อโลหะที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไปจากเนื้อโลหะเดิม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงส่งผลกระทบต่อสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม โดยสมบัติที่เป็นปัญหาให้พบเจออยู่เสมอคือ สมบัติความต้านทานการกัดกร่อนที่ลดลง ดังนั้น การเชื่อมเหล็กไร้สนิมออสเทนนิติกจึงให้ความสำคัญกับสมบัติด้านการกัดกร่อนและสมบัติความเป็นแม่เหล็กของแนวเชื่อม จึงได้เกิดการวิจัยทดลองเพื่อพิสูจน์หรือพยากรณ์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะชนิดนี้กันมากมายหลายแง่มุม เช่น แง่มุมของขบวนการเชื่อม ปัจจัยของการเชื่อม วัสดุเชื่อม และองค์ประกอบของการเชื่อมด้านอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง และจากงานวิจัยทดลองของผู้เขียนและคณะได้ทำการศึกษาหาข้อสรุปถึงความแตกต่างของการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกแบบที่เชื่อมโลหะชนิดเดียวกันและแบบที่เชื่อมโลหะต่างชนิดกัน ในสมบัติของออกไซด์ฟิล์ม (Oxide film) ที่สามารถต้านทานต่อการเกิดกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) ดังผลตัวอย่างรายงานการวิจัยของแต่ละชนิดแนวเชื่อมดังต่อไปนี้

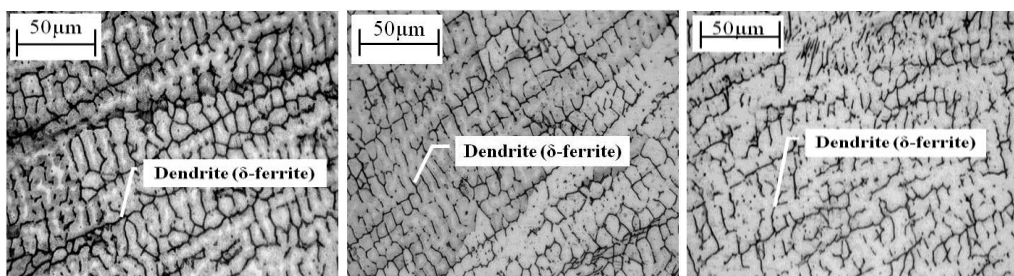
1. การกัดกร่อนของแนวเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน (Corrosion of similar weldment) แนวเชื่อมที่เกิดจากการหลอมละลายของโลหะชนิดเดียวกันถือได้ว่าเป็นแนวเชื่อมที่มีปัญหาน้อย ด้วยเพราะวัสดุที่เชื่อมเหมือนกันทุกประการ แต่อย่างไรก็ตามโอกาสที่จะได้เนื้อเชื่อมที่เหมือนกับโลหะหลักคงเป็นไปได้ เพราะเนื้อเชื่อมเป็นของแข็งใหม่จากการเย็นตัวของน้ำโลหะหลังการเชื่อม จึงจำเป็นต้องทดสอบเพื่อหาค่าความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนที่แท้จริงของเนื้อเชื่อม ดังตัวอย่างผลงานวิจัยทดลองของ Wichan Chuaiphan et al. (2014) ที่ทำการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทซีรีย์ 200 เกรด AISI 201 แบบไม่เติมลวดเชื่อมโดยใช้ความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้น เพื่อต้องการหาค่าความสามารถด้านการกัดกร่อนที่ทดสอบด้วยวิธีเซลล์ไฟฟ้าเคมี Potentiodynamic ในสารละลาย NaCl 3.5 wt% ตามมาตรฐาน ASTM D1141 พบว่า ประสิทธิภาพความทนทานต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting) ของเนื้อเชื่อม แปรเปลี่ยนไปตามปริมาณและรูปทรงของการเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในแนวเชื่อม โดยถ้าปริมาณเดลตาเฟอร์ไรต์มากความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มต่ำลง เพราะจุดเริ่มต้นของการกัดกร่อนจะเกิดที่ตำแหน่งขอบรอยต่อระหว่างเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์กับออสเทนไนต์ (δ/γ) ดังนั้นเมื่อสัดส่วนเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในออสเทนไนต์มากขึ้นก็เป็นการสร้างโอกาสให้เกิดจุดเริ่มกัดกร่อนมากขึ้น และการเชื่อมที่ความเร็วสูงจะเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่ต่ำ เพราะมีอัตราการเย็นตัวรวดเร็วเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ฟอร์มตัวไม่ทัน ดังแสดงเปรียบเทียบเส้นกราฟ Potentiodynamic ของจุด Pited ในรูปที่ 9.53 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ของเนื้อเชื่อมที่แตกต่างกันเพราะความเร็วเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 9.54 จากเหตุผลความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกขึ้นอยู่กับปริมาณของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่ได้หลังจากการเย็นตัวของน้ำโลหะและปริมาณเดลตาเฟอร์ไรต์ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวของบ่อหลอมละลาย ดังนั้น การควบคุมให้เนื้อเชื่อมมีปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์น้อยก็เป็นการเพิ่มความสามารถในการ

ด้านการกัดกร่อนแบบรูเข็มได้มากขึ้น ดังแสดงลักษณะของการเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่ขอบรอยต่อระหว่างเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์กับออสเทนไนต์ในรูปที่ 9.55



รูปที่ 9.53 กราฟทดสอบการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 201

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, pp. 402–408, 2020



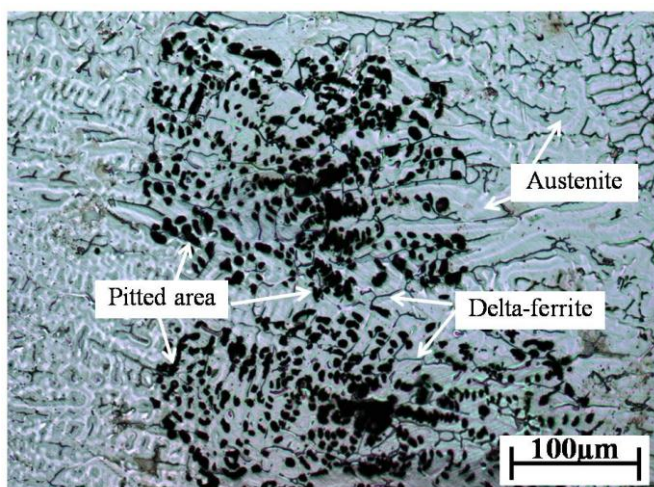
ความเร็วเชื่อม 1.5 มม/วินาที

ความเร็วเชื่อม 2.5 มม/วินาที

ความเร็วเชื่อม 3.5 มม/วินาที

รูปที่ 9.54 เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 201

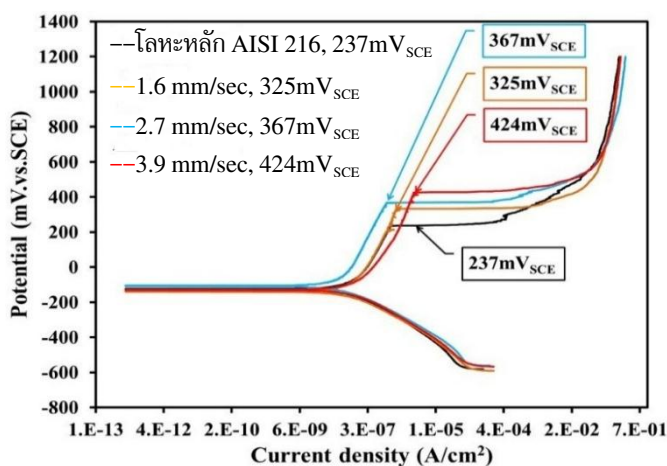
ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, pp. 402–408, 2020



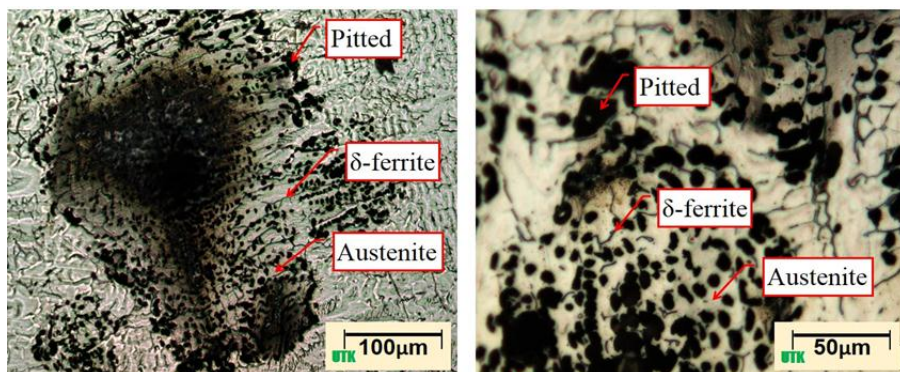
รูปที่ 9.55 รูปแบบกลไกการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 201

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, pp. 402–408, 2020

จากตัวอย่างผลการวิจัยทดลองที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นการทดลองเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม ซึ่งเป็นการหลอมละลายโลหะชนิดเดียวกันเป็นเนื้อเชื่อม ซึ่งการเกิดของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมแบบนี้ถูกกำหนดด้วยอัตราการณ์ตัวของความเร็วในการเชื่อมเป็นสำคัญ และจากพฤติกรรมรูปแบบการกัดกร่อนแบบรูเข็มดังที่แสดงในรูปที่ 9.55 สังเกตได้ว่าจุดเริ่มต้นของการกัดกร่อนเกิดที่ตำแหน่งเขตรอยต่อระหว่างเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์กับเฟสออสเทนไนต์ จากนั้นการกัดกร่อนก็ลุกลามไปในทิศทางด้านของเฟสออสเทนไนต์ และขณะเดียวกันก็จะขยายการกัดกร่อนไปตามขอบระหว่างเฟสอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น การลดปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ให้น้อยเป็นการลดจุดเริ่มต้นของการกัดกร่อน เป็นการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนได้ดี นอกจากนี้ ก็เป็นที่ทราบกันว่าเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มซีรีย์ 200 มีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนที่ไม่ดีทัดเทียมเท่าซีรีย์ 300 อาจมีความเป็นไปได้ว่าการเชื่อมแบบไม่เติมลวดเกิดการพองของโครเมียมที่หายไปกับอิทธิพลของความร้อนเชื่อม โดย Wichan Chuaiphan et al. (2020) จึงเกิดแนวคิดทดลองเพิ่มปริมาณโครเมียมจากโลหะลวดเชื่อมเติมเข้าไปในเนื้อเชื่อมเพื่อเพิ่มปริมาณโครเมียมให้มากพอในการสร้างฟิล์มที่แข็งแรงในจุดที่เกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ ซึ่งได้ทำการทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมซีรีย์ 200 เกรด AISI 216 ที่ผสม 17.85% Cr และ 7.21% Ni ด้วยลวดเชื่อม ER 316 ที่ผสม 18.40% Cr และ 12.13% Ni และยังทดลองควบคู่กับปัจจัยของความเร็วในการเชื่อม เพื่อหาความสัมพันธ์กับปริมาณการเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ ผลการทดลองได้ข้อสรุปว่าการเชื่อมด้วยวิธีการเติมเนื้อโลหะลวดเชื่อมมีแนวโน้มทำให้ประสิทธิภาพของความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกซีรีย์ 200 เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโลหะหลัก และเมื่อทดลองใช้ความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นผลปรากฏว่า ค่าของ Cr_{eq}/Ni_{eq} เพิ่มขึ้น สอดรับกับผลการทดสอบที่เห็นได้ชัดเจนว่าที่ระดับความเร็วเพิ่มขึ้นความสามารถด้านทานการกัดกร่อนเพิ่มตาม ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 9.56 ซึ่งผลที่แนวเชื่อมมีความต้านทานการกัดกร่อนที่สูงขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลของอิทธิพลปริมาณโครเมียมที่เพิ่มขึ้นในเนื้อเชื่อม แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 9.57 ปริมาณเดลตาเฟอร์ไรต์เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้น แต่เป็นเดลตาเฟอร์ไรต์ที่เป็นแบบต่อเนื่อง (Continuity) เสมือนหนึ่งว่าปริมาณของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมลดลง

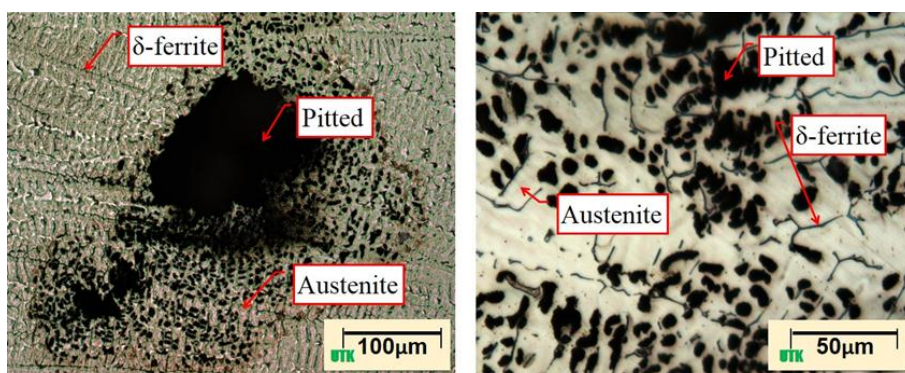


รูปที่ 9.56 กราฟทดสอบการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 216 ด้วยลวดเชื่อม ER316
ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. *Journal of Advanced Joining Processing Technology*, Vol. 2, (100027), 2020



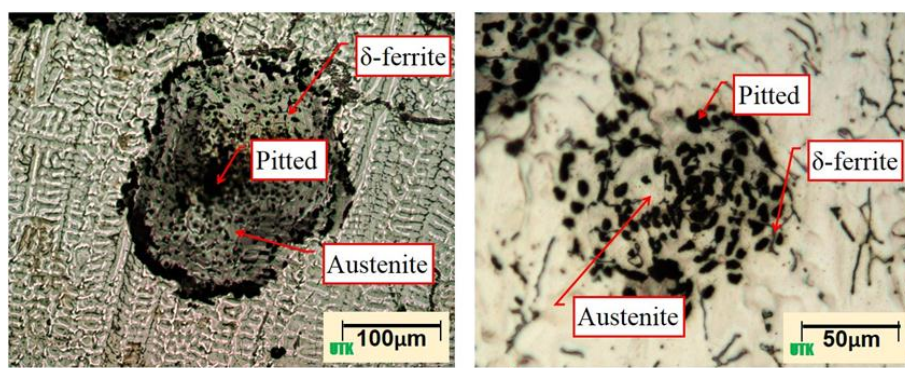
High magnification

(ก) ความเร็วในการเชื่อม 1.6 มม/วินาที



High magnification

(ข) ความเร็วในการเชื่อม 2.7 มม/วินาที



High magnification

(ง) ความเร็วในการเชื่อม 3.9 มม/วินาที

รูปที่ 9.57 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting) ของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 216

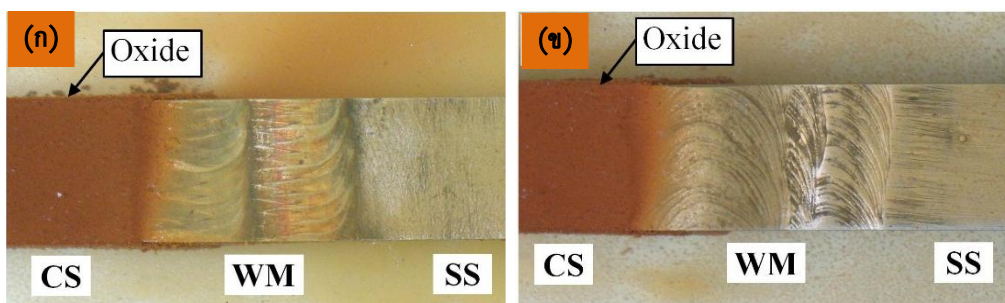
ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. *Journal of Advanced Joining Process. Techno. Vol. 2, (100027), 2020*

2. การกัดกร่อนของแนวเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน (Corrosion of dissimilar weldment) แนวเชื่อมที่ได้จากการนำโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกต่างชนิดมาทำการเชื่อมต่อกัน เนื้อเชื่อมจะมีองค์ประกอบภายในที่มีความแตกต่างกับการเชื่อมแบบโลหะชนิดเดียวกัน ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างต้น ความหลากหลายของการเชื่อมต่อโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกกับโลหะเหล็กกล้าอื่น ๆ ยิ่งโลหะที่มีสมบัติพื้นฐานแตกต่างกันมากก็ยิ่งทำให้เนื้อเชื่อมมีความแตกต่างกันมากขึ้น โดยเฉพาะสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อม

● การกัดกร่อนของแนวเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน (Dissimilar welding austenitic stainless steel and carbon steel) ผลการวิจัยเชิงทดลองของ Wichan Chuaiphan et al. (2012) ที่ทำการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกกับเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งก็เป็นที่น่าทึ่งกันว่าโลหะคู่นี้ต่างก็เป็นโลหะกลุ่มเหล็ก ดังนั้น เนื้อโลหะโดยพื้นฐานเป็นโลหะเหล็ก (Ferrous metal) โดยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกจะต่างกันที่ส่วนผสมเพิ่มเติมที่ต้องการสมบัติบางประการ ได้แก่ การเติมธาตุโครเมียม (Cr) เพื่อต้องการความต้านทานการกัดกร่อน เติมนิกเกิล (Ni) หรือแมงกานีส (Mn) เพื่อสร้างสมบัติความไม่เป็นแม่เหล็กและธาตุอื่น ๆ ตามจุดประสงค์ เป็นต้น ดังนั้น เมื่อนำมาเชื่อมเข้าด้วยกันเนื้อโลหะทั้งสองหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ก็เกิดการเจือจาง (Dilution) ของส่วนผสมโดยธาตุโครเมียมจากเหล็กกล้าไร้สนิมแพร่ไปยังเหล็กกล้าคาร์บอน ทำให้ปริมาณของโครเมียมผสมโดยรวมไม่มากพอที่จะมีสมบัติในการสร้างฟิล์มเพื่อป้องกันการกัดกร่อนได้ แต่ลักษณะกายภาพภายนอกของแนวเชื่อมเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ทนการกัดกร่อนแบบ Uniform ได้เมื่อเทียบกับด้านเหล็กกล้าคาร์บอน ดังแสดงผลการทดสอบแซนในสารละลายเกลือแอง 3.5 % ไม่เกิดออกไซด์หรือสนิมแดงที่ผิวบริเวณของแนวเชื่อม แต่มีออกไซด์ขึ้นที่บริเวณผิวของพื้นที่นอกแนวเชื่อมด้านโลหะหลักเหล็กกล้าคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 9.58 ซึ่งเหมือนกันของทั้งขบวนการเชื่อม GTAW และขบวนการเชื่อม SMAW ซึ่งผลของการเกิดออกไซด์ที่ผิวสรุปได้ว่าการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกกับเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกสามารถเชื่อมได้

สำหรับความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มซึ่งมีความสำคัญของเหล็กกล้าไร้สนิม จึงได้ทำการทดสอบหาระดับความแข็งแรงของฟิล์มออกไซด์ (Pitting corrosion) พบว่า ค่าความต้านทานของฟิล์มออกไซด์ในเนื้อเชื่อมต่ำกว่าโลหะหลักเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ($432 \text{ mV}_{\text{SCE}}$) และเนื้อเชื่อมของขบวนการเชื่อม GTAW ($385 \text{ mV}_{\text{SCE}}$) สูงกว่าขบวนการเชื่อม SMAW ($245 \text{ mV}_{\text{SCE}}$) ดังแสดงเส้นกราฟการกัดกร่อนในรูปที่ 9.59 เหตุผลที่โลหะหลักมีความต้านทานการกัดกร่อนที่สูงกว่าเนื้อเชื่อมก็เป็นเพราะเนื้อโลหะไม่เกิดการหลอมละลายส่วนผสมของโครเมียมปริมาณมากเพียงพอ แต่เมื่อนำมาเชื่อมต่อกันปริมาณโครเมียมลดลงจากการที่เจือจางส่วนผสมขณะหลอมละลาย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับขบวนการเชื่อมที่ต่างกันพบว่าแนวเชื่อมจากการเชื่อมแบบ GTAW มีเนื้อเชื่อมที่มีเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์น้อยกว่า มีโอกาสเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มยากกว่าแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมแบบ SMAW

เหตุผลหลักมาจากอัตราเร็วของการเย็นของเนื้อเชื่อมที่ต่างกัน โดยการเชื่อมแบบ GTAW ความร้อนบ่อหลอมต่ำกว่า โดยมีรูปแบบผลของรอยกัดกร่อนแบบรูเข็มจากการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 9.60

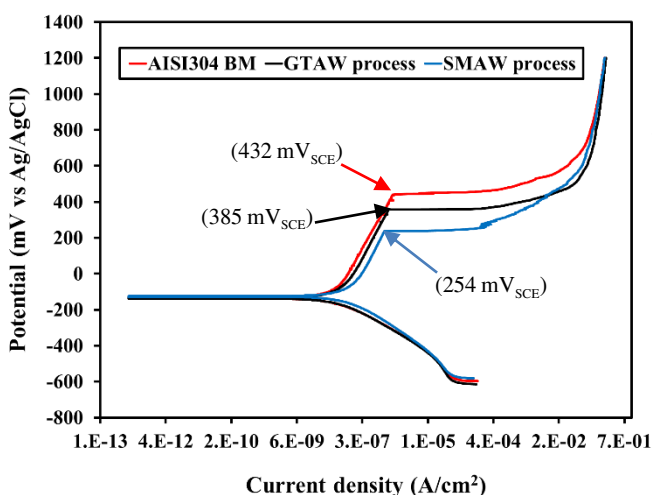


(ก) ขบวนการเชื่อม GTAW

(ข) ขบวนการเชื่อม SMAW

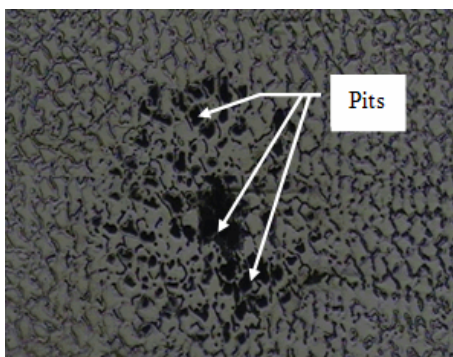
รูปที่ 9.58 การเกิดออกไซด์ของแนวเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Applied mechanics and Material. Vol. 238–270 29, 2012

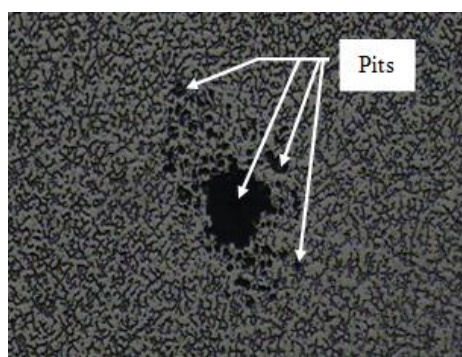


รูปที่ 9.59 กราฟทดสอบการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อมโลหะต่างชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Applied mechanics and Material. Vol. 238–270 29, 2012



(ก) ขบวนการเชื่อม GTAW

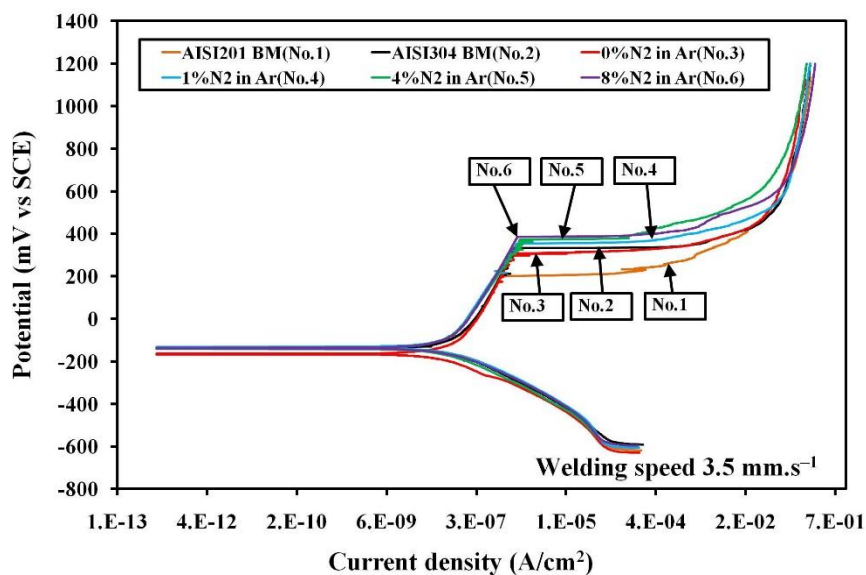


(ข) ขบวนการเชื่อม SMAW

รูปที่ 9.60 ลักษณะการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อมโลหะต่างชนิด SS กับ CS

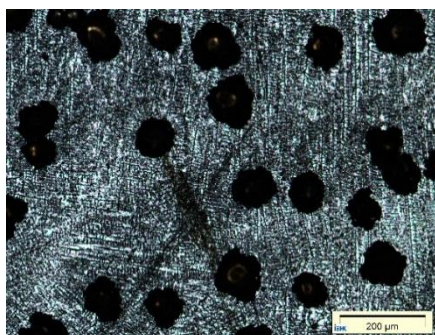
ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. Journal of Applied mechanics and Material. Vol. 238–270 29, 2012

● **การกัดกร่อนของแนวเชื่อมโลหะต่างชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่แตกต่างกัน (Dissimilar welding austenitic stainless steel different grade)** เป็นการกัดกร่อนของแนวเชื่อมในกรณีที่ทำกรเชื่อมโลหะต่างชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกทั้งคู่แต่ต่างเกรด ซึ่งแนวเชื่อมของโลหะต่างชนิดลักษณะนี้มีโครงสร้างพื้นฐานที่ใกล้เคียงกัน แต่ก็มีส่วนที่แตกต่างกันบางอย่างที่เป็นสมบัติที่โดดเด่นเฉพาะด้านของเกรดนั้น ๆ สำหรับสมบัติความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นหลังการเปลี่ยนแปลงเมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมผ่านขบวนการเชื่อมแบบหลอมละลายมีความแตกต่างไปจากเดิมแน่นอน เพราะต่างเกรดก็จะมีส่วนผสมทางเคมีเป็นสำคัญ และเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติกมีทั้งกลุ่มซีรีย์ 200 และ ซีรีย์ 300 ค่อนข้างนิยมนำมาใช้งานร่วมกันในหลายลักษณะงาน จึงมีการเชื่อมต่อกันแบบโลหะต่างชนิดเกิดขึ้น ซึ่งโดยสมบัติพื้นฐานของโลหะทั้งคู่มีความสามารถในการเชื่อมต่อกันได้ดี และผลของแนวเชื่อมในด้านทางกายภาพค่อนข้างอย่างสมบูรณ์ ไม่ค่อยพบข้อบกพร่องของแนวเชื่อมมากนักแต่ก็มีบ้างในบางคู่ของโลหะที่เชื่อม เช่น มีค่าความสามารถในการนำความร้อนต่างกันที่นำความร้อนได้ดีจะมีส่วนที่หลอมละลายได้มากกว่าก็จะทำให้บ่อหลอมละลายไม่สมมาตรกัน เมื่อน้ำโลหะแข็งตัวก็ได้รับรังของแนวเชื่อมที่ไม่สมดุลทั้งสองข้าง เป็นต้น ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้เทคนิคการเชื่อมเข้ามาปรับมุมเอียงของหัวเชื่อมเพื่อกำหนดทิศทางของการหลอมละลายของบ่อหลอม หรือสามารถใช้เทคนิคการส่ายหัวเชื่อมหรือเทคนิคการเติมลวดเชื่อมก็สามารถนำมาประยุกต์แก้ปัญหาก็ได้ แต่สำหรับสมบัติทางกลและสมบัติทางเคมีค่อนข้างมีความแตกต่างกันมาก ด้วยเพราะอิทธิพลของธาตุแต่ละชนิด และรวมถึงระดับปริมาณของส่วนผสมทางเคมีของแต่ละเกรดจะมีความแตกต่างกัน จึงได้มีการวิจัยทดลองเชื่อมโลหะต่างชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกกันหลากหลาย ดังงานวิจัยของ Wichan chuaiphan et al. (2019) ที่ทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกซีรีย์ 200 เกรด 201 กับ ซีรีย์ 300 เกรด 304 ด้วยขบวนการเชื่อม TIG แบบไม่เติมลวดเชื่อม โดยใช้แก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สอาร์กอนสำหรับปกคลุมแนวเชื่อมเพื่อต้องการควบคุมการเกิดปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็ม ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมสามารถควบคุมให้เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ลดลงได้ ซึ่งเป็นผลดีต่อความต้านทานการกัดที่สูงขึ้น ดังแสดงเปรียบเทียบผลการทดสอบหาจุดแตกของฟิล์มออกไซด์ (Pitting) เส้นกราฟโพเทนทิโอไดนามิก (Potentiodynamic) ในรูปที่ 9.61 โดยความสามารถในการต้านทานทานการกัดกร่อนสูงขึ้นเมื่อปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมต่ำลง ซึ่งก็สอดคล้องกับผลการวิจัยของเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกของหลาย ๆ นักวิจัยที่ได้เผยแพร่ไว้ และในรูปที่ 9.62 เป็นตัวอย่างของลักษณะรอยกัดกร่อนแบบรูเข็มที่ปริมาณไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนที่ต่างกัน จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่ปริมาณไนโตรเจนผสมต่ำจำนวนตำแหน่งที่เกิดการกัดกร่อนมีจำนวนมากจุด โดยจำนวนจุดที่เกิดจะมากตามปริมาณของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่สูง และเมื่อผสมไนโตรเจนมากขึ้นปริมาณเดลตาเฟอร์ไรต์ลดลง ส่งผลทำให้จุดที่เกิดการกัดกร่อนลดลงตามไปด้วยซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 9.62 (ก) (ข) (ค) และ (ง) ที่มีสัดส่วนผสมของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนที่มากขึ้นตามลำดับ

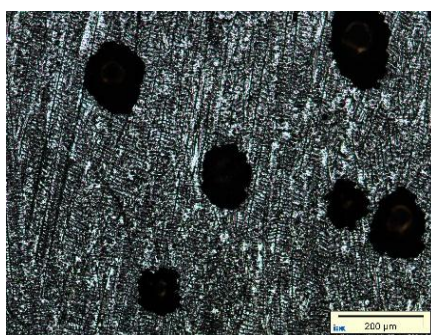


รูปที่ 9.61 กราฟการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อมโลหะต่างชนิดซีรีย์ 200 กับซีรีย์ 300

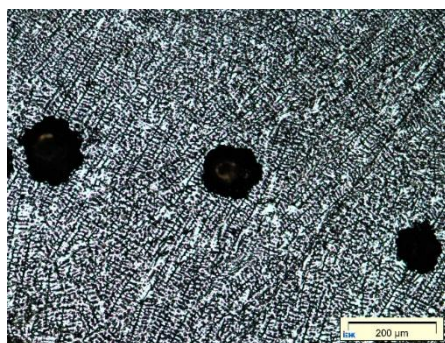
ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. *Journal of Defence Technology*. Vol. 15, pp. 170–178, 2019



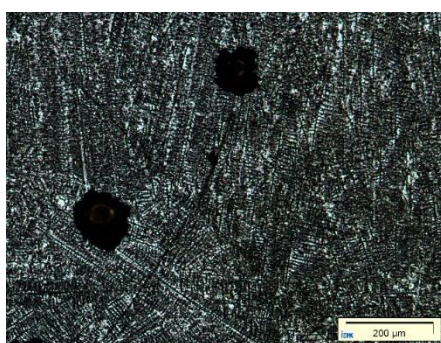
(ก) 0%N₂ + 100%Ar



(ข) 1%N₂ + 99%Ar



(ค) 4%N₂ + 96%Ar



(ง) 8%N₂ + 92%Ar

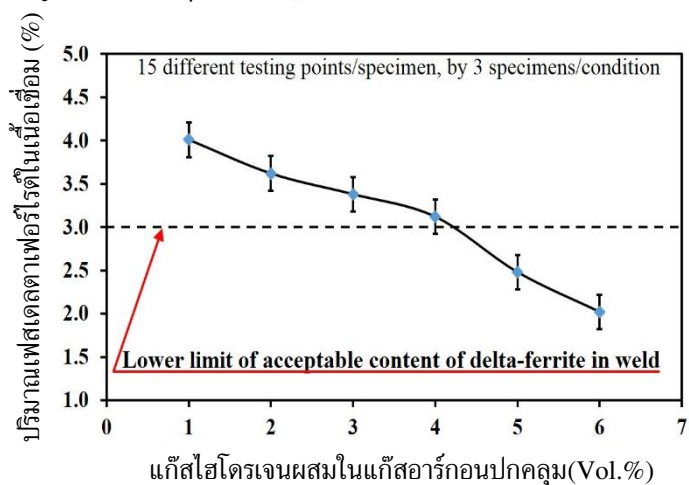
รูปที่ 9.62 รอยการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อมโลหะต่างชนิดซีรีย์ 200 กับซีรีย์ 300

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. *Journal of Defence Technology*. Vol. 15, pp. 170–178, 2019

นอกจากคู่โลหะต่างชนิดที่กล่าวมาแล้วนั้น Wichan Chuaiphan และคณะยังได้มีการวิจัยทดลองเชื่อมโลหะต่างชนิดของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมซีรีย์ 200 เกรด AISI 204Cu กับซีรีย์ 300 เกรด AISI 304 ด้วยขบวนการเชื่อมทิกแบบวิธีการเติมลวดเชื่อมผลการวิจัยพบว่า แนวเชื่อมที่เติมเนื้อด้วยลวดเชื่อมช่วยเพื่อเพิ่มธาตุผสมหลัก ๆ ที่สำคัญเพิ่มมากขึ้น เช่น ธาตุโครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) หรือแมงกานีส ที่ช่วยรักษาสมบัติความเป็นโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกของเนื้อโลหะที่ผ่านการหลอมละลายใหม่ด้วยกระบวนการเชื่อมให้คงอยู่ใกล้เคียงหรือเหมือนกับโลหะหลักมากที่สุด โดยเฉพาะเทคนิคการเลือกลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของโครเมียมสูง มีประโยชน์มากต่อการเสริมโครเมียมในเนื้อเชื่อมที่โดนเจือจางจากการเชื่อมโลหะที่ผสมโครเมียมต่างกัน และชดเชยโครเมียมบางส่วนที่ลดลงจากการไปรวมตัวกับคาร์บอนเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr_{23}C_6) แล้วตกผลึกอยู่ตามขอบเกรน ดังนั้น เมื่อปริมาณของโครเมียมที่เหลืออยู่ในเนื้อเชื่อมมากขึ้นและมากพอที่สามารถสร้างฟิล์มออกไซด์ที่แข็งแรงได้ ก็ส่งผลต่อการเพิ่มขีดความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มมากขึ้น ส่วนรูปแบบกลไกการกัดกร่อนก็เป็นไปในลักษณะรูปแบบที่เริ่มต้นเกิดที่เฟสของเดลตาเฟอร์ไรต์แล้วลุกลามเข้าไปตามเส้นแนวของเฟอร์ไรต์ที่เป็นแบบเส้นยาวที่เรียกกันว่า Vermicular ferrite ซึ่งได้อธิบายผ่านมาแล้ว จากการทดลองนี้สามารถนำมาใช้เป็นสรุปได้ว่าการเชื่อมโลหะต่างชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก กรณีเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อมแนะนำว่าต้องพิจารณาถึงปริมาณของโครเมียมที่ผสมในลวดเชื่อมเป็นสำคัญซึ่งมีอิทธิพลต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion resistance) โดยตรง

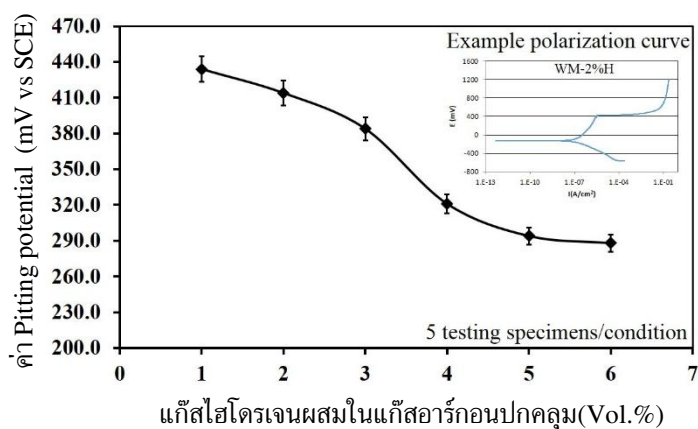
นอกจากนี้ Wichan Chuaiphan et al. (2020) ยังได้ทำการทดลองวิจัยการเชื่อมโลหะต่างชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกซีรีย์ 200 ต่างเกรดที่ต่างส่วนผสมหลายคู่ เช่น การเชื่อมเกรด AISI 205 กับ AISI 216 โดยใช้แก๊สปกคลุมแนวเชื่อมที่ผสมแก๊สไฮโดรเจนที่ปริมาณ 1–6 %Vol. และเลือกใช้ลวดเชื่อมเติม ER307 ที่มีโครเมียม 18.61% และนิกเกิล 8.14% ผลการทดลองพบว่า ด้วยปัจจัยการเชื่อมหลัก ๆ ที่กล่าวมาเนื้อเชื่อมที่ได้มีการเติมธาตุผสมที่สัดส่วน $\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}}$ ที่ต่ำกว่า 1.95 การแข็งตัวของเนื้อเชื่อมเป็น Mode Ferrite Austenite (FA Mode) พบว่าปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ลดลงเมื่อปริมาณการใช้แก๊สไฮโดรเจนผสมในแก๊สปกคลุมที่มากขึ้น ดังแสดงใน **รูปที่ 9.63** เป็นผลมาจากอิทธิพลของแก๊สไฮโดรเจนที่ช่วยสร้างความร้อนให้แก่บ่อหลอมละลาย สามารถเชื่อมได้ด้วยความเร็วที่สูงขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อปริมาณความร้อนสะสมที่ต่ำ บริเวณแบบนี้อัตราการเย็นตัวจะสูง เฟสเดลตาเฟอร์ไรต์เกิดได้ยาก ซึ่งโดยปกติการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่ต่ำจะมีความต้านทานการกัดกร่อนที่สูง แต่เมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบการกัดกร่อนแบบรูเข็มใน **รูปที่ 9.64** กลับต่ำลง เหตุผลเพราะเนื้อเชื่อมเกิดจากการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมซีรีย์ 200 ที่มีโครเมียมต่ำทั้งคู่ และในลวดเชื่อมก็มีไม่มาก ดังนั้นโครงสร้างจุลภาคจึงมีส่วนของธาตุผสมโครเมียมที่ต่ำทำให้ปัจจัยด้านความแข็งแรงของออกไซด์ฟิล์มลดลงและความไวต่อการต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่มากกว่าปัจจัยของปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อม ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าค่าความต้านทานการกัดกร่อนจากการเชื่อมโลหะคู่นี้และด้วยปัจจัยการเชื่อมนี้ ค่าความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

(Pitting potential) เกิดจากอิทธิพลของปริมาณโครเมียมที่ผสมมากกว่าบทบาทปริมาณของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่ลดลง ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองที่ Wichan Chuaiphan et al. (2020) ได้ทดลองเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ซีรีย์ 200 เกรด 201 โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนผสมในแก๊สอาร์กอน ซึ่งพบว่า แก๊สไฮโดรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนสูงขึ้นตาม ซึ่งได้รับอิทธิพลโดยตรงจากปริมาณของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่อยู่ในเนื้อเชื่อม อย่างไรก็ตาม กลไกของจุดเริ่มต้นการกัดกร่อนแบบรูเข็มยังคงเริ่มที่รอยต่อระหว่างเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์กับเฟสออสเทนไนต์ซึ่งเป็นพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่มีเฟสโครงสร้างออสเทนไนต์ผสมอยู่ในโครงสร้างจุลภาคพื้นฐาน



รูปที่ 9.63 อิทธิพลของไฮโดรเจนต่อการเกิดเดลตาเฟอร์ไรต์แนวเชื่อมโลหะต่างชนิดซีรีย์ 200

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. *Journal of Manufacturing processes*. Vol.58, pp. 163–178, 2020

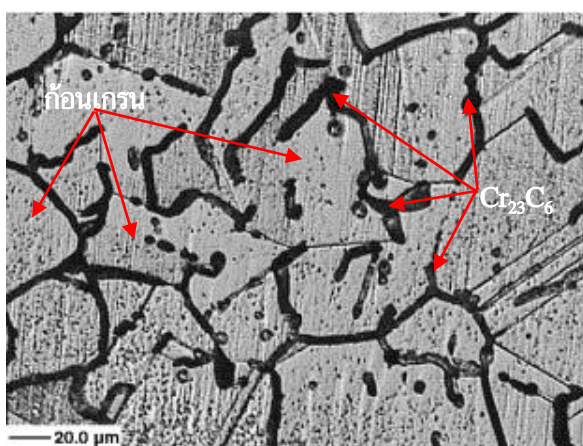


รูปที่ 9.64 อิทธิพลของไฮโดรเจนต่อการกัดกร่อนรูเข็มแนวเชื่อมโลหะต่างชนิดซีรีย์ 200

ที่มา : Wichan Chuaiphan et al. *Journal of Manufacturing Processes*. Vol.58, pp. 163–178, 2020

9.6 การกัดกร่อนตามขอบเกรนของแนวเชื่อม (Intergranular corrosion of weldments)

การเชื่อมโลหะแบบหลอมละลายของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะมีโอกาสเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนขึ้นที่บริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone : HAZ) เพราะขบวนการเชื่อมที่ต้องใช้ความร้อนในการหลอมละลายให้โลหะติดกัน ต้นเหตุของการกัดกร่อนรูปแบบนี้เกิดจากความพร่องของปริมาณโครเมียมในเนื้อโลหะที่หายไปบางส่วน ซึ่งที่ยังคงเหลืออยู่ก็ไม่มากเพียงพอต่อการสร้างออกไซด์ฟิล์มเพื่อป้องกันการกัดกร่อน โดยโครเมียมที่หายไปจะไปรวมตัวกับคาร์บอนอยู่ในรูปของสารประกอบโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr_2C_6) และตกผลึกอยู่ตามขอบเกรน (Grainboundary) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนเชื่อมแต่ไม่หลอมละลายมีโอกาสเกิดขึ้นได้ง่าย เพราะกลไกการตกผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์เกิดได้ง่ายในช่วงอุณหภูมิสูงประมาณ $415-850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งช่วงอุณหภูมินี้ก็คือบริเวณ HAZ ของแนวเชื่อม ดังแสดงลักษณะของโครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ ที่เกิดการตกผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรนของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 ในรูปที่ 9.65

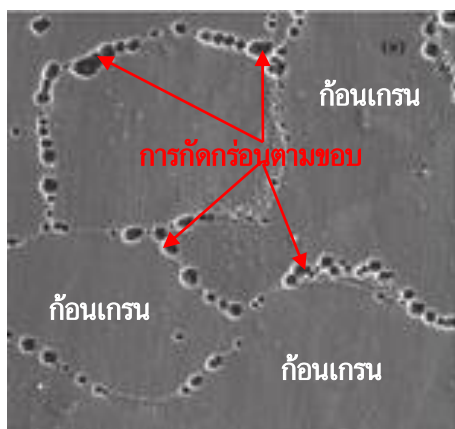


รูปที่ 9.65 การเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตกผลึกตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

ที่มา : A. Yae Kina et al. *Journal of Materials Characterization*. Vol.59, Issue 5, pp. 651–655, 2008

กลไกของการกัดกร่อนตามขอบเกรนที่เรียกกันว่า “Intergranular corrosion” นี้เป็นรูปแบบของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบริเวณที่ผิวของชิ้นงานโลหะแล้วถูกลามเข้าไปภายในเนื้อโลหะลึกลงไปตามขอบของก่อนเกรน โดยเป็นปฏิกิริยาคาโทดิกที่เกิดสภาพขั้วไฟฟ้าคาโทด (Cathode) ที่เนื้อก่อนเกรน และเกิดสภาพขั้วไฟฟ้าแอโนด (Anode) ที่ขอบเกรน จุดเริ่มต้นของการกัดกร่อนเป็นการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting) ที่เกิดจากฟิล์มออกไซด์ที่บริเวณผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมแตก (Passive film fracture) สร้างรูเล็กขึ้นที่ฟิล์มออกไซด์จากนั้นก็กัดลึกลงในเนื้อโลหะ ซึ่งบริเวณที่ฟิล์มแตกจะเป็นตำแหน่งที่มีโครเมียมพร่องหายไปทีละน้อยไปเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ ก็คือตำแหน่งของขอบเกรนและประจวบเหมาะ กับบริเวณขอบเกรนที่มีสภาพขั้วเป็นแอโนดมีสมบัติพร้อมสูญเสียเนื้อโลหะได้ง่ายจึงสอดคล้องกับการถูกลามการกัดกร่อนตามขอบเกรนได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น และถ้าเนื้อโลหะแนวเชื่อมมีการตกผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์ที่ปริมาณมาก การสูญเสียของโครเมียมก็จะสูงขึ้นขอบเกรนที่จะเป็นขั้วแอโนดก็มาก

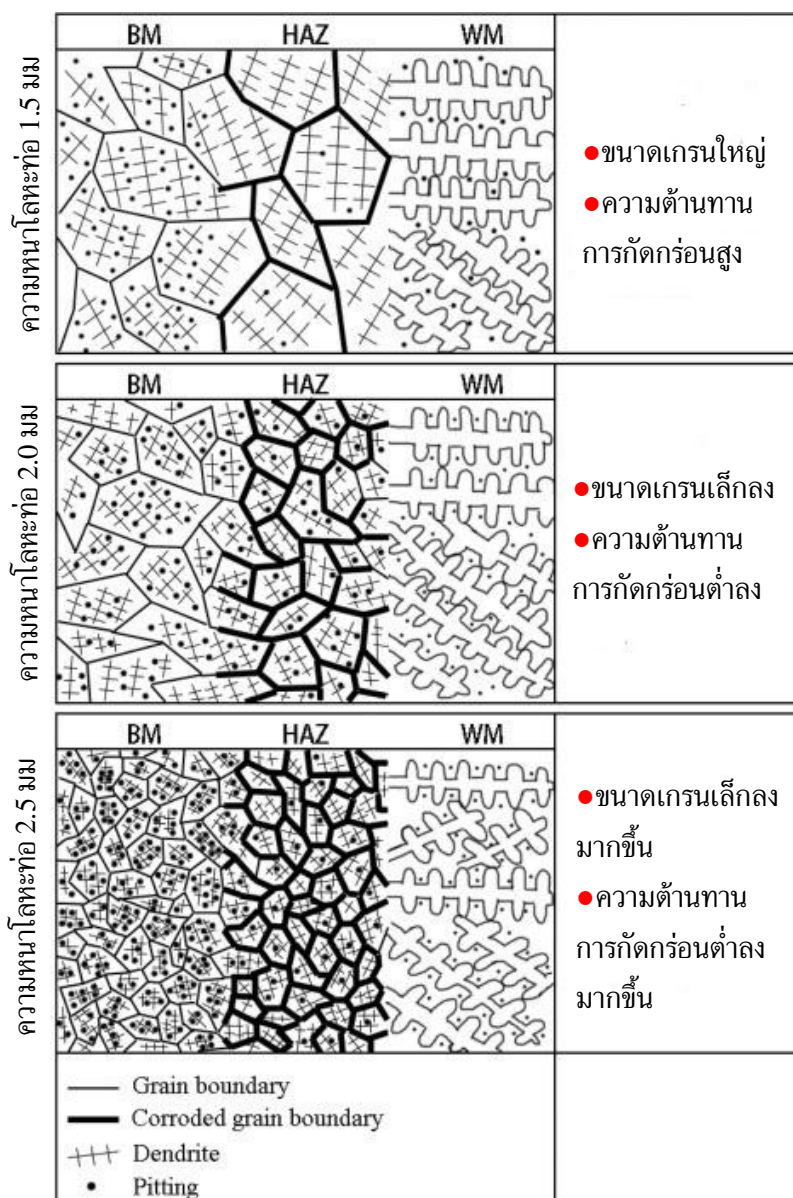
ขึ้น ดังนั้น โอกาสของการที่เกิดกัดกร่อนตามขอบเกรนก็รุนแรงมากขึ้น ดังแสดงลักษณะรูปแบบของการกัดกร่อนตามขอบเกรนในรูปที่ 9.66



รูปที่ 9.66 การกัดกร่อนตามขอบเกรนที่มีโครเมียมคาร์ไบด์ตกผลึกตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

ที่มา : A. Yae Kina et al. *Journal of Materials Characterization*. Vol.59, Issue 5, pp. 651–655, 2008

ขนาดของก่อนเกรน (Grain size) มีอิทธิพลต่อความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion resistance) ที่เกิดขึ้นตามขอบเกรน โดยจากผลการวิจัยทดลองของ Lianyong Xu et al. (2019) ที่เชื่อมโลหะท่ที่มีโครเมียมผสมสูงโดยที่ความหนาของท่อต่างกัน ได้รายงานผลการทดลองไว้ว่าแนวเชื่อมของท่อที่บาง (1.5 มม) บริเวณกระทบร้อน (HAZ) มีขนาดก่อนเกรนที่ใหญ่ (Large grain size) มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้สูง และเมื่อเปรียบเทียบกับแนวเชื่อมของท่อที่หนาขึ้น (2.0 มม) พบว่า ขนาดของก่อนเกรนกลับมีขนาดเล็ก และความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนก็ลดต่ำลง และที่แนวเชื่อมของท่อที่หนาเพิ่มมากขึ้น (2.5 มม) ขนาดของก่อนเกรนมีขนาดเล็กมากขึ้น ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนก็จะยิ่งลดต่ำลง ดังแสดงผลการทดลองที่เขียนเป็นโมเดลแสดงขนาดของเกรนของแต่ละบริเวณของแนวเชื่อม พร้อมแสดงพื้นที่ของบริเวณที่จะเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนที่บริเวณกระทบร้อน และแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่จะเกิดในเนื้อเกรนที่ชิดกับขอบเกรนที่โครเมียมลดลง (Chromium depleted zone) ดังในรูปที่ 9.67 ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าว สามารถอธิบายได้บนเหตุผลเป็นเพราะอิทธิพลของจำนวนขอบเกรน กล่าวคือ กรณีที่ก่อนเกรนมีขนาดใหญ่ทำให้จำนวนพื้นที่ของขอบเกรนน้อย โอกาสที่จะเกิดตำแหน่งให้กัดกร่อนก็น้อยลงความต้านทานการกัดกร่อนก็ย่อมสูงขึ้น และในทางตรงกันข้ามถ้าขนาดเกรนเล็ก จำนวนพื้นที่ของขอบเกรนก็มีมากขึ้นโอกาสที่จะเกิดกัดกร่อนตามขอบเกรนก็มากขึ้นตาม ความต้านทานการกัดกร่อนก็ต้องลดลง ดังนั้น การควบคุมโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมที่บริเวณกระทบร้อนให้มีขนาดของก่อนเกรนที่ใหญ่สามารถช่วยในการเพิ่มค่าความต้านทานการกัดกร่อนตามขอบเกรนได้สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การกัดกร่อนตามขอบเกรนนี้ยังมีปัจจัยอื่นร่วมด้วยที่มีผลต่อการกัดกร่อน เพราะเป็นที่ทราบกันดีว่าตำแหน่งขอบเกรนเป็นที่รวมของสารประกอบอื่น ๆ หรือสารมลทินอื่น ๆ ที่ถูกผลึกออกมาจากก่อนเกรนและมารวมกันอยู่แบบไม่เป็นเนื้อเดียวกันจึงเป็นตัวลดความต้านทานการกัดกร่อนได้เช่นกัน



รูปที่ 9.66 ขนาดของก้อนเกรนที่มีผลต่อกลไกการกัดกร่อนตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิม

ที่มา : Lianyong Xu et al. *Journal of Corrosion Science*. Vol.160, 108164, 2019

จากหลักการและผลการวิจัยที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ของขบวนการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมหรือเหล็กกล้าผสมโครเมียมสูงมีโอกาสดังขึ้นเสมอ เพราะผลกระทบของความร้อนจากขบวนการเชื่อมแบบอาร์คหลอมละลายอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ แต่สามารถปรับปรุงแก้ไขได้ด้วยขบวนการทางความร้อน (Solution annealing) โดยการอบเพื่อสลายโครเมียมคาร์ไบด์ให้หมดไปนำโครเมียมคืนสู่เนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ซึ่งเป็นการขจัดต้นตอของการกัดกร่อนตามขอบเกรนหรือจะเรียกว่า “ตัดไฟแต่ต้นลม”

ดัชนีคำศัพท์บทที่ 9

Active gas – แก๊สปกคลุมที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเมื่อสัมผัสความร้อน

Aging treatment – ขบวนการทางความร้อนด้วยวิธีบ่ม

Alternative stainless steel – เหล็กกล้าไร้สนิมเกรดทางเลือกที่มีธาตุถูกนำมาใช้งานทดแทน

Asymmetric – แนวเชื่อมที่ไม่สมมาตรกันทั้งสองข้าง

Austenitic stainless steel – เหล็กกล้าไร้สนิมโครงสร้างพื้นออสเทนไนต์

Autogenously welding – เทคนิคการเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม

Backing gas – แก๊สปกคลุมด้านหลังแนวเชื่อม (Root side)

Base metal – โลหะหลักที่นำมาเชื่อมต่อกัน

Chromium carbide – สารประกอบของธาตุโครเมียมกับคาร์บอน (Cr_{23}C_6)

Chromium depletion zone – บริเวณที่เกิดการลดลงของธาตุโครเมียม

Cold crack – การแตกกร้าวในขณะที่แนวเชื่อมเย็นตัวไปแล้ว

Corrosion of dissimilar weldment – การกัดกร่อนของแนวเชื่อมโลหะต่างชนิด

Delta ferrite – เฟสโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่เกิดหลังการเย็นตัวของเนื้อเชื่อม

Different composition – ส่วนผสมที่ต่างกันของโลหะที่นำมาเชื่อม

Diffusion – การกระจายตัวของธาตุผสมแบบแพร่ซึม

Dilution – การละลายเจือจางของธาตุผสมในแนวเชื่อม

Dissimilar welding – การเชื่อมต่อกันของโลหะต่างชนิดหรือต่างเกรด

Duplex stainless steel – เหล็กกล้าไร้สนิมโครงสร้างพื้นผสมออสเทนไนต์-เฟอร์ไรต์

Ferrite stabilizer – มีความไวต่อการเกิดเฟสโครงสร้างเฟอร์ไรต์

Ferritic stainless steel – เหล็กกล้าไร้สนิมโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์

Fine grain – โครงสร้างเกรนที่มีความละเอียดหรือขนาดเล็ก

Fusion area – บริเวณพื้นที่ของส่วนที่หลอมละลาย

Fusion welding – การเชื่อมโลหะแบบโลหะหลักลหลอมละลาย

Fusion zone width – ความกว้างของรอยเชื่อม

Grain boundary – ขอบรอยต่อระหว่างก้อนเกรน

Grain size – ขนาดของก้อนเกรน

Heat affecter zone – บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนเชื่อม

Heat conductivity – สมบัติค่าการนำความร้อนของโลหะที่นำมาเชื่อม

Heat input – ความร้อนที่ป้อนเข้าไปในการอาร์กหลอมละลาย

Homogeneous weldment – แนวเชื่อมที่มีโลหะเป็นเนื้อเดียวกัน

Hot crack – การแตกร้าวในขณะที่แนวเชื่อมกำลังร้อน

Inert gas – แก๊สปกคลุมที่ไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา

Interface zone – บริเวณรอยต่อระหว่างส่วนที่หลอมกับไม่หลอมละลาย

Intergranular corrosion – การกัดกร่อนตามขอบเกรนที่พองโครเมียม

Longitudinal tensile test – การทดสอบแรงดึงตามแนวยาวของแนวเชื่อม

Martensitic stainless steel – เหล็กกล้าไร้สนิมโครงสร้างพื้นมาร์เทนไซต์

Matrix structure – โครงสร้างพื้นหรือโครงสร้างหลักของเนื้อโลหะชนิดนั้น

Micro-hardness mapping – การวัดค่าความแข็งแบบแผนที่

Mixtures gas – แก๊สผสมสำหรับใช้ปกคลุมบ่อหลอมละลาย

Non-dissolved carbide – เฟสคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัว

Non-fusion welding – การเชื่อมโลหะแบบโลหะหลักไม่หลอมละลาย

Non-magnetic structure – โครงสร้างที่มีสมบัติไม่ดูดติดแม่เหล็ก

Optimization – ปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสม

Oxide film – ผิวนอกที่เกิดจากออกไซด์ของโครเมียมของเหล็กกล้าไร้สนิม

Pitting corrosion – การกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือแบบหลุม

PMZ – เป็นคำย่อที่แสดงถึงบริเวณที่หลอมละลายบางส่วน (Partially melted zone)

Potentiodynamic – วิธีการทดสอบการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting test)

Precipitation hardening – การเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีการตกผลึกของธาตุผสม

Precipitation hardening stainless steel – เหล็กกล้าไร้สนิมโครงสร้างชุบแข็งโดยการตกผลึก

Pure inert gas – แก๊สเฉื่อยที่มีความบริสุทธิ์สูง (99.999%)

Schaeffler diagram – แผนภาพทำนายโครงสร้างจุลภาคเหล็กกล้าไร้สนิม

Sensitized zone : SZ – บริเวณที่เกิดสารประกอบโครเมียมคาร์ไบด์

Series 200 – เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติกที่ผสมธาตุ Cr + Mn เป็นหลัก

Series 300 – เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติกที่ผสมธาตุ Cr + Ni เป็นหลัก

Shielding gas – แก๊สที่ใช้สำหรับปกคลุมบ่อหลอมละลาย

Similar welding – การเชื่อมต่อโลหะชนิดเดียวกันหรือเกรดเดียวกัน

Solidification of metal – กลไกการแข็งตัวของน้ำโลหะเชื่อม

Solution heat treatment : SHT – การอบด้วยความร้อนเพื่อละลายเฟสให้เป็นเนื้อเดียวกัน

Spray transfer – การถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบละออง

Stainless steel – เหล็กกล้าไร้สนิมทนการกัดกร่อน

Thermal expansion – ค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนจากการเชื่อม

Transverse section hardness – การวัดค่าความแข็งตามแนวขวางของแนวเชื่อม

Uniform corrosion – การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอทั่วผิวน้ำ

Vermicular ferrite – รูปทรงของเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ที่เป็นเส้น ๆ

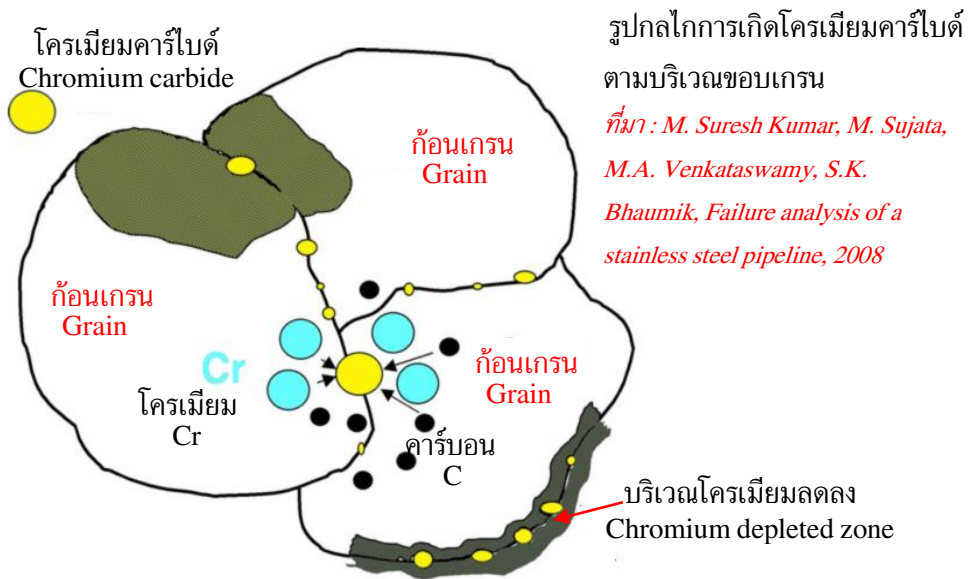
Volumetric heat capacities – สมบัติด้านค่าความจุความร้อน

Weld bead shape – รูปร่างหรือรูปทรงของแนวเชื่อม

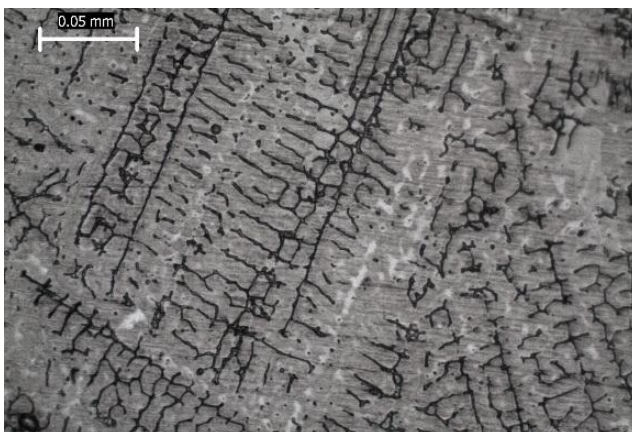
Welding speed – ความเร็วของการเดินหัวเชื่อม

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 9

- ข้อที่ 1. จงบอกถึงข้อเด่น-ข้อด้อยของเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละชนิด (ควรเขียนเป็นตาราง)
- ข้อที่ 2. จงอธิบายความแตกต่างของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกซีรีส์ 200 กับซีรีส์ 300
- ข้อที่ 3. จากรูปข้างล่างนี้ จงอธิบายกลไกการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรน



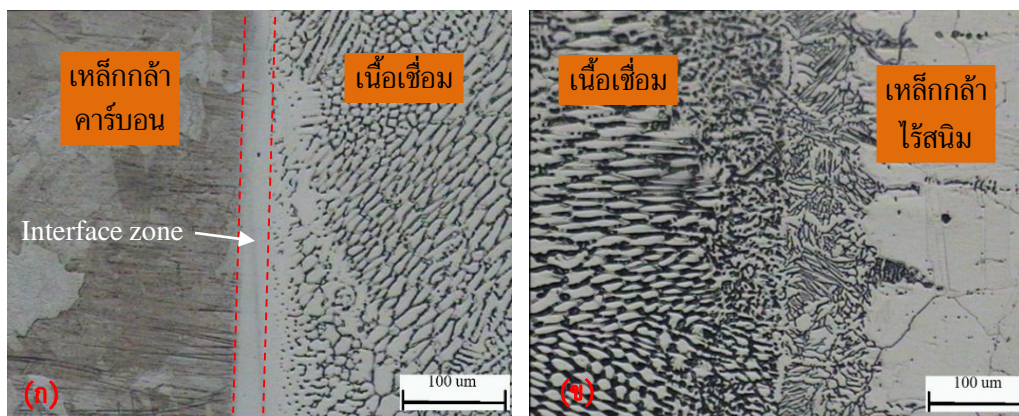
- ข้อที่ 4. จากรูปโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ที่ประกอบด้วยโครงสร้างเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ในโครงสร้างพื้นออสเทนไนต์ จงอธิบายถึงกลไกของการเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์มาให้เข้าใจ



รูปเนื้อเชื่อมที่แสดงเฟสเดลตา
เฟอร์ไรต์ในโครงสร้างพื้นออส
เทนไนต์ของเหล็กกล้าไร้สนิม
ออสเทนนิติก

ที่มา : Wichan Chuaiphan, et al.,
Journal of Materials Processing
Technology, Vol. 214, 2014

ข้อที่ 5. จงอธิบายเหตุผลของความแตกต่างของตำแหน่ง Interface zone ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกกับเหล็กกล้าคาร์บอน อ้างอิงจากรูปข้างล่างนี้



รูป Interface zone ของแนวเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน

ที่มา : Wichan Chuaiphan, et al., *Journal of Advanced Joining Processes*. Vol. 2, 2020

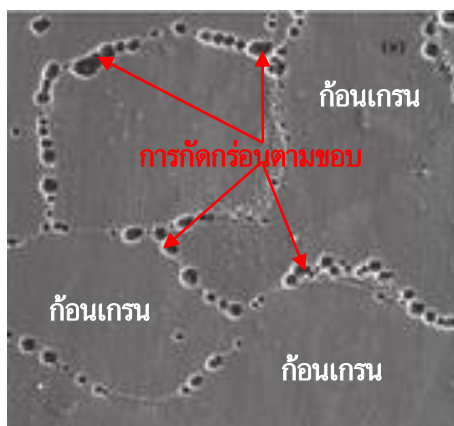
ข้อที่ 6. จงอธิบายถึงความแตกต่างของ Inert gas กับ Active gas สำหรับแก๊สปกคลุมแนวเชื่อม

ข้อที่ 7. จงบอกถึงพฤติกรรมของแก๊สไนโตรเจน (N_2) กับแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ที่มีต่อขบวนการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

ข้อที่ 8. จงอธิบายกลไกการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาพอเข้าใจ (โดยวาดภาพประกอบคำอธิบาย)

ข้อที่ 9. จงอธิบายความสัมพันธ์ของปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ต่อความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

ข้อที่ 10. จงอธิบายถึงกลไกของการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion) ของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก โดยอ้างอิงภาพข้างล่างนี้ในการอธิบาย



รูปการกัดกร่อนตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

ที่มา : A. Yae Kina et al. *Journal of Materials Characterization*. Vol.59, Issue 5, pp. 651–655, 2008

บรรณานุกรมบทที่ 9

- มนูญ เลิศวิจิตรพันธุ์ *การกัดกร่อน SCC ของงานเชื่อมเหล็กกล้าออสเทนนิติกสแตนเลส AISI 304 (Stress Corrosion Cracking of Welded AISI 304 Austenitic Stainless Steel)* วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ 2 ฉบับพิเศษ สิงหาคม 2549
- A. Durgutlu. *Experimental Investigation of the Effect of Hydrogen in Argon as a Shielding Gas on TIG Welding of Austenitic Stainless Steel*. Journal of Materials Design. Vol. 25, pp. 19–23, 2015.
- Anbarasan N., Jerome S., Arivazhagan N. *Argon and Argon–hydrogen Shielding Gas Effects on the Laves Phase formation and Corrosion behavior of Inconel 718 Gas Tungsten Arc Welds*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 263, pp. 374–384, 2019.
- A.V. Bansod, A.P. Patil and S. Shukla. *Effect of Heat on Microstructure, Mechanical and Electrochemical Evaluation of Tungsten Inert Gas Welding of Low–Nickel ASS*. Journal of Anti–Corr. Met. Mater, Vol. 65, pp. 605–615, 2018.
- A. Yae Kina, V.M. Souza, S.S.M. Tavares, J.M. Pardal and J.A. Souza. *Microstructure and Intergranular Corrosion Resistance Evaluation of AISI 304 Steel for High Temperature Service*. Journal of Materials Characterization, Vol. 59, Issue 5, pp. 651–655, 2008.
- C. Lerone and H. W. Kerr. *The Ferrite to Austenite Transformation in Stainless Steel*. Journal of Materials Science, ID: 150381707, 2013.
- Erica Marcelino Freitas de Souza Silva, Glaucio Soares da Fonseca and Elivelton Alves Ferreiar. *Microstructure and Selective Dissolution Analysis of 316L Austenitic Stainless Steel*. Journal of Materilas Research and Technology, Vol. 15, pp. 4317–4329, 2021.
- Himanshu Vashishtha and Rajesh K. Khatirkar. *Welding Behavior of Low Nickel Chrome – Manganese Stainless Steel*. ISIJ International, Vol. 54, No.6, pp. 1361–1367, 2014.
- H.M. Soltani and M.Tayebe. *Comparative Study of AISI 304L to AISI 316L Stainless Steel Joints by TIG and Nd:YAG Laser Welding*. Journal of Alloy. Compd. Vol. 767, pp. 112–121, 2018.
- H. Naffakh, M. Shamanian and F. Ashrafizadeh. *Dissimilar welding of AISI 301 Austenitic Stainless Steel to Nickel–Based Alloy Inconel*. Journal of Material Processing Technology, Vol. 209, pp. 3628–3639, 2009.

- H. Vashishtha, R.V. Taiwade, S. Sharma and A.P. Patil. *Effect of Welding Processes on Microstructural and Mechanical properties of Dissimilar Weldments between Conventional Austenitic Stainless Steels*. Journal of Manufacturing Processes, Vol. 25, pp. 49–59, 2017.
- I. Bitharas, S.W. Campbell, A.M. Galloway, N.A. McPherson and A.J. Moore. *Visualization of Alternating Shielding Gas Flow in GTAW*. Journal of Materials and Design, Vol. 91, pp. 424–431, 2016.
- ISSF : *International Stainless Steel Forum. Stainless Steel in Figures*. Published by ISSF, 2020.
- Jeng SL, Lee HT, Weirich TE and Rebach WP. *Microstructural Study of the Dissimilar Joints of Alloy 690 and SUS 304L Stainless Steel*. Journal of Materials Trans. Vol. 48, pp. 481–489, 2017.
- J. Verma and R.V. Taiwade. *Dissimilar Welding Behavior of 22% Cr Series Stainless Steel with 316L and its Corrosion Resistance in Modified Aggressive Environment*. Journal of Manufacturing Processes. Vol. 24, pp. 1–10, 2016.
- J. W. Fu, Y.S. Yang, J.J. Guo and W.H. Tong. *Effect of Cooling Rate on Solidification Microstructure in AISI 304 Stainless Steel*. Journal of Materials Science and Technology. Vol. 24, Issue 8, 2013.
- Lian-Fu Li, Zhou-Hua Jiang, Yves Riquier. *High Temperature Oxidation of Duplex Stainless Steel in Air and Mixed Gas of Air and CH₄*. Journal of Corrosion Science, Vol. 47(1) pp. 57–68, 2005.
- Lianyong Xu, Jianyang Zhang, Yongdian Han, Lei Zhao and Hongyang Jing. *Insights into the Intergranular Corrosion of Overlay Welded Joints of X65–Inconel 625 Clad Pipe and Its Relationship to Damage Penetration*. Journal of Corrosion Science. Vol. 160, 2019.
- Mehdi Safari, Hossein Mostaan and Ebrahim Derakhshan. *Microstructural and Mechanical Studies of the Dissimilar Tabular Joints of Incoloy Alloy 825 and AISI 316 Stainless Steel*. Journal of Marine Engineering & Technology, 2018.
- Mortezaie A. and Shamanian M. *An Assessment of Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Dissimilar Welds between Inconel 718 and 301S Austenitic Stainless Steel*. International Press Vessels Piping, 116, pp. 37–46.

- M.P. Prabakaran and G.R. Kannan. *Optimization of Laser Welding Process Parameters in Dissimilar Joint of Stainless Steel AISI316 and AISI1018 Low Carbon Steel to Attain the Maximum Level of Mechanical Properties Through PWHT*. Journal of Optical Laser Technology, Vol. 112, pp. 314–322, 2019.
- M. Sadeghian, M. Shamanian and A. Shafyei. *Effect of Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Joints between Super duplex Stainless steel and High Strength Low Alloy Steel*. Journal of Materials & Design, Vol. 60, pp. 678–684, 2014.
- M. Shimada, H. Kokawa, Z.J. Wang, Y.S. Sato and I. Karibe. *Optimization of Grain Boundary Character Distribution for Intergranular Corrosion Resistant 304 Stainless Steel by Twin-induced Grain Boundary Engineering*. Acta Materialia Vol. 50, pp. 2331–2341, 2002.
- N. Arivazhagan, S. Singh, S. Prakash and G.M. Reddy. *Investigation on AISI 304 Austenitic Stainless Steel to AISI 4140 Low Alloy Steel Dissimilar Joints by Gas Tungsten Arc, Electron Beam and Friction Welding*. Journal of Materials Design. Vol. 32, pp. 3036–3050, 2011.
- Ramkumar KD, Mithilesh P, Varun D, Reddy ARG, Arivazhagan N, Narayanan S and Kumar KG. *Characterization of Microstructure and Mechanical Properties of Inconel 625 and AISI 304 Dissimilar Weldments*. ISIJ International, Vol. 54, pp. 900–908. 2014.
- Ramkumar T, Selvakumar M, Narayanasamy P, Begam AA, Mathavan P and Raj AA. *Studies on the Structure properties, Mechanical Relationships and Corrosion Behaviour of Inconel 718 and SS 316L Dissimilar Joints by TIG Welding without Using Activated Flux*. Journal of Manufacturing Processes. Vol. 30, pp. 290–298, 2017
- R. Ghasemi, B. Beidokhti and M. Fazel–Najafabadi. *Effect of Delta Ferrite on the Mechanical Properties of Dissimilar Ferritic –Austenitic Stainless Steel Welds*. Arch. Metall. Mater. 63, No. 1, pp. 437–443.
- Saeed Hosseinzadeh and Massoud Goodarzi. *Influence of Shielding Gas Composition and Pulsed Current Frequency on the Microstructure of Austenitic Stainless Steel Welded by Pulsed Current GTAW*. Trans Indian Inst. Met. IIM, 2021.
- Saulius Baskutis, Jolanta Baskutiene, Regita Bendikiene, Antanas Ciuplys and Karolis Dutkus. *Comparative Research of Microstructure and Mechanical Properties of Stainless steel Dissimilar Welds*. Journal of MDPI–Materials, Vol. 14, 6180, 2021.

Schaeffler, A.L. *Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metal*. Metal Progress 56 (11) : 680–680B. 1949.

SEAISI : *South East Asia Iron and Steel Institute. ASEAN Steel Industry : Steel Market Developments, Steel Committee Meeting, OECD*. By Yeoh Wee Jin Secretary General, March 19, 2021.

T. Masumura, N. Nakada, T. Tsuchiyama, S. Takaki, T. Koyano and K. Adachi. *The Different in Thermal and Mechanical Stabilities of Austenite between Carbon – and Nitrogen– Added Metastable Austenitic Stainless Steels*. Journal of Acta Mater. Vol. 84, pp. 330–388, 2015.

Vipin Tandon, Manish A. Thombre, Awanikumar P. Patil, Ravindra V. Taiwade and Himanshu Vashishtha. *Effect of Heat Input on the Microstructure, Mechanical, and Corrosion Properties of Dissimilar Weldment of Conventional Austenitic Stainless Steel and Low –Nickel Stainless Steel*. Journal of Metallography, Microstructure and Analysis. Vol. 9, pp. 668–677, 2020.

Wang W., Lu Y, Ding X. and Shoji T. *Microstructures and Microhardness at Fusion Boundary of 316 Stainless Steel/Inconel 182 in High Temperature and High Pressure Water*. Journal of Materials Characteristic, Vol. 131, pp. 339–347, 2017.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Microstructure, Mechanical Properties and Pitting Corrosion of TIG Weld Joints Alternative Low Cost Austenitic Stainless Steel Grade 216*. Journal of Advance Joining processes Vol. 2, 100027, 2020.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Optimization of TIG Welding Parameter in Dissimilar Joints of Low Nickel Stainless Steel AISI 205 and AISI 216*. Journal of Manufacturing Processes. Vol. 58, pp. 163–178, 2020.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Effect of Hydrogen in Argon Shielding Gas for Welding Stainless Steel Grade SUS 201 by GTAW Welding Processes*. Journal of Advance Joining Processes Vol.1, 1000016, 2020.

Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Optimization of Gas Tungsten Arc Welding Parameters for the Dissimilar Welding Between AISI 304 and AISI 201 Stainless Steels*. Journal of Defence Technology, Vol.15, pp. 170–178.

- Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Evaluation of Microstructure, Mechanical Properties and Pitting Corrosion in Dissimilar of Alternative Low Cost Stainless Steel Grade 204CU and 304 by GTA Welding Joint*. Journal of Materials Research and Technology, Vol. 9(3), pp. 5147–5183, 2020.
- Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Heat Input and Shielding Gas Effects on the Microstructure, Mechanical Properties and Pitting Corrosion of Alternative Low Cost Stainless Steel Grade 202*. Journal of Result in Materials, Vol. 7, 100111, 2020.
- Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Effect of Welding Speed on Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of GTA–Welded AISI 201 Stainless Steel Sheets*. Journal of Material Processing Technology, Vol. 214, pp. 402–408, 2014.
- Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Effect of Filler Alloy on Microstructure, Mechanical and Corrosion Behavior of Dissimilar Weldment between AISI 201 Stainless Steel and Low Carbon Steel Sheets Produced by A Gas Tungsten Arc Welding*. Journal of Advance Materials Research, Vol. 581–582, pp. 808–816, 2012.
- Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *The Behavior of Nitrogen on the Welding Parameter of the Dissimilar Weld Joints between AISI 304 and AISI 316L Austenitic Stainless Steel Produced by Gas Tungsten Arc Welding*. Journal of Applied Mechanic and Materials, Vol. 248, pp. 365–410, 2012.
- Wichan Chuaiphan, Chandra Ambhorn Somrer, Satian Niltawach and Banleng Sornil. *Dissimilar Welding between AISI 304 Stainless Steel and AISI 1020 Carbon Steel Plates*. Journal of Applied Mechanics and Materials, Vol. 238–270, pp. 283–290.
- Wichan Chuaiphan, Chandra Ambhorn Somrer, Banleng Sornil and Wolfgang Bleck. *Microstructure, Mechanical and Corrosion Behavior of Dissimilar Weldments between AISI 304 Stainless Steel and AISI 1020 Carbon Steel Produced by Gas Tungsten Arc Welding Using Different Consumables*. Journal of Key Engineering Materials, Vol. 410–411, pp. 533–541, 2009.
- Xiaoyu Cai, Chenglei Fan, Sanbao Lin, Xiangru Ji, Chunli Yang and Wenxuan Guo. *Effect of Shielding Gas Composition on Arc properties and Wire Melting Characteristics in Narrow Gap MAG Welding*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 244, pp. 225–230, 2017.

Xiaoyu Cai, Bolun Dong, Sanbao Lin, Anthony B. Murphy, Chenglei Fan and Chunli Yang.

Heat Source Characteristics of Ternary–Gas–Shielded Tandem Narrow– Gap GMAW.

Journal of MDPI–Materials, 29 April 2019.

Y. Fu, X. Wu, E.N. Han, W. Ke, K. Yang and Z. Jiang. *Effects of Nitrogen on the Passivation of Nickel–Free High Nitrogen and Manganese Stainless Steels in Acidic Chloride*

Solution. Journal of Electrochim. Acta, Vol. 54, pp. 4005–1014, 2009.