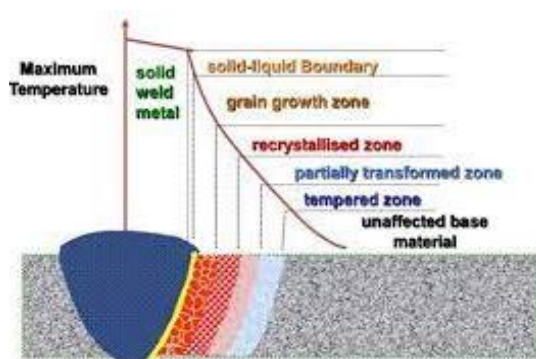
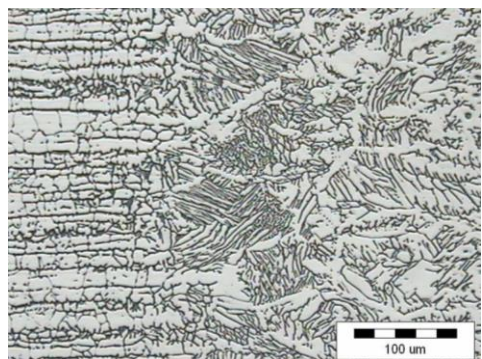


บทที่ 6

โลหะวิทยาในการเชื่อม Welding Metallurgy



ที่มา : IJESIT–Prediction of HAZ, 2015



ที่มา : วิชาญ ช่วยพันธ์ – โลหะการวิศวกรรม 2560

จุดประสงค์การเรียนรู้ บทที่ 6 โลหะวิทยาในการเชื่อม

- รู้และเข้าใจถึงความหมายและความสำคัญของอิทธิพลทางด้านโลหะวิทยาที่มีต่อขบวนการเชื่อม
- รู้และเข้าใจถึงปัจจัยการเชื่อมที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาของเนื้อเชื่อม
- สามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนที่จะป้อนเข้าในระหว่างการเชื่อมและมีผลกระทบในเชิงโลหะวิทยาของเนื้อเชื่อม
- รู้และเข้าใจถึงกลไกการเกิดโครงสร้างเกรนที่เกิดขึ้นจากการแข็งตัวของบ่อหลอมละลาย
- เข้าใจและสามารถอธิบายถึงผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อมที่มีต่อโลหะงานที่นำมาเชื่อม
- เข้าใจและสามารถคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางของส่วนผสมทางเคมีในเนื้อเชื่อม
- ตระหนักและมีจิตใต้สำนึกในการให้ความสำคัญกับความเสียหายของงานเชื่อมที่เกิดจากความบกพร่องของเนื้อเชื่อมในทางโลหะวิทยา

“Welding Metallurgy” หมายถึง บริบทของวัสดุโลหะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านขบวนการของการเชื่อม ซึ่งพฤติกรรมหรือกลไกของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับโลหะ ทั้งระหว่าง การเชื่อมและหลังการเชื่อมจะเกิดจากอิทธิพลที่ผสมผสานกันของทั้งขบวนการเชื่อม (Welding processes) และ ลักษณะเฉพาะทางโลหะวิทยาของวัสดุที่เชื่อม (Metallurgical characteristics) ดังนั้น เราจึงเรียก ลักษณะการเปลี่ยนแปลงโดยรวมที่เกิดขึ้นนี้ว่า “โลหะวิทยางานเชื่อม” วิศวกรช่างเชื่อมที่เก่ง จะต้องมีความรู้ความเข้าใจถึงโลหะวิทยาของวัสดุที่จะนำมาทำการเชื่อม เพราะอิทธิพลทางโลหะวิทยาของวัสดุจะมีบทบาทสำคัญในการที่จะกำหนดหรือเลือกกรรมวิธีการเชื่อม (Welding processes) ปัจจัยการเชื่อม (Welding parameters) รวมถึงการออกแบบการเชื่อม (Welding design) ที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังมีบทบาทในภาคส่วนของการทดสอบคุณภาพแนวเชื่อมทั้งที่เป็น การทดสอบแบบทำลาย (Destructive testing) และการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive testing) ด้วยบทบาททางโลหะวิทยาของวัสดุ ที่มีผลกระทบโดยตรงต่อขบวนการเชื่อมอย่างเด่นชัดดังที่กล่าวมานั้น ประจวบกับจากประสบการณ์ของผู้เขียนเองที่ได้สัมผัสและได้ทำงานร่วมกับวิศวกร รวมถึงช่างเชื่อมฝีมือดีมานาน และเป็นผู้ทดสอบเพื่อออกไปรับรองวิศวกรการเชื่อมสากล (International Welding Engineering : IWE) ภายใต้สถาบันการเชื่อมแห่งประเทศไทย (Thailand Institute of Welding : WIT) พบว่าพื้นฐานองค์ความรู้ทางด้านโลหะวิทยางานเชื่อมของบุคคลากรที่ประกอบอาชีพด้านงานเชื่อมจะค่อนข้างน้อย จนบางครั้งสร้างความเสียหายต่องานเชื่อมอย่างมากมาย เพียงแค่ขาดความรู้ความเข้าใจอันเล็กน้อยของหลักการพื้นฐานทางโลหะวิทยา และบางครั้งยังเข้าใจผิดหรือเชื่อฟังกันมาแบบผิด ๆ ผู้เขียนจึงได้ตระหนักในเรื่องนี้และเล็งเห็นว่าวิศวกร ช่างเชื่อมหรือบุคคลที่สนใจงานด้านเทคโนโลยีการเชื่อม ควรจะต้องมีความรู้ความเข้าใจบทบาททางด้านโลหะวิทยาของวัสดุโลหะที่จะนำมาเชื่อมมากเพียงพอ เพื่อที่จะช่วยในการสร้างบุคลากรด้านงานเชื่อมที่มีคุณภาพและลดปัญหาความเสียหายที่เกิดจากเชื่อมลง รวมไปถึงการก้าวทันกับเทคโนโลยีการเชื่อมที่ปัจจุบันได้มีการพัฒนาก้าวหน้าไปมากแล้ว โดยเนื้อหาสาระของบทเรียนนี้จะได้กล่าวถึงบริบททางโลหะวิทยาที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการกรรมวิธีการเชื่อมและปัจจัยการเชื่อมและอิทธิพลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะแยกเป็นเป็นด้าน ๆ เพื่อลดความยากในการทำ ความเข้าใจดังรายละเอียดต่อไปนี้

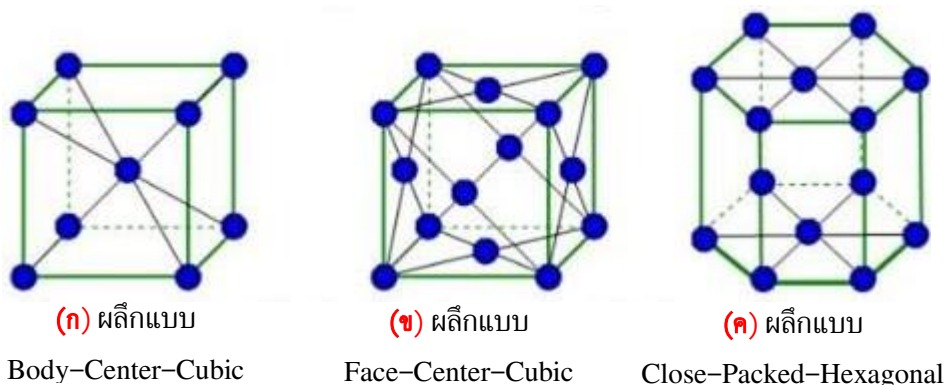
6.1 โครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallurgical structure)

โครงสร้างของโลหะ (Structure) เป็นโลหะวิทยาทางกายภาพ (Physical metallurgy) ของวัสดุที่นำมาเชื่อม ซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลหลักที่สำคัญของการเชื่อม เพราะเป็นตัวบ่งชี้ถึงโครงสร้างภายในของเนื้อโลหะเชื่อมที่ได้ ที่เกี่ยวข้องและสัมพันธ์กับ โครงสร้างของผลึก (Crystal structure) และโครงสร้างของเกรนในแนวเชื่อม (Grain structure) รวมถึงสมบัติทางกล (Mechanical properties) ทางกายภาพ (Physical properties) และทางเคมี (Chemical properties) ของแนวเชื่อมที่ได้หลังการเชื่อมเสร็จสิ้นสมบูรณ์ ดังรายละเอียดเพิ่มเติมของแต่ละด้านดังต่อไปนี้

1. โครงสร้างของผลึก (Crystal structure)

วัสดุโลหะทุกชนิดจะเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างการเกาะยึดกันเป็นแบบระบบผลึก (Crystal system) โดยในทางกายภาพตามธรรมชาติโครงสร้างผลึกของโลหะมีได้ถึง 14 ชนิด แต่ที่พบในวัสดุโลหะทางวิศวกรรมมักจะพบ 3 ชนิดหลัก ๆ คือ ผลึกแบบ BCC แบบ FCC และ แบบ HCP ดังแสดงใน **รูปที่ 6.1 (ก) (ข) และ (ค)** ตามลำดับ ปกติธรรมชาติของโลหะจะมีระบบผลึกแบบเดียวเป็นสมบัติพื้นฐาน แต่อาจมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนตำแหน่งการเกาะยึดกัน เช่น โลหะเหล็ก (Fe) ที่มีทั้งการเกาะยึดแบบ BCC และ FCC ขึ้นอยู่กับระดับอุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งความแตกต่างจำนวนอะตอมและรูปทรงของผลึกจะส่งผลต่อพฤติกรรมและสมบัติของวัสดุโลหะได้ชัดเจน ไม่ว่าจะเป็นพฤติกรรมที่มีต่อความร้อน ต่ออัตราการเย็นตัว ต่อสมบัติความเป็นฉนวนแม่เหล็ก และต่อสมบัติทางกลในแต่ละด้านในการรับแรง เป็นต้น ซึ่งกล่าวไว้โดย Sindo Kou (2003)

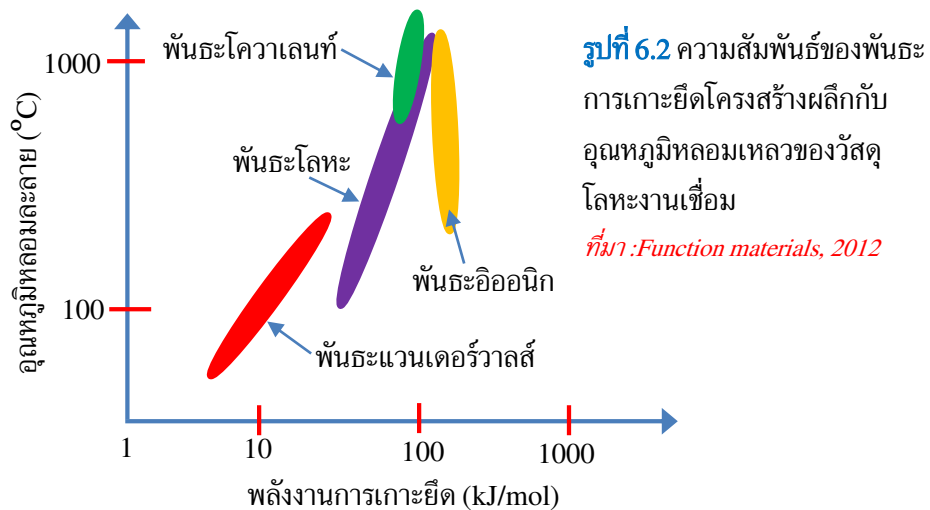
การเชื่อมส่วนใหญ่จะเป็นแบบเชื่อมหลอมละลาย (Fusion welding) ซึ่งก็หมายถึงการทำให้โลหะเกิดการหลอมละลายแล้วตอดิดกันแล้วปล่อยให้แข็งตัว ดังนั้นการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลว แล้วกลับไปเป็นของแข็งอีกครั้งนั้น ถ้ามีปัจจัยอื่น ๆ เข้ามามีส่วนร่วมก็ย่อมส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ไม่เหมือนเดิม ปัจจัยอื่น ๆ ที่ว่าในงานเชื่อม หมายถึง อัตราการเย็นตัว อิทธิพลของแก๊สปกคลุม ส่วนผสมทางเคมีของลวดเติม และสภาพแวดล้อมที่ทำการเชื่อม เป็นต้น ในบางครั้งเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเชื่อมแบบหลอมละลาย ก็ได้มีการหาเทคนิคหรือกรรมวิธีการเชื่อมแบบใหม่ที่ไม่ต้องหลอมละลายโลหะ เช่น การเชื่อมแบบความดันแบบกวน (FSW) ดังนั้นจะเห็นได้ชัดเจนว่ารูปแบบการจัดเรียงของโครงสร้างผลึกที่ได้หลักจากการเชื่อม จะมีผลต่อสมบัติของแนวเชื่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านสมบัติทางกล เช่น แนวเชื่อมที่เย็นตัวเร็วมากจะมีความแข็งแรงสูงกว่าการเย็นตัวช้า เพราะรูปแบบการจัดเรียงตัวของโครงสร้างเป็นระเบียบต่างกัน ซึ่งการเย็นตัวเร็วจะเรียงตัวไม่เป็นระเบียบแต่เมื่อมีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ความแข็งแรงของแนวเชื่อมก็จะลดลง อันเนื่องจากความร้อนมาช่วยลดความไม่เป็นระเบียบของการจัดเรียงโครงสร้างลง อ้างอิงตาม Baldev Raj (2008)



รูปที่ 6.1 โครงสร้างผลึกของวัสดุโลหะงานเชื่อม

ที่มา : Subtech .com, Under creative commons, 2017

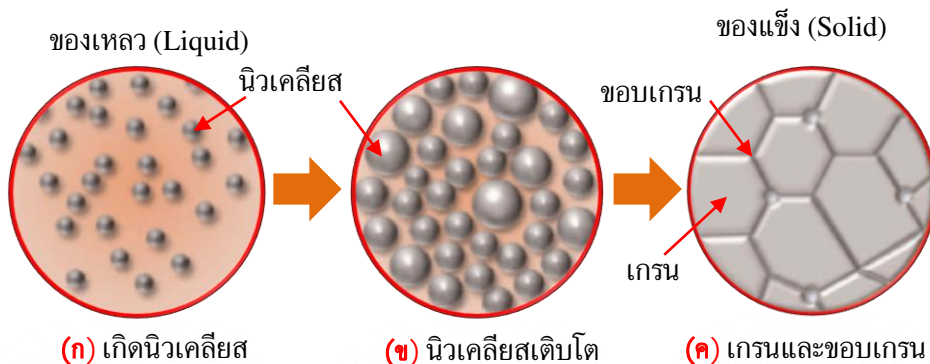
พันธะการเกาะยึดของโครงสร้างผลึกโลหะมีความแตกต่างกันตามธรรมชาติของโลหะแต่ละชนิด ซึ่งพันธะดังกล่าว คือ พันธะโลหะ (Metallic bond) พันธะไอออนิก (Ionic bond) พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) และพันธะแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) โดยพันธะแต่ละชนิดจะมีพลังงานของการยึดเกาะ (Bond energy) ไม่เท่ากัน พันธะที่มีพลังงานการยึดเกาะน้อยจะมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ ดังแสดงระดับอุณหภูมิหลอมละลายของพันธะต่าง ๆ ในรูปที่ 6.2 ซึ่งเป็นตรรกะหนึ่งซึ่งถึงการกำหนดปัจจัยการเชื่อมเรื่องการป้อนพลังงานความร้อน (Heat input) เข้าสู่ชิ้นงาน เพื่อให้โลหะเชื่อมเกิดการหลอมละลาย โดยจะมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการเชื่อมโลหะแบบโลหะต่างชนิดวัสดุ (Dissimilar welding) ซึ่งรวมไปถึงการเลือกจุดเชื่อมที่จะหลอมละลายเดิมเนื้อโลหะในแนวเชื่อมด้วย



2. โครงสร้างเกรน (Grain structure)

John C. Lippold et al. (2005) ได้กล่าวไว้ว่าวัสดุโลหะทุกชนิดจะมีระบบโครงสร้างที่เป็นแบบผลึก (Crystal structure) โดยมีจำนวนหลาย ๆ ผลึกมารวมตัวกัน (Polycrystalline) เป็นก้อนที่เรียกว่า เกรน (Grain) และในเนื้อของโลหะก็จะประกอบไปด้วยจำนวนเกรนที่มากมายมาวางต่อกัน ซึ่งรอยต่อของระหว่างก้อนเกรนจะเรียกว่าขอบเกรน (Grain boundary) โดยหลักธรรมชาติในวัสดุโลหะเดียวกันทั้งก้อนเกรนและขอบเกรนก็จะมีขนาดที่ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของปัจจัยในการเย็นตัวของเหลวไปเป็นของแข็ง ดังแสดงกลไกของการเกิดโครงสร้างเกรนในรูปที่ 6.3 โดยในรูป (ก) แสดงถึงน้ำโลหะหลอมเหลวเมื่อเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิของการเกิดนิวเคลียส ก็จะเกิดเป็นของแข็งเล็กๆ ทำมกลางของเหลว เมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิก็จะลดต่ำลงเรื่อย ๆ นิวเคลียสของแข็งก็จะเติบโตมากขึ้นจนทำให้สัดส่วนของแข็งมากกว่าของเหลว ดังแสดงในรูป (ข) จนเมื่ออุณหภูมิเย็นตัวลงถึงระดับอุณหภูมิห้องก็จะได้เป็นของแข็งทั้งหมดที่มีก้อนเกรนจำนวนมากเกาะติดกัน โดยมีรอยต่อของขอบเกรนที่อยู่ระหว่างก้อนของเกรน ดังแสดงในรูป (ค) ซึ่งกลไกของการเกิดโครงสร้างเกรนที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นหลักการในเชิงทางทฤษฎี (อุดมคติ) กล่าวคือเป็นการเย็นตัวที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่ความร้อนสามารถระบายออกไปได้ทุกทิศทางเท่า ๆ กัน แต่สำหรับการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายในการเชื่อมจะ

มีปัจจัยของทิศทางการระบายความร้อนที่มีความสามารถระบายความร้อนออกไปได้ในแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน ที่จะส่งผลกระทบต่อการจัดเรียงและทิศทางการเติบโตของเกรน อ้างอิงหลักการจาก Kenneth Easterling (2013) ดังที่จะอธิบายรายละเอียดเพิ่มเติมดังต่อไปนี้



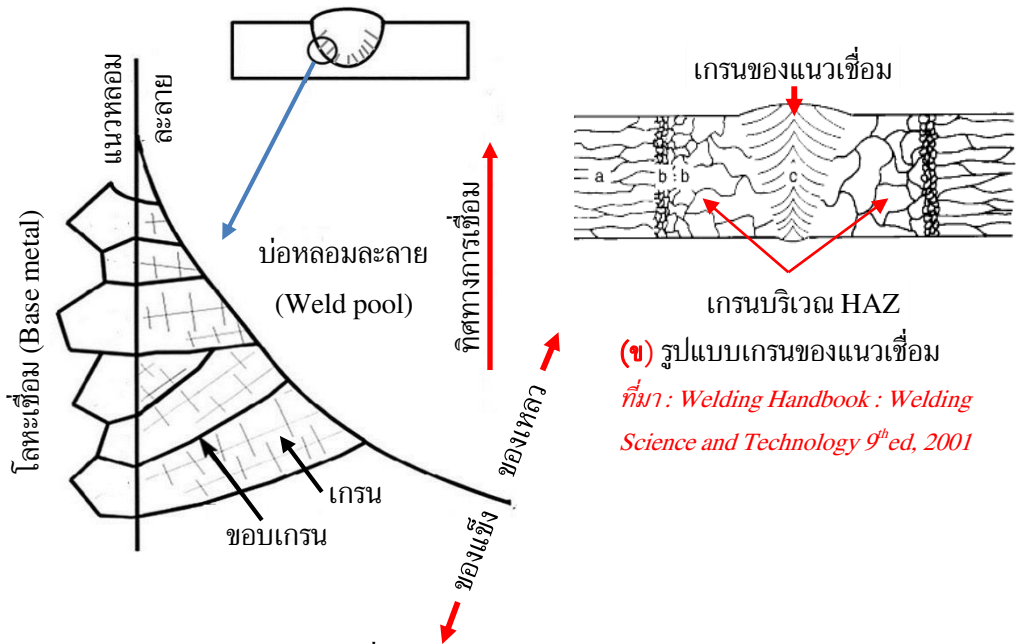
รูปที่ 6.3 กลไกของการเกิดโครงสร้างเกรนในเนื้อโลหะ

ที่มา : *Solidification mechanisms 1, 20125*

กลไกการเกิดโครงสร้างเกรนของโลหะในแนวเชื่อม ตามคำกล่าวของ Jinliang Zhang et al. (2019) ดังแสดงในรูปที่ 6.4 พบว่าถ้าพิจารณาเพียงลำดับของขั้นตอนในการเกิดก็จะเป็นไปตามหลักการเย็นตัวจากของเหลวไปเป็นของแข็ง (Solidification mechanism) แต่ในทางปฏิบัติพบว่ารูปแบบของการเกิดโครงสร้างเกรนจะแปรเปลี่ยนไปตามพฤติกรรมการระบายความร้อนของบ่อหลอมละลาย โดยความร้อนจะระบายผ่านเนื้อโลหะเชื่อม (Base metals) ได้ดีกว่าทางอากาศ (Environment) ดังนั้น ทิศทางของการเกิดเกรนจึงสวนทางกับทิศทางการระบายของความร้อนที่เข้าหาจุดกึ่งกลางของบ่อหลอมละลาย รูปร่างของเกรนก็จะเป็นแบบก้อนเรียวยาวที่เรียกกันว่า “Columnar grains” ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติความสามารถในการนำความร้อนของโลหะเชื่อม โดยอิทธิพลของความร้อนจากการเชื่อมที่ระบายผ่านโลหะเชื่อมยังส่งผลทำให้ส่วนที่ไม่ได้หลอมละลายก็เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเกรน ซึ่งเรียกบริเวณที่โครงสร้างเกรนเปลี่ยนแปลงนี้ว่า บริเวณผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone) หรือที่รู้จักกันดีในชื่อของ “HAZ” นั่นเอง และขนาดความกว้างของ HAZ ของแนวเชื่อมจะขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่ป้อนไปสู่แนวเชื่อม (Heat input) ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

ความเร็วในการเชื่อม (Welding speed) ยังเป็นปัจจัยการเชื่อมที่สำคัญต่อการกำหนดลักษณะรูปทรงของโครงสร้างแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 6.5 (ก) (ข) และ (ค) ที่เชื่อมด้วยระดับความเร็วที่ต่ำ ปานกลาง และสูงตามลำดับ จะเห็นได้ชัดเจนว่าการเชื่อมด้วยความเร็วที่ต่ำอัตราการเย็นตัวจะช้ามาก เนื่องจากความร้อนสะสมในบ่อหลอมละลายสูง ลักษณะของโครงสร้างเกรนจะเป็นแบบ Columnar โค้งค้อย ๆ เข้าหาจุดกึ่งกลางของบ่อหลอมละลาย (ไม่ตั้งฉาก) ส่งผลทำให้บ่อหลอมละลายมีรูปทรงเป็นรูปไข่หรือวงรี (Elliptical) และในทางกลับกัน ถ้าเชื่อมด้วยความเร็วเชื่อมที่สูง ลักษณะของโครงสร้างเกรนจะเป็นแบบ Columnar ที่ตั้งฉากกับเส้นกึ่งกลางของบ่อหลอมละลาย ซึ่งทำให้บ่อหลอมละลายมีรูปทรง

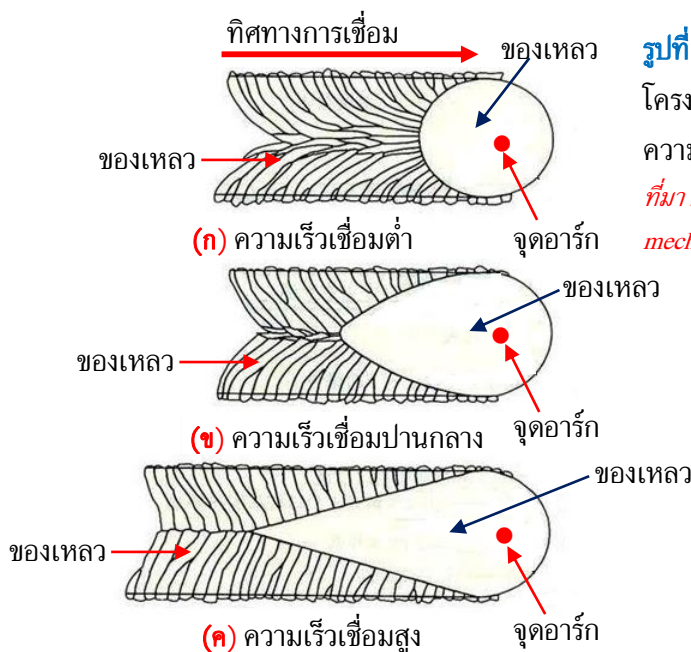
เป็นรูปหยดน้ำ (Teardrop) ส่วนกรณีที่ความเร็วเชื่อมปานกลางก็จะเกิดลักษณะของโครงสร้างเกรนที่ผสมกันของทั้งความเร็วเชื่อมต่ำและสูง อ้างอิงตามคำอธิบายของ John N. Dupont (2009)



(ก) กลไกการเกิดเกรนในแนวเชื่อม

ที่มา : *Journal of Materials Science & Technology*, 35, pp. 270–284, 2019

รูปที่ 6.4 การเกิดโครงสร้างของเกรนจากขบวนการเชื่อม



รูปที่ 6.5 กลไกของการเกิดโครงสร้างเกรนในเนื้อโลหะที่ความเร็วเชื่อมต่างกัน

ที่มา : *Solidification mechanisms 1*, 2015

3. ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานเชื่อม (Heat input)

ขบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) ต้องอาศัยองค์ประกอบหลักของปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานเชื่อม ที่เรียกกันนิยมกันว่า “Heat input” เป็นสำคัญ เพราะความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ขบวนการเชื่อมจะทำหน้าที่หลอมละลายโลหะชิ้นงาน (Base metals) สร้างเป็นบ่อหลอมละลาย (Weld pool) และยังต้องทำหน้าที่หลอมละลายโลหะเติม (Filler metal) โดยระดับของปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าไปจะต้องสูงมากเพียงพอที่จะหลอมโลหะที่เชื่อมและต้องพิจารณาขดเคี้ยวความร้อนบางส่วนที่สูญเสียไปกับสภาพแวดล้อมที่เชื่อม ช่วงเชื่อมที่ดีก็ต้องมีความรู้และเข้าใจถึงวิธีการคำนวณปริมาณความร้อนที่จะต้องป้อนเข้าสู่โลหะชิ้นงานเพื่อการหลอมละลายที่สมบูรณ์ แหล่งต้นกำเนิดของพลังงานความร้อนสามารถเกิดได้จากแหล่งต่าง ๆ ตามแต่ละกรรมวิธีของการเชื่อม ได้แก่ แหล่งพลังงานจากการไฟฟ้าอาร์ก (Electric arc) พลาสมาอาร์ก (Plasma arc) ลำแสงเลเซอร์อาร์ก (Laser arc) ลำแสงอิเล็กตรอนอาร์ก (Electron arc) และรวมไปถึงความร้อนจากการเผาไหม้ของแก๊สอะเซทิลีนกับออกซิเจน (Oxyacetylene) เป็นต้น โดยความแตกต่างของปริมาณความร้อนที่ต้องเข้าสู่ชิ้นงานขณะเชื่อมขึ้นอยู่กับขบวนการเชื่อม โลหะที่ทำการเชื่อม การออกแบบรอยต่อและรวมไปถึงช่องทางโอกาสต่าง ๆ ที่อาจสูญเสียความร้อนไปในระบบของขบวนการเชื่อม

การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ต้องป้อนเข้าสู่ชิ้นงาน สามารถคำนวณได้จากปัจจัยของการเชื่อม ซึ่งมีสูตรการคำนวณที่เป็นมาตรฐานสากล โดยที่ใช้กัน จะมี 2 ระบบ คือ

1. ระบบการคำนวณตามมาตรฐานของอเมริกา (American system) จะใช้กับมาตรฐานต่าง ๆ ของอเมริกา ได้แก่ AWS D1.1 (2017) กับ ASME Section IX (2019) สูตรการคำนวณ คือ

$$\text{ปริมาณความร้อนป้อนเชื่อม (Heat input)} = \frac{\text{แรงดัน (V)} \times \text{กระแส (A)}}{\text{ความเร็วเชื่อม } x \text{ (60/1000)}} \quad \text{สมการที่ } \textcircled{6.1}$$

ภายใต้เงื่อนไข : แรงดัน (V) มีหน่วยเป็น โวลต์ (Volts)

: กระแส (A) มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (Ampere)

: ความเร็ว (S) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร/นาที (mm/min)

- ค่าความร้อนที่ได้จะมีหน่วยเป็น กิโลจูลต่อนิ้ว (kJ/in) เมื่อความเร็วเชื่อมเป็น นิ้วต่อนาที (in/min)
- ค่าความร้อนที่ได้จะมีหน่วยเป็น กิโลจูลต่อมิลลิเมตร (kJ/mm) เมื่อความเร็วเชื่อมเป็นมิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)

2. ระบบการคำนวณตามมาตรฐานของสหภาพยุโรป (European system) จะใช้กับมาตรฐาน EN 1011-1(2009) และ ISO/TR 18491 (2015) สูตรการคำนวณ คือ

ปริมาณความร้อนป้อนเชื่อม (Heat input) = พลังงานอาร์ก (Arc energy : kJ/mm) X
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency : k)

สมการที่ 6.2

เมื่อ : พลังงานอาร์ก (Arc energy) คือ

$$\text{พลังงานอาร์ก (kJ/mm)} = \frac{\text{แรงดัน (V)} \times \text{กระแส (A)}}{\text{ความเร็วเชื่อม (S)} \times 1000}$$

สมการที่ 6.3

ภายใต้เงื่อนไข : แรงดัน (V) มีหน่วยเป็น โวลต์ (Volts)

: กระแส (A) มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (Ampere)

: ความเร็ว (S) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร/วินาที (mm/sec)

เมื่อ : ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (k) ขึ้นอยู่กับขบวนการเชื่อม ดังในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (k) ของแต่ละขบวนการเชื่อม

ที่มา : Welding & NDT : How to calculate heat input, 2019

ลำดับ	ขบวนการเชื่อม (Welding process)	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency : k)*
1.	การเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding : SAW)	1.0
2.	การเชื่อมอาร์กหลอดหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding : SMAW)	0.8
3.	การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding : GMAW)	0.8
4.	การเชื่อมอาร์กหลอดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux Cored Arc Welding : FCAW)	0.8
5.	การเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW)	0.6
6.	กรรมวิธีการเชื่อมด้วยอาร์กพลาสมา (Plasma Arc Welding : PAW)	0.6

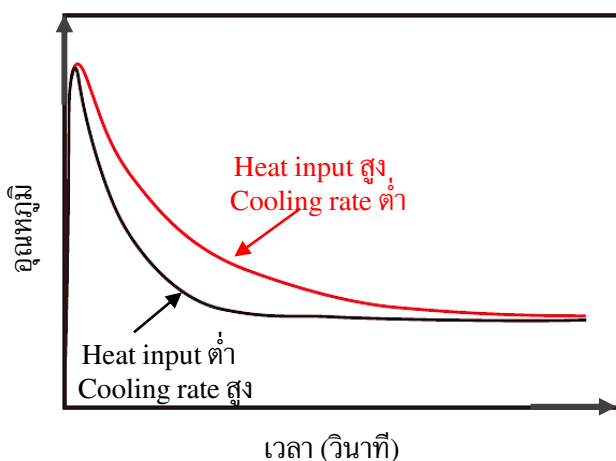
* หมายเหตุ ค่า k มาก แสดงว่าขบวนการเชื่อมมีการสูญเสียพลังงานความร้อนระหว่างการเชื่อมน้อย

จากตารางที่ 6.1 ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (k) ของการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (SAW) จะมีค่าสูงสุด คือมีค่า เท่ากับ 1.0 ซึ่งหมายถึงเป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่ไม่มีการสูญเสียความร้อนในระหว่าง

การเชื่อมหรืออาจมีแต่น้อยมาก ด้วยเหตุผลเพราะแหล่งของความร้อนระหว่างการเชื่อมทั้งหมดโดนปกคลุมอยู่ภายใต้ฟลักซ์ที่ค่อนข้างมิดชิด แม้แสงจากการอาร์กก็ยังไม่ลอดออกมา ส่วนกรรมวิธีการเชื่อมแบบอื่น ๆ ก็จะมีค่าตัวเลขที่ลดลงตามแต่ละกรรมวิธีที่มีการสูญเสียความร้อน

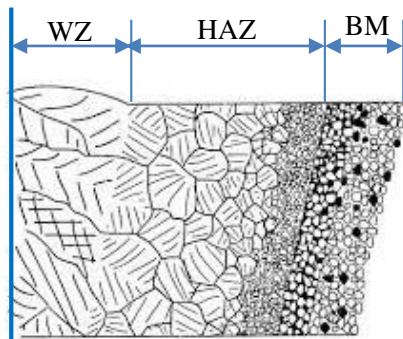
จากหลักการคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานเชื่อม จะเห็นได้ชัดเจนว่าจะมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับปัจจัยการเชื่อมหลัก ๆ ที่สำคัญ คือ กระแสไฟเชื่อม (Welding current) แรงดันอาร์ก (Arc welding) และความเร็วเชื่อม (Welding speed) ดังนั้น การปรับเปลี่ยนตัวแปรใด ๆ ก็ตามจะส่งผลต่อระดับปริมาณของความร้อนที่จะป้อนเข้าสู่ชิ้นงาน ซึ่งจะมีผลกระทบโดยตรงต่อโครงสร้าง และสมบัติทางกลของรอยเชื่อม ที่รวมไปถึงการบิดตัวหรือเสียรูปทรงของชิ้นงานที่เกิดจากความร้อนในการเชื่อม แต่ที่ส่งผลกระทบโดยตรงมากที่สุด ก็คือรูปร่างของรอยเชื่อม (Weld bead shape) ซึ่งได้แก่ ความกว้าง (Weld width) ความนูน (Reinforcement) การหลอมลึก (Penetration) ของแนวเชื่อม และอาจรวมถึงรอยบกพร่องที่เกิดจากการใช้ตัวแปรการเชื่อมที่ไม่เหมาะสม เช่น รอยกัดแห้ว (Undercut) เม็ดโลหะกระเด็น (Spatter) รอยนูนเกิน (Excess reinforcement)) เป็นต้น อ้างอิงคำอธิบายจากข้อมูลของ Jan Pawel Pilarczyk (2004)

ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานเชื่อม (Heat input volume) จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการเย็นตัว (Cooling rate) ถ้าในกรณีที่มีปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานสูงหรือมาก เมื่อปล่อยให้แนวเชื่อมเย็นตัว จะมีอัตราการเย็นตัวที่ต่ำหรือช้า ในทิศทางตรงกันข้ามถ้าปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานต่ำหรือน้อย แนวเชื่อมจะมีอัตราการเย็นตัวที่สูงหรือเร็ว ดังแสดงความสัมพันธ์ใน **รูปที่ 6.6** ซึ่งอัตราการเย็นตัวจะเป็นตัวการสำคัญที่จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อโครงสร้างของชิ้นงานเชื่อม ทั้งที่เป็นบริเวณแนวเชื่อม (Weld zone : WZ) และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat affected zone : HAZ) ดังแสดงใน **รูปที่ 6.7** โดยกรณีถ้าปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานสูง WZ และ HAZ จะมีความกว้างมากกว่ากรณีปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานต่ำ



รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ของปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงาน (Heat input) กับอัตราการเย็นตัว (Cooling rate)

ที่มา : Review, MAPI : Metals, Metallurgy Journal, 2017



รูปที่ 6.7 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแต่ละโซนที่ได้รับอิทธิพลจากปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงาน (Heat input)

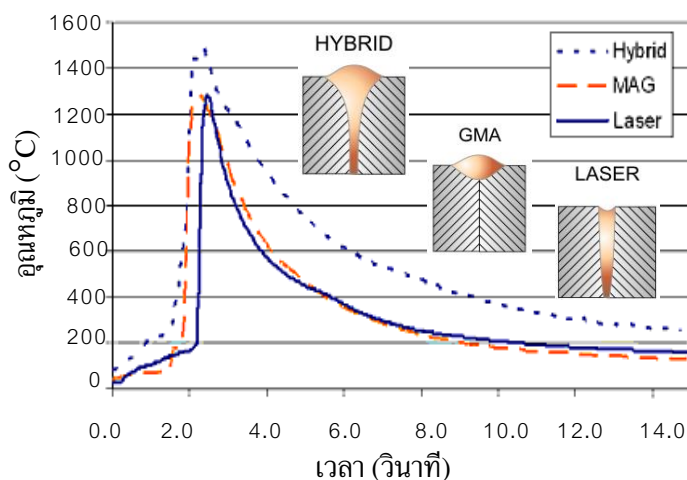
ที่มา : Review, MAPI : Metals, Metallurgy Journal, 2017

3.1 อัตราการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานของการเชื่อม (Heat rate of welding)

V.M. Radhakrishnan (2005) ได้กล่าวถึงอัตราการป้อนความร้อนให้แก่ชิ้นงานไว้ว่า เป็นอัตราของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นงานโลหะที่เชื่อมจากที่ระดับอุณหภูมิห้อง (Room temperature) จนถึงระดับอุณหภูมิของการเชื่อม (Welding temperature) ต่อช่วงของเวลา ซึ่งจะมีหน่วยวัดเป็น องศา/เวลา เช่น องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง ($^{\circ}\text{C/h}$) หรือ องศาเซลเซียสต่อนาที ($^{\circ}\text{C/min}$) เป็นต้น ซึ่งค่าความละเอียดขึ้นอยู่กับเครื่องมือวัด อัตราการให้ความร้อนแก่ของการเชื่อมขึ้นอยู่กับ กรรมวิธีการเชื่อม (Welding process) ค่าการนำความร้อนของโลหะเชื่อม (Thermal conductivity) และมวลของพื้นที่เนื้อเชื่อม (Mass of joint area) ซึ่งในทางปฏิบัติช่างเชื่อมจะต้องเผื่ออัตราการให้ความร้อนที่ต้องสูญเสียไปในระหว่างการเชื่อม และระหว่างที่โลหะชิ้นงานจะร้อนถึงจุดหลอมเหลว ที่ต้องสูญเสียไปกับบรรยากาศของสภาพแวดล้อม

อัตราการให้ความร้อนเร็วหรือช้าจะมีผลทั้งโครงสร้างภายในที่มีผลต่อขนาดและรูปร่างของเกรน และรูปทรงภายนอกที่มีผลต่อการบิดงอเสียรูปทรง รวมถึงการแตกร้าวของชิ้นงานเชื่อมด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน (Dissimilar welding) ดังนั้น ช่างเชื่อมจึงต้องมีเทคนิคต่าง ๆ ที่จะป้อนความร้อนให้แก่ชิ้นงาน โดยไม่ให้เกิดความเสียหาย เช่น การให้ความร้อนนำแก่ชิ้นงานก่อนเชื่อม (Preheating) การปรับมุมมองสายของการเชื่อม (Angle torch) หรือการประยุกต์ใช้การเชื่อมแบบไฮบริด (Hybrid welding) ที่ซึ่งนำข้อดีของกรรมวิธีการเชื่อมมาใช้ร่วมกัน เช่น ไฮบริดทิก-มิก (TIG-MIG) หรือไฮบริดเลเซอร์-มิก (LBW-MIG) และอีกหลายกรรมวิธีการเชื่อมเป็นต้น ซึ่งไฮบริดแต่ละคู่ก็จะมีขีดความสามารถในการป้อนความร้อนให้แก่ชิ้นงานในอัตราที่รวดเร็วแตกต่างกัน ดังแสดงตัวอย่างของการเชื่อมแบบไฮบริด เลเซอร์-แม็ก (LBW-MAG) ในรูปที่ 6.8

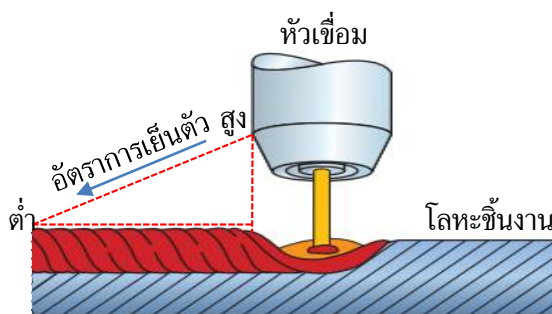
อัตราการให้ความร้อนที่เร็ว (High heating rate) จะมีผลกระทบโดยตรงกับขนาดความกว้างของแนวเชื่อม กล่าวคือ ขนาดของแนวเชื่อมจะแคบเล็ก และมีอัตราการหลอมที่ลึก (Keyhole) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่มีพลังงานลำแสงที่สร้างความร้อนได้สูงและรวดเร็ว เช่น การเชื่อมด้วยอาร์กพลาสมา (Plasma Arc Welding : PAW) การเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์ (Laser Beam Welding : LBW) และ การเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Welding : EBW) เป็นต้น



รูปที่ 6.8 อัตราการป้อนความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานของการเชื่อมแบบไฮบริด
ที่มา: *Materials Research Conference, London 17–18 February, 2003*

3.2 อัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อม (Cooling rate of welding)

อัตราการเย็นตัวของการเชื่อม เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในแนวเชื่อมเมื่อเวลาผ่านไป จากระดับอุณหภูมิของน้ำโลหะเหลว (Melting point) ลดลงมาถึงระดับอุณหภูมิห้อง (Room temperature) ที่กลายเป็นของแข็งทั้งหมด โดยอัตราการเย็นตัวจะสูงมากที่บริเวณติดกับบ่อหลอมละลายและจะลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะทางที่ห่างออกไปจากบ่อหลอมละลาย ดังแสดงในรูปที่ 6.9 อย่างไรก็ตามเส้นอัตราความเร็วที่เกิดขึ้นของแต่ละงานเชื่อมจะลดชันลงเล็กน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับความสามารถระบายความร้อนของโลหะชิ้นงานเชื่อม การสูญเสียความร้อน การให้ความร้อนโลหะชิ้นงานก่อนการเชื่อม (Preheat) ซึ่งรวมถึงการควบคุมอัตราการเย็นตัวด้วยอุปกรณ์เครื่องมือพิเศษที่สร้างขึ้น เช่น ชุดอุปกรณ์อุ่นชิ้นงานหรือชุดอุปกรณ์ระบายความร้อนด้วยน้ำ เป็นต้น



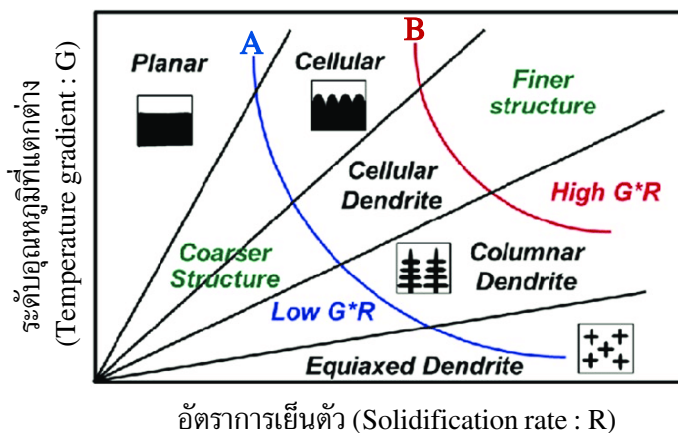
รูปที่ 6.9 อัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อมตามระยะห่างจากบ่อหลอมละลาย ที่มา: *Buried arc transfer mode in welding, 2010*

ในทางโลหะวิทยาการเชื่อม อัตราการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายถือว่ามีความสำคัญต่อโครงสร้าง (Structure) และสมบัติ (Properties) ของแนวเชื่อมเป็นอย่างยิ่ง คำกล่าวในงานวิจัยของ Chamara Kumara Ph.D. Thesis (2018)

● กรณีที่อัตราการเย็นตัวช้า (Low/Slow cooling rate) กลไกการแข็งตัวจะเกิดสมดุลทางความร้อน ซึ่งที่อัตราความร้อนเข้าและออก เท่ากัน/ใกล้เคียงกัน โดยที่ทำให้ น้ำโลหะเหลวในบ่อหลอมละลายมีเวลาในการจัดเรียงโครงสร้างอย่างสมดุล โครงสร้างที่ได้จึงเป็นโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวกัน

อย่างเป็นระเบียบไม่บิดเบี้ยว และจะเป็นโครงสร้างแบบเกรนหยาบ (Coarser structure) ขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกัน ไม่เกิดความเครียดในเนื้อโลหะ (Stress Concentration) สมบัติของแนวเชื่อมมีความเหนียว ไม่แตกร้าขณะเย็นตัว (Hot crack) บ่อหลอมละลายด้วยมีเวลามากเพียงพอในการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง ดังแสดงเส้นโค้งการเย็นตัว เส้น A ในรูปที่ 6.10

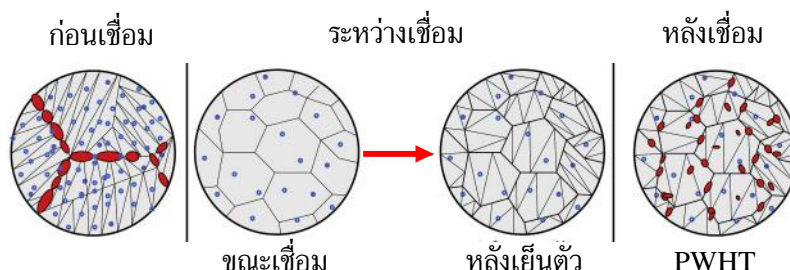
● กรณีที่อัตราการเย็นตัวเร็ว (High/Rapid cooling rate) กลไกการแข็งตัวจะเป็นแบบไม่สมดุลทางความร้อน โดยอัตราการระบายความร้อนออกจะเร็วกว่าอัตราการป้อนความร้อนเข้า ทำให้บ่อหลอมละลายเย็นตัวกลายเป็นของแข็งที่รวดเร็ว (Rapid solid) ด้วยพฤติกรรมในลักษณะนี้โครงสร้างของแนวเชื่อมจะเกิดการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ เกิดการบิดเบี้ยวของโครงสร้าง และเกิดความเครียดภายในเนื้อโลหะเชื่อม แนวเชื่อมจะเกิดความเค้นสูง เกิดการแตกร้าได้ง่าย หรืออาจบิดงอหรือเสียรูปร่าง โครงสร้างที่เย็นตัวเร็วจะมีลักษณะที่เป็นแบบละเอียด (Finer structure) ดังแสดงเส้นโค้งการเย็นตัว เส้น B ในรูปที่ 6.10 โดยปกติแนวเชื่อมที่เย็นตัวเร็วจะต้องผ่านขั้นตอนการทำเทมเปอร์ริง (Tempering) ที่เป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานหลังเชื่อมเพื่อต้องการให้โครงสร้างเกิดการปรับลดความเครียดเค้นลง ซึ่งก็คือการทำ “Post heating”



รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ของอัตราการเย็นตัวต่อกลไกการเกิดโครงสร้างของแนวเชื่อม
ที่มา : Chamara Kumara, Licentiate Thesis Production Technology, 2018

ขบวนการปรับปรุงโครงสร้างของแนวเชื่อมด้วยการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานหลังเชื่อม (PWTH) มีเจตนาที่ต้องการให้โครงสร้างสร้างของแนวเชื่อมเกิดการปรับตัวใหม่ให้อยู่ในสภาวะสมดุลมากที่สุด ซึ่งพลังงานความร้อนที่ป้อนให้แก่ชิ้นงานนั้นจะต้องไม่สูงมากจนถึงจุดหลอมละลายของโลหะนั้น ๆ โดยปกติในทางปฏิบัติระดับอุณหภูมิจะสัมพันธ์กับระยะเวลา กล่าวคือ ถ้ากรณีเลือกใช้ระดับอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง จะใช้เวลาป้อนความร้อนที่สั้น การปรับเปลี่ยนของโครงสร้างจะเกิดขึ้นแบบรวดเร็ว แต่มีความเสี่ยงที่จะเกิดการรวมตัวของก้อนเกรน กลายเป็นโครงสร้างเกรนขนาดใหญ่สูญเสียสมบัติทางกลที่ดีบางอย่างไป ข้อดีคือ ปฏิบัติงานได้อย่างรวดเร็ว ส่วนในกรณีที่เลือกใช้ระดับอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำ จะใช้เวลาป้อนความร้อนที่ยาวนานขึ้น การปรับเปลี่ยนของโครงสร้างจะเกิดขึ้นแบบช้า ๆ โครงสร้างที่ได้จะมีขนาดเกรนที่ละเอียดเล็ก ๆ สมบัติทางกลโดยรวมจะมีแนวโน้มที่ดี ดังแสดงตัวอย่าง

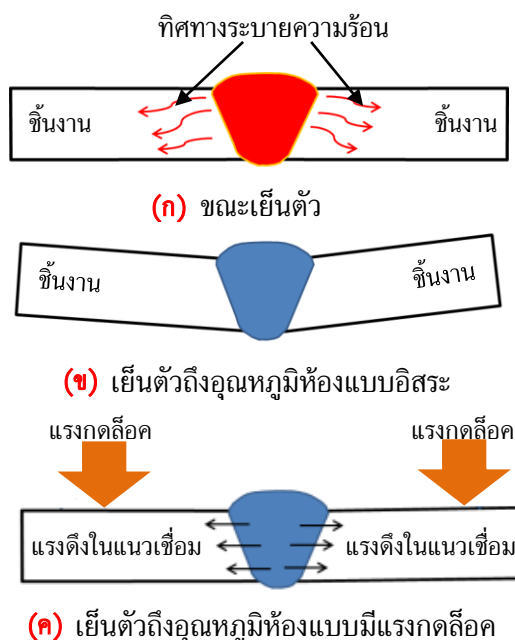
ลำดับของกลไกการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างตลอดขบวนการเชื่อม ของเหล็กกล้าผสมเกรด P 91 ใน **รูปที่ 6.11** ที่เปรียบเทียบให้เห็นถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างในสภาพก่อนเชื่อม (As-received) ระหว่างเชื่อม (As-weld condition) และหลังเชื่อม (After weld)



รูปที่ 6.11 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแนวเชื่อมที่ผ่านการให้ความร้อนหลังเชื่อม (PWTH)

ที่มา : Chandan Pandey et al. *Journal of Alloy and Compounds*, Vol. 743, pp. 332–364, 2018

● กรณีที่เกิดการบิดตัวโก่งงอ เสียรูปทรงของชิ้นงานเชื่อม (Distortion of weld metals) กลไกการเย็นตัวและพฤติกรรมการเสียรูปทรงของชิ้นงานเมื่อผ่านขบวนการเชื่อม จะมีผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมอย่างมาก โดยปัจจัยหลัก ๆ ที่มีผลต่อการบิดตัวโก่งงอส่วนใหญ่เกิดจากเรื่องของ การออกแบบรอยเชื่อม (Welding design) ปัจจัยของการเชื่อม (Welding parameter) และรวมถึงชนิดของวัสดุที่ทำการเชื่อม (Welding materials) โดยปกติการบิดตัวโก่งงอจะเกิดขึ้นระหว่างที่แนวเชื่อมกำลังเย็นตัว ดังแสดงใน **รูปที่ 6.12 รูป (ก)** แสดงถึงทิศทางการระบายความร้อนของบ่อหลอมละลายผ่านตัวชิ้นงานโลหะเชื่อมที่ขณะกำลังเย็นตัว **รูป (ข)** แสดงถึงพฤติกรรมการบิดตัวโก่งงอ และเสียรูปทรงเมื่อชิ้นงานเชื่อมเย็น



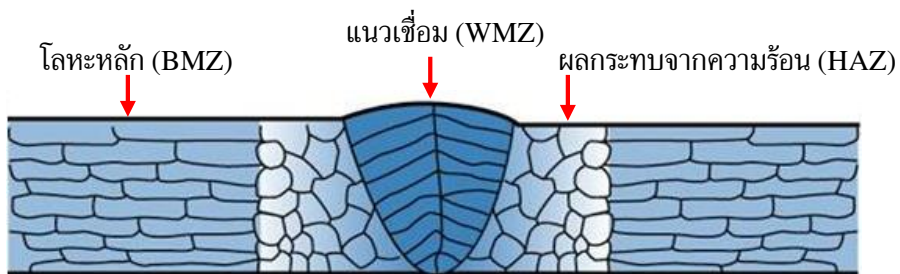
รูปที่ 6.12 พฤติกรรมการบิดตัวโก่งงอเสียรูปทรงของชิ้นงานเมื่อผ่านขบวนการเชื่อม

ที่มา : AWS D1.1/D1.1 : 2015 Structure Welding Code-Steel, 2015

ตัวแบบอิสระ และรูป (ค) แสดงถึงการใช้แรงกดลึงคขึ้นงานเชื่อมเพื่อบังคับไม่ให้เกิดการบิดตัวโค้งงออย่างอิสระ แต่ก็เกิดแรงดึงขึ้นภายในแนวเชื่อม (Weld tension) ที่จะทำให้เกิดความเครียดในเนื้อเชื่อมซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดการแตกร้าวได้ จึงต้องนำแนวเชื่อมไปผ่านการให้ความร้อนหลังเชื่อมเพื่อคลายความเครียดลงหรือให้หมดไป ที่เรียกขบวนการนี้ว่า “Post heating”

6.2 บริเวณต่าง ๆ ของแนวเชื่อม (Weld regions/zone)

ปัจจัยของการเชื่อมจะมีผลกระทบโดยตรงต่อแนวเชื่อม ที่ส่งผลทำให้แนวเชื่อมเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ที่ซึ่งสามารถแยกตามความแตกต่างของโครงสร้างเกรนออกเป็นโซนหรือบริเวณได้ 3 บริเวณ ดังแสดงในรูปที่ 6.13 ได้แก่ 1. บริเวณแนวเชื่อม (Weld metals zone : WMZ) 2. บริเวณผลกระทบจากความร้อน (Heat affected zone : HAZ) และ 3. บริเวณไม่กระทบจากความร้อนหรือโลหะหลัก (Base metal/parents zone : BMZ) ซึ่งได้สรุปอ้างอิงจาก Larry Jeffus et al. (2010) และจะอธิบายเพิ่มเติมถึงรายละเอียดของแต่ละโซน ดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.13 ความแตกต่างของโครงสร้างเกรนในชิ้นงานเมื่อผ่านขบวนการเชื่อม

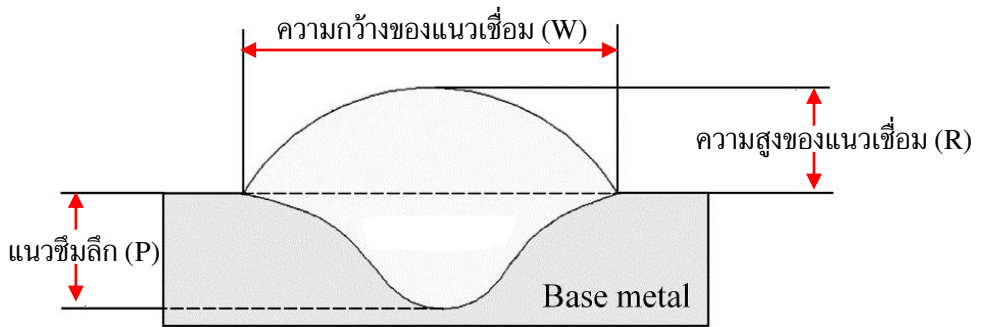
ที่มา : *Welding Skill, Processes and Practices for Entry-Level Welders, 2010*

1. **บริเวณแนวเชื่อม (Weld metals zone : WMZ)** หรืออาจเรียกว่า บริเวณหลอมละลาย (Fusion zone) ซึ่งเป็นส่วนบริเวณที่ปลายของโลหะชิ้นงานทั้งคู่เกิดการหลอมเหลวเข้าด้วยกันที่เรียกว่า บ่อหลอมละลาย (Weld pool) เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงก็จะได้เป็นของแข็งแนวเชื่อมที่เชื่อมต่อกัน โดยลักษณะของแนวเชื่อมจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 6.14 คือ

ก. ส่วนของความกว้างของแนวเชื่อม (Width of weld metal : W) เป็นระยะขนาดของเนื้อเชื่อมที่วัดจากขอบของรอยเชื่อมด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งตรงข้าม และจะต้องมีขนาดความกว้างที่เท่ากันตลอดความยาวของแนวเชื่อม

ข. ส่วนของความสูงแนวเชื่อม (Reinforcement of weld metal : R) เป็นระยะที่แสดงถึงความนูนสูงของเนื้อเชื่อมที่วัดจากผิวระดับของโลหะงาน

ค. ส่วนของการซึมลึกของแนวเชื่อม (Penetration of weld metal : P) เป็นส่วนที่ระบุระดับความลึกของแนวเชื่อม ซึ่งจะวัดจากระดับผิวของโลหะงานลึกลงไปแนวเชื่อม



รูปที่ 6.14 ลักษณะส่วนประกอบของแนวเชื่อม (Weld metal)

ที่มา : MDPI-Journal Sensors , 16, 1500, doi : 10.3390/S16091500, 2016

โดยปกติทั่ว ๆ ไปในขบวนการเชื่อมจะมีทั้งแบบวิธีที่มีการเติมเนื้อโลหะลงไปในบ่อหลอมละลายที่เรียกว่า ลวดเชื่อม (Filler metals) กับการเชื่อมที่ไม่ใช้ลวดเติม (Non- filler metals) โดยจะอาศัยเอาเนื้อของโลหะชิ้นงานทั้งคู่หลอมละลายติดกัน ที่เรียกกันว่า การเชื่อมแบบ Autogenous ซึ่งแนวเชื่อมของทั้งสองแบบมีลักษณะรูปทรงที่แตกต่างกัน ดังแสดงการเปรียบเทียบของแนวเชื่อมในรูปที่ 6.15 โดยแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อมจะมีส่วนของความนูนหรือความสูงของแนวเชื่อมที่สูงกว่าพื้นผิวของโลหะงาน ด้วยเพราะได้รับปริมาณของเนื้อโลหะที่เพิ่มเติมจากลวดเชื่อม ดังแสดงเป็นตัวอย่างของการเชื่อมทิกแบบเติมลวดเชื่อมในรูปที่ 6.15 (ก) สำหรับแนวเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม ลักษณะของแนวเชื่อมจะไม่มีคานูนสูงของแนวเชื่อม ด้วยเหตุเพราะการเชื่อมติดกันจะอาศัยเนื้อของโลหะงาน ที่หลอมเหลวแล้วไหลไปรวมกันเป็นแนวเชื่อม ทำให้บริเวณของแนวเชื่อมจึงมีระดับที่ต่ำกว่าระดับผิวของโลหะชิ้นงาน ดังแสดงลักษณะของแนวเชื่อมในรูปที่ 6.15 (ข) ซึ่งการเชื่อมแบบไม่เติมลวดนี้จะรองรับกับขบวนการเชื่อมบางวิธี เช่น การเชื่อมทิก การเชื่อมพลาสมา การเชื่อมเลเซอร์ และการเชื่อมแก๊สอะเซทิลีน เป็นต้น นิยมใช้กับการเชื่อมงานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงของแนวเชื่อมมากนัก เน้นความสวยงามของแนวเชื่อม หรือต้องการไม่ให้เห็นแนวเชื่อม โดยทั่วไปจะเป็นเชื่อมประกอบชิ้นงานโลหะแผ่นบางเป็นสำคัญ



(ก) แนวเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อม

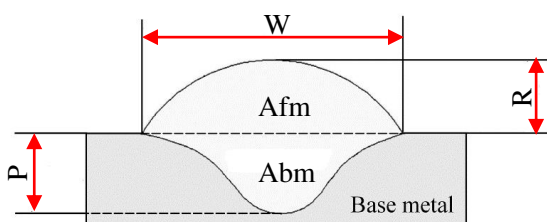


(ข) แนวเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม

รูปที่ 6.15 เปรียบเทียบการเชื่อมแบบเติมลวดกับแบบไม่เติมลวดของการเชื่อมทิก (GTAW)

ที่มา : The welder : TIG welding-When looks matter, 2014

การเจือจาง (Dilution) ของแนวเชื่อม หรือที่เรียกกันว่า % Dilution จะหมายถึง การที่แนวเชื่อมเกิดการหลอมละลายผสมผสานกันของส่วนผสมทางเคมีที่เกิดจากโลหะชิ้นงาน (Base metals) กับ โลหะลวดเชื่อม (Filler metal) ที่อยู่ในรูปของแนวเชื่อม (Weld metal) ดังแสดงในรูปที่ 6.16 ซึ่งเป็นหลักการเชื่อมแบบอูตมคติ กล่าวคือ โลหะเชื่อมกับลวดเชื่อมเป็นโลหะชนิดและเกรดเดียวกัน (Similar welding) จะเห็นได้ชัดเจนว่าเป็นการรวมกันของเนื้อเชื่อมส่วนที่เป็นบริเวณเนื้อโลหะลวดเติม (Afm) กับส่วนที่เป็นบริเวณเนื้อโลหะหลัก (Abm) โดยสามารถที่จะนำเอาพื้นที่เนื้อโลหะของทั้งสองส่วนมาเพื่อการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจาง (% Dilution) ส่วนผสมของแนวเชื่อมได้จากสูตรสมการที่ 6.4 ที่อ้างอิงจาก Janette Brezinova et al. (2016)



W = ความกว้าง (Width) Afm = บริเวณเนื้อโลหะลวดเติม (Filler metal area)

R = ความสูง (Reinforcement) Abm = บริเวณเนื้อโลหะหลัก (Base metal area)

P = แนวซึมลึก (Penetration)

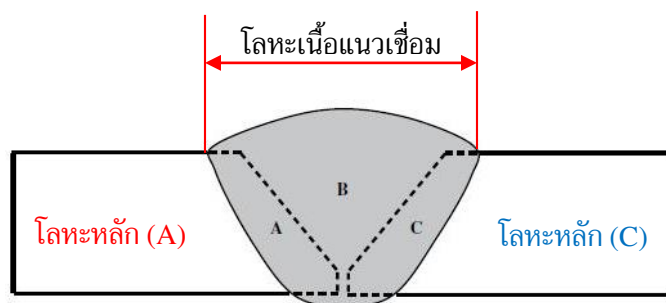
$$\% \text{ การเจือจาง (Dilution) } = [Abm / (Abm + Afm)] \times 100 \quad \text{สมการที่ 6.4}$$

รูปที่ 6.16 หลักการหาค่าการเจือจาง (Dilution) ของแนวเชื่อม

ที่มา : Weld Overlay – Springer link, 2016

ความสำคัญ of ค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางจะมีผลกระทบต่อแนวเชื่อมมากในกรณีการเชื่อมของโลหะต่างชนิด (Dissimilar welding) ที่บางครั้งเรียกว่า Black & White welding (แถบยุโรป) ซึ่งการเชื่อมโลหะต่างชนิดนี้ มีทั้งแบบที่ต่างกันบนพื้นฐานของชนิดหรือเกรดของโลหะหลัก (Dissimilar base metal) และต่างกันที่ชนิดหรือเกรดของโลหะลวดเติม (Dissimilar filler metal) โดยหลักและวิธีการหาค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางของแนวเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมโลหะต่างชนิดนี้ (Dissimilar welding) จะแตกต่างจากการเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน (Similar welding) ดังแสดงในรูปที่ 6.17 และสมการของการหาค่าการเจือจางแนวเชื่อมโลหะต่างชนิด (Dilution in dissimilar) ดังแสดงในสมการที่ 6.5

การเชื่อมโลหะที่ต่างกันทั้งแบบต่างกันที่โลหะหลักและต่างกันที่โลหะลวดเติม เมื่อเกิดการหลอมละลายแล้วเย็นตัว จะเรียกขบวนการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายแบบนี้ว่า “Heterogeneous welding” ด้วยเหตุผลที่ขบวนการเกิดนิวเคลียสของน้ำโลหะเชื่อมขณะเย็นตัวจะถูกกำหนดโดยตัวแปร



% การเจือจางเชื่อมโลหะต่างชนิด (Dilution in dissimilar)

$$= \frac{A + C}{A + B + C} \times 100$$

สมการที่ 6.5

รูปที่ 6.17 หลักการหาการเจือจางแนวเชื่อมโลหะต่างชนิด (Dilution in dissimilar)

ที่มา : Rex Thomas Alexandre. Thesis of Welding Engineering, Ohio State University, 2016

ที่เป็นองค์ประกอบของส่วนผสมทางเคมีของโลหะหลักที่แตกต่างกัน หรือลวดเชื่อมที่แตกต่างกันเป็นสำคัญ ซึ่งโครงสร้างจุลภาคที่ได้จะเกิดเฟสต่าง ๆ ที่กระจายทั่วไปแบบไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 6.18 (ก) และในทางกลับกัน กรณีการเชื่อมโลหะที่เป็นชนิดหรือเกรดเดียวทั้งโลหะหลัก และลวดเชื่อมเต็ม จะเรียกขบวนการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายแบบนี้ว่า “Homogenous welding” โครงสร้างจุลภาคที่ได้หลังการเย็นตัวก็จะเกิดเป็นเฟสต่าง ๆ ที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเหมือนกันทุกส่วน ก็ด้วยเหตุผลที่ส่วนผสมทางเคมีของบ่อหลอมละลายเกิดจากโลหะหลักและลวดเชื่อมเต็มชนิดเดียว ส่วนผสมทางเคมีทุกบริเวณจึงไม่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้ปัจจัยที่กำหนดการเกิดนิวเคลียสขณะเย็นตัวเหมือนกัน ดังแสดงลักษณะของโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 6.18 (ข)



(ก) โครงสร้างจุลภาคแบบ Heterogeneous

(ข) โครงสร้างจุลภาคแบบ Homogeneous

รูปที่ 6.18 โครงสร้างของแนวเชื่อมแบบ Heterogeneous และแบบ Homogeneous

ที่มา : TECS – Uniform microstructure of weld metal, 2012

ค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจาง (% Dilution) ยังขึ้นอยู่กับชนิดของรอยเชื่อมต่อ (Joint design) และขบวนการเชื่อม (Welding process) ดังแสดงในตารางที่ 6.2 ซึ่งพบว่าการออกแบบชนิดของรอย

เชื่อมต่อไปจะมีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางของแนวเชื่อม ด้วยเหตุเพราะรูปแบบของรอยต่อจะมีบทบาทในการกำหนดสัดส่วนการหลอมละลายของเนื้อโลหะหลัก (Base metals) และเนื้อโลหะลวดเติม (Filler metal) ตัวอย่างเช่น การออกแบบรอยเชื่อมต่อนูนตัววี (Single vee groove) ค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางจากลวดโลหะเติมมากกว่าจากเนื้อโลหะหลัก ด้วยเพราะรอยร่องบากจะต้องเชื่อมด้วยการเติมเนื้อลวดเชื่อมที่มาก ซึ่งในทางตรงกันข้าม กรณีการออกแบบชนิดรอยต่อเชื่อมแบบต่อนูนไม่บากหน้างาน (Square butt joint) ค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางจากโลหะหลักจะมากกว่าจากเนื้อโลหะลวดเติม เพราะพื้นที่ว่างของรอยต่อน้อยอาศัยเนื้อโลหะหลักที่ต้องหลอมละลายออกมาช่วยเชื่อมประสานกันของแนวเชื่อม

นอกจากนี้ขบวนการเชื่อม (Welding process) ก็เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางของเนื้อเชื่อม เพราะแต่ละขบวนการเชื่อมมีวิธีที่จะทำให้เนื้อโลหะหลอมละลายแตกต่างกัน เช่น บางขบวนการเชื่อมอาศัยความร้อนจากอาร์กของเนื้อโลหะหลักไปช่วยในการหลอมละลายเนื้อโลหะลวดเติม ส่วนบางขบวนการเชื่อมกลับตรงกันข้าม ที่อาศัยการอาร์กของโลหะลวดเติมเพื่อให้เนื้อโลหะหลักหลอมละลาย ซึ่งรวมถึงการเลือกสภาพผิวของการเชื่อมว่าเป็นการต่อข้อเชื่อมแบบใด กล่าวคือแบบ DCEN ความร้อนจะเกิดที่โลหะหลัก 70 % และที่ลวดโลหะเติม 30 % ส่วนแบบ DECP จะตรงกันข้าม คือความร้อนจะเกิดที่โลหะหลัก 30 % และที่ลวดโลหะเติม 70 % ดังนั้นขบวนการเชื่อมที่แตกต่างกันจะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางของเนื้อโลหะเชื่อมแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 6.2 และนอกจากตัวแปรของขบวนการเชื่อมที่กล่าวมาแล้วนั้น ยังมีปัจจัยของพลังงานร้อนที่ป้อนเข้าสู่การเชื่อม (Heat input) ซึ่งเป็นที่ทราบกันว่าเป็นปัจจัยการเชื่อมที่สำคัญต่อการกำหนดอัตราการหลอมละลายของบ่อหลอมละลายขณะทำการเชื่อม

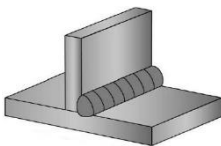
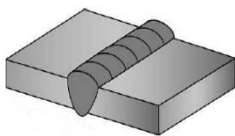
ค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจาง (% Dilution) จะแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของขบวนการเชื่อม ด้วยเหตุผลเพราะแต่ละขบวนการการเชื่อมจะใช้ปริมาณความร้อนไม่เท่ากัน บางขบวนการใช้ปริมาณความร้อนเพื่อการหลอมละลายน้อยบ่อหลอมละลายเล็กและแคบ ค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางจึงต่ำ แต่ในบางขบวนการเชื่อมมีการอาร์กที่รุนแรงเพราะต้องการที่จะสร้างบ่อหลอมละลายที่กว้าง ด้วยต้องการแนวเชื่อมที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งจะต้องเน้นการเติมเนื้อโลหะจากโลหะลวดเชื่อม การเชื่อมแบบนี้จะทำให้เกิด ค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางที่สูง (High dilution) ดังนั้น จึงพอจะสรุปได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางของส่วนผสมทางเคมีในแนวเชื่อมจะขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานของขบวนการเชื่อมในขณะเชื่อม (Heat input)

ยกตัวอย่างการหาค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางของแนวเชื่อม

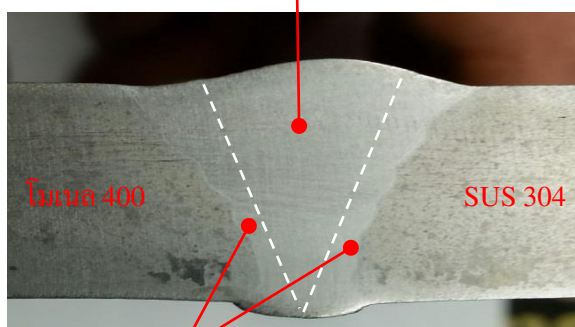
ตัวอย่างวิธีการหาค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางของแนวเชื่อมจากการคำนวณที่ส่วนผสมทางเคมีของการเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดกัน (Dissimilar welding) ระหว่างโลหะผสมเกรดโมเนล 400 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 ใช้โลหะลวดเชื่อม ENiCrFe-2 ด้วยขบวนการเชื่อม SMAW ดังแสดงรายละเอียดของแนวเชื่อมที่ได้ในรูปที่ 6.19 อ้างอิงจาก B.J. Moniz & R.T. Miller (2004)

ตารางที่ 6.2 ชนิดรอยต่อและขบวนการเชื่อมที่สัมพันธ์กับค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางของเนื้อเชื่อม

ที่มา : KWE (Korea Welding Engineer) : Dilution in welding, 2011

ชนิดของรอยเชื่อมต่อ(Joint design)	ค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจาง (% Dilution)
	SMAW \approx 20 % โลหะหลัก 80 % โลหะลวดเติม GTAW \approx 20 % โลหะหลัก 80 % โลหะลวดเติม SAW \approx 80 % โลหะหลัก 20 % โลหะลวดเติม
	ต่อชนบากร่องตัว V 30 – 40 % โลหะหลัก 60 – 70 % โลหะลวดเติม ต่อชนไม่บากร่อง 75 – 85 % โลหะหลัก 15 – 25 % โลหะลวดเติม
ชนิดของขบวนการเชื่อม (Welding process)	ค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจางโดยประมาณ (% Dilution)
SMAW	\approx 25 – 40 %
SAW	\approx 25 – 50 %
FCAW	\approx 20 – 25 %
GMAW	\approx 25 – 50 %
GTAW	\approx 25 – 50 %
ESW	\approx 7 – 12 %

70 % ของเนื้อเชื่อมจากโลหะลวดเติม (Filler metal)



15 % ของเนื้อเชื่อมจากโลหะหลัก (Base metal)

รูปที่ 6.19 ตัวอย่างลักษณะของแนวเชื่อมสำหรับการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจาง

ที่มา : Welding Skill : Welding Metallurgy, 2004

จากรูปที่ 6.19 อัตราการเจือจาง 30 % ใช้ในการคำนวณการเข้ามาผสมของส่วนผสมทางเคมี (Deposited) ในแนวเชื่อมและ 70% ของเนื้อเชื่อมได้จากส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อมกับส่วนผสมทางเคมีของโลหะหลักของทั้งสองด้านที่ต่างกัน ซึ่งด้านละ 15 % (เนื่องจากการเชื่อมโลหะหลักต่างชนิดกัน) โดยที่มีข้อมูลส่วนผสมหลักดังนี้

ก. โลหะหลักโมเนล 400 มีส่วนผสมหลัก 67 % Ni และ 32 % Cu

ข. โลหะหลัก SUS 304 มีส่วนผสมหลัก 8 % Ni 18 % Cr และ 74 % Fe

ค. โลหะลวดเชื่อม ENiCrFe-2 มีส่วนผสมหลัก 70 % Ni 15 % Cr และ 8 % Fe

ทำการเชื่อมแบบหลายแนว (Multi pass welding) ซึ่งส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อม 70 % ได้มาจากโลหะลวดเชื่อม และ 15 % ได้มาจากโลหะหลัก โดยจะมีองค์ประกอบของส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อมตามแต่ละแหล่งที่มาของส่วนผสม ดังนี้

ส่วนผสมทางเคมีในแนวเชื่อมจากโลหะลวดเชื่อม ENiCrFe-2 คือ

70 % x 70 % นิกเกิล = นิกเกิล 49 %

70 % x 15 % โครเมียม = โครเมียม 10.5 %

70 % x 8 % เหล็ก = เหล็ก 5.6 %

ส่วนผสมทางเคมีในแนวเชื่อมจากโลหะหลัก โมเนล 400 คือ

15 % x 67 % นิกเกิล = การเจือจางนิกเกิล 10 %

15 % x 32 % ทองแดง = การเจือจางทองแดง 4.8 %

ส่วนผสมทางเคมีในแนวเชื่อมจากโลหะหลัก เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 คือ

15 % x 8 % นิกเกิล = การเจือจางนิกเกิล 1.2 %

15 % x 18 % โครเมียม = การเจือจางโครเมียม 2.7 %

15 % x 74 % เหล็ก = การเจือจางธาตุเหล็ก 11.1 %

องค์ประกอบส่วนผสมทางเคมีรวมที่คำนวณได้ของเนื้อโลหะแนวเชื่อมได้มาจากการเพิ่มส่วนผสมทางเคมีจากโลหะลวดเชื่อมลงในส่วนโลหะหลัก คือ

ส่วนผสมของนิกเกิล (49 % Ni + 10 % Ni + 1.2 % Ni) = 60.2 %

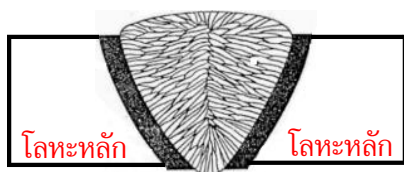
ส่วนผสมของโครเมียม (10.5 % Cr + 2.7 % Cr) = 13.2 %

ส่วนผสมของเหล็ก (5.6 % Fe + 11.1 % Fe) = 16.7 %

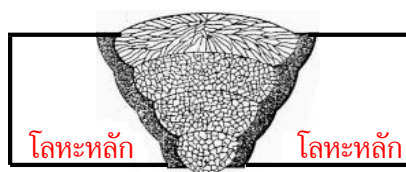
เพิ่มส่วนผสมของทองแดง 4.8 %

จากการคำนวณพบว่าองค์ประกอบส่วนผสมทางเคมีจะไม่เท่ากับ 100 % ตามหลักการคิดสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ ด้วยเพราะว่ามีเปอร์เซ็นต์เล็กน้อยขององค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ที่เป็นส่วนผสมอยู่ในโลหะหลักและโลหะลวดเดิมที่ไม่ได้นำมารวมอยู่ในการคำนวณ

จากการศึกษาวิจัยถึงการเงาจากส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อม D.K. Bhattacharya (2009) เขียนรายงานว่าแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมแบบแนวเดียวหรือรอบเดียว (Single pass weld) จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การเงาจากของส่วนผสมทางเคมีในเนื้อเชื่อมเท่ากันทุกบริเวณ ส่วนแนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมแบบหลายแนวหรือหลายรอบ (Multiple pass weld) จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การเงาจากของส่วนผสมทางเคมีในเนื้อเชื่อมที่ไม่เท่ากันทุกบริเวณ กล่าวคือ บริเวณเนื้อเชื่อมส่วนของราก (Root bead) จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การเงาจากที่เท่ากัน ด้วยเพราะร่องของรอยต่อส่วนนี้แคบเชื่อมเพียงรอบเดียวก็เต็มร่องว่าง จึงเป็นแบบ Single pass weld ส่วนถัดมาช่องว่างรอยต่อก็กว้างขึ้นต้องเชื่อมด้วยจำนวนรอบที่มากขึ้น เนื้อโลหะเชื่อมแต่ละรอบก็จะเป็นสัดส่วนผสมทางเคมีจากโลหะลวดเติมมากกว่าส่วนผสมทางเคมีจากโลหะหลัก จึงเป็นต้นเหตุของการที่ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเงาจากของเนื้อเชื่อมไม่สม่ำเสมอเท่า ๆ กัน ทุก ๆ บริเวณของแนวเชื่อม โดยสัดส่วนของธาตุผสมทางสารเคมีจะมีแนวโน้มใกล้เคียงหรือเหมือนกัน กับส่วนผสมทางเคมีของโลหะลวดเติม ดังแสดงการเปรียบเทียบลักษณะของแนวเชื่อม ที่เชื่อมแบบแนวเดียวหรือรอบเดียว กับแนวเชื่อมแบบหลายแนวหรือหลายรอบ ในรูปที่ 6.20 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) การเชื่อมแบบแนวเดียวหรือรอบเดียว
(Single pass weld)

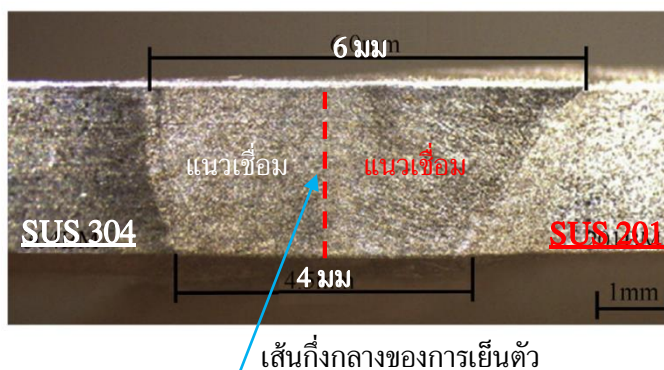


(ข) การเชื่อมแบบหลายแนวหรือหลายรอบ
(Multiple pass weld)

รูปที่ 6.20 ลักษณะของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยจำนวนรอบเชื่อมที่ไม่เท่ากัน

ที่มา : D.K. Bhattacharya : *Microstructure of welded joints*, 2009

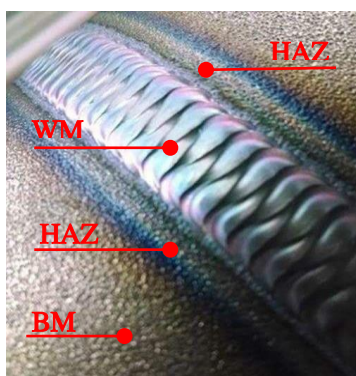
นอกจากนี้ยังมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเชื่อมโลหะต่างชนิด (Dissimilar welding) โดย Wichan Chuaiphan et al. (2019) มีข้อมูลเผยแพร่ว่า การเชื่อมแบบหลอมละลายของโลหะต่างชนิดกัน ที่ทั้งคู่มีความแตกต่างของอุณหภูมิจุดหลอม เมื่อทำการเชื่อมพบว่าโลหะที่มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าจะเกิดการหลอมละลายก่อนและบ่อหลอมละลายของการเชื่อม (Weld pool) ก็จะเอียงไปทางนั้น เมื่อน้ำโลหะเย็นตัวลงรูปร่างของแนวเชื่อมจะไม่สมดุล เนื้อเชื่อมจะเอียงและมีสัดส่วนพื้นที่ของเนื้อเชื่อมไปทางโลหะที่จุดหลอมเหลวต่ำกว่า ดังแสดงตัวอย่างของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติกต่างเกรดระหว่าง เกรด SUS 304 กับ SUS 201 ด้วยขบวนการเชื่อมทิก แบบไม่เติมลวดเชื่อม (Autogenous welding) ในรูปที่ 6.21 ซึ่งลักษณะแนวเชื่อมดังกล่าวจะมีผลต่อวิธีการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การเงาจาก โดยจะต้องกำหนดสัดส่วนพื้นที่ของการหลอมละลายให้ถูกต้องตามความจริงของเนื้อเชื่อมที่เกิดจากการละลายของส่วนผสมทางเคมีที่ไม่สมดุลของทั้งสองข้างของแนวเชื่อมที่ติดกับโลหะหลักนั้น ๆ ตามหลักการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การเงาจากของการเชื่อมโลหะต่างชนิด ที่แสดงใน สมการที่ 6.5



รูปที่ 6.21 ลักษณะของแนวเชื่อมโลหะต่างชนิดที่มีอัตราการหลอมละลายไม่เท่ากัน

ที่มา : Wichan Chuaiphan : *Journal of Defence Technology*, 15, 170–178, 2019

2. บริเวณผลกระทบจากความร้อน (Heat affected zone : HAZ) หมายถึง ส่วนของบริเวณพื้นที่อยู่ใกล้ซิดหรือติดกับแนวเชื่อม ซึ่งบริเวณนี้จะมีอุณหภูมิความร้อนที่สูงมากขณะที่ทำการเชื่อม แต่ถึงแม้จะสูงมาก ก็ไม่มากเพียงพอต่อการที่จะทำให้โลหะหลักเกิดการหลอมละลายกลายเป็นเนื้อเชื่อมได้ และด้วยอิทธิพลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมดังกล่าว จะส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของเนื้อโลหะหลักที่อยู่ในบริเวณถัดมาได้ ซึ่งจะเรียกบริเวณนี้ว่า “บริเวณกระทบร้อน” หรือที่นิยมเรียกกันในกลุ่มของวิศวกรรมการเชื่อมว่า “HAZ” ดังแสดงตำแหน่งของการเกิดบริเวณกระทบร้อนบนแนวเชื่อมในรูปที่ 6.22 จากรูปจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าบริเวณกระทบร้อน หรือ HAZ จะมีขนาดความกว้างที่ห่างจากขอบของแนวเชื่อมเท่ากันตลอดแนว และเหมือนกันทั้งสองข้างของแนวเชื่อม นั่นหมายความว่าความร้อนจากบ่อหลอมละลายที่กระจายผ่านเนื้อโลหะหลักจะเท่ากันหรือมีกลไกที่เหมือนกัน แต่สำหรับกรณีการเชื่อมต่อของโลหะต่างชนิด (Dissimilar welding) ก็จะมีโอกาสที่ขนาดของความกว้างและระยะต่าง ๆ ของบริเวณกระทบร้อนของทั้งสองข้างจะแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะของวัสดุนั้น ๆ และมีผลต่อสมบัติของแนวเชื่อมที่เกิดจากอิทธิพลของ HAZ ทั้งสองข้างที่ไม่เหมือนกันหรือไม่เท่ากัน ข้างเชื่อมอาจจะต้องพิจารณาถึงรายละเอียดที่มากขึ้นสำหรับกรณีของการเชื่อมโลหะต่างชนิด

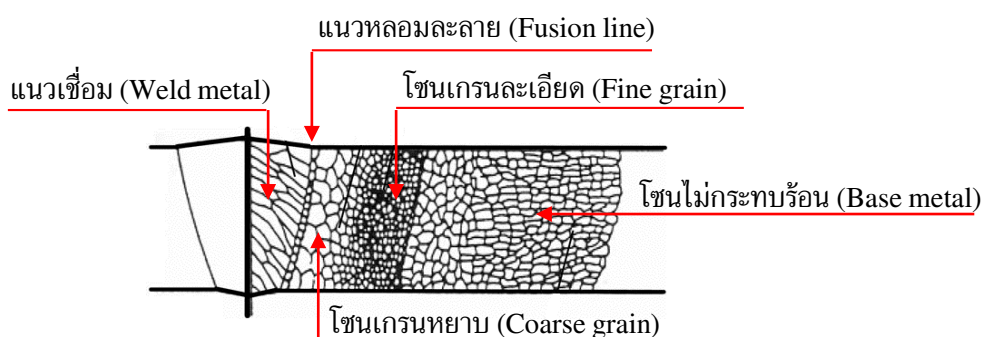


รูปที่ 6.22 ลักษณะของแนวเชื่อมที่เกิดบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนของการเชื่อม

ที่มา : Colossal – Welding, Metal welding , Welding design, 2011.

บริเวณกระทบร้อนหรือว่า HAZ นี้จะเกิดขึ้นเสมอสำหรับขบวนการเชื่อมแบบหลอมละลายอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และมีบทบาทโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเนื้อโลหะหลักที่บริเวณใกล้กับแนวเชื่อมไม่เหมือนกับเนื้อโลหะหลักส่วนอื่น ๆ ซึ่งเป็นผลกระทบที่เกิดจากการเชื่อมที่ไม่พึงประสงค์ จนปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีขบวนการเชื่อมสมัยใหม่ที่ต้องการเชื่อมแล้วไม่เกิดบริเวณกระทบร้อน หรือเกิดน้อยที่สุด เช่น ขบวนการเชื่อมทิก ขบวนการเชื่อมพลาสมา ขบวนการเชื่อมเลเซอร์ เป็นต้น โดยขบวนการเชื่อมเหล่านี้ต้องใช้พลังงานอาร์กที่สูง เพื่อให้โลหะหลอมเหลวอย่างรวดเร็วและเกิดเป็นบ่อหลอมละลายที่แคบ ๆ ความร้อนแพร่ออกไปไม่มากทำให้บริเวณกระทบร้อนแคบและมีพื้นที่น้อยลง แต่ก็ยังมีต้นทุนต่อการเชื่อมที่สูงมาก อาจไม่เหมาะกับการเชื่อมประกอบงานที่เป็นงานอุตสาหกรรมการผลิตต้นทุนต่ำ

อย่างไรก็ตามถ้าวิศวกรงานเชื่อมเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาของโครงสร้างเนื้อโลหะที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในการเชื่อมก็สามารถที่จะออกแบบรอยต่อ เลือกขบวนการเชื่อม รวมถึงควบคุมการเชื่อมที่ลดผลกระทบดังกล่าวได้ โดยจะได้กล่าวถึงรายละเอียดทางโลหะวิทยาการเชื่อม (Welding metallurgy) ของโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในบริเวณกระทบร้อน ดังแสดงในรูปที่ 6.23 ซึ่งจะได้อธิบายถึงกลไกการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของแต่ละโซน ดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.23 การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนของการเชื่อม

ที่มา : Ali P. Gordon, *International of Fracture*, 126: 321–344, 2004

จากรูปที่ 6.23 จะประกอบด้วยบริเวณหรือโซนต่าง ๆ อ้างอิงจาก AWS (1994) ดังต่อไปนี้

1. โซนของแนวเชื่อม (Weld metal zone : WMZ) บริเวณนี้เป็นส่วนของแนวเชื่อมที่เกิดจากการที่บ่อหลอมละลายของน้ำโลหะ แล้วเย็นตัวลงมาได้เป็นของแข็งใหม่ที่มีรูปแบบหน้าตาของเกรนจะแตกต่างไปจากเกรนของโลหะหลักที่ก่อนเชื่อม โดยจะถูกกำหนดรูปร่างของเกรนด้วยกลไกและทิศทางการระบายของความร้อนจากบ่อหลอมละลายไปสู่ภายนอก ซึ่งจะผ่านตัวกลางที่เป็นโลหะหลักที่ทำการเชื่อมต่อ ส่วนใหญ่มีลักษณะเกรนเป็นแบบแบนยาว ที่เรียกกันว่า Columnar grains

2. แนวหลอมละลาย (Fusion line: FL) บริเวณนี้จะอยู่ถัดออกไปที่ติดอยู่กับบ่อหลอมละลาย ซึ่งจะเป็นส่วนที่กั้นอยู่ระหว่างส่วนของโลหะที่เกิดการหลอมเหลว (Melting) กับส่วนที่ไม่เกิดการ

หลอมเหลว (Un-melting) บางครั้งจะเรียกว่า ขอบเขตการหลอมละลาย (Fusion boundary) ส่วนนี้จะแคบและเกรนเล็กยาวตลอดตามขนาดของบ่อหลอมละลาย และจะกว้างขึ้นเมื่อปริมาณความร้อนที่ป้อนเชื่อมสูงและโลหะหลักมีอัตราการนำความร้อนที่ต่ำ อุณหภูมิบริเวณนี้จะต่ำกว่าที่แนวเชื่อมไม่มาก

3. โชนเกรนหยาบ (Coarse grain) ส่วนนี้จะเป็บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ซึ่งมีระดับอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง แต่เป็นส่วนที่เนื้อโลหะไม่หลอมละลาย แต่ด้วยเหตุที่ความร้อนจากการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายมีระดับอุณหภูมิที่สูงส่งผ่านมาในโลหะหลัก เป็นผลทำให้ขอบเกรน (Grain boundary) ของก้อนเกรนเดิมโลหะหลักเกิดการแพร่ซึมเข้าหากันกลายเป็นเกรนเดียวกันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นที่เรียกว่า “Grain growth” ทำให้บริเวณนี้มีจำนวนเกรนที่น้อยลงมีขนาดของก้อนเกรนใหญ่ขึ้น จึงมองเป็นลักษณะว่าเป็นรูปแบบของเกรนหยาบ

4. โชนเกรนละเอียด (Fine grain) ส่วนนี้จะเป็โชนถัดมาของบริเวณที่ได้รับผลกระทบร้อน อุณหภูมิส่วนนี้จะอยู่ที่ระดับของอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization temperature) ของวัสดุโลหะหลัก ซึ่งจะมีกลไกการเกิดผลึกใหม่ของโครงสร้าง (New grain) จึงทำให้เกิดเป็นก้อนเกรนใหม่ขึ้นพร้อม ๆ กันในเวลาเดียวกันหรือใกล้เคียงกันมาก โดยเกิดเป็นจำนวนมากและมีขนาดเท่า ๆ กัน ดังนั้นโชนนี้จึงมีลักษณะของเกรนที่เป็นแบบเล็กละเอียด

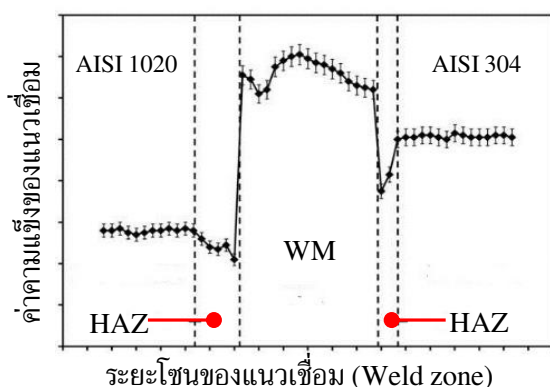
5. โชนไม่กระทบร้อน (Un-affected zone) ส่วนนี้หมายถึงเป็นโครงสร้างเดิมของเนื้อโลหะหลัก (Base metal) ที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ อันเนื่องมาจากอิทธิพลของความร้อนจากการเชื่อม ดังนั้นส่วนนี้จึงมีลักษณะของโครงสร้างที่ปกติตามแบบเดิมก่อนทำการเชื่อม

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดผลกระทบร้อน (Causes of heat affected zone)

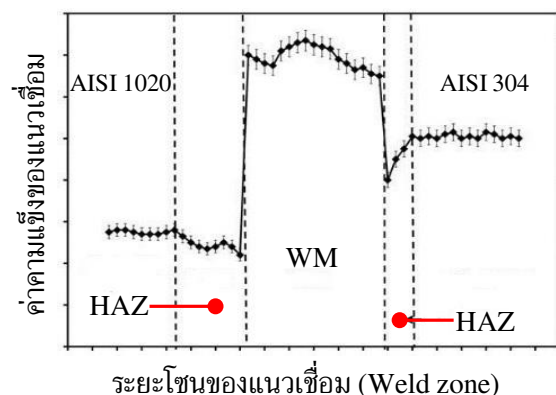
หลักการเชื่อมโลหะหรือตัดโลหะด้วยความร้อน ซึ่งเป็นที่ทราบกันทั่วไปว่าต้องใช้ความร้อนที่ต้องป้อนเข้าไปสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะที่เชื่อมหรือตัด และความร้อนเหล่านี้ก็ต้องระบายออกไปผ่านตัวกลางโลหะชิ้นงานจึงเป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างโลหะวิทยาขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดผลกระทบร้อน เกิดจากปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้า (Heat input) กับกลไกการกระจายความร้อนของวัสดุโลหะ (Thermal diffusivity) อย่างไรก็ตามทั้งสองปัจจัยนี้ ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่าปัจจัยของการกระจายความร้อนผ่านตัวของวัสดุโลหะที่นำมาเชื่อมจะมีบทบาทและผลกระทบต่อขนาดของโชนต่าง ๆ มากกว่า ดังรายละเอียดของทั้งสองปัจจัย ดังนี้

- ปัจจัยของความร้อนที่ป้อนเข้า (Heat input) จัดว่าเป็นที่กระทบโดยตรง เพราะถ้าความร้อนที่ป้อนเข้าไปในการเชื่อมมีปริมาณที่ต่ำ อัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อมจะเร็ว ส่งผลทำให้ระยะของ HAZ

มีขนาดที่แคบหรือเล็กลง และในทางกลับกันถ้ากรณีที่ความร้อนที่ป้อนเข้าไปในการเชื่อมมีปริมาณที่สูงมากจะส่งผลให้อัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อมจะช้าลง ความร้อนทยอยระบายออกได้ช้า สะสมค้างอยู่ในโลหะหลักเป็นเวลานาน จึงเป็นเหตุให้เกิดผลกระทบจากความร้อนมาก ระยะ HAZ จึงมีขนาดที่กว้างขึ้น อย่างไรก็ตามปัจจัยความร้อนที่ป้อนเข้าอาจเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุงแก้ไขยากเพราะถูกกำหนดด้วยขบวนการเชื่อมและปัจจัยของการเชื่อมเป็นสำคัญ ซึ่งอาจพิจารณาเลือกใช้ขบวนการเชื่อมที่มีพลังของการอาร์กที่สูง ๆ ความร้อนจะได้ไม่กระจายเป็นวงกว้าง เช่น การเชื่อมพลาสมา การเชื่อมเลเซอร์หรือการเชื่อมด้วยลำแสงอิเล็กตรอน เป็นต้น ดังแสดงการเปรียบเทียบขนาดของ HAZ ระหว่างขบวนการเชื่อม GTAW กับขบวนการเชื่อม SMAW บนกราฟทดสอบความแข็งในการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิม ในรูปที่ 6.24 ซึ่งเป็นผลการวิจัยเชิงทดลองของ Wichan Chuaiphan et al. (2014)



(ก) การเชื่อมแบบ GTAW



(ข) การเชื่อมแบบ SMAW

รูปที่ 6.24 การเปรียบเทียบขนาดของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนของการเชื่อม (HAZ) จากขบวนการเชื่อมที่แตกต่างกัน

ที่มา : Wichan Chuaiphan. Thesis of Doctoral Program in Material and Metallurgical Engineering, 2014

● ปัจจัยของการกระจายความร้อนผ่านตัวของวัสดุโลหะ (Thermal diffusivity) ขึ้นอยู่กับสมบัติด้านการนำความร้อนของวัสดุที่นำมาเชื่อม (Thermal conductivity) ซึ่งวัสดุที่มีความสามารถในการนำหรือถ่ายเทความร้อนไปสู่ภายนอกได้รวดเร็วก็จะทำให้บ่อหลอมละลายเย็นตัวเร็วขึ้น ซึ่งจะเป็นช่วยลดความกว้างของ HAZ ลง และในทางกลับกันถ้าวัสดุโลหะหลักมีสมบัติในการระบายความร้อนที่ต่ำบ่อหลอมละลายก็จะคงความร้อนไว้นาน ส่งผลทำให้ขนาดของ HAZ กว้างขึ้น ดังนั้น สำหรับกรณีที่ทำการเชื่อมโลหะที่ต่างชนิดกันที่ซึ่งโลหะหลักมีความสามารถในการนำความร้อนแตกต่างกันก็จะมีอิทธิพลที่จะทำให้ขนาดของ HAZ บนแนวเชื่อมทั้งสองข้างไม่เท่ากัน โดยผู้เขียนได้ทำวิจัยเชิงทดลองของการเชื่อมโลหะต่างชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1020) กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติก (AISI 304) ด้วยขบวนการเชื่อมทิกพบว่าขนาด HAZ ของแนวเชื่อมด้านโลหะหลักเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีขนาดที่แคบกว่าทางด้านของโลหะหลักเหล็กกล้าคาร์บอน เหตุเพราะสมบัติทางด้านการนำความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมสูงกว่า ถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอกได้รวดเร็วกว่า ดังแสดง ในรูปที่ 6.24 และเป็นไปในทิศทางเดียวกันถึงแม้จะเชื่อมด้วยขบวนการเชื่อมที่แตกต่างกัน

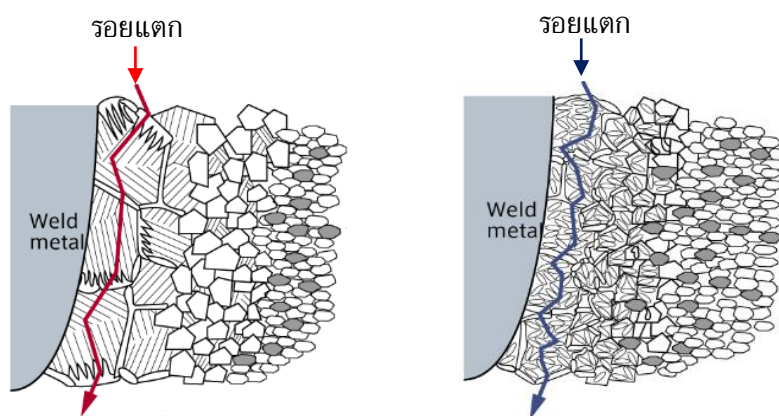
อิทธิพลของผลกระทบร้อนต่อสมบัติของแนวเชื่อม (Effect of heat affected zone)

“HAZ เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ แต่มันต้องมี” รู้จักกันดีในกลุ่มของช่างเชื่อม ที่เชื่อมต่อโลหะด้วยขบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) ซึ่งการเชื่อมจำเป็นต้องใช้ความร้อนเพื่อการหลอมโลหะให้ติดกันหรือต่อกัน แต่ในขณะที่ความร้อนก็ส่งผลกระทบในเชิงลบต่อชิ้นงานที่ทำการเชื่อมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นจึงได้พยายามออกแบบงานเชื่อมและเลือกกรรมวิธีการเชื่อมที่ลดพื้นที่ของ HAZ ให้เกิดน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพราะพื้นที่ดังกล่าวนี้จะส่งผลกระทบต่อสมบัติของแนวเชื่อมโดยตรง ทั้งสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมี ส่วนจะกระทบกับสมบัติด้านใดมากน้อยต่างกันนั้นก็ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุโลหะที่นำมาทำการเชื่อมเป็นสำคัญ ซึ่งสมบัติด้านต่าง ๆ ที่กระทบมากและพบเห็นอยู่บ่อย ๆ ในการเชื่อมพอจะรวบรวมได้ดังนี้

- | | |
|----------------------------|--|
| – ความแข็งแรงลดลง | – เกิดความแข็งเปราะจากไฮโดรเจน |
| – เกิดความเค้นตกค้าง | – เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟสโครงสร้าง |
| – ความเหนียวลดต่ำลง | – เกิดการออกซิเดชัน (Oxidation) |
| – ลดความต้านทานการกัดกร่อน | – เกิดความแข็งเฉพาะที่ (Localized hardening) |
| – เกิดความไวต่อการแตกร้าว | – เกิดไนไตรดิงที่ผิว (Surface nitriding) |

จากการศึกษาข้อมูลงานวิจัยทางด้านโลหะวิทยางานเชื่อม ได้มีการกล่าวถึงความเสียหายที่เกิดจากการแตกร้าว (Cracking) ของแนวเชื่อมที่บริเวณ HAZ พร้อมกับการศึกษาทดลองเพื่อหาวิธีการ

แก้ปัญหาการแตกร้าวดังกล่าวกันมากพอสมควร โดยมีงานวิจัยเชิงทดลองได้รายงานผลการทดลองไว้ว่า ขนาดของก้อนเกรน (Grain size) ที่บริเวณกระแทกร้อนจะมีผลกระทบโดยตรงต่อความไวในการแตกร้า (Susceptibility to cracking) กล่าวคือ กรณีที่บริเวณที่กระแทกร้อน หรือ HAZ มีขนาดเกรนที่มีหยาบ (Coarse grains) จะมีความไวต่อการแตกร้าสูงมากและในขณะเดียวกันอัตราการแตกร้าก็จะสูงเช่นกัน (Crack propagation) เมื่อพิจารณาถึงรอยแตกร้าจะพบว่า มีลักษณะเป็นรอยแตกร้าแบบเปราะ (Brittle fracture) แต่สำหรับกรณีที่บริเวณที่กระแทกร้อนมีขนาดเกรนที่เล็กหรือละเอียด (Fine grains) จะพบว่าความไวต่อการแตกร้าของบริเวณ HAZ ต่ำ และมีอัตราการขยายตัวของรอยแตกร้าที่ช้า ด้วยเหตุผลเพราะการที่มีขนาดเกรนเล็ก ๆ จะมีจำนวนของขอบเกรน (Grain boundary) ที่มาก ซึ่งปกติการแตกร้ามักจะเริ่มต้นที่ขอบเกรนและลุกลามขยายการแตกไปตามขอบของเกรน ดังนั้น ขอบเกรนที่มากจะส่งผลให้เพิ่มระยะทางและเพิ่มเวลาของรอยแตกที่ลุกลาม ทำให้รอยแตกหักเกิดช้าลงเหมือน HAZ มีความเหนียวที่มากขึ้น (Toughness) และเมื่อพิจารณาถึงรอยแตกหักก็จะเห็นได้ชัดเจนว่ารอยแตกหักจะมีลักษณะเป็นแบบเหนียว (Ductile fracture) ดังแสดงเปรียบเทียบลักษณะการแตกร้าของ HAZ ที่มีขนาดเกรนแบบหยาบ กับขนาดเกรนแบบละเอียด ในรูปที่ 6.25



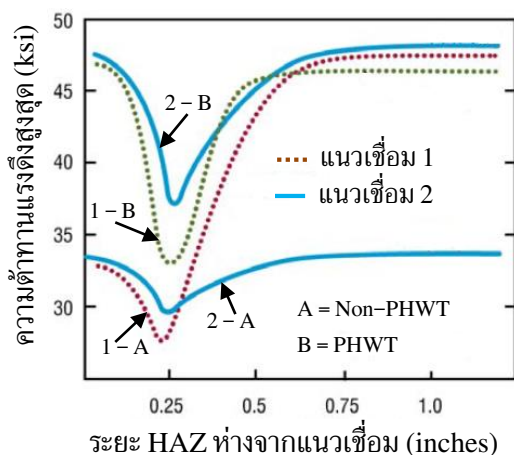
(ก) HAZ แบบเกรนหยาบ (Coarse grains) (ข) HAZ แบบเกรนละเอียด (Fine grains)

รูปที่ 6.25 การเปรียบเทียบการแตกร้าของ HAZ แบบเกรนหยาบ กับ แบบเกรนละเอียด

ที่มา : Jian Yang and et al. *Journal of Steel Research International*. Vol. 2, Issue 5, 2014

จากคำอธิบายข้างต้น แสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าปัญหาของขนาดเกรนที่ใหญ่ หรือเกรนหยาบ ที่เกิดขึ้นในบริเวณ HAZ ของชิ้นงานเชื่อมจะไม่เกิดผลดีต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม โดยเฉพาะสมบัติด้านความเหนียวแน่น (Toughness) ที่ซึ่งจะทนต่อการแตกร้าได้น้อย จึงได้มีการวิจัยทดลองพบว่าการวิธีทางความร้อนหลังขบวนการเชื่อม (Post weld heat treatment) หรือที่รู้จักกันในคำย่อที่ว่า “PWHT” เป็นวิธีการที่สามารถแก้ปัญหาได้ โดยใช้หลักการให้ความร้อนกับชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมตรงบริเวณรอยแนวเชื่อม เพื่อที่จะนำความร้อนไปเป็นพลังงานกระตุ้นให้โครงสร้างบริเวณ HAZ ของแนว

เชื่อมเกิดการเปลี่ยนแปลง ระดับของความร้อนต้องสูงเกินระดับอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ของโลหะที่นำมาเชื่อม (Recrystallization temperature) เพื่อต้องการให้เกิดเป็นเกรนใหม่ที่มีขนาดละเอียด และเกิดการจัดเรียงตัวของเกรน มีความเป็นระเบียบ ซึ่งนอกจากนี้พบว่ากรรมวิธีทางความร้อนนี้จะยังช่วยลดความแข็ง ลดความเค้นตกค้าง กำจัดแก๊สไฮโดรเจนที่ละลายอยู่ในเนื้อเชื่อม และเพิ่มความเหนียวกับความแกร่งให้แก่เนื้อเชื่อมอีกด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับ HAZ ของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติกที่นำไปใช้กับงานที่มีสภาพแวดล้อมที่เกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรง จำเป็นต้องทำ PHWT เพื่อละลายอนุภาคโครเมียมคาร์ไบด์ ซึ่งผลการละลายจะช่วยให้เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมได้ดี (Resistance pitting corrosion) ดังตัวอย่างในรูปที่ 6.26 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่บริเวณ HAZ ของแนวเชื่อมโลหะอลูมิเนียมผสมระหว่างแนวเชื่อมที่ผ่านกับการไม่ผ่านการทำ PHWT จากผลการทดลองจะเห็นได้ชัดเจนว่า ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของ HAZ เมื่อผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อมจะให้ค่าที่เพิ่มสูงขึ้น



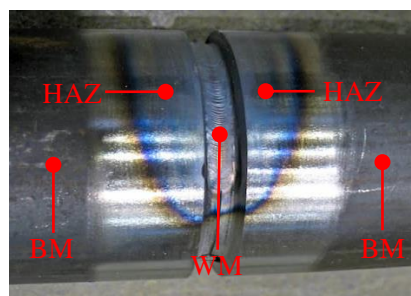
รูปที่ 6.26 การเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงของ HAZ ที่ผ่านกับการไม่ผ่านการทำการทำ PHWT
ที่มา : Theory and education, Weld failure, 2018

การพิจารณาตรวจสอบหรือประมาณการขนาดของ HAZ ด้วยสายตา

เบื้องต้นของการเชื่อมแบบหลอมละลาย หลังเชื่อมเสร็จผู้ปฏิบัติการเชื่อมหรือผู้ควบคุมการเชื่อมจะสามารถระบุขนาดความกว้างโดยประมาณของบริเวณ HAZ ได้ ด้วยวิธีการสังเกตจากสีของพื้นผิวโลหะหลัก (Base metal) ที่อยู่ถัดจากแนวเชื่อมได้ ซึ่งเป็นสีที่ถูกกำหนดเป็นมาตรฐานบ่งชี้ถึงระดับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะเชื่อม ซึ่งเรียกกันว่า “Heat Tint Colors” ดังแสดงในรูปที่ 6.27 พร้อมตัวอย่างชิ้นงานที่เชื่อมเพื่อแสดงการเกิดสีของบริเวณกระแทกร้อน โดยปกติสีของ HAZ จะชัดเจนมากในการเชื่อมวัสดุโลหะกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิม และสีที่เกิดจะแปรเปลี่ยนไปตามปัจจัยของ ปริมาณธาตุโครเมียมที่ผสม ระดับออกซิเจนระหว่างการเชื่อม สภาพความพื้นผิว และสารปนเปื้อนที่บริเวณผิวโลหะเชื่อม เป็นต้น สำหรับมาตรฐาน American Welding Society (AWS) D18.2 ได้สร้างมาตรฐานแนวปฏิบัติการพิจารณาสีของแนวเชื่อม สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ดังแสดงในรูปที่ 6.28 สำหรับบอกขนาดความกว้างของ HAZ และระดับปริมาณออกซิเจนขณะเชื่อมได้ โดยมี No.1 ถึง No.10 นับเบอร์

น้อยจะมีปริมาณออกซิเจนต่ำ (No.1 = 10 ppm) และนับเบอร์มากจะมีปริมาณออกซิเจนสูง (No.10 = 25000 ppm) ส่วนปริมาณออกซิเจนที่นับเบอร์อื่น ๆ แสดงไว้ได้รูปที่ 6.28 อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ สีของผิวบริเวณแนวเชื่อมที่ใช้บ่งชี้ขนาดของ HAZ อาจคลาดเคลื่อนได้บ้าง เนื่องจากสภาพแวดล้อมของการเชื่อมการเชื่อมจะมีตัวแปรอื่น ๆ อีกที่ส่งผลกระทบต่อสี เช่น สภาพอากาศ กระแสลม ความชื้น และปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น

Color	Temperature
Light Yellow	550 degrees F/290 degrees C
Straw Yellow	640 degrees F/340 degrees C
Yellow	700 degrees F/370 degrees C
Brown	735 degrees F/390 degrees C
Purple Brown	790 degrees F/420 degrees C
Dark Purple	840 degrees F/450 degrees C
Blue	1,000 degrees F/540 degrees C
Dark Blue	1,110 degrees F/600 degrees C



(ข) ตัวอย่างการเกิดสีบริเวณ HAZ

(ก) มาตรฐานสีเทียบอุณหภูมิ Heat Tint Colors

รูปที่ 6.27 มาตรฐานแถบสีอุณหภูมิของบริเวณกระทบร้อน (HAZ) และตัวอย่างการเกิดสี

ที่มา : Andrea Bustreo. All you need to know about the heat affected zone. 2016

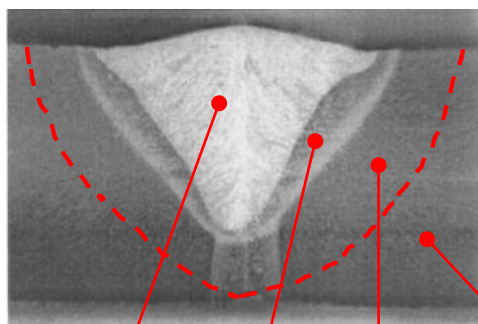
No. 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
• NO.1 = 10 ppm	• NO.2 = 25 ppm	• NO.3 = 50 ppm	• NO.4 = 100 ppm	• NO.5 = 200 ppm	• NO.6 = 500 ppm	• NO.7 1000 ppm	• NO.8 = 5000 ppm	• NO.9 = 12500 ppm	• NO.10 = 25000 ppm

รูปที่ 6.28 มาตรฐาน AWS D18.2 แถบสีที่บอกขนาด HAZ และปริมาณออกซิเจนขณะเชื่อม

ที่มา : American Welding Society : D 18.2 , 2009

3. บริเวณที่ไม่กระทบจากความร้อน (Non-heat affected zone : Non-HAZ) หมายถึง ส่วนของบริเวณพื้นที่เนื้อโลหะเชื่อมที่ไม่ได้รับผลกระทบความร้อนจากการเชื่อม เป็นส่วนบริเวณที่อยู่ถัดออกมาจาก HAZ ซึ่งส่วนนี้ก็คือ ส่วนของเนื้อโลหะหลัก (Base metal/parents zone : BMZ) ถึงแม้ว่าส่วนนี้จะมีหน้าที่เป็นตัวระบายความร้อนที่ผ่านจากบริเวณ HAZ ออกมาไปสู่ภายนอกก็ตาม แต่ด้วยระดับอุณหภูมิของความร้อนที่ระบายออกมานั้นไม่สูงมากพอที่จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางโลหะวิทยา ดังนั้น บริเวณนี้จึงมีสภาพที่เหมือนกับโลหะหลักที่นำมาเชื่อมทุกประการ ทั้งส่วนผสมทางเคมีและสมบัติด้านต่าง ๆ ดังแสดงเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของบริเวณที่ไม่กระทบจากความร้อน (Non-HAZ) กับบริเวณของโลหะหลัก (BMZ) ในรูปที่ 6.29 จะเห็นได้ชัดเจนว่าโครงสร้าง

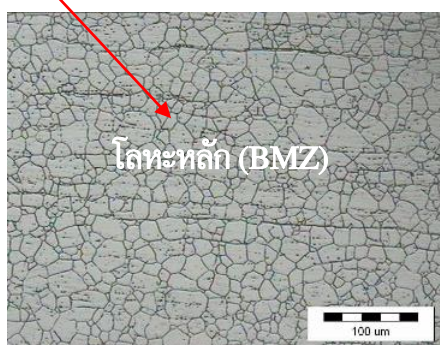
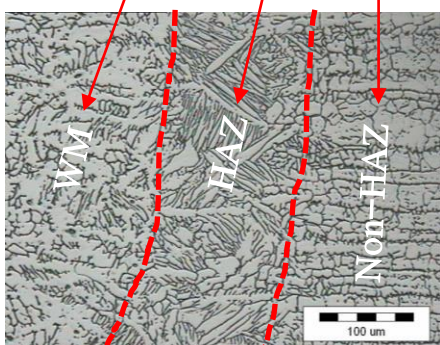
จุลภาคของบริเวณที่ไม่ได้ผลกระทบจากความร้อนกับบริเวณของโลหะหลัก จะมีโครงสร้างจุลภาคที่เหมือนกันทุกประการ



รูปที่ 6.29 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค

บริเวณ Non-HAZ กับ BMZ

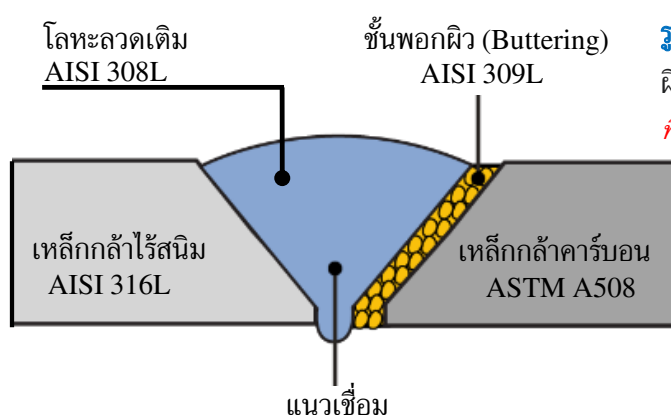
ที่มา :Wichan Chuaiphan. *Journal of Manufacturing Processes*, (58), 163–178, 2020



6.3 แนวเชื่อมแบบเชื่อมเสริมเนื้อโลหะ (Adding up weldments)

หลักของการเชื่อมโลหะแบบหลอมละลาย (Fusion welding) ก็เพื่อต้องการนำเอาโลหะอย่างน้อยสองชิ้นมาต่อกันด้วยการหลอมละลายติดกันที่อาจมีหรือไม่มีโลหะลวดเติมก็ได้ โดยถ้าเป็นการเชื่อมโลหะชนิดหรือเกรดเดียวกัน (Similar welding) ถือว่าเป็นการเชื่อมแบบปกติ แต่มีลักษณะของประเภทงานอีกมากมายที่มีความจำเป็นจะต้องทำการเชื่อมโลหะที่ต่างชนิดหรือต่างเกรดกัน (Dissimilar welding) แนวเชื่อมในลักษณะแบบนี้ต้องคำนึงถึงปัจจัยทางด้านโลหะวิทยางานเชื่อมที่มากขึ้น ซึ่งปัจจุบันเทคโนโลยีงานเชื่อมได้มีการนำไปใช้กับการเชื่อมโลหะที่ต่างชนิดกันมากขึ้น ที่มีจุดมุ่งหมายเพื่อนำชิ้นงานไปใช้กับงานอุตสาหกรรมประเภทที่ต้องการสมบัติเฉพาะด้านเช่น ทนการสึกหรอ ทนการกัดกร่อน ทนความดัน เพิ่มความแข็งแรงของพื้นผิว เพิ่มขนาดของชิ้นงาน ซึ่งรวมถึงเพิ่มขีดความสามารถในการเชื่อมของโลหะต่างชนิดกัน เป็นต้นจากเหตุผลที่กล่าวข้างต้นจึงได้เกิดขบวนการเชื่อมที่เป็นวิธีการเสริมเนื้อโลหะขึ้นหลายวิธีการที่นิยมใช้งานกันในปัจจุบัน โดยแต่ละวิธีการที่จะกล่าวถึงจะคล้าย ๆ กัน ที่เป็นการเสริมเนื้อโลหะลงบนผิวของชิ้นงานโลหะหลัก (Base metal) หรือบางครั้งอาจเสริมลงบนผิวแนวเชื่อมเดิมที่เชื่อมเสร็จสิ้นมาแล้ว ซึ่งต้องพยายามสร้างความเข้าใจและแยกแยะของแต่ละวิธี ซึ่งอาจจะแตกต่างกันในแง่ของวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งานหรือแตกต่างกันด้วยกรรมวิธีการเชื่อม ดังจะได้กล่าวถึงแต่ละวิธีการของการเสริมเนื้อโลหะ ดังต่อไปนี้

1. การสร้างชั้นพอกผิว (Buttering/Buffer layer) ASM International (1993) ได้กล่าวถึงรูปแบบของการสร้างชั้นพอกผิวลงบนผิวของโลหะหลักบริเวณรอยต่อด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้านเพื่อใช้เป็นตัวกลางที่จะเพิ่มขีดความสามารถในการเชื่อมหรือปรับปรุงสมบัติของแนวเชื่อมด้านต่าง ๆ ให้ดีขึ้นเหมาะสมกับสภาพการนำไปใช้งาน ซึ่งส่วนใหญ่จะนิยมใช้กับการเชื่อมโลหะต่างชนิด ที่มุ่งเน้นเหตุผลทางด้านโลหะวิทยา เช่น โลหะหลักมีจุดหลอมเหลวที่ต่างกัน (Melting point) ชั้นพอกผิวที่สร้างขึ้นจะเป็นตัวช่วยสร้างสมดุลจุดหลอมเหลวให้ใกล้เคียงกัน หรือกรณีที่โลหะหลักมีอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกัน (Cooling rate) มักจะเกิดการแตกร้าวเนื่องจากความเค้น ซึ่งชั้นพอกผิวก็จะช่วยลดปัญหาการเย็นตัวที่รวดเร็วต่างกันได้นอกจากนี้ชั้นพอกผิวยังถูกสร้างขึ้นเพื่อทำหน้าที่ช่วยให้แนวเชื่อมมีการเจือจาง (% Dilution) ของส่วนผสมทางเคมีในแนวเชื่อมที่สูง โดยเฉพาะกับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน กับเหล็กกล้าไร้สนิมที่ต้องการแนวเชื่อมที่มีความต้านทานการกัดกร่อน ดังแสดงด้วยารูปแบบของการสร้างชั้นพอกผิวในรูปที่ 6.30 มักจะนิยมสร้างชั้นพอกผิวด้วยลวดโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดที่มีธาตุโครเมียมผสมสูง และพอกผิวด้านเหล็กกล้าคาร์บอนเพื่อเจือจางโครเมียมเข้าไปก่อน เมื่อทำการเชื่อมปริมาณธาตุโครเมียมที่ทนการกัดกร่อนจากลวดเชื่อมที่เติมเข้าไปในเนื้อเชื่อมได้มากขึ้นโดยไม่ต้องเจือจางสูญเสียไปในฝั่งของเหล็กกล้าคาร์บอนอีก เป็นต้น นอกจากนี้จุดประสงค์ของการสร้างชั้นพอกผิวยังครอบคลุมไปถึงเหตุผลทางด้านช่วยลดขั้นตอนการอุ่นขึ้นงานหลังเชื่อม (PWTH) การป้องกันการแตกขณะร้อน (Hot cracking) และงานเชื่อมที่นิยมนำวิธีการการสร้างชั้นพอกผิวมาใช้ที่พบเห็นมาก เป็นการป้องกันการแตกแบบฉีก (Lamellar tearing) ดังแสดงในรูปที่ 6.31 (ก) แนวเชื่อมมุม (Fillet weld) ที่เมื่อรับแรงมักจะเกิดการแตกแบบฉีกขาด ซึ่งแก้ปัญหาโดยการสร้างชั้นพอกผิวขึ้นก่อนทำการเชื่อมตามแบบงานที่กำหนดก็สามารถจัดปัญหาการแตกดังกล่าวได้ดี

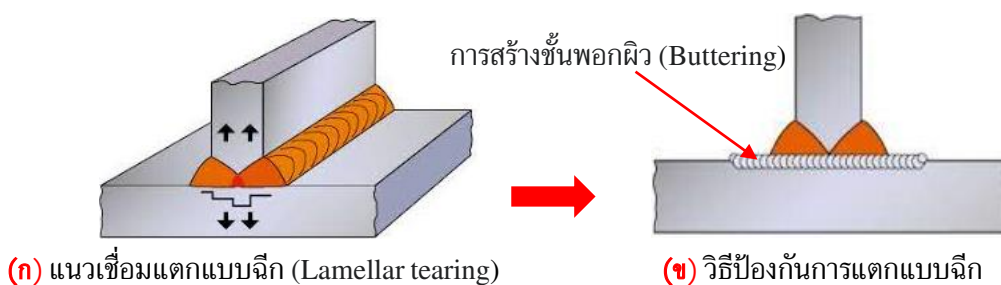


รูปที่ 6.30 ตัวอย่างการสร้างชั้นพอกผิว (Buttering/Buffer layer)

ที่มา : AWS : Learning – Buttering,

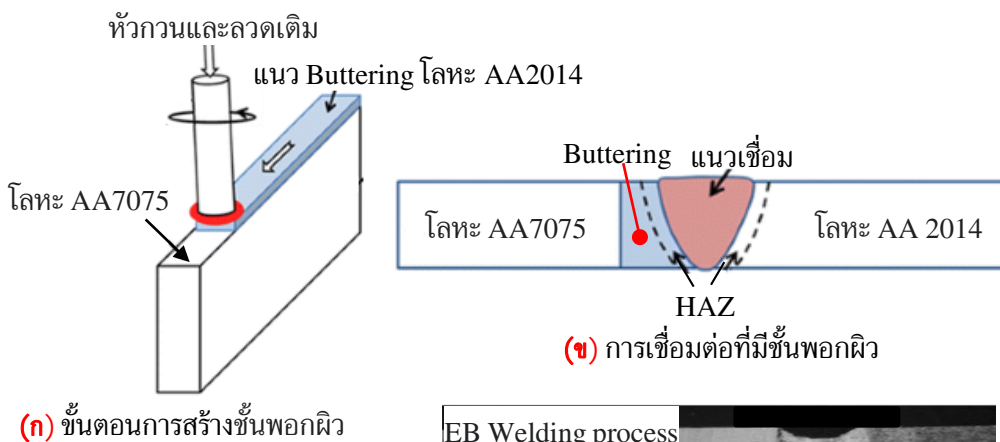
การสร้างชั้นพอกผิวหรือ Buttering ที่ผ่านมาจะพบว่าอาศัยการพอกด้วยการเชื่อมแบบหลอมละลายของลวดโลหะเดิมกับผิวหน้าตรงรอยต่อ แต่ปัจจุบันได้มีการวิจัยคิดค้นเทคนิคการ Buttering ด้วยวิธีการเชื่อมแบบการเสียดทาน (Friction stir welding) โดยออกแบบหัวกวนให้ทำหน้าที่กวนเนื้อโลหะพร้อมกับเป็นลวดโลหะเดิมด้วย (Consumable rod) เมื่อเชื่อมเสร็จก็จะได้นเนื้อโลหะที่เป็นชั้นพอก

ผิวซึ่งจะนำไปใช้เป็นตัวกลางของการเชื่อมต่อไป ข้อดีของการสร้างชั้นพอกผิวด้วยวิธีนี้จะได้ชั้นพอกที่ไม่มีปัญหาข้อบกพร่องในแนวเชื่อมเหมือนกับการเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่น รูพรุน สแลกฝังใน ความเค้นตกค้าง การแตกร้าวจากการเย็นตัวของแนวเชื่อมและการเกิด HAZ เป็นต้น ซึ่งเป็นข้อดีของการเชื่อมแรงเสียดทาน ดังแสดงการตัวอย่างงานวิจัยที่มีการเผยแพร่ทดลองการเชื่อมโลหะอลูมิเนียมผสมต่างชนิด ที่มีการสร้างชั้นพอกผิวด้วยวิธีการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน ดังแสดงในรูปที่ 6.32



รูปที่ 6.31 การสร้างชั้นพอกผิว (Buttering) เพื่อลดการแตกร้าวแบบฉีก (Lamellar tearing)

ที่มา : TWI : Cracking mechanisms –Lamella tearing, 2007



(ค) แนวเชื่อมอลูมิเนียมผสมที่มีชั้นพอกผิว (Butter)

รูปที่ 6.32 การสร้างชั้นพอกผิวด้วยวิธีการเชื่อมแบบการเสียดทาน (Friction stir welding)

ที่มา : Friction buttering : A New Technique for dissimilar welding, (48) 1416–1422, 2017

2. การสร้างชั้นผิวแบบหุ้ม (Cladding welding) Janette Brezinova et al. (2016) ได้อธิบายไว้ว่าเป็นวิธีการที่ต้องการเพิ่มเนื้อโลหะและเพิ่มคุณสมบัติที่บริเวณส่วนเฉพาะผิวของชิ้นงานด้วยการรวมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย โดยการเชื่อมจะแตกต่างจากการเชื่อมปกติที่จะหลอมละลายโลหะทั้งหมดตรงรอยต่อเข้าด้วยกัน แต่จะเป็นการเชื่อมแบบผากหรือแค่เชื่อมติดไว้ที่ผิวด้านนอกของชิ้นงานจะไม่ให้ความสำคัญว่าจะเชื่อมติดได้ดีสมบูรณ์มากน้อยอย่างไร เพราะต้องการเอาโลหะที่จะต้องใช้งานมาหุ้มผิวไว้ โดยส่วนที่หุ้มหรือผากไว้ต้องมีสมบัติตามที่ต้องการ เช่น อาจต้องการไบต์ที่แข็งมากขึ้น หรืออาจต้องการโครงสร้างทางโลหะวิทยาที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนที่มากขึ้น เป็นต้น ซึ่งโลหะที่นำมาเชื่อมหุ้มนั้นส่วนใหญ่จะเป็นโลหะต่างชนิดกับโลหะชิ้นงาน เช่น การเชื่อมหุ้มผิวเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยสวดอินโคเนล (Inconel electrode) เพื่อให้เนื้อเชื่อมที่หุ้มผิวชิ้นส่วนมีความทนทานต่อการเสียดสี มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน หรือการเชื่อมผิวงานที่ต้องการเพิ่มความแข็งที่ผิวชิ้นงานทนแรงกระแทก เช่น การเชื่อมผิวเหล็กกล้าคาร์บอนสูงด้วยสวดเชื่อมแมงกานีสสูงในงานอุตสาหกรรมเหมืองแร่ เป็นต้น

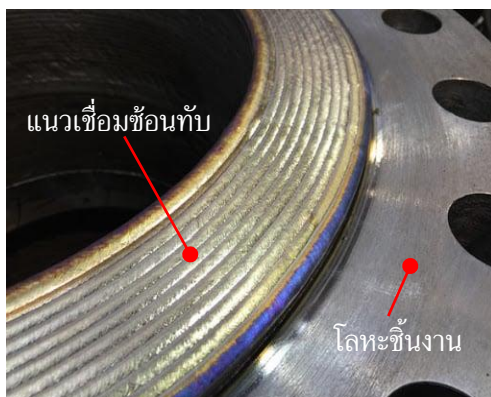
ขบวนการเชื่อมสำหรับการสร้างชั้นผิวแบบหุ้ม (Cladding) สามารถเลือกใช้ขบวนการเชื่อมที่มีใช้อยู่ ได้แก่ SMAW/ GMAW/ FCAW/ PAW/ GTAW และ อื่น ๆ ส่วนข้อบกพร่องของรอยเชื่อมแบบหุ้มก็จะมีให้เห็นปกติเช่นเดียวกับการเชื่อมรอยต่อทั่ว ๆ ไป ดังแสดงตัวอย่างการสร้างชั้นผิวแบบหุ้มด้วยวิธีการเชื่อมแบบเลเซอร์ (Laser cladding welding) ในรูปที่ 6.33



รูปที่ 6.33 การสร้างชั้นผิวแบบหุ้ม
(Cladding welding)
ที่มา : TITANOVA– Refurbishing
Services : Laser cladding, 2019

3. การสร้างชั้นผิวแบบซ้อนทับ (Overlay welding หรือ Weld overlay : WOL) เป็นวิธีการสร้างชั้นผิวของชิ้นงานด้วยการเชื่อมที่ต้องการให้ผิวของชิ้นงานหนาขึ้น โดยลักษณะของแนวเชื่อมแต่ละแนวจะซ้อนทับกัน มักจะนิยมเรียกว่า “Weld overlay” วิธีการนี้จะคล้ายกับแบบ Cladding จะต่างกันที่วิธีนี้สามารถเลือกใช้วัสดุสวดเชื่อมที่เป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ และส่วนใหญ่นิยมกับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ ๆ โดยวัตถุประสงค์หลักของการสร้างชั้นผิวแบบซ้อนทับก็เพื่อ ปรับปรุงคุณสมบัติของพื้นผิวของโลหะชิ้นงาน กรณีที่สวดเชื่อมเป็นชนิดเดียวกันกับโลหะชิ้นงานจะเป็นการปรับปรุงผิวของชิ้นงานให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น ส่วนกรณีที่สวดเชื่อมต่างชนิดก็จะเป็นการสร้างผิวชิ้นงานที่เพิ่มคุณสมบัติบางประการ เช่น ทนอุณหภูมิสูง ต้านทานการขยายตัว ทนการเสียดสีหรือสึกหรอ และทนการกัดกร่อน

เป็นต้น ดังตัวอย่างวิธีการเชื่อมสร้างชั้นผิวแบบซ้อนทับในรูปที่ 6.34 (ก) และ (ข) เป็นตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแบบ Weld overlay



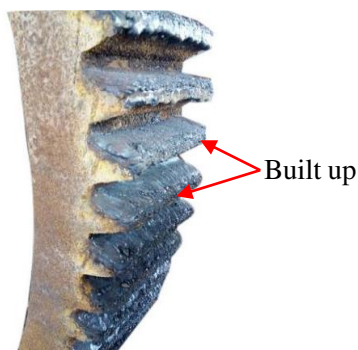
(ก) การเชื่อมแบบซ้อนทับ (Welding overlay) (ข) แนวเชื่อมแบบซ้อนทับ (Overlay weld)

รูปที่ 6.34 การสร้างชั้นผิวแบบซ้อนทับ (Overlay welding)

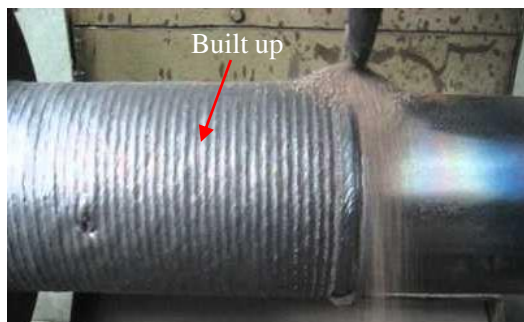
ที่มา : WALDUN- Weld Overlay Company, 2015

4. การเชื่อมเพื่อเพิ่มขนาด/รูปทรง (Built up welding) เป็นขบวนการเชื่อมเพื่อเสริมสร้างขนาดหรือรูปทรงให้กับชิ้นงาน โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดหรือรูปร่างตามความต้องการที่จะใช้งานต่อไป ซึ่งเป็นการสร้างเนื้อโลหะขึ้นที่ไม่เน้นคุณสมบัติเฉพาะด้านมากนัก ดังนั้น การเชื่อมมักจะเป็นการเชื่อมที่โลหะลวดเชื่อมกับโลหะชิ้นงานเป็นวัสดุชนิดหรือเกรดเดียวกัน ขบวนการเชื่อมแบบ Built up จึงไม่ต้องยุ่งยากกับการเลือกลวดเชื่อมและไม่จำเป็นต้องเน้นพฤติกรรมทางโลหะวิทยาเชื่อมมากนัก หลักการกำหนดปัจจัยการเชื่อมจะเป็นการเชื่อมปกติแบบ Similar welding ส่วนใหญ่จะพบการเชื่อมเพื่อเพิ่มขนาด ของงานซ่อมบำรุงบนชิ้นส่วนงานที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เกิดการสึกหรอหรือสูญเสียเนื้อโลหะ หรือบางครั้งก็เป็นการประกอบขึ้นส่วนที่เกิดปัญหาจากความผิดพลาดในการออกแบบขนาดของชิ้นส่วนที่ไม่สามารถประกอบงานได้จึงต้องสร้างเพิ่มขึ้นจึงมักเรียกขบวนการแก้ปัญหาการเชื่อมในลักษณะนี้ว่า การ “Built up” เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเพื่อเพิ่มขนาด/รูปทรง ในรูปที่ 6.35 จากตัวอย่างชิ้นงานที่แสดงจะสังเกตได้ว่ามีลักษณะรูปแบบของวิธีการเชื่อมจะเหมือนกันหรือคล้ายกับการเชื่อมพอกผิวและการเชื่อมซ้อนทับ แต่จะต่างกันที่จุดประสงค์ของการนำผิวพอกไปใช้งาน

ลักษณะของงานที่ใช้วิธีการเชื่อมเพื่อเพิ่มขนาด/รูปทรงยังสามารถพบเห็นในรูปแบบของการเสริมผิวหน้าของร่องบากหน้ารอยต่อ ในกรณีที่ย่อยต่อมีช่องว่างมากเกินไป หรือบางครั้งเป็นการเชื่อมที่คล้ายกับการทำ Buttering เพื่อฝากวัสดุทับหน้าไว้บริเวณรอยต่อแต่มีจุดประสงค์หลักเพื่อเสริมขนาดของผิวให้หนาขึ้น โดยส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมวัสดุโลหะที่เป็นชนิดเดียวกันทั้งโลหะลวดเชื่อมและโลหะหลัก (Similar welding)



(ก) การเชื่อมเพื่อเพิ่มขนาดของฟันเฟือง



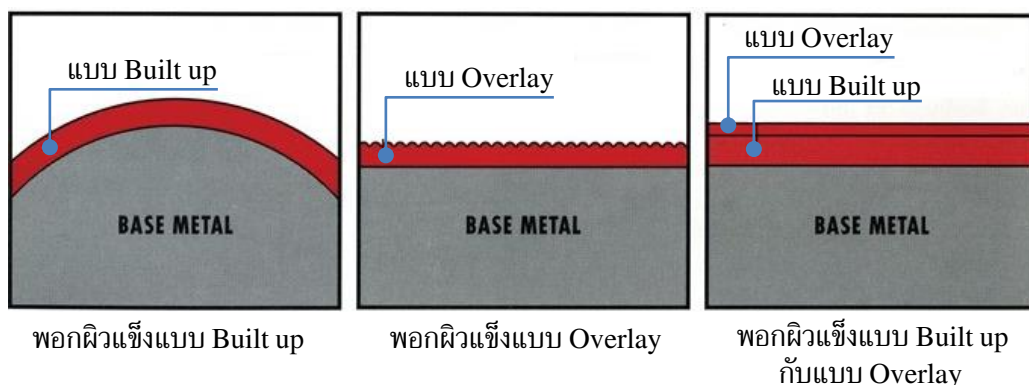
(ข) การเชื่อมเพื่อเพิ่มขนาดรูปร่างของเพลลา

รูปที่ 6.35 การเชื่อมเพื่อเพิ่มขนาดหรือรูปทรง (Built up welding)

ที่มา : Unithai – Beam build, 2016

5. การเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hard-facing welding) เป็นขบวนการเชื่อมเสริมเนื้อโลหะที่ผิวหน้าชิ้นงาน เพื่อต้องการให้ผิวมีความแข็งเป็นพิเศษ ซึ่งบางครั้งเรียกว่าการเชื่อมเคลือบผิวแข็ง/การฝากวัสดุที่แข็งบนพื้นผิว เป้าหมายก็เพื่อต้องการให้ชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบทนทานต่อการสึกหรอจากการเสียดสี วัสดุลวดโลหะที่นำมาเชื่อมพอกผิวแข็งสามารถเลือกได้ทั้งที่เป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันกับโลหะหลัก (Base metal) ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญที่ต้องพิจารณา คือ เนื้อเชื่อมต้องทนต่อการสึกหรอ เพราะการเชื่อมพอกผิวแข็งจะนิยมนำไปใช้กับงานซ่อมบำรุงที่จะช่วยยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วนหรือปรับปรุงชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่เสื่อมสภาพให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ช่วยลดค่าใช้จ่ายได้ในการที่จะต้องเปลี่ยนชิ้นส่วน เป็นต้น อ้างอิงจาก C. Okechukwu et al. (2017)

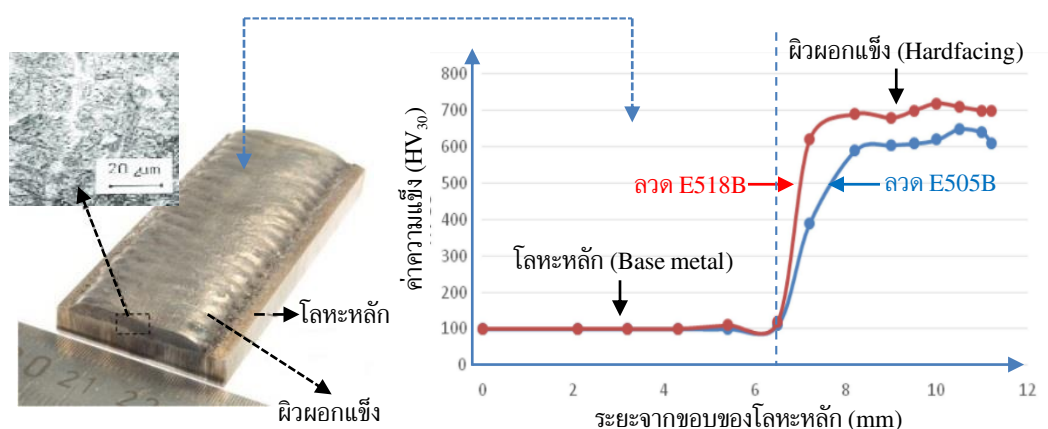
กรรมวิธีการพอกผิวแข็งด้วยการเชื่อมจะสามารถพอกผิวได้หลายแบบหรือหลายเทคนิควิธี ดังแสดงใน**รูปที่ 6.36** ที่สามารถทำการพอกด้วยวิธีแบบ Built up แบบ Overlay และแบบผสมของทั้งแบบ Built up แบบ Overlay โดยทุกวิธีจะมุ่งเน้นทำให้ผิวชิ้นงานมีความแข็งสูงขึ้น



รูปที่ 6.36 เทคนิควิธีการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing technic)

ที่มา : Hardfacing and compact machinery, 2013

ด้วยจุดประสงค์หลักของการเชื่อมพอกผิวแข็งที่ต้องการเสริมหรือเพิ่มความแข็งแรงให้กับผิวของชิ้นงาน และต้องทนต่อสภาพการใช้งานที่ลดการสูญเสียเนื้อโลหะเป็นสำคัญ ดังนั้น คุณสมบัติของแนวเชื่อมต้องคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลทางด้านโลหะวิทยาของรอยเชื่อม ดังตัวอย่างการวิจัยการเชื่อมพอกผิวแข็งโลหะหลักเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S235JRH ด้วยลวด E505B กับ ลวด E518B ผลการวิจัยมีความเด่นชัดมาก ถึงค่าความแข็งที่บริเวณพอกผิวแข็งมีความแข็งสูงกว่าบริเวณโลหะหลัก ด้วยเหตุเพราะแนวเชื่อมพอกเกิดโครงสร้างที่เป็นคาร์ไบด์ที่ผสมกับโครงสร้างเบนไนท์ที่มีความแข็งสูง ดังแสดงผลของค่าความแข็งในรูปที่ 6.37 ดังนั้น การเลือกลวดเชื่อมที่จะนำมาเชื่อมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงผิวงาน ช่างเชื่อมต้องมีความเข้าใจถึงบริบทของโลหะวิทยาของโลหะลวดที่เชื่อมและโลหะหลัก ซึ่งโดยเฉพาะส่วนผสมทางเคมี เป็นสำคัญ

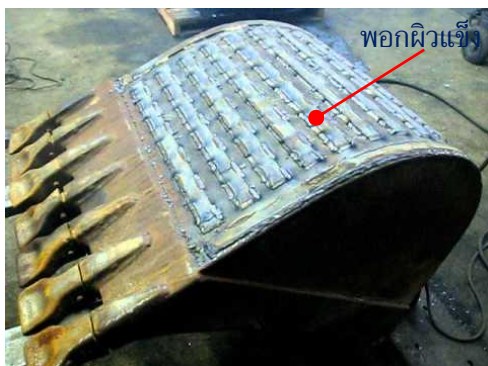


รูปที่ 6.37 ตัวอย่างการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing welding)

ที่มา : Journal of MDPI-Metal, (6) 36, 2016

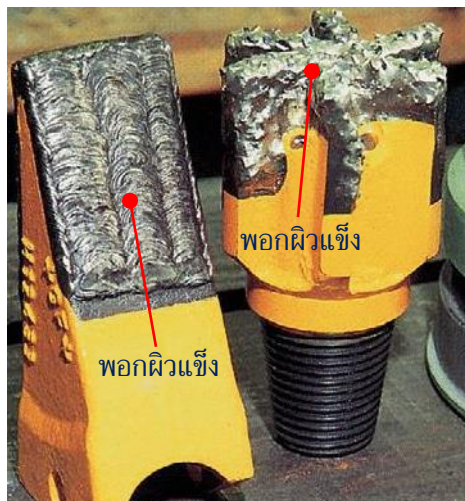
ลักษณะชิ้นงานของการเชื่อมพอกผิวแข็งในอดีตมักจะพบในการเชื่อมงานประเภทซ่อมบำรุง เพื่อปรับปรุงแก้ไขให้ผิวของชิ้นงานสามารถนำไปใช้งานได้อีกครั้ง เช่น ชิ้นส่วนงานที่มีราคาแพงที่ผิวเกิดการสึกหรอก็จะทำการเชื่อมพอกผิวให้มีขนาดเหมือนเดิม ต่อมาก็พยายามเลือกลวดเชื่อมที่ทนทานต่อการสึกหรอมากขึ้น จนเกิดเป็นเทคนิควิธีการเชื่อมพอกผิวแข็งขึ้นดังแสดงตัวอย่างชิ้นส่วนที่นำมาเชื่อมพอกผิวแข็งในรูปที่ 6.38 (ก) และในปัจจุบันผู้ผลิตชิ้นส่วนงานที่ต้องนำไปใช้กับงานที่มีการสึกหรอมาก ๆ หรืองานที่ต้องการความแข็งแรงที่ผิวชิ้นงานมาก ๆ ได้ผลิตชิ้นส่วนที่มีการเชื่อมพอกผิวแข็งติดมาเรียบร้อยแล้ว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานและยืดอายุการใช้งาน รวมถึงการลดต้นทุนการผลิตลง ดังแสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีการเชื่อมพอกผิวสำเร็จมาแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 6.38 (ข) จากการศึกษาข้อมูลการผลิตชิ้นส่วนที่มีการเชื่อมเสริมผิวแข็ง และงานวิจัยในการเสริมผิวแข็งพบว่าส่วนใหญ่จะเป็นเทคนิคการเชื่อมของโลหะต่างชนิดกัน (Dissimilar welding) ระหว่างโลหะโครงสร้างหลักกับโลหะลวดเชื่อม ด้วยเหตุผลที่ต้องการให้ผิวของแนวเชื่อมมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากผิวของโลหะชิ้นงานเดิม เช่น

การใช้ลวดเชื่อมเหล็กกล้าผสมแมงกานีส (High manganese alloy steel) เชื่อมพอกบนชิ้นส่วนของเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) เพื่อต้องการให้ผิวของชิ้นงานที่อ่อนมีความแข็งที่เกิดจากโครงสร้างของแมงกานีสคาร์ไบด์ในแนวเชื่อม เป็นต้น



(ก) ชิ้นส่วนซ่อมเสริมเชื่อมพอกผิวแข็ง

ที่มา : Brazinternational-Hardfacing, 2012



(ข) ชิ้นส่วนสำเร็จที่มีการพอกผิวแข็ง

ที่มา : FSH Welding CANADA, 2013

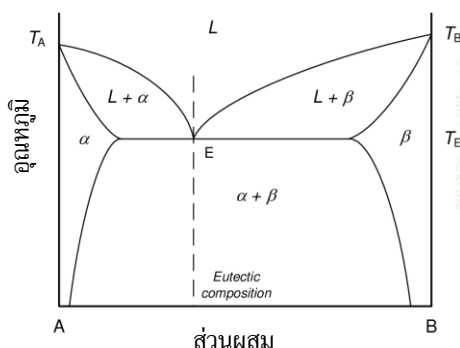
รูปที่ 6.38 ตัวอย่างชิ้นส่วนงานที่มีการเชื่อมพอกผิวแข็ง (Hardfacing welding)

ที่มา : Journal of MDPI-Metal, (6) 36, 2016

แนวเชื่อมแบบเชื่อมเสริมเนื้อโลหะ (Adding up weldments) ปัจจัยขององค์ประกอบทางด้านโลหะวิทยางานเชื่อม จะมีอิทธิพลโดยตรงต่อสมบัติของแนวเชื่อมที่มีการเชื่อมเสริมพื้นผิวทุกวิธี ไม่ว่าจะเป็นการเชื่อมแบบ Buttering/Cladding/Overlay/Built up และ Hardfacing ล้วนต้องคำนึงถึงทั้งในสมบัติทางด้านกายภาพ ทางด้านเคมี และทางด้านเชิงกล โดยมีรายละเอียดของสมบัติด้านต่าง ๆ ดังนี้

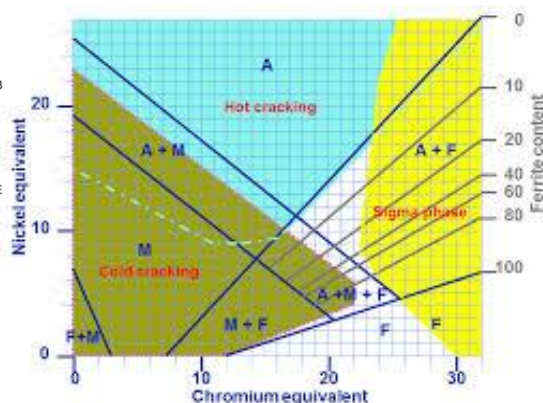
1. สมบัติทางด้านกายภาพ (Physical properties) สมบัติที่สำคัญด้านนี้ก็เป็นเรื่องของจุดหลอมเหลวของบ่อหลอมละลาย (Melting point) อัตราเร็วในการเย็นตัวของบ่อหลอมละลาย (Cooling rate) การเกิดระยะความกว้างของ HAZ การหดและการขยายตัวของชิ้นงาน รวมไปถึงบิดงอหรือเสียรูปทรงของชิ้นงานหลังเชื่อม เป็นต้น การสร้างเสริมเนื้อโลหะพอกผิวจะสามารถควบคุมผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับแนวเชื่อมในเรื่องต่าง ๆ ข้างต้นได้เป็นอย่างดี ก็ด้วยเพราะการสร้างชั้นผิวใหม่สามารถเลือกและกำหนดวัสดุที่จะนำมาพอกผิวได้ตามต้องการ ซึ่งช่วยแก้ปัญหาของการเชื่อมเสริมเนื้อโลหะได้ เช่น ปัญหาจากการเชื่อมโลหะต่างชนิดที่มีจุดหลอมเหลวต่างกัน การออกแบบรอยต่อสามารถเลือกวัสดุโลหะมาทำการสร้างเป็นชั้นพอกผิวที่เป็นตัวกลางช่วยเฉลี่ยอุณหภูมิจุดหลอมเหลวให้ใกล้เคียงกันหรืออาจเท่ากันได้ โดยอาศัยหลักการพิจารณาจากส่วนผสมทางเคมีที่มีธาตุบางคู่ผสมกันซึ่งจะทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะผสมนั้นลดต่ำลง ซึ่งเรียกจุดที่มีจุดหลอมเหลวนี้นี้ว่า Eutectic point โดยอ้างอิง

จากแผนภาพสมดุลของธาตุผสม (Binary alloy phase diagram) ดังแสดงในรูปที่ 6.39 (ก) นอกจากนี้ผิวพอกที่เสริมสร้างชั้นยังสามารถควบคุมชนิดของโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมได้จากการผสมกันของธาตุผสมในแนวเชื่อม เช่น การกำหนดปริมาณของเฟสโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite structure) โครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite structure) และโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite structure) ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ด้วยการทำนายจากมาตรฐานของแผนภาพ Schaeffler diagram ที่ใช้สัดส่วนปริมาณส่วนผสมทางเคมีของธาตุโครเมียม (Cr) กับธาตุนิกเกิล (Ni) ดังแสดง Schaeffler diagram ในรูปที่ 6.39 (ข)



(ก) แผนภาพสมดุลโลหะ 2 ธาตุ

ที่มา : Desk Handbook : Phase Diagram for Binary Alloys, 2nd ed., 2010



(ข) แผนภาพ Schaeffler

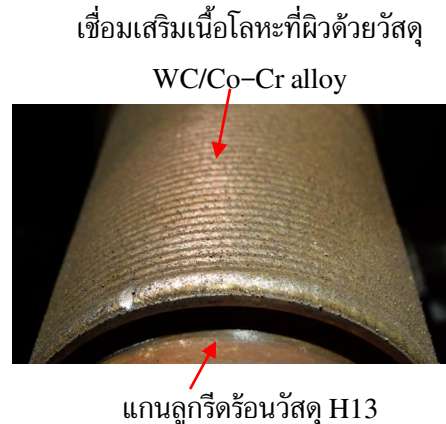
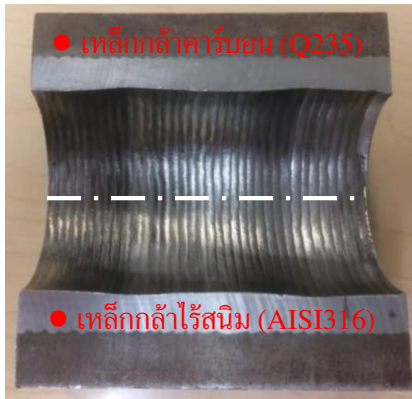
ที่มา : Welding Handbook : Welding Science and Technology 9th ed., 2001

รูปที่ 6.39 ปัจจัยเครื่องมือที่ใช้พิจารณาเลือกวัสดุที่จะนำมาเชื่อมเสริมเนื้อโลหะที่ผิว

2. สมบัติทางด้านเคมี (Chemical properties) สำหรับการเชื่อมเพื่อเสริมเนื้อโลหะที่ผิวหรือที่เรียกว่าการพอกผิวนั้น สมบัติทางด้านเคมีส่วนใหญ่จะให้ความสำคัญกับการป้องกันการกัดกร่อนที่ผิวชิ้นงาน โดยการเลือกวัสดุโลหะที่มีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนมาใช้เป็นลวดเชื่อม ซึ่งมักจะเกี่ยวข้องกับส่วนผสมทางเคมีของโลหะ (Chemical composition) ทั้งชนิดและปริมาณของธาตุที่ผสมอยู่ภายใน ตัวอย่างชิ้นงานที่พบเห็นกันบ่อย ๆ ได้แก่ การเชื่อมพอกผิวเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ดังแสดงในรูปที่ 6.40 (ก) เป็นการเลือกใช้สมบัติทางเคมีที่ทนต่อการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 316 SS) มาเชื่อมพอกสร้างชั้นผิวบนเหล็กกล้าคาร์บอน (Q235) ที่มีส่วนผสมทางเคมีในการต้านทานการกัดกร่อนที่ต่ำ เมื่อนำไปใช้งานผิวภายในของท่อก็จะทนต่อการกัดกร่อนได้ดี

นอกจากนี้ยังมีลักษณะของชิ้นงานที่ต้องใช้กับสภาพแวดล้อมที่ต้องทนต่อความร้อน (High temperature) มักนิยมทำการเสริมผิวชิ้นงานด้วยการเชื่อม เพื่อนำเอาสมบัติทางเคมีของวัสดุต้านทานต่อความร้อนสูงไปปกป้องผิวหรือยืดอายุการใช้งาน ดังแสดงตัวอย่างการเชื่อมสร้างชั้นผิวหุ้มด้วยขบวนการเชื่อมเลเซอร์ (Laser cladding) ในรูปที่ 6.40 (ข) เป็นการเชื่อมเสริมเนื้อโลหะที่ผิววัสดุเกรด H 13 ที่

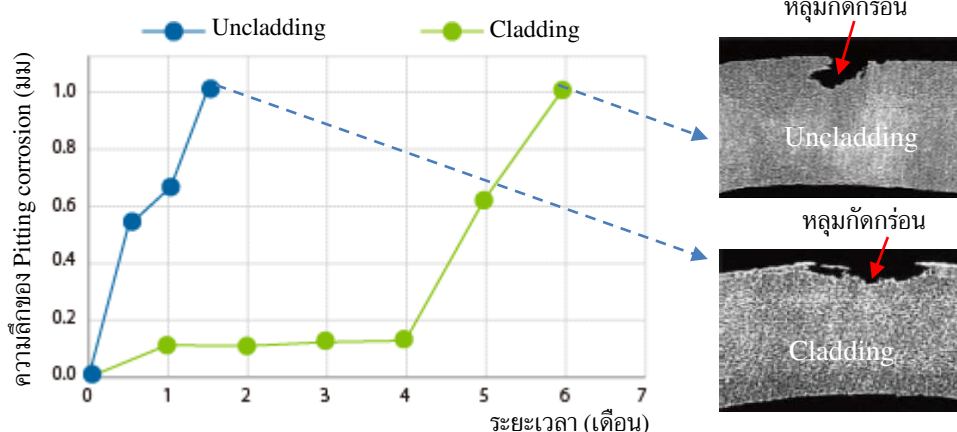
เป็นชิ้นส่วนแกนลูกรีดงานร้อน ด้วยลวดเชื่อม WC/Co-Cr alloy โดยจุดประสงค์ต้องการใช้คุณสมบัติโครงสร้างคาร์ไบด์ของทั้งสแตน โครบอลต์ และโครเมียม ในการเสริมสร้างความต้านทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูงของลูกรีดชิ้นรูปร้อน



- (ก) การสร้างชั้นผิวพอกทนการกัดกร่อนภายในท่อ (ข) การสร้างชั้นผิวพอกเพื่อทนความร้อน
ที่มา : AMI – ANESAB BRAND, 2020 ที่มา : Cladding Technology–Repair, 2020

รูปที่ 6.40 ลักษณะงานสร้างชั้นผิวพอกที่มุ่งเน้นสมบัติทางเคมีของแนวเชื่อม

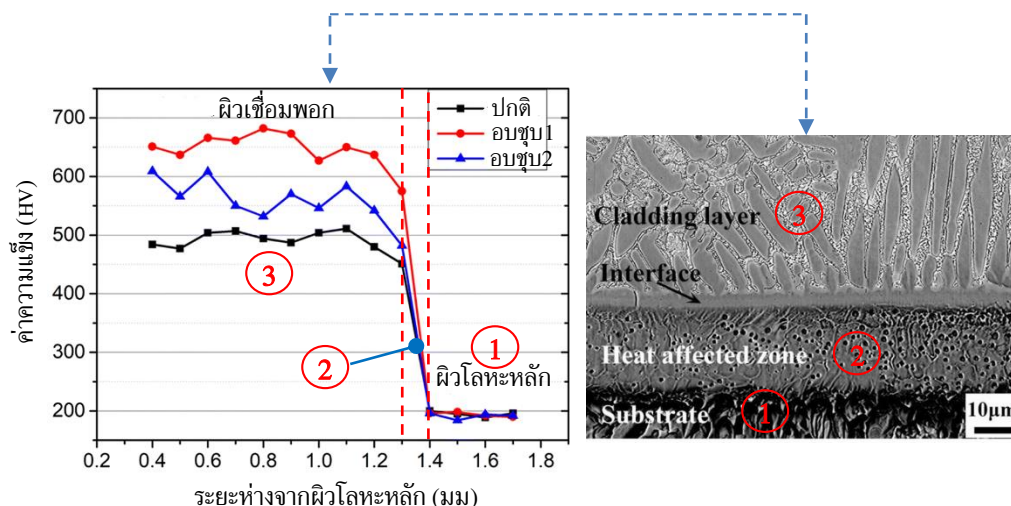
เทคนิคการเชื่อมเสริมเนื้อโลหะที่บริเวณผิวของชิ้นส่วนงานต่าง ๆ ทุกวิธีการล้วนแต่เป็นการปกป้องพื้นผิวของชิ้นงานทั้งสิ้น ส่วนจะมุ่งเน้นให้เกิดความโดดเด่นในคุณสมบัติด้านใดนั้นก็ต้องพิจารณาถึงวัสดุที่นำมาพอกหรือเสริมเนื้อนั้น ซึ่งมีหลายลักษณะงานในอดีตที่ประสบความสำเร็จและยังคงนิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน และยังมีงานวิจัยอีกจำนวนมากที่ได้ทำการทดลองหาวัสดุและวิธีการเชื่อมที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเชื่อมเสริมเนื้อโลหะที่บริเวณผิว ดังแสดงตัวอย่างผลการวิจัยในรูปที่ 6.41 เป็นการวิจัยเชิงทดลองของการเชื่อมเสริมเนื้อโลหะด้วยวิธีการสร้างชั้นผิวแบบหุ้ม (Cladding welding) บนชิ้นส่วนโลหะอลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อขึ้นรูปเกรด H2010 แล้วทำการเชื่อมพอกผิว (Cladding process) ด้วยโลหะอลูมิเนียมเกรด H2615 ที่มีส่วนผสมของเซอร์โคเนียม (Zr) สูง งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่ต้องการป้องกันการกัดกร่อน โดยใช้วิธีการให้โลหะที่ผิวพอกทำหน้าที่ป้องกันการกัดกร่อนและยังทำหน้าที่ผุกร่อนแทนเนื้อโลหะหลัก (Sacrificial layer) เมื่อนำไปใช้งานในสภาวะที่เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรง จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าผิวของชิ้นงานที่ผ่านการสร้างชั้นผิวพอกจะสามารถทนต่อการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting corrosion) ได้ดีและยาวนานกว่าผิวงานโลหะอลูมิเนียมผิวปกติ ด้วยเหตุผลเพราะธาตุผสมที่อยู่ในโลหะที่นำมาเชื่อมสร้างชั้นผิวพอกมีคุณสมบัติทางเคมีในการสร้างฟิล์มปกป้องพื้นผิว (Passive film) ที่ต้านการกัดกร่อนได้ดีกว่า และยังมีแนวโน้มที่จะเกิดรูปแบบของการกัดกร่อนที่เป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniformly corrosion) มากกว่ารูปแบบของการกัดกร่อนแบบหลุมหรือรูเข็ม (Pitting corrosion) ดังแสดงรูปแบบการกัดกร่อนในรูปที่ 6.41



รูปที่ 6.41 เปรียบเทียบการกัดกร่อนแบบรูเข็มของผิวงานปกติกับที่ผ่านการเชื่อมพอกผิว

ที่มา : UACJ – Aluminum lightens the world, 2014

3. สมบัติด้านทางกล (Mechanical properties) คุณสมบัติด้านนี้จะมีบทบาทและอิทธิพลอย่างมากต่อขบวนการสร้างชิ้นผิวพอก เพราะลักษณะของงานเชื่อมส่วนใหญ่จะนำไปใช้กับการรับแรงทางกลเป็นสำคัญ แต่ที่มุ่งเน้นและมีความสำคัญเป็นพิเศษก็จะเป็นสมบัติทางด้านความแข็ง (Hardness properties) ปกติการสร้างผิวพอกเพื่อเพิ่มความแข็งแรงอาจเกิดขึ้นตอนการเชื่อมพอกจากโรงงานผู้ผลิตชิ้นส่วนโดยตรง กับเกิดจากการซ่อมบำรุงพื้นผิวของชิ้นงานหลังใช้งานแล้วได้รับความเสียหาย แต่จะเกิดในลักษณะใดก็ตามสาเหตุหลักส่วนใหญ่มาจากการที่โลหะที่เป็นโครงสร้างหลักมีค่าสมบัติความแข็งที่ไม่มากเพียงพออาจเกิดจากขีดจำกัดในการออกแบบ การเลือกวัสดุ ขบวนการผลิต รวมถึงต้นทุนของการผลิต เมื่อนำไปใช้งานเกิดการสึกหรอสูง หรือผิวชิ้นงานเสียรูปทรง จึงจำเป็นต้องสร้างชิ้นผิวพอกที่มีระดับของค่าความแข็งให้สูงขึ้น ดังตัวอย่างงานวิจัยในรูปที่ 6.42 เป็นผลการวิจัยของ Junbo Lin et al. (2018) ที่ทำการทดสอบหาค่าความแข็งของผิวพอกวัสดุโลหะ Tribaloy 400 บนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเลเซอร์ จากรูปกราฟผลการทดสอบวัดค่าความแข็งจะเป็นได้อย่างชัดเจนว่าค่าความแข็งของแนวเชื่อมพอกผิว (Cladding process) จะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าผิวโลหะหลัก (●ปกติ) ซึ่งสามารถนำไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ของการเพิ่มความแข็งที่ผิว งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาหาวิธีการเพิ่มความแข็งให้กับแนวเชื่อมพอกด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment) โดยทดลองเปรียบเทียบการชุบแข็งที่ปัจจัยแตกต่างกัน (ระหว่าง ●อบชุบ 1 กับ ●อบชุบ 2) พบว่าค่าความแข็งที่ได้สูงกว่าแบบปกติ และทั้งคู่ก็ยังมีค่าความแข็งที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าการเพิ่มความแข็งของผิวพอกสามารถนำขบวนการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยกรรมวิธีทางความร้อนมาใช้ได้ ซึ่งสมบัติเชิงกลด้านความแข็งที่สูงจะช่วยให้ผิวพอกมีความสามารถต้านทานการเสียดสีได้มากขึ้น มีอัตราการสึกหรอต่ำลง เราจะมักได้พบเห็นลักษณะการเชื่อมพอกงานเหล่านี้กับชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลหนักในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ หรืองานขุดเจาะ บดย่อยต่าง ๆ เป็นต้น

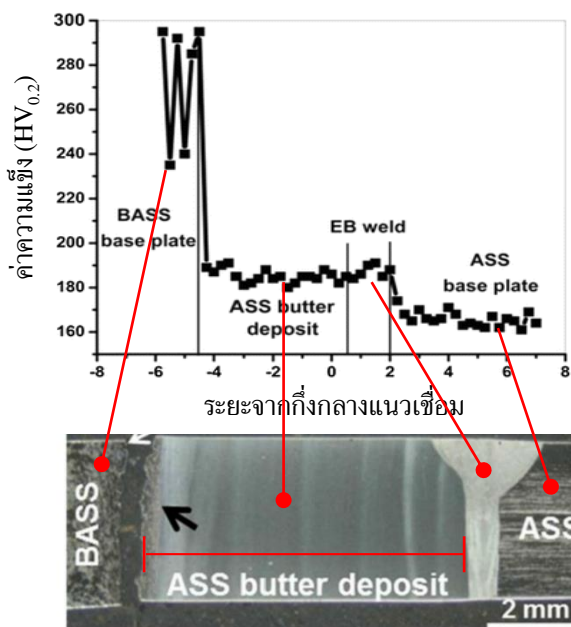


รูปที่ 6.42 เปรียบค่าความแข็งของแนวเชื่อมพอกผิวกับโลหะหลัก

ที่มา : Junbo Lin et al., ASM International, JMEPEG. (27) : 6339, 6339-6348, 2018

การสร้างชั้นพอกผิวที่เรียกกันว่า Buttering เป็นขบวนการเสริมสร้างเนื้อโลหะบนพื้นผิว เช่นเดียวกัน แต่จุดประสงค์ไม่ได้เน้นความต้องการด้านสมบัติทางกล แต่เป็นการเน้นเสริมสร้างขีดความสามารถในการเชื่อม (Welding ability) เพื่อที่จะช่วยให้วัสดุที่มีความสามารถในการเชื่อมต่ำหรือเชื่อมยาก มีความสามารถในการเชื่อมที่สูงขึ้น (ส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมโลหะต่างชนิด) ซึ่งสาระสำคัญที่ต้องพิจารณาจะเป็นปัจจัยทางด้านโลหะวิทยางานเชื่อม ดังตัวอย่างในรูปที่ 6.43 เป็นผลการวิจัยของ G.M. Karthik et al. (2017) ที่ทำการButtering บนเหล็กกล้าคาร์บอน (BASS-base metal) ด้วยโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม (ASS- butter deposit) เพื่อการเตรียมผิวหน้าที่จะนำไปเชื่อมต่อกับเหล็กกล้าไร้สนิมที่เป็นโลหะหลัก (ASS-base metal) ด้วยขบวนการเชื่อมด้วยลำแสงอิเล็กตรอน จะพบว่าค่าความแข็งของบริเวณการสร้างชั้นผิวพอกจะไม่ได้มีความแข็งที่สูงขึ้นอย่างแตกต่างกันกับแนวเชื่อม นั้นเป็นเพราะจุดประสงค์ของการทำที่ไม่ได้ต้องการปรับปรุงสมบัติทางกลของผิวชิ้นงาน แต่ต้องการที่จะใช้เป็นตัวประสานเพิ่มประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อ และผลกระทบทางโลหะวิทยาต่อชิ้นงานเชื่อม เช่น ลดการเกิดการแตกร้าวขณะร้อน (Hot cracking) ที่เกิดจากโลหะต่างชนิดมีอัตราการเย็นตัวต่างกัน อัตราการขยายตัวตัวไม่เท่ากัน ซึ่งเนื้อเชื่อมบริเวณ Buttering จะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ดี หรือปัญหาของการที่โลหะที่นำมาเชื่อมต่อกันมีจุดหลอมเหลวแตกต่างกัน มีความสามารถในการนำความร้อนได้ไม่เท่ากัน รวมถึงช่วยลดปัญหาของธาตุที่ผสมมีประสิทธิภาพในการเจือจาง (Dilution) ในแนวเชื่อมต่ำ ปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการสร้างชั้นพอกผิวที่เรียกกันว่า Butter ซึ่งปัจจุบันขบวนการของการเชื่อมเพื่อสร้างชั้นพอกผิวแบบนี้สามารถเลือกวิธีการเชื่อมได้หลากหลาย และเกือบทุกขบวนการสามารถนำมาใช้เชื่อมได้ แต่ส่วนใหญ่มักเลือกขบวนการเชื่อมที่มีโอกาสเกิดข้อบกพร่องของแนวเชื่อมน้อยที่สุด กล่าวคือ ต้องเป็นแนวเชื่อมที่ไม่เกิดรูพรุน ไม่เกิดสแลกฝังใน หรือมีความเค้นตกค้างมาก และที่สำคัญ

รอยเชื่อมควรจะต้องมีรูปทรงที่สมบูรณ์ไม่เกิดการบิดงอหรือบิดเบี้ยวไม่คงรูป โดยที่แนวเชื่อมไม่จำเป็นต้องตกแต่งหรือปรับสภาพของผิวพอก



รูปที่ 6.43 ตัวอย่างงานเชื่อม

Buttering ที่ไม่เน้นสมบัติทางกลแต่เน้นผลทางด้านโลหะวิทยางานเชื่อม

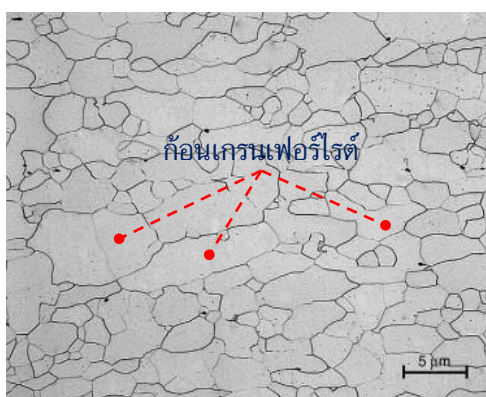
ที่มา : G.M. Karthik et al., *Friction*

buttering : A New Technique for Dissimilar Welding, 2017

6.4 โครงสร้างทางโลหะวิทยาของแนวเชื่อม (Metallurgical structure of weld metal)

เทคโนโลยีการเชื่อมได้มีการพัฒนาค้นคว้าเพื่อหาเทคนิคและวิธีการใหม่ ๆ อยู่เสมอ จนปัจจุบันมีกรรมวิธีการเชื่อมที่หลากหลายให้เลือกใช้ อย่างไรก็ตามการเชื่อมส่วนใหญ่ที่นิยมใช้งานกันจะเป็นกลุ่มของกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) ซึ่งมีหลักการที่เหมือนกันคือ ป้อนความร้อนเข้าไปเพื่อให้โลหะที่จะต่อกันหลอมละลายทั้งคู่ จากนั้นก็ปล่อยให้เย็นตัวก็จะได้ส่วนของเนื้อโลหะที่หลอมติดกันที่เรียกว่า “แนวเชื่อม” เมื่อสังเกตพบว่ากลไกของการเย็นตัวในบ่อหลอมละลายเชื่อม (Welding) จะเหมือนกับกลไกการเย็นตัวของขบวนการหล่อโลหะ (Casting) นั่นคือ ขบวนการเปลี่ยนสถานะจาก ของแข็ง → ของเหลว → ของแข็ง โดยที่ภายในของแนวเชื่อมเกิดเป็นโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างไปจากโครงสร้างจุลภาคเดิม (Base metals) จะแตกต่างกันทั้งด้านส่วนผสมทางเคมี รูปแบบการรวมตัวของธาตุผสมต่าง ๆ และลักษณะรูปร่างของเกรน ซึ่งกลไกของการเกิดได้มาจากปัจจัยสำคัญ ๆ ในด้านของวัสดุโลหะที่นำมาเชื่อม (Welding materials) ปัจจัยของขบวนการเชื่อม (Welding processes) และองค์ประกอบอื่น ๆ ของสภาพแวดล้อมที่ทำการเชื่อม (Environment welding) เป็นต้น โดยโครงสร้างทางโลหะวิทยาหรือโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมนี้มีโอกาสเป็นได้ทั้งโครงสร้าง ชนิดสารละลายของแข็ง (Solid solution) ชนิดสารประกอบ (Compound) และชนิดอื่น ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ของขบวนการเชื่อม ดังรายละเอียดของแต่ละชนิดของโครงสร้างจุลภาคดังต่อไปนี้อ้างอิงข้อมูลจาก AWS Welding Metallurgy (1956)

1. **โครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite structure)** เป็นโครงสร้างประเภทสารละลายของแข็ง (Solid solution structure) ที่มีส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะเชื่อม ที่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้อย่างสมบูรณ์ในสภาพของแข็ง ซึ่งโครงสร้างจุลภาคนี้อาจพบเป็นโครงสร้างหลักในเนื้อเชื่อมของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) เพราะลักษณะของโครงสร้างเป็นชนิดสารละลายของแข็งที่ธาตุคาร์บอน (C) ละลายในธาตุเหล็ก (Fe) ที่ความเข้มข้นสูงสุดไม่เกิน 0.0218 % ลักษณะของก้อนเกรน และโครงสร้างจะคล้ายกับโครงสร้างของเหล็กบริสุทธิ์ (Pure ferrous) ดังแสดงเปรียบเทียบกับโครงสร้างจุลภาคของเหล็กบริสุทธิ์ในรูปที่ 6.44 (ก) และ โครงสร้างเฟอร์ไรต์ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ในรูปที่ 6.44 (ข) Wichan Chuaiphan thesis Ph.D. (2011)



(ก) โครงสร้างเฟอร์ไรต์เหล็กบริสุทธิ์
ที่มา : Jmr&t. 3(4), 349-353, 2014

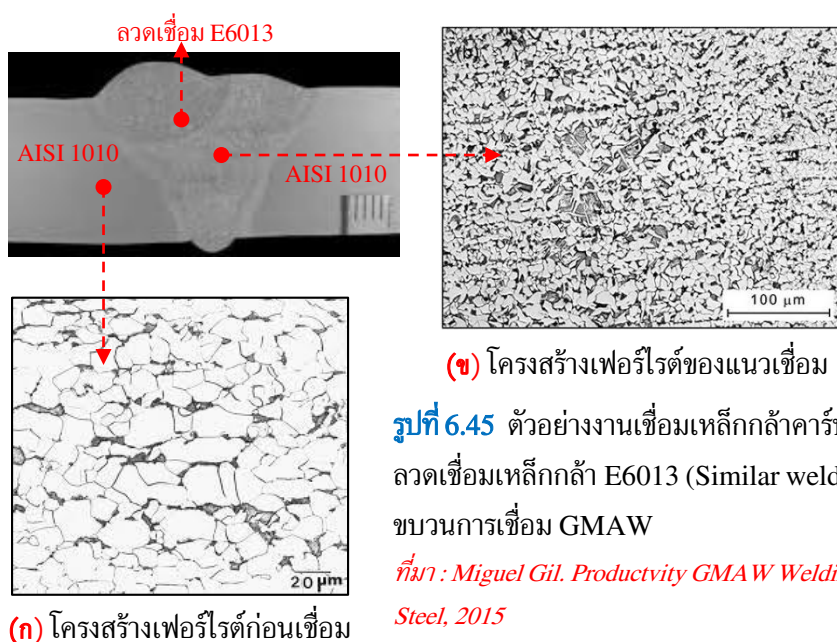


(ข) โครงสร้างเฟอร์ไรต์เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ
ที่มา : Wichan.C. Thesis in Doctoral, 2011

รูปที่ 6.44 ลักษณะของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ในโลหะเหล็ก

โครงสร้างเฟอร์ไรต์ในแนวเชื่อมจะมีความแตกต่างไปจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์ในโลหะหลักก่อนเชื่อม กล่าวคือ สำหรับกรณีที่โลหะเชื่อมกับลวดเชื่อมเป็นวัสดุชนิดและเกรดเดียวกัน (Similar welding) โครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่หลอมละลายในบ่อเชื่อมเล็ก ๆ เมื่อเย็นตัวจะมีอัตราการเย็นตัวที่เร็วมาก ซึ่งผลกระทบต่อกรเกิดเกรนใหม่ในแนวเชื่อม ที่มีรูปร่างของก้อนเกรนที่ต่างไปจากเดิม (ก่อนเชื่อม) โดยการเติบโตของเกรน (Grain growth) ซึ่งถูกกำหนดโดยกลไกการระบายความร้อนของบ่อหลอมละลาย รูปร่างของเกรนจะมีขนาดเล็กมากขึ้น และเรียบแหลมพุ่งเข้าหาจุดกึ่งกลางของบ่อหลอมละลาย โดยที่ส่วนผสมทางเคมีไม่มีการเปลี่ยนแปลง (อาจสูญเสียไปบางส่วนเพียงเล็กน้อยจากความร้อนเชื่อม) และถ้าทำการเชื่อมด้วยขบวนการที่ใช้พลังงานความร้อน (Heat input) ไม่เท่ากัน โครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่ได้ก็จะแตกต่างกัน โดยบ่อหลอมละลายที่ป้อนพลังงานความร้อนสูง (High heat input) พบว่าบ่อหลอมละลายที่ได้จะกว้างและมีอัตราการเย็นตัวที่ช้า (Slow cooling rate) ดังนั้น โอกาสที่จะเกิดเป็นก้อนเกรนเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดใหญ่ในแนวเชื่อมก็มีมากขึ้น ด้วยเหตุผลเพราะนิวเคลียสของเกรนมีเวลาในการเติบโตรุกคืบเข้าไปในส่วนที่เหลือก่อนจะกลายเป็นของแข็ง ส่วนถ้าบ่อหลอมละลายที่มีขนาดเล็ก ๆ ที่

เกิดจากขบวนการเชื่อมที่ป้อนพลังงานความร้อนไม่สูง (Low heat input) อัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะก็จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วก่อนเกรนมีเวลาน้อยในการเติบโต เกรนที่ได้จึงมีขนาดเล็ก ดังตัวอย่างงานวิจัยที่แสดงในรูปที่ 6.45 เป็นการแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมเมื่อได้รับอิทธิพลจากความร้อนของขบวนการเชื่อม ที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางส่วนผสมทางเคมี (อาจมีบ้างเล็กน้อย) แต่ที่เด่นชัดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาที่อธิบายถึงกลไกการแข็งตัวของน้ำโลหะของแนวเชื่อม (Solidification of weld metal) ว่าอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วเป็นปัจจัยที่ทำให้แนวเชื่อมได้โครงสร้างเกรนที่ละเอียด (Fine grain structures)

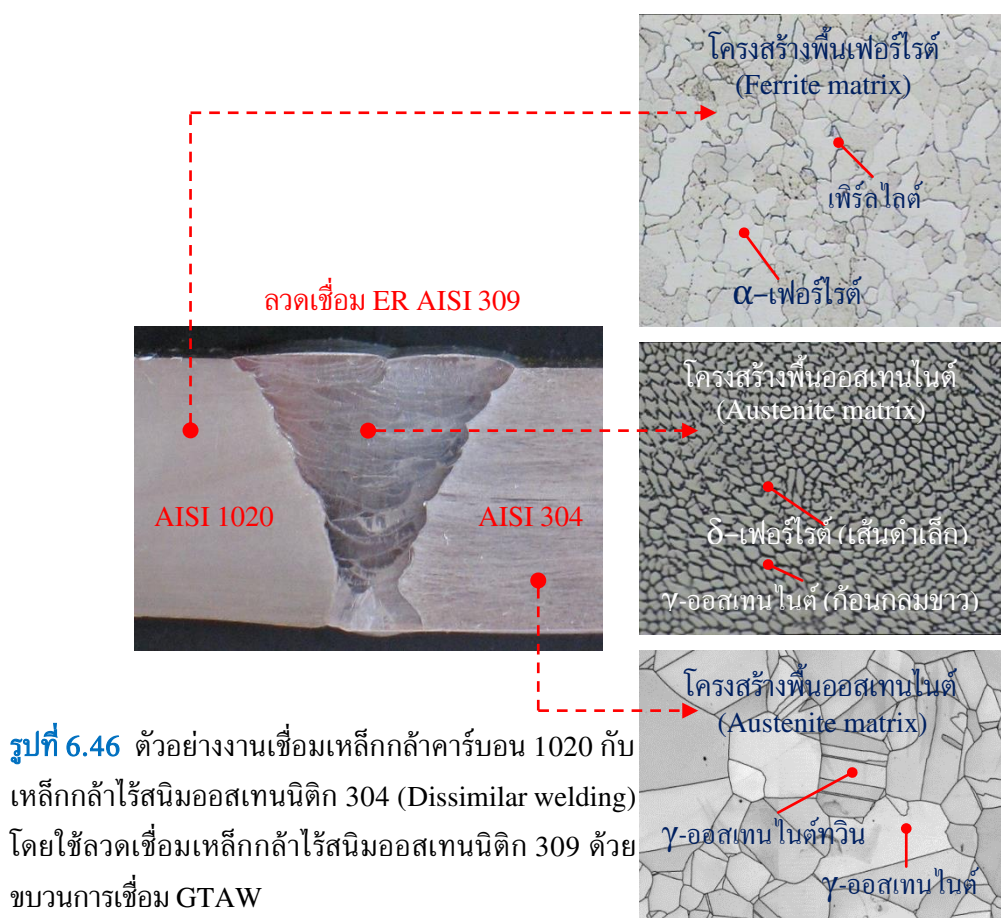


รูปที่ 6.45 ตัวอย่างงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ใช้ลวดเชื่อมเหล็กกล้า E6013 (Similar welding) ด้วยขบวนการเชื่อม GMAW

ที่มา : Miguel Gil. *Productivity GMAW Welding – Carbon Steel*, 2015

สำหรับในกรณีที่ทำกรเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนกับโลหะเหล็กกล้าต่างชนิด/ต่างเกรดและต่างชนิดลวดเติม (Dissimilar welding) โครงสร้างเฟอร์ไรต์ในแนวเชื่อมที่ได้จะแตกต่างกันไปตามปัจจัยของส่วนผสมทางเคมี และสมบัติการระบายความร้อนของโลหะที่นำมาเชื่อม (อัตราการเย็นตัว) โดยอาจมีโครงสร้างอื่นเกิดรวมด้วยกับเฟอร์ไรต์ หรืออาจมีรูปแบบการฟอร์มของก่อนเกรนที่มีแตกต่างกันไป ดังตัวอย่างการวิจัยเชิงทดลองของ Wichan Chuaiphan thesis Ph.D (2011) ทำการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1020 กับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 309 โดยทำการเชื่อมด้วยขบวนการเชื่อม GTAW ที่แสดงในรูปที่ 6.46 จากผลการทดลองพบว่าแนวเชื่อมที่ได้มีสมบัติเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิค (Austenitic stainless steel) ที่มีโครงสร้างพื้นเป็นเฟสออสเทนไนต์ (Austenite matrix) มีขนาดของก่อนเกรนเล็กและละเอียด พร้อมกับมีเฟสของโครงสร้างเฟอร์ไรต์เกิดขึ้นระหว่างเกรน เป็นที่น่าสนใจว่าจากเดิมโครงสร้างเฟอร์ไรต์ในเหล็กกล้าคาร์บอนมีขนาดที่ใหญ่และลักษณะของเกรนจะเป็นก้อน ๆ แต่เมื่อนำมาเชื่อมกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิค รูปแบบการฟอร์มตัวของเกรนเฟอร์ไรต์เปลี่ยนไปเป็นเส้นเล็ก ๆ เกิดอยู่ระหว่างเกรนของ

ออสเทนไนต์ ด้วยลักษณะรูปร่างที่แตกต่างไปจากเดิมมากจึงได้เรียกโครงสร้างเฟสเฟอร์ไรต์นี้ว่า เดลต้าเฟอร์ไรต์ (δ -Ferrite) เจตนาน่าจะเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่เกิดในแนวเชื่อม และจากการพิสูจน์พบว่า เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากอิทธิพลของธาตุผสมนิกเกิล (Ni) ที่อยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และในลวดเชื่อม AISI 309 ที่เป็นตัวฟอร์มเฟสออสเทนไนต์ก่อนจากนั้นเกรนก็เติบโตผลักดันให้เฟสเฟอร์ไรต์ไปอยู่ตามขอบเกรน และนอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของก้อนเกรนของออสเทนไนต์ในแนวเชื่อม มีขนาดที่เล็กกว่าออสเทนไนต์ในโลหะหลักก่อนเชื่อม ซึ่งสรุปได้อีกว่าอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วของน้ำโลหะเหลวในแนวเชื่อมจะทำให้ขนาดของก้อนเกรนมีขนาดที่เล็กลง



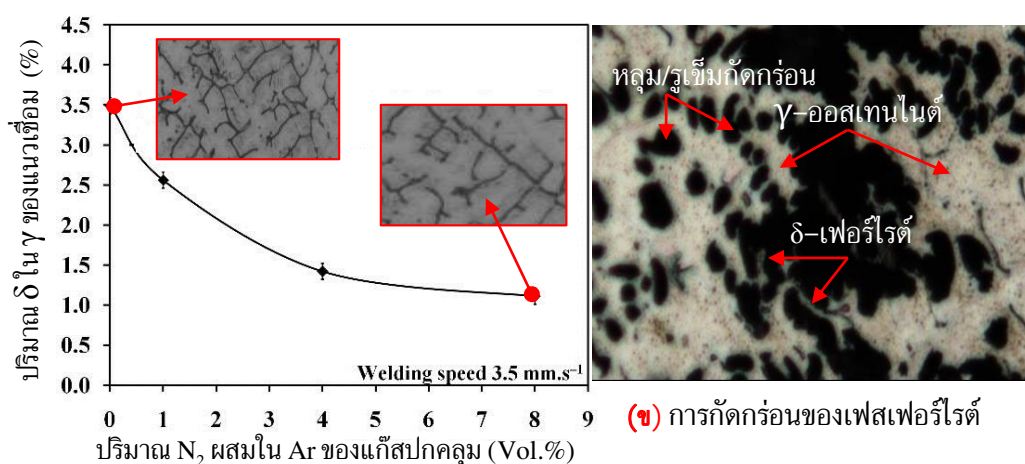
รูปที่ 6.46 ตัวอย่างงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน 1020 กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 304 (Dissimilar welding) โดยใช้ลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 309 ด้วยขบวนการเชื่อม GTAW

ที่มา : Wichan Chuaiphan. Thesis Doctoral, 2011

โครงสร้างเฟสเดลต้าเฟอร์ไรต์ (δ -ferrite) ที่เกิดขึ้นท่ามกลางโครงสร้างพื้นออสเทนไนต์ในแนวเชื่อมของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกทุกเกรด เป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนาของช่างเชื่อม ด้วยเหตุผลเพราะเฟสเฟอร์ไรต์ในลักษณะนี้จะเป็นตัวลดความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนแบบหลุม/รูเข็ม (Pitting corrosion) ของเหล็กกล้าไร้สนิมลง กล่าวคือ ที่บริเวณรอยต่อของขอบเกรนระหว่างเฟสออสเทนไนต์ (γ) กับเฟสเฟอร์ไรต์ (δ) เป็นบริเวณที่มีธาตุโครเมียมต่ำกว่าบริเวณอื่น ทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดความอ่อนแอของประสิทธิภาพของฟิล์มปกป้อง (Passive film) จึงเป็นจุดเริ่มต้น

ของการกัดกร่อนแบบหลุม/รูเข็ม ดังนั้น ถ้าในแนวเชื่อมมีปริมาณของเฟสเดลต้าเฟอร์ไรต์มากก็มีโอกาสในการเกิดจุดกัดกร่อนมากขึ้นด้วย แต่ด้วยกลไกการเย็นตัวของการเชื่อมแบบหลอมละลายหลีกเลี่ยงที่จะไม่ให้เกิดเฟสโครงสร้างเดลต้าเฟอร์ไรต์นั้นเป็นเรื่องที่ยากมาก แต่ก็ได้มีการทดลองปรับปรุงปัจจัยการเชื่อม เช่น ใช้แก๊สไนโตรเจน (N_2) ผสมกับแก๊สเฉื่อยปกคลุม (Ar) เพื่อควบคุมปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรต์ โดยตามมาตรฐานเกณฑ์การยอมรับปริมาณเฟสเดลต้าเฟอร์ไรต์ในเฟสออสเทนไนต์ของแนวเชื่อม กับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก (Delta-ferrite fraction : %) อยู่ระหว่าง 3–10% โดยมีการวิจัยทดลองผสมแก๊สไนโตรเจนลงไปแก๊สอาร์กอนปกคลุม (Shielding gases) ที่ปริมาณต่าง ๆ กัน ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 6.47 (ก) เป็นการทดลองเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 201 กับเกรด AISI 304 ด้วยวิธีการเชื่อมทิก (TIG) แบบไม่เติมลวด พบว่าเมื่อปริมาณไนโตรเจนผสมลงไปแก๊สปกคลุมอาร์กอนที่ปริมาณมากขึ้น จาก 0–8% สามารถลดปริมาณเฟสเดลต้าเฟอร์ไรต์ในแนวเชื่อมลงได้จาก 3.5% ลดลงถึง 1.14% ดังแสดงในเส้นกราฟของรูป

การมีปริมาณเฟสโครงสร้างเดลต้าเฟอร์ไรต์ที่มากในแนวเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก นอกจากจะเป็นจุดอ่อนของการที่ฟิล์มปกป้องแตกได้ง่ายแล้ว ยังเป็นเนื้อพื้นที่ส่วนที่ง่ายต่อการถูกรุกคืบของการกัดกร่อนอีกด้วย กล่าวคือ เนื้อของเฟสเดลต้าเฟอร์ไรต์มีปริมาณโครเมียมละลายอยู่น้อย เพราะโครเมียมจะถูกดึงไปรวมตัวกันกับธาตุเหล็ก (Fe) ในเฟสของออสเทนไนต์ ทำให้ขอบเกรนรอบด้านของออสเทนไนต์มีโครเมียมต่ำ ซึ่งก็คือเฟสเดลต้าเฟอร์ไรต์ที่ไม่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ ทิศทางการรุกรคืบของการกัดกร่อนจึงลุกลามไปตามเนื้อเฟสเดลต้าเฟอร์ไรต์ที่อ่อนล้าเฟสโครงสร้างออสเทนไนต์ที่ทนการกัดกร่อนได้ดีเพราะมีโครเมียมละลายอยู่สูงเป็นพฤติกรรมที่เรียกกันว่า เลือกกัดกร่อน ดังแสดงตัวอย่างการรุกรคืบของการกัดกร่อนตามเฟสเดลต้าเฟอร์ไรต์ในรูปที่ 6.47 (ข)



(ก) วิธีการลดปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรต์แนวเชื่อม

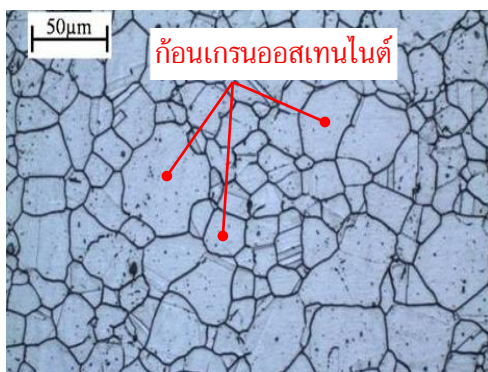
รูปที่ 6.47 ตัวอย่างวิธีการควบคุมปริมาณและกลไกการกัดกร่อนของเดลต้าเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อม

ที่มา : Wichan Chuaiphan. Defence Technology, Vol. 15(2), 170–178, 2019

2. โครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite structure) เป็นโครงสร้างประเภทสารละลายของแข็ง (Solid solution) ที่เกิดอยู่ในโลหะตระกูลเหล็กซึ่งบางครั้งเรียกว่า เหล็กแกมมา (Gamma iron : γ) มีระบบผลึกของโครงสร้างเป็นแบบ FCC ที่มีคุณลักษณะไม่ดูดติดกับแม่เหล็ก (Non-magnetic) มีความอ่อนเหนียว จากแผนภาพสมดุลของเหล็ก-คาร์บอนโครงสร้างนี้จะเกิดที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง $723 - 1,495^{\circ}\text{C}$ ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้โครงสร้างจะเปลี่ยนสภาพไปเป็นโครงสร้างเดลต้าเฟอร์ไรต์ที่มีระบบผลึกเป็นแบบ BCC และถ้าอุณหภูมิต่ำกว่านี้โครงสร้างจะเปลี่ยนสภาพไปเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่มีระบบผลึกเป็นแบบ BCC และโครงสร้างซีเมนไทต์ที่เป็นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound : Fe_3C) โดยปกติในเหล็กกล้าคาร์บอนโครงสร้างนี้สามารถละลายคาร์บอนได้สูงสุด 2.11% ที่ อุณหภูมิ $1,146^{\circ}\text{C}$ และไม่สามารถเกิดได้ที่ระดับอุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิกปกติ (Room temperature) ด้วยเหตุที่สมบัติของโครงสร้างออสเทนไนต์มีคุณลักษณะไม่ดูดติดกับแม่เหล็ก ซึ่งเป็นสมบัติที่พิเศษของวัสดุโลหะกลุ่มเหล็ก จึงได้มีความพยายามที่จะสร้างเฟสโครงสร้างออสเทนไนต์ให้สามารถคงอยู่ได้ที่ระดับอุณหภูมิห้อง เพื่อประโยชน์ในการใช้งานที่หลากหลาย ซึ่งที่จำเป็นที่จะต้องใช้โลหะเหล็กที่มีสมบัติ Non-magnetic เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ นักโลหะวิทยาจึงได้ค้นพบว่าธาตุโลหะนิกเกิล (Ni) และแมงกานีส (Mn) เป็นธาตุที่ผสมเข้าไปในโลหะเหล็กแล้วสามารถควบคุมขอบเขตการฟอร์มตัวของสารละลายของแข็งที่มีระบบผลึกแบบ FCC และไม่ดูดติดแม่เหล็ก ให้สามารถคงสถานะอยู่ได้เมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วก็ตาม กล่าวคือ โครงสร้างออสเทนไนต์ในโลหะเหล็กสามารถมีได้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งผู้ผลิตโลหะได้ผลิตออกมาในปัจจุบันก็คือวัสดุโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกทั้งเกรด Series 300 และเกรด Series 200 และรวมไปถึงเหล็กกล้าผสมเกรดอื่น ๆ ที่ผสมธาตุโลหะนิกเกิลหรือผสมธาตุโลหะแมงกานีสในปริมาณที่สูง เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างโครงสร้างออสเทนไนต์ของเหล็กกล้าผสมนิกเกิล (Austenitic stainless steel) และเหล็กกล้าผสมแมงกานีสสูง (Hadfil-High manganese alloy steel) ในรูปที่ 6.48 (ก) และ (ข) ตามลำดับ อ้างอิงจาก Wichan Chuaiphan (2020) ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของสารละลายของแข็งที่ฟอร์มตัวเป็นออสเทนไนต์มีลักษณะก่อนเกรนที่เหมือนกัน จะต่างกันที่ขนาดก่อนเกรนที่อาจหยาบหรือละเอียดกว่ากัน ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยทางโลหะวิทยาอื่น ๆ เช่น ปัจจัยของการเย็นตัวหรืออิทธิพลของส่วนผสมทางเคมีอื่น ๆ ที่อยู่ด้วยกัน เป็นต้น

โครงสร้างออสเทนไนต์ในเนื้อเชื่อมจะเกิดขึ้นกับการเชื่อมโลหะที่มีโครงสร้างพื้น (Matrix) ของโลหะหลักก่อนเชื่อมเป็นออสเทนไนต์ซึ่งเป็นปกติ แต่บางครั้งถ้าขอบเขตการเชื่อมใช้พลังงานความร้อนที่สูงมาก เป็นเหตุให้เกิดการสูญเสียธาตุที่มีเสถียรภาพออสเทนไนต์ (Austenite stabilizer) ออกไปมาก ยังคงเหลืออยู่ในปริมาณที่ไม่เพียงพอที่จะสร้างเสถียรภาพเฟสโครงสร้างออสเทนไนต์ไว้ได้ เนื้อเชื่อมอาจกลายเป็นโครงสร้างอื่นได้ เช่น โครงสร้างเดลต้าเฟอร์ไรต์ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เป็นต้น ดังนั้นการควบคุมปริมาณของส่วนผสมทางเคมีให้คงเหลือเพียงพอในแนวเชื่อมจึงเป็นปัจจัยสำคัญยิ่ง ไม่ว่าจะเป็นการเชื่อมโลหะชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน รวมไปถึงลดเชื่อมชนิดเดียวกันและต่างชนิดกัน ซึ่งผู้ออกแบบงานเชื่อมหรือวิศวกรงานเชื่อมต้องทำนายหรือพยากรณ์ได้ว่าแนวเชื่อมที่ได้

ควรจะมีปริมาณส่วนผสมทางเคมีอยู่ปริมาณเท่าไร? ที่จะเป็นกรณีหนึ่งซึ่งชี้ได้ว่าโครงสร้างของแนวเชื่อมมีโอกาสเป็นโครงสร้างชนิดใดบ้างและมีสัดส่วนปริมาณมากน้อยอย่างไร



(ก) ออสเทนไนต์เหล็กกล้าผสมนิกเกิล

ที่มา : JMR&T. Vol.9(3),5174–5183, 2020



(ข) ออสเทนไนต์เหล็กกล้าผสมแมงกานีสสูง

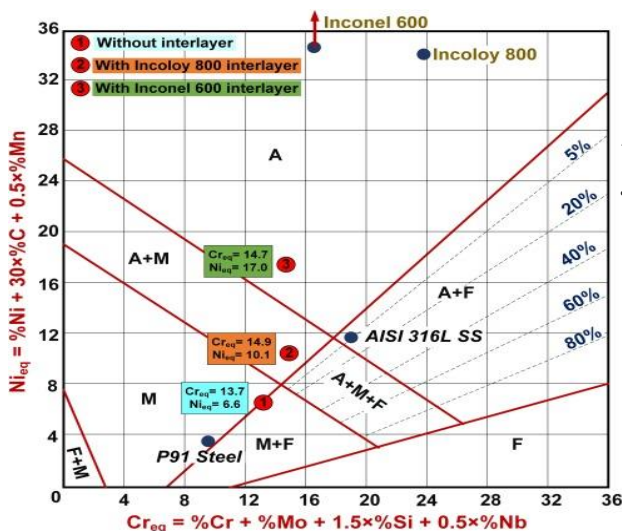
ที่มา : MaterilasTransac. Vol.52(8),349–353, 2011

รูปที่ 6.48 โครงสร้างออสเทนไนต์ในเหล็กกล้าผสมนิกเกิลและเหล็กกล้าผสมแมงกานีส

การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิคทั้งที่เป็นแบบวัสดุโลหะชนิดเดียวกันและต่างชนิดกันของทั้งโลหะเชื่อมและลวดเชื่อม โครงสร้างพื้นฐาน (Matrix) ของแนวเชื่อมที่ได้ก็จะมีโอกาสเกิดเป็นเฟสออสเทนไนต์อย่างแน่นอนแต่จะมีเฟสโครงสร้างอื่น ๆ ปะปนร่วมอยู่ด้วยมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนของธาตุผสมทางเคมีเทียบเท่าเป็นสำคัญ กล่าวคือ ขึ้นอยู่กับปริมาณของโครเมียมเทียบเท่า ($\text{Chromium equivalent (Cr}_{\text{eq}}$) กับนิกเกิลเทียบเท่า (Nickel equivalent (Ni_{eq})) ที่ผสมอยู่ในเนื้อโลหะเชื่อม ดังนั้น ถ้าก่อนที่จะทำการเชื่อมช่างเชื่อมทราบค่าของ $\text{Cr}_{\text{eq}} / \text{Ni}_{\text{eq}}$ ของทั้งโลหะเชื่อมและลวดเชื่อมก็สามารถทำนาย/พยากรณ์ได้ว่าเมื่อนำโลหะเย็นตัวลงเนื้อของโลหะเชื่อมจะได้โครงสร้างชนิดใดบ้างและมีสัดส่วนปริมาณมากน้อยเพียงใด ปัจจุบันได้มีวิศวกรด้านวิศวกรรมโลหการคิดสูตรสำเร็จเป็นตารางความสัมพันธ์ออกมา ที่เรียกว่า “Schaeffler diagram” ใช้ในประมาณการปริมาณของโครงสร้าง (%) ในเนื้อเชื่อมที่อาศัยค่าความสัมพันธ์ของ Cr_{eq} กับ Ni_{eq} ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.49 เป็นการวิจัยทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L กับเหล็กกล้าผสมเกรด P 91 (9Cr–Mo) ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบ A–TIG โดยการทำนายโครงสร้างที่จะได้จากการเลือกใช้ลวดเชื่อม Incoloy 800 กับ Inconel 600 ที่อาศัยค่า Cr_{eq} กับ Ni_{eq} ด้วยการคำนวณจากส่วนผสมทางเคมี จะเห็นได้จากแผนภาพ Schaeffler ว่าค่าสัดส่วนปริมาณของ Cr_{eq} กับ Ni_{eq} สามารถพยากรณ์บอกชนิดและปริมาณของโครงสร้างที่ควรจะได้หลังการเชื่อม เช่น ออสเทนไนต์ (A) มาร์เทนไซต์ (M) และเฟอร์ไรต์ (F) ***ดูรายละเอียดเพิ่มเติมในบทต่อไป*

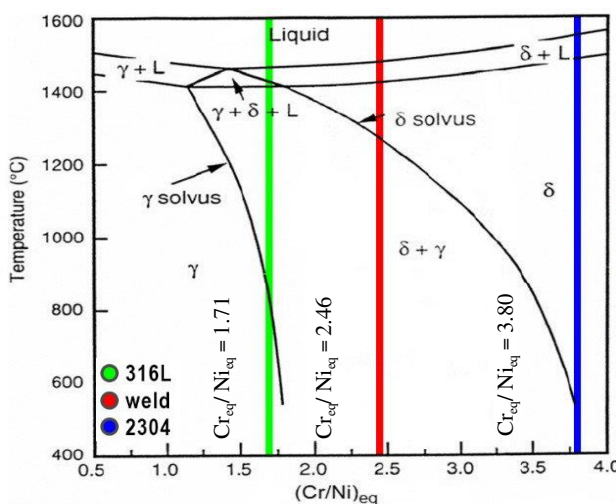
นอกจากนี้ยังมีวิธีการทำนายโครงสร้างที่ควรจะได้ด้วยการใช้ค่าสัดส่วนของ $\text{Cr}_{\text{eq}} / \text{Ni}_{\text{eq}}$ ที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ ขณะเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้องโดยใช้แผนภาพ Psuedo–binary ดังแสดงตัวอย่างในการวิจัยเชิงทดลองของการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่าง เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L กับเกรดดูเพล็กซ์ AISI 2304 ด้วยขบวนการเชื่อมเลเซอร์แบบไม่เติมลวด (Autogenous welding) ที่นำค่าสัดส่วนของ

Cr_{eq}/Ni_{eq} มาทำนายโครงสร้างภายในเนื้อเชื่อม ในรูปที่ 4.50 จากรูปเห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่าสัดส่วนของ Cr_{eq}/Ni_{eq} มีบทบาทในการกำหนดปริมาณการเกิดเฟสออสเทนไนต์ในแนวเชื่อม โดยกรณีที่สัดส่วนของ Cr_{eq}/Ni_{eq} มีค่าต่ำโอกาสเกิดเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์สูง และเมื่อสัดส่วนของ Cr_{eq}/Ni_{eq} มีค่าที่เพิ่มมากขึ้นโอกาสได้โครงสร้างออสเทนไนต์ก็จะค่อย ๆ ลดลง โดยจะได้เป็นเฟสโครงสร้างเฟอร์ไรต์มากขึ้นแทน ดังนั้นถ้าช่างเชื่อมทราบถึงปริมาณของ Cr_{eq} และ Ni_{eq} ของโลหะที่นำมาเชื่อมก็สามารถพยากรณ์ได้ว่าเมื่อนำโลหะในบ่อหลอมละลายเย็นตัวลง เนื้อโลหะของแนวเชื่อมจะเป็นโครงสร้างชนิดใด



รูปที่ 6.49 ตัวอย่างการทำนายโอกาสเกิดโครงสร้างภายในเนื้อเชื่อมของการเชื่อมเหล็กกล้าผสมโครเมียม – นิกเกิลด้วย Schaeffler diagram

ที่มา : Journal of Materials Processing Technology. Vol.274, 116280, 2019

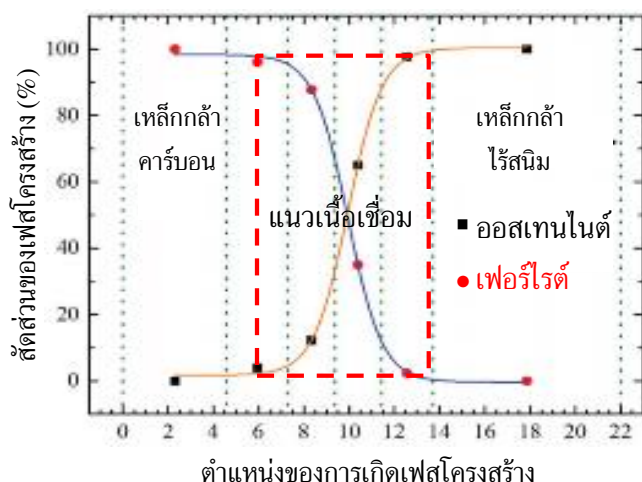


รูปที่ 6.50 ตัวอย่างการใช้สัดส่วนค่าของ Cr_{eq}/Ni_{eq} เพื่อการทำนายเฟสโครงสร้างที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ ของการเชื่อมเหล็กกล้าที่ผสมโครเมียม-นิกเกิลโดยใช้ Psuedo-binary diagram

ที่มา : MDPI – Materials. Volume 13 (2930), 2020

ความสัมพันธ์ของการเกิดโครงสร้างออสเทนไนต์ (FCC) กับเฟอร์ไรต์ (BCC) ในเนื้อโลหะแนวเชื่อม เมื่อทำการเชื่อมเหล็กกล้าผสมที่มีโครงสร้างพื้นเป็นเฟสออสเทนไนต์ (Austenite matrix) กับเหล็กกล้าคาร์บอนมีโครงสร้างพื้นเป็นเฟสเฟอร์ไรต์ (Ferrite matrix) ดังแสดงในรูปที่ 6.51 (ก) จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนโครงสร้างได้อย่างชัดเจนมากกว่า ถ้าเมื่อใดก็ตามภายในเนื้อโลหะเชื่อมเกิดเฟสออสเทนไนต์ปริมาณน้อย เฟสเฟอร์ไรต์จะกลับมีปริมาณที่มาก และในทางตรงกันข้ามถ้าเมื่อเกิด

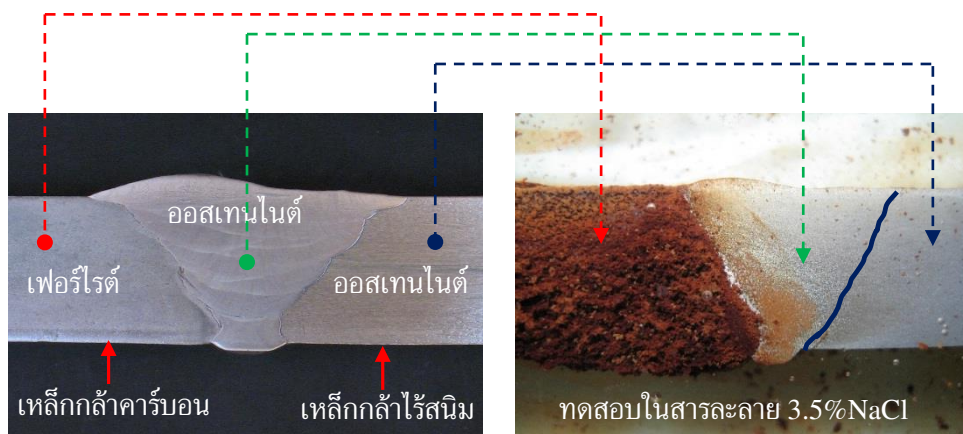
เฟสของออสเทนไนต์ปริมาณมาก เฟสเฟอร์ไรต์ก็จะน้อย ซึ่งเมื่อนำหลักการเกิดสัดส่วนโครงสร้างนี้ไปพิจารณา ร่วมกับการทำนายโครงสร้างด้วยปริมาณสัดส่วน Cr_{eq}/Ni_{eq} ที่แสดงในรูปที่ 6.50 นั้น สามารถอธิบายได้ว่าโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนซึ่งไม่มีธาตุникเกิดผสมจึงไม่สามารถเกิดเฟสออสเทนไนต์ได้ แต่ถ้าทำการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของนิกเกิลสูงก็จะสามารถสร้างเฟสออสเทนไนต์ขึ้นได้ โดยยี่งนิกเกิลละลายเข้ามามากก็จะยิ่งทำให้โอกาสในการเกิดเฟสที่แม่เหล็กไม่ดูดนี้เพิ่มมากยิ่งขึ้นด้วย ดังตัวอย่างงานวิจัยเชิงทดลองในรูปที่ 6.51 (ข) เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1020 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 เชื่อมด้วยลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 309L (Cr และ Ni สูง) พบว่าเนื้อโลหะเชื่อมมีสมบัติเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเพราะมีเฟสโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ และเมื่อทดลองแช่ในสารละลายน้ำเกลือ 3.5% (น้ำทะเล) เป็นเวลา 7 วัน จะเห็นได้ชัดเจนว่าบริเวณแนวเชื่อมจะไม่เกิดออกไซด์ ซึ่งลักษณะเหมือนกับเนื้อโลหะบริเวณฝั่งโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม แต่ที่บริเวณฝั่งของโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนเกิดออกไซด์ ซึ่งเป็นปกติของเหล็กกล้าคาร์บอนในน้ำทะเล ดังแสดงในรูปที่ 6.51 (ค)



รูปที่ 6.51 ความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดเฟสเฟอร์ไรต์กับเฟสออสเทนไนต์ในการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิม

ที่มา : Wichan Chuaiphon. Thesis Doctoral, 2011

(ก) สัดส่วนการเกิดเฟสออสเทนไนต์/เฟอร์ไรต์

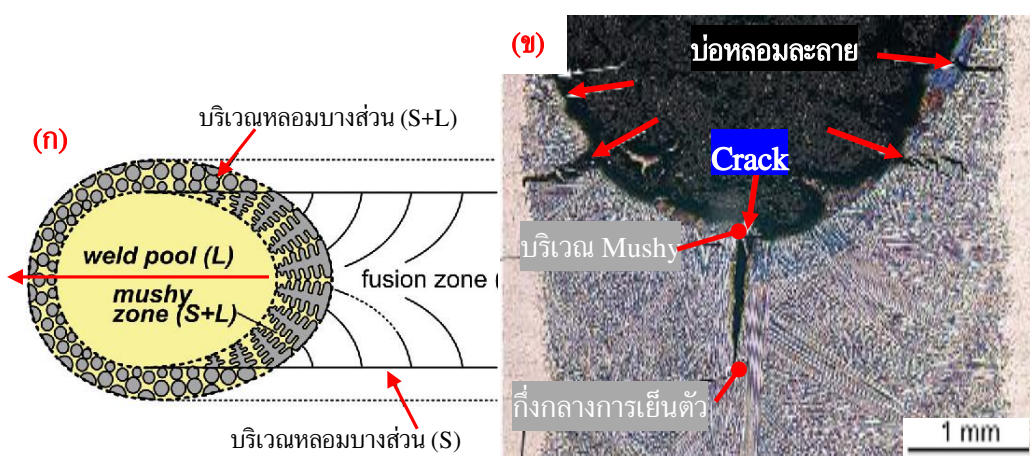


(ข) ลักษณะของแนวเชื่อมในการเชื่อมต่อ

(ค) การทดสอบประเมินการเกิดออกไซด์

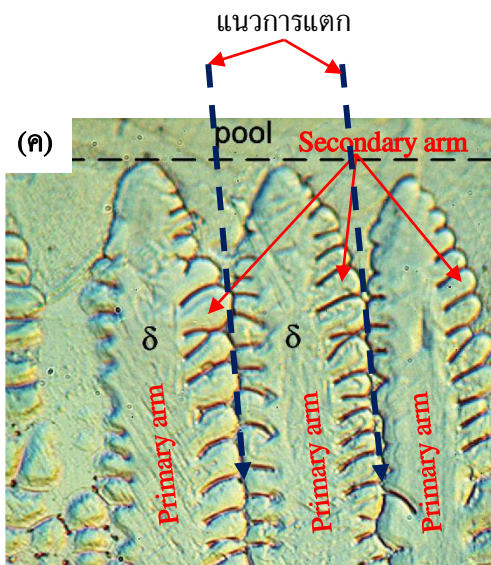
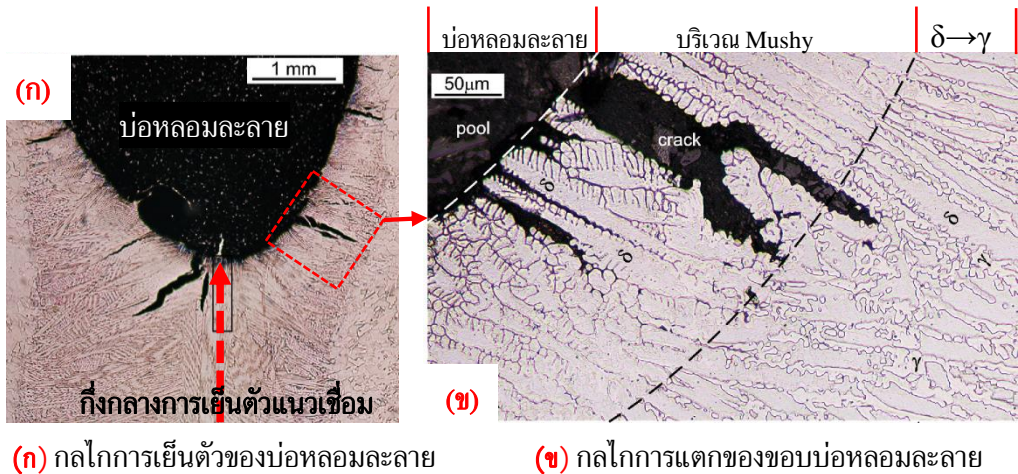
นอกจากที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว การเกิดโครงสร้างอสเทนไนต์ในแนวเชื่อมยังต้องระวังการเกิด การแตกร้าขณะแข็งตัว (Solidification cracking) ตามกลไกการแข็งตัวของบ่อหลอมละลายในการ เชื่อม โดยปกติที่บริเวณกึ่งกลางของแนวเชื่อมจะเย็นตัวช้าที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 6.52 (ก) อ้างอิงจาก งานวิจัยของ P. YU et al. (2018) กล่าวคือ เมื่อเริ่มเย็นตัวนิวเคลียสของแข็งจะเกิดที่ขอบของบ่อหลอม ละลายที่บริเวณหลอมบางส่วน (Partially melted) เพราะความร้อนระบายออกไปได้ก่อน จากนั้นความ ร้อนจากส่วนกลางก็ตามมาของแข็งก็จะรุกลืบสวนทางกับทิศทางการระบายของความร้อน จึงเป็นเหตุให้ กึ่งกลางของแนวเชื่อมเย็นตัวหลังสุด ซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจนที่บริเวณกึ่งกลาง แนวแข็งตัวเมื่อแนวเชื่อมเย็นตัวเสร็จสิ้น

ขณะแข็งตัวของน้ำโลหะเหลวในการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก มักเกิดการ แตกร้าที่บริเวณของแข็งผสมของเหลว (S+L) ที่เรียกกันว่า “Mushy State” โดยมีโอกาสเกิดขึ้นได้ รอบขอบของบ่อหลอมละลาย แต่ตำแหน่งที่รุนแรงและมีโอกาสเกิดมากที่สุดจะเป็นบริเวณจุดกึ่งกลาง ของแนวเย็นตัว ดังแสดงในรูปที่ 6.52 (ข) โดยการแตกร้าจะเกิดที่ขอบของบ่อหลอม (Fusion line) แล้วแตกไปตามร่องของเกรนเดนไดร์ Primary arm ของแต่ละแท่ง โดยแต่ละแท่งจะจรดกันที่จุดปลาย ของ Secondary arm ซึ่งแนวที่แตกก็เปรียบเสมือนเป็นขอบเกรนของแท่งเดนไดร์ ที่มีสมบัติที่เกิดการ แตกร้าได้ง่าย ดังแสดงตัวอย่างผลของการวิจัยทดลองในรูปที่ 6.53 (ก)–(ค) ของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้ สนิมออสเทนนิติก AISI 304 แบบไม่เติมลวดเชื่อมด้วยขบวนการเชื่อมทิก ในรูป (ก) แสดงตำแหน่ง ของการแตกขณะเย็นตัวว่าจะเกิดที่บริเวณของแข็งผสมกับของเหลว (S+L) ส่วนในรูป (ข) ขยายถึง รูปแบบของการแตกจากขอบของบ่อหลอมละลาย (Mushy region) ลึกเข้าไปเนื้อของแข็ง ซึ่งสังเกต พบว่าแนวของรอยแตกจะเกิดในตำแหน่งที่เป็นรอยต่อของระหว่างเกรนเดนไดร์ จึงได้ขยายตำแหน่งของ รอยต่อระหว่างของโครงสร้างเดนไดร์ในรูป (ค) เพื่อให้เห็นถึงตำแหน่งของการแตกอย่างชัดเจน



(ก) กลไกการแข็งตัวของบ่อหลอมละลาย (ข) ตำแหน่งที่จะเกิดการแตกขณะแข็งตัว
รูปที่ 6.52 กลไกการแข็งตัวของบ่อหลอมละลายในการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

ที่มา : AWS – Welding Journal, Welding research. Doi.org/10.29391/2018.97.026, 2018



รูปที่ 6.53 ตำแหน่งและทิศทางของการแตกขณะแข็งตัวของบ่อหลอมละลายในการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มของออสเทนนิติก

ที่มา : AWS – *Welding Journal, Welding research*. Doi.org/10.29391/2018.97.026, 2018

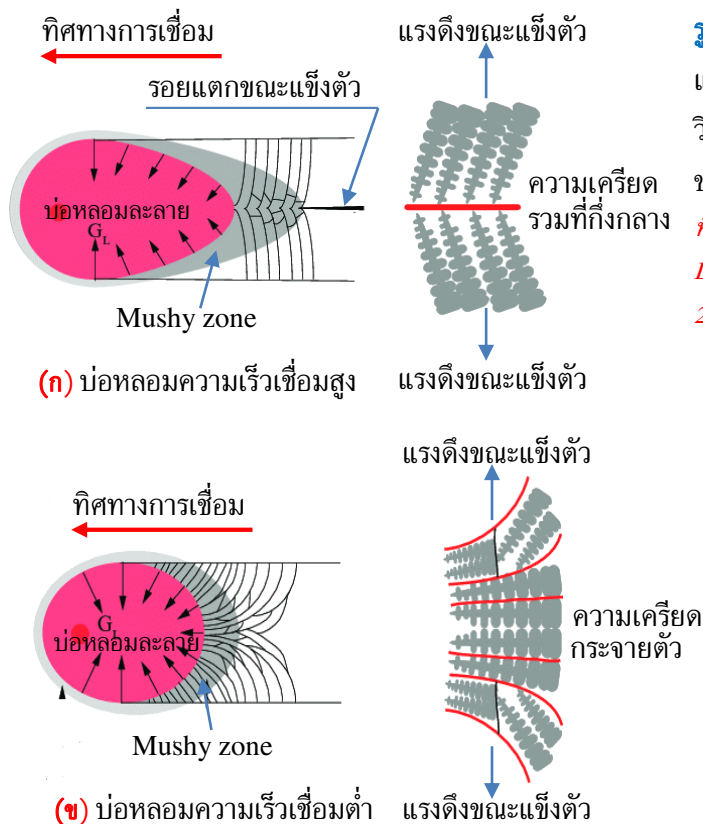
ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการแตกร้าวขณะแข็งตัว (Factor of Solidification cracking) จะเกิดจากส่วนผสมทางเคมีเป็นสำคัญ กล่าวคือ ส่วนผสมทางเคมีของทั้งโลหะหลักที่ติดมาจากการผลิตและส่วนผสมทางเคมีโลหะหล่อเชื่อมที่นำมาเติม โดยที่มีการหลอมละลายรวมเข้าด้วยกัน ซึ่งทั้งชนิดและปริมาณของธาตุที่ผสมจะมีพฤติกรรมในการเปลี่ยนเฟสสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง (Solidification) ที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่มักมีธาตุซิลิโคน (S) และฟอสฟอรัส (P) ที่หลงเหลือติดมาจากการผลิต (หรืออาจมาจากที่ผสมในโลหะเชื่อมเพื่อเพิ่มความสามารถในการตบแต่ง เช่น AISI 303S) เมื่อบ่อหลอมละลายแข็งตัวจะเริ่มแข็งที่ขอบแล้วรูดืบเข้าหาที่กลางแนวเชื่อม ธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำอย่างซิลิโคนและฟอสฟอรัสจะเย็นตัวช้า จึงถูกขับ

ออกไปยังกึ่งกลางของแนวเชื่อมทำให้บริเวณกึ่งกลางของแนวเชื่อมแข็งตัวหลังสุด และด้วยการที่มีปริมาณสะสมของซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสตามขอบเกรนเดนไดรต์ที่สูง เมื่อแนวเชื่อมหดตัวบริเวณขอบเกรนจะไม่สามารถรับความเค้นที่เกิดขึ้นจากการหดตัวได้ จึงเป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดการแตกร้าขณะร้อนได้ (Hot cracking)

ในทางโลหะวิทยาเป็นที่ทราบกันดีว่าเฟสเฟอร์ไรต์ยินยอมให้ธาตุซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสสามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี ด้วยเหตุผลทางโลหะวิทยาข้อนี้ทำให้ในการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์เป็นโครงสร้างพื้นจึงมักไม่เกิดการแตกขณะเย็นตัว แต่ปัญหาดังกล่าวมักเกิดกับการเชื่อมเหล็กกล้าที่มีโครงสร้างพื้นเป็นเฟสออสเทนไนต์ นั่นก็คือการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มประเภทออสเทนไนต์ (Series 300 และ 200) ดังนั้นวิธีการป้องกันหรือลดการแตกขณะแข็งตัวของเหล็กกล้าประเภทนี้สามารถทำได้โดยการยินยอมให้เกิดเฟสเฟอร์ไรต์ขึ้นท่ามกลางเฟสออสเทนไนต์ เพื่อเอาไว้ทำหน้าที่กำจัดซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสในแนวเชื่อมไม่ให้ไปสะสมอยู่ตามขอบเกรน แต่อย่างไรก็ตามต้องไม่ลืมว่า เฟสโครงสร้างเฟอร์ไรต์ในแนวเชื่อมจะเป็นตัวการที่ลดความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนลง ซึ่งจากงานวิจัยได้มีการสรุปไว้ว่าการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกทั้งที่เชื่อมกับชนิดเดียวกัน หรือต่างชนิด/ต่างเกรดกัน ต้องควบคุมปริมาณของเฟสเฟอร์ไรต์ในแนวเชื่อมให้มีปริมาณที่ยอมรับได้อยู่ที่ 3 – 10 % โดยสามารถทำนายปริมาณเฟสเฟอร์ไรต์ได้จากเครื่องมือที่เรียกว่า Schaeffler diagram ที่อาศัยการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโครเมียมเทียบเท่า (Cr_{eq}) กับปริมาณนิกเกิลเทียบเท่า (Ni_{eq}) ลงบนแผนภาพ Schaeffler ดังแสดงในรูปที่ 6.39 (ข) ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า ข้างเชื่อมสามารถควบคุมปริมาณของเฟสเฟอร์ไรต์ในแนวเชื่อมได้ด้วยการเลือกโลหะที่เชื่อมกับโลหะลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมทางเคมีที่ถูกต้องเหมาะสมและมีความสัมพันธ์กัน

นอกจากนี้วิธีการป้องกันการแตกร้าขณะแข็งตัวยังสามารถทำได้ด้วยวิธีการควบคุมรูปร่างของบ่อหลอมละลายขณะแข็งตัว (Weld pool) ดังแสดงในรูปที่ 6.54 ซึ่งเป็นผลการวิจัยเชิงทดลองของ G. Agarwal et al. (2019) ที่ทดลองเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงในงานอุตสาหกรรมยานยนต์ เกรด TRIP ด้วยขบวนการเชื่อมเลเซอร์ที่ความเร็วเชื่อมสูง (High welding speed) กับความเร็วเชื่อมต่ำ (Low welding speed) ดังในรูป (ก) และ รูป (ข) ตามลำดับ เพื่อพิสูจน์ให้เห็นว่าเมื่อเชื่อมโลหะด้วยความเร็วเชื่อมที่สูง รูปร่างของบ่อหลอมละลายที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูปวงรียาวคล้ายหยดน้ำ (Teardrop) การเย็นตัวของบ่อหลอมละลายจะค่อนข้างเร็วทำให้เกิดรูปแบบการแข็งตัวเป็นเดนไดรต์ที่พุ่งเข้าหาจุดกึ่งกลางของแนวเชื่อม (เกือบตั้งฉาก) ขณะที่ของแข็งเดนไดรต์กำลังเติบโตก็จะปรากฏแรงดึงจากการหดตัว (Tensile strain) ขึ้นที่ทั้งสองข้างของขอบบ่อหลอมละลาย ส่งผลทำให้บริเวณกึ่งกลางของแนวเชื่อมที่เย็นตัวหลังสุดมีความเครียดดึงสูงมาก (Strain concentration) จึงเป็นต้นเหตุของการเกิดการแตกขณะร้อนขึ้น แต่พบว่าในขบวนการเชื่อมที่ใช้ความเร็วต่ำบ่อหลอมละลายจะมีลักษณะเป็นรูปทรงไข่ (Eilliptical) และมีอัตราการเย็นตัวที่ช้า รูปแบบการเติบโตของเดนไดรต์ขณะแข็งตัวจะไม่พุ่งเข้าหาจุดกึ่งกลางแนวเชื่อมทิศทางเดียวแต่จะกระจายออกไป ด้วยเพราะมีเวลามากเพียงพอในการจัดเรียง

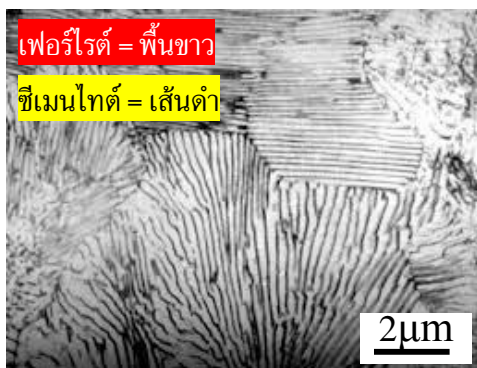
ตัวอย่างเป็นระยะียบ จากพฤติกรรมกรรมการเติบโตของเดนไดรต์ดังกล่าวส่งผลให้แรงเครียดดึงจากการหดตัวกระจายไปตามทิศทางของเดนไดรต์ ขจัดการรวมแรงเครียดดึงที่จุดกึ่งของแนวเชื่อม ซึ่งเป็นการขจัดปัญหาการแตกร้าวขณะแข็งตัวของการเชื่อมได้เป็นอย่างดี



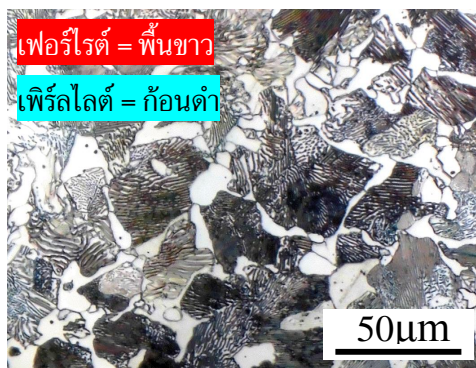
รูปที่ 6.54 การป้องกันการแตกร้าวขณะแข็งตัวด้วยวิธีการควบคุมความเร็วของขบวนการเชื่อม
ที่มา : *Journal of Materials & Design, Vol. 183 (5), 108104, 2019*

3. โครงสร้างซีเมนไทต์ (Cementite structure) หรือ โครงสร้างเหล็กคาร์ไบด์ (Iron carbide) เป็นโครงสร้างโลหะที่อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound) ที่ประกอบกันแบบแทรกช่องว่างระหว่างอะตอมของเหล็ก (Fe) กับคาร์บอน (C) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสูตรทางเคมีได้ว่า Fe_3C เป็นโครงสร้างของโลหะเหล็กที่มีสมบัติที่แข็งและเปราะ มีส่วนประกอบของคาร์บอนสูงสุด 6.67% ระบบผลึกเป็นแบบออร์โธรมบิก (Orthorhombic) เป็นโครงสร้างที่มีจุดหลอมละลายสูงถึง $1,550^\circ\text{C}$ ในทางโลหะวิทยาจะไม่สามารถพบเหล็กที่มีโครงสร้างซีเมนไทต์อย่างเดียว แต่จะอยู่รวมกับโครงสร้างอื่น โดยเฉพาะในเหล็กกล้าคาร์บอนจะพบโครงสร้างซีเมนไทต์เกิดรวมอยู่กับโครงสร้างฟีนเพอร์ไรต์ ซึ่งปะปนกันอยู่แบบเป็นแถบสลับกัน จะเรียกชื่อโครงสร้างที่อยู่กันในลักษณะนี้ว่า โครงสร้างเพิร์ลไลท์ (Pearlite structure : $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) โดยที่สัดส่วนของเฟสซีเมนไทต์จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็ก กล่าวคือ ถ้าคาร์บอน (C) มากสามารถรวมตัวกับเหล็ก (Fe) ได้มากเกิดเป็นเหล็กคาร์ไบด์ได้มาก (Fe_3C) เฟสซีเมนไทต์ก็จะมากเฟสเพอร์ไรต์ก็จะน้อย ในทางกลับกันถ้าคาร์บอน

น้อยเฟสซีเมนไทต์ก็จะน้อยเฟสเฟอร์ไรต์ก็จะมาก ดังแสดงในรูปที่ 6.55 (ก) แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างเฟสซีเมนไทต์มากกว่าเฟสเฟอร์ไรต์ และในรูป (ข) แสดงให้เห็นถึงเฟสซีเมนไทต์กับเฟสเฟอร์ไรต์ที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกันที่เรียกกันว่า เพิร์ลไลต์สมบูรณ์ (Balance pearlite)



(ก) โครงสร้างซีเมนไต์ (Fe_3C)



(ข) โครงสร้างเพิร์ลไลต์ ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$)

รูปที่ 6.55 โครงสร้างซีเมนไทต์ที่เกิดร่วมกับเฟอร์ไรต์ในโครงสร้างเพิร์ลไลต์

ที่มา University of Tennessee, Materials Science and Engineering, 2013

โครงสร้างซีเมนไทต์ในทางโลหะวิทยางานเชื่อมมีอิทธิพลน้อยมาก เนื่องจากเป็นโครงสร้างสารประกอบของเหล็กที่สามารถเกิดขึ้นได้เองอย่างอัตโนมัติ เมื่อมีความเข้มข้นของคาร์บอนมากเพียงพอ (6.67%) ดังนั้น อัตราการเย็นตัวของการเชื่อมจึงไม่มีผลต่อการเกิดโครงสร้างซีเมนไทต์ หรืออาจจะมีเพียงแคได้เฟสซีเมนไทต์สั้น-ยาว ที่อยู่ระหว่างเฟสเฟอร์ไรต์ โดยถ้าเย็นตัวเร็วจะได้เฟสของซีเมนไทต์ที่สั้นทำให้ได้โครงสร้างเพิร์ลไลต์ที่เป็นก้อนเล็ก และถ้าเย็นตัวช้าเฟสซีเมนไทต์ก็จะยาวทำให้ได้โครงสร้างเพิร์ลไลต์ที่เป็นก้อนใหญ่ จึงเป็นโครงสร้างที่ไม่ค่อยมีอิทธิพลต่อสมบัติของแนวเชื่อม

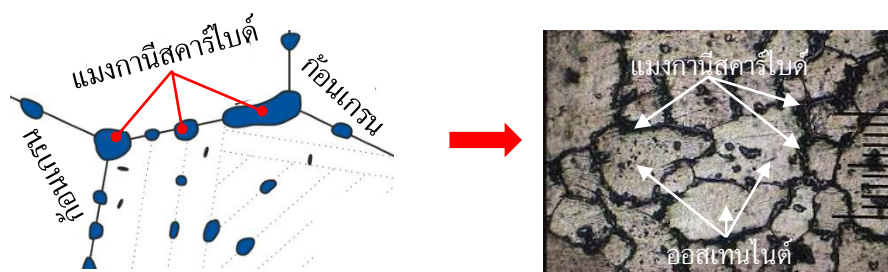
นอกจากโครงสร้างคาร์ไบด์ซีเมนไทต์แล้วยังมีโครงสร้างคาร์ไบด์ที่เกิดจากคาร์บอนไปรวมตัวกับธาตุโลหะอื่น ๆ ในรูปของการประกอบที่เกิดขึ้นได้ในแนวเชื่อม เช่น โครเมียมคาร์ไบด์ (Cr_{23}C_6) แมงกานีสคาร์ไบด์ (Mn_3C) นิกเกิลคาร์ไบด์ (Ni_3C) โมลิบดีนัมคาร์ไบด์ (Mo_3C) ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) และธาตุอื่น ๆ ที่อยู่ในบ่อหลอมละลายที่รวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ เป็นต้น โดยกลไกของการเกิดเฟสคาร์ไบด์ทั้งหมดจะเกิดขึ้นได้จากปริมาณที่เหมาะสมอยู่ ไม่ได้เกิดจากปัจจัยของการเย็นตัวจึงไม่มีผลกระทบใด ๆ ต่อขบวนการเชื่อม แต่เป็นที่ทราบกันดีว่าเฟสคาร์ไบด์ส่วนใหญ่มีผลต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม ดังนั้นการเลือกวัสดุโลหะเชื่อมและลวดเชื่อมที่เหมาะสมก็สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลของแนวเชื่อมได้ ด้วยการควบคุมปริมาณเฟสคาร์ไบด์ที่กระจายอยู่ในแนวเชื่อม พบว่าส่วนใหญ่เฟสคาร์ไบด์มักถูกผลักออกมาให้อยู่ตามบริเวณขอบเกรน ด้วยเพราะไม่ละลายหรือรวมกับเฟสอื่น ๆ ได้อีก โดยจะส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีสมบัติด้านความเหนียวลดลง ซึ่งข้อด้อยของแนวเชื่อมเหล่านี้สามารถปรับปรุงแก้ไขได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment of metal) ด้วยการเอาพลังงานความร้อน

ไปช่วยในการปรับแต่งตำแหน่งของเฟสต่าง ๆ ให้อยู่ในสถานะและตำแหน่งที่ไม่สมดุลในแนวเชื่อม ดังตัวอย่างการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์และแมงกานีสคาร์ไบด์ตามขอบเกรนในรูปที่ 6.56



(ก) การเกิดเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรน

ที่มา : T.Sourmail and H.K.D.H. Bhadeshia. *Stainless steel*, 2015



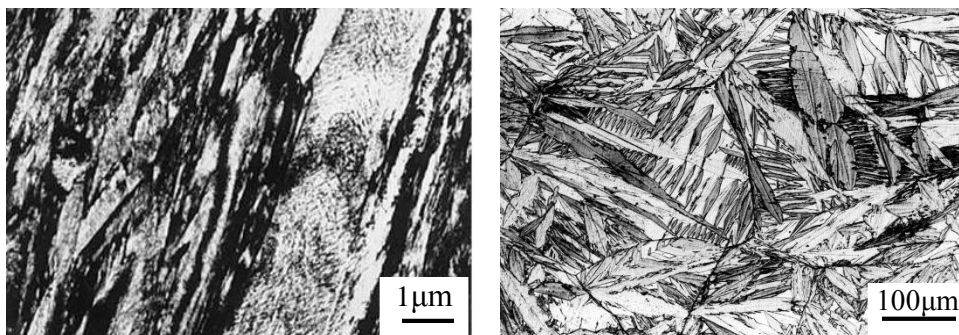
(ข) การเกิดเฟสแมงกานีสคาร์ไบด์ตามขอบเกรน

ที่มา : Knowledge E, ICTSD 2018 – Vol. 2019

รูปที่ 6.56 การเกิดคาร์ไบด์ตามบริเวณขอบเกรนหลังการแข็งตัว

4. โครงสร้างมาร์เทนไซต์ และเบนไนต์ (Martensite and Bainite structures) โครงสร้างจำพวกนี้เป็นโครงสร้างที่มีสภาพไม่เสถียร (Unstable) หรือไม่สมดุลซึ่งไม่ปรากฏให้เห็นบนแผนภาพสมดุลเฟส (Equilibrium phase diagram) แต่จะเกิดจากการเปลี่ยนของโครงสร้างในสภาวะวิกฤติ (Critical state) ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างฉับพลันของโลหะในการอบชุบด้วยความร้อน หรือเกิดจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการที่โลหะเหล็กกล้าผสมแมงกานีสสูง ได้รับแรงกระทำจากภายนอกอย่างแรง (แรงกระแทกของเหล็กฮาร์ดฟิลด์) และที่สำคัญคือเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของบ่อหลอมละลายในการเชื่อม ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ทั้งในเนื้อของแนวเชื่อม และบริเวณผลกระทบร้อน (HAZ) ของโลหะเชื่อม เป็นต้น สำหรับในแนวเชื่อมมักจะพบเฟสมาร์เทนไซต์กับการเชื่อมโลหะที่มีคาร์บอนผสมสูง โดยเกิดการแพร่ของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมของเหล็กจากเฟสออสเทนไนต์ขณะเย็นตัว เพื่อมาจับตัวกันเพื่อเป็นเฟสเฟอร์ไรต์ ด้วยเหตุคาร์บอนที่ผสมอยู่สูงจึงมารวมกันในปริมาณที่มากเกินไป และเนื่องจากเพราะเวลาเย็นตัวที่เร็ว จึงเกิดเป็นสารละลายของแข็งเกินจุดอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated solid solution) ซึ่งผลึกของเฟสเฟอร์ไรต์แบบที่เกิดขึ้นใหม่นี้เรียกว่า BTC (Body Centered Tetragonal)

นั่นก็คือ เฟสโครงสร้างมาร์เทนไซต์ โดยสามารถพบได้ทั้งมาร์เทนไซต์แบบบาง (Lath martensite) ซึ่งเกิดในกรณีที่มีปริมาณคาร์บอนละลายมากเกินไป (ที่ระดับต่ำ) และมาร์เทนไซต์แบบปลายแหลมคล้ายเข็ม (Needle-like martensite) ซึ่งเกิดในกรณีที่มีปริมาณคาร์บอนละลายมากเกินไป (ที่ระดับสูง) ดังแสดงในรูปที่ 6.57 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



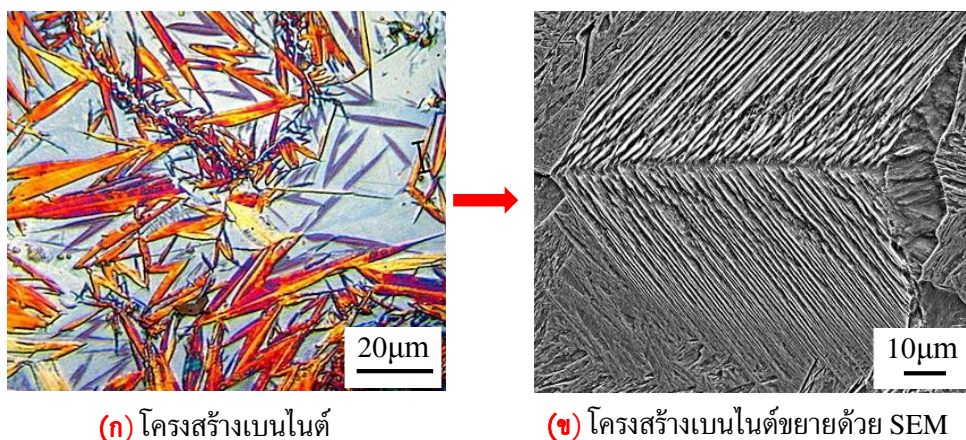
(ก) โครงสร้างมาร์เทนไซต์แบบแผ่นบาง

(ข) โครงสร้างมาร์เทนไซต์แบบคล้ายเข็ม

รูปที่ 6.57 ลักษณะของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีรูปแบบมีรูปร่างแตกต่างกัน

ที่มา : *Journal of Materials Research, Vol. 18(3), Org/10.1590, 2015*

สำหรับโครงสร้างเฟสเบนไนต์ เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการที่เฟสออสเทนไนต์เย็นตัวเพื่อมาเป็นเฟสเฟอร์ไรต์แต่ด้วยอัตราเร็วของการเย็นตัวที่สูงของวิธีการอบชุบหรือวิธีการเชื่อม เป็นเหตุให้คาร์บอนที่ละลายออกมาจากการเปลี่ยนระบบผลึก FCC ไปเป็น BCC นั้นละลายออกมาได้ง่ายและมาก แล้วก็ไปรวมกับเฟสเฟอร์ไรต์และซีเมนไทต์ในปริมาณที่มากเกินไปจนเกิดเป็นสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดขึ้นที่เกิดสลับกันระหว่างเฟสเฟอร์ไรต์กับเฟสซีเมนไทต์ (เหมือนกับโครงสร้างเฟอร์ไรต์) แต่ด้วยเพราะเฟอร์ไรต์นี้แตกต่างจากเฟอร์ไรต์ที่เกิดแบบปกติ คือมีสถานะเป็นสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวดจึงเรียกโครงสร้างที่เกิดสลับกันนี้ว่า “โครงสร้างเบนไนต์” ดังแสดงลักษณะของโครงสร้างในรูปที่ 6.58 (ก) และเพิ่มกำลังขยายด้วย SEM ในรูป (ข) ในงานเชื่อมมักจะพบว่าเกิดร่วมกันกับโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ด้วยเพราะอัตราการระบายความร้อนของการเย็นตัวในแนวเชื่อมมีความแตกต่างกันในแต่ละบริเวณ โดยบริเวณใดที่มีอัตราการเย็นตัวที่สูงโอกาสที่จะเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์มากกว่าเบนไนต์ และในทางตรงกันข้ามถ้าบริเวณใดมีอัตราการเย็นตัวที่ต่ำโอกาสที่จะเป็นโครงสร้างเบนไนต์มากกว่ามาร์เทนไซต์ และนอกจากอัตราการเย็นตัวแล้วยังมีปัจจัยของปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ในโลหะที่นำมาเชื่อม กล่าวคือ โอกาสที่จะเกิดปริมาณของโครงสร้างทั้งสองมากขึ้นในกรณีที่มีคาร์บอนผสมอยู่สูงอยู่ในโลหะเชื่อม (Base metal) แต่สำหรับการเชื่อมโลหะที่มีโครงสร้างพื้นเป็นมาร์เทนซิติก เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic stainless steels) หรือ ซีรีย์ 400 เมื่อผ่านการเชื่อมแล้วเย็นตัวก็จะได้โครงสร้างเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ (Martensitic matrix) ซึ่งเกิดขึ้นอย่างสมดุลของเหล็กกล้าผสมของเหล็กกลุ่มนี้ไม่ได้เกิดจากอิทธิพลของอัตราเร็วของการเย็นตัว

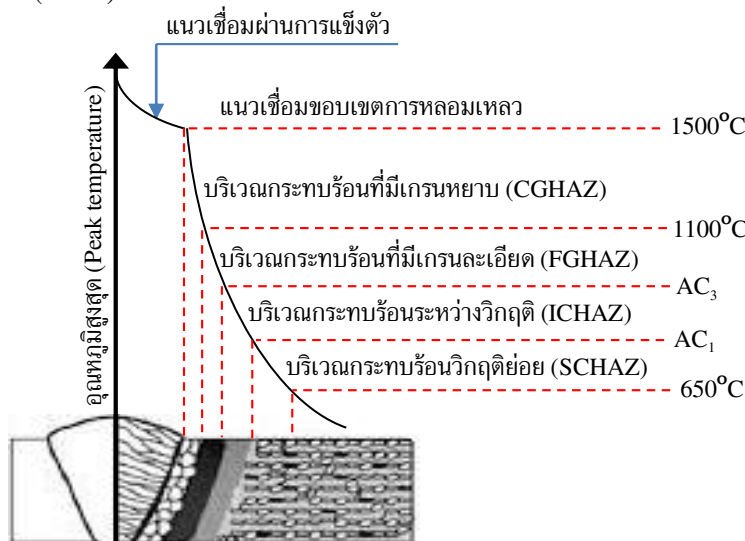


รูปที่ 6.58 ลักษณะของโครงสร้างเบนไนต์ปกติและเพิ่มกำลังขยายด้วย SEM

ที่มา : Leometwu., CS WU Taichung Taiwan, Color metallography, 2009

โครงสร้างมาร์เทนไซต์และเบนไนต์นอกจากจะเกิดอยู่ในส่วนของแข็งตัวจากบ่อหลอมละลายแล้ว บริเวณกระแทบร้อน (HAZ) จากบ่อหลอมละลายก็จะมีโอกาสเกิดมากเช่นกัน เนื่องจากบริเวณของ HAZ มีอุณหภูมิจากการเชื่อมสูงมากที่จะทำให้เกิดเฟสออสเทนไนต์ แล้วเมื่อมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของการระบายความร้อนก็จะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจาก FCC เป็นเป็น BCC ได้ไม่ทัน เป็นเหตุให้เกิดเป็นโครงสร้าง BTC แทน ซึ่งก็คือโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (เย็นตัวเร็วมาก) และโครงสร้างเบนไนต์ (เย็นตัวช้ากว่าตามลำดับ) โดยโครงสร้างทั้งสองสามารถเกิดขึ้นได้ที่ HAZ ของทั้งบริเวณกระแทบร้อนที่มีเกรนหยาบ (Coarse Grain Heat Affected Zone : CGHAZ) และบริเวณกระแทบร้อนที่มีเกรนละเอียด (Fine Grain Heat Affected Zone : FGHAZ) ด้วยเพราะว่าระดับอุณหภูมิของทั้งสองบริเวณอยู่เหนือเส้น A_3 ดังแสดงในรูปที่ 6.59 ซึ่งที่ระดับของอุณหภูมินี้สูงมากพอที่จะทำให้โครงสร้างอยู่ในสภาวะสารละลายของแข็งเฟสออสเทนไนต์ (FCC) และเมื่อบ่อหลอมละลายแนวเชื่อมเริ่มเย็นตัวที่มีอัตราการเย็นตัวที่เร็วมาก การเปลี่ยนเฟสจะเกิดขึ้นแบบฉับพลันซึ่งมีเวลาไม่มากพอที่จะเกิดเป็นโครงสร้างเฟสสมดุลได้ทันที ซึ่งก็คือเฟสเพอร์ไรต์และซีเมนไทต์ แต่จะเกิดเป็นโครงสร้างเฟสที่ไม่สมดุลขึ้นแทน นั่นก็คือเฟสของโครงสร้างมาร์เทนไซต์และเบนไนต์ โดยปกติสมบัติทางกลของโครงสร้างมาร์เทนไซต์และเบนไนต์จะมีความแข็งสูง ดังนั้น บริเวณแนวเชื่อมและบริเวณกระแทบร้อนที่เกิดโครงสร้างทั้งสองนี้จะมีความแข็งที่สูงจนอาจเป็นข้อด้อยที่ไม่พึงประสงค์ของแนวเชื่อมที่แข็งมากเกินไป เกิดการแตกร้าวได้ง่าย จึงต้องมีการขบวนการนำแนวเชื่อมไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อลดความแข็ง และความเค้นตกค้าง (Residual stress) ที่สะสมอยู่ในแนวเชื่อม ซึ่งที่รู้จักกันดีในขบวนการของการให้ความร้อนกับชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม (Post Weld Heat Treatment : PWHT) โดยจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

ข้อมูลในรูปได้จากผลการวิจัยทดลองเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ส่วนผสมต่ำ (HSLA : APIX80) ด้วยขบวนการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (SAW)

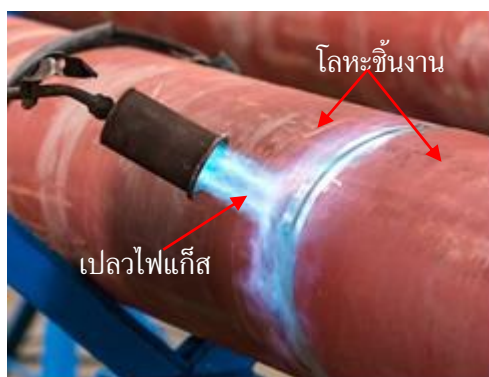


รูปที่ 6.59 การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างอันเนื่องมาจากอิทธิพลของอุณหภูมิกระแทกร้อน (HAZ) ในแนวเชื่อม
ที่มา : ASME : Pressure Vessels and Piping Conference, Paper No. PVP 2020-21833, 2020

6.5 กรรมวิธีทางความร้อนกับงานเชื่อม (Heat treatments associated with welding)

การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) มีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กันกับความร้อนเสมอ ทั้งที่เป็นความร้อนที่ป้อนเข้าไปเพื่อต้องการให้โลหะเกิดการหลอมละลาย (Heating) และความร้อนที่ระบายออกเพื่อต้องการให้บ่อหลอมละลายแข็งตัว (Cooling) ซึ่งทั้งคู่จะมีผลที่สัมพันธ์ต่อกัน ต่างก็ต้องควบคุมให้เกิดขึ้นอย่างมีระบบ เพราะบทบาทของความร้อนนี้มีอิทธิพลต่อการกำหนดคุณภาพและคุณสมบัติของแนวเชื่อมตามที่ต้องการ โดยจะกล่าวถึง กรรมวิธีทางความร้อนที่สำคัญและจำเป็นในขบวนการเชื่อมที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน ดังนี้

1. การอุ่นโลหะงานก่อนเชื่อม (Preheating in welding) เป็นวิธีการให้ความร้อนแก่โลหะชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม (Base metal) ให้มีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากอุณหภูมิปกติ เพื่อวัตถุประสงค์ในการเพิ่มความสามารถในการเชื่อมที่สูงขึ้น เช่นในกรณีการเชื่อมโลหะต่างชนิด การเชื่อมโลหะความหนาต่างกัน การเชื่อมโลหะที่จุดหลอมเหลวต่างกัน เป็นต้น และยังช่วยลดอัตราการบิดตัว การแตกร้าว ที่เกิดจากความเค้น พร้อมกันนี้ยังช่วยขจัดแก๊สและความชื้นที่ชิ้นงานได้อีกด้วย กรรมวิธีการอุ่นโลหะงานสามารถทำได้ทั้งวิธีการเผาด้วยเปลวไฟแก๊ส (Flame heating) ดังแสดงในรูปที่ 6.60 (ก) ที่ทำได้ง่ายและสะดวก แต่ขาดความเที่ยงตรงของอุณหภูมิจากเปลวไฟอาจจะเหมาะกับงานที่ไม่ต้องการคุณภาพแนวเชื่อมมากนัก สำหรับงานเชื่อมที่ต้องการความเที่ยงตรงหรือคุณภาพของแนวเชื่อมที่สูง นิยมวิธีการใช้ขดลวดความร้อน (Induction heating) ดังแสดงในรูปที่ 6.60 (ข) ด้วยเพราะวิธีนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำซึ่งอาศัยระบบของไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



(ก) วิธีการให้ความร้อนด้วยเปลวไฟแก๊ส

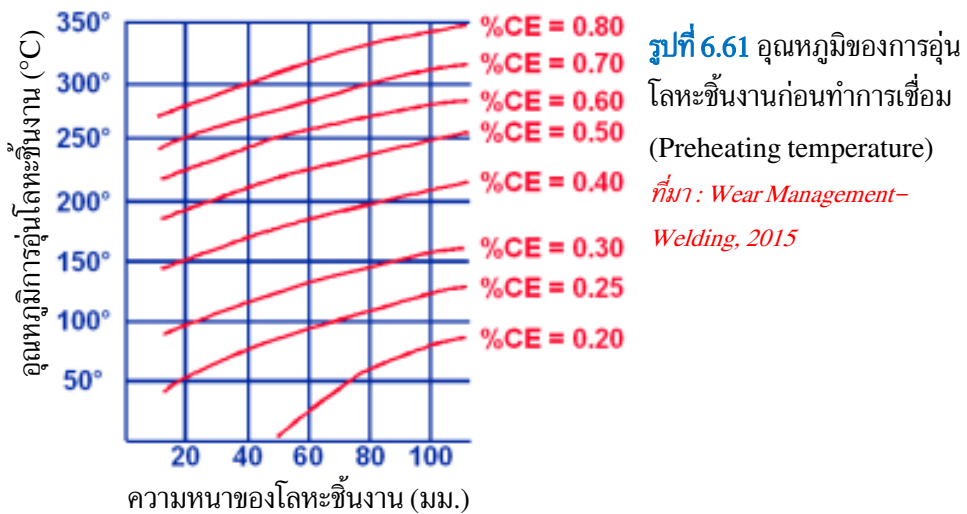
(ข) วิธีการให้ความร้อนด้วยขดลวดความร้อน

รูปที่ 6.60 กรรมวิธีการอุ่นโลหะชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม (Preheating in welding)

ที่มา : Pipe –Tube heating system, 2013

การเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาของการให้ความร้อนเพื่ออุ่นโลหะชิ้นงานก่อนเชื่อม เป็นการทำให้โลหะเชื่อมหลอมละลายได้เร็วขึ้นหรือง่ายขึ้น เหมาะกับการเชื่อมโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่างกัน เพราะความร้อนที่อุ่นให้จะเป็นฐานของอุณหภูมิสำหรับช่วยในการหลอมละลาย และความร้อนนี้ยังสร้างเป็นฐานของการระบายความร้อนให้เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เพื่อลดการขยายตัวแบบฉับพลันของโลหะชิ้นงานซึ่งสามารถช่วยลดการเกิดการบิดตัวของชิ้นงานได้ดี (Distortion) การให้ความร้อนก่อนเชื่อมนี้ นอกจากจะกระทำบนบริเวณผิวของโลหะชิ้นงานที่ต้องการจะเชื่อมแล้วนั้น ยังมีขบวนการอุ่นหรือให้ความร้อนงานระหว่างการเชื่อมของการเชื่อมหลายแนว (Interpass temperature) เพื่อต้องการเพิ่มอุณหภูมิในการเชื่อมของแนวเชื่อมถัดไป ซึ่งเป็นการเพิ่มขีดความสามารถของการเชื่อมเพิ่มขึ้น ในปัจจุบันได้มีการนำข้อดีของการอุ่นโลหะชิ้นงานก่อนเชื่อมมาพัฒนาเป็นเทคนิคการเชื่อม เช่น การออกแยกหัวเชื่อมมิก/แมกที่มีหัวเชื่อมแก๊สนำ เพื่อใช้เปลวไฟจากหัวเชื่อมแก๊สอุ่นงานก่อนเชื่อม ซึ่งเป็นลักษณะการเชื่อมแบบไฮบริด (Hybrid welding) เป็นต้น

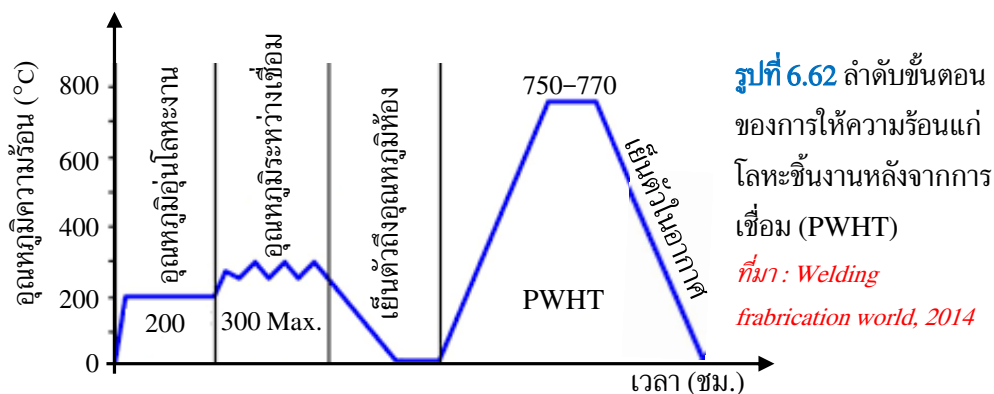
อุณหภูมิสำหรับการอุ่นโลหะชิ้นงานก่อนทำการเชื่อมจะพิจารณาจากความสัมพันธ์ของปริมาณคาร์บอนที่ผสม (Carbon equivalent) กับความหนาของโลหะชิ้นงานเป็นสำคัญ ดังแสดงความสัมพันธ์ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงในรูปที่ 6.61 กล่าวคือ โลหะที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ในปริมาณมากขึ้น อุณหภูมิสำหรับการอุ่นโลหะชิ้นงานก็จะสูงขึ้น และในทำนองเดียวกันโลหะชิ้นงานยังมีความหนามากขึ้น อุณหภูมิสำหรับการอุ่นก็จะยิ่งเพิ่มสูงมากขึ้น ซึ่งเป็นเหตุผลในทางโลหะวิทยาที่โลหะที่มีคาร์บอนผสมสูงอัตราการขยายตัวจะต่ำ มีคาร์ไบด์สูง ความแข็งสูงเมื่อบดงอแล้วจะแตกได้ง่าย จึงต้องอุ่นงานด้วยความร้อนที่สูง สำหรับความหนาก็เป็นเรื่องปกติวิสัยที่เนื้องานที่หนามาก ต้องการความร้อนเพื่อการอุ่นให้เข้าถึงทุกบริเวณก็ต้องสูงตาม อย่างไรก็ตามการพิจารณาถึงอุณหภูมิของการอุ่นโลหะชิ้นงานก็ต้องควบคู่กับกรรมวิธีการเชื่อม เพราะแต่ละวิธีจะสร้างความร้อนได้ไม่เท่ากัน ซึ่งช่างเชื่อมต้องพิจารณาเลือกให้เหมาะสมและสัมพันธ์กัน ซึ่งอาจรวมถึงปัจจัยการเชื่อมด้านอื่น ๆ ด้วย เช่น ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้า (Heat input) และขนาดของลวดเชื่อม เป็นต้น



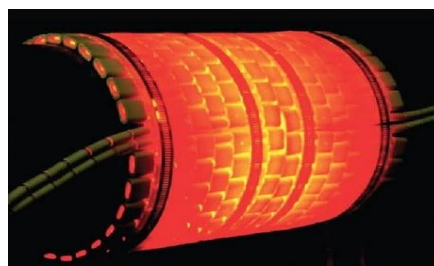
2. การให้ความร้อนโลหะขึ้นงานหลังการเชื่อม (Post-Weld Heat Treatment : PWHT) เป็นขบวนการที่จะเกิดขึ้นหลังการเชื่อมเสร็จสิ้นทันที หรือภายในเวลาที่กำหนดไว้ โดยการให้ความร้อนต่อชิ้นงานเชื่อมทั้งที่เป็นแนวเชื่อมและบริเวณกระทบร้อน เพื่อต้องการให้ความร้อนไปทำหน้าที่ปรับปรุงสมบัติของแนวเชื่อมให้ดีขึ้น โดยช่วยคลายหรือลดความเค้นที่ตกค้างภายในโครงสร้างโลหะที่เกิดจากการหดตัวของชิ้นส่วนของแนวเชื่อม ด้วยเหตุเพระบ่อหลอมละลายของการเชื่อมมีอัตราการเย็นตัวที่เร็ว โครงสร้างที่ได้จะจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (Disorder structure) จึงเกิดความเค้นขึ้น ดังนั้น เมื่อป้อนพลังงานความร้อนเข้าไปก็จะช่วยทำให้โครงสร้างปรับตำแหน่งจนเป็นระเบียบ (Order structure) มากขึ้นเป็นผลทำให้ความเค้นลดลง นอกจากนี้ยังจะส่งผลไปทำให้ความแข็งของบริเวณกระทบร้อนลดลง ช่วยเพิ่มความเหนียวและความแกร่ง และยังช่วยกำจัดแก๊สไฮโดรเจนที่ละลายอยู่ในเนื้อเชื่อมได้เป็นอย่างดี สำหรับกรณีที่เชื่อมงานโลหะเหล็กไร้สนิมออสเทนเนติกที่ต้องการนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีความกัดกร่อนที่รุนแรง จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำ PWHT เพื่อให้ความร้อนไปละลายอนุภาคของเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr_3C_2 หรือ Cr_7C_3 หรือ Cr_{23}C_6) เพื่อให้โครเมียมที่ละลายออกมาช่วยสร้างออกไซด์ฟิล์ม (Passive film) ให้แข็งแรงและต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบหลุมหรือรูเข็ม (Pitting corrosion) ได้มากขึ้น ซึ่งเรียกกรรมวิธีนี้ว่า “การทำละลายของแข็ง (Solid solution heat treatment)”

สำหรับบริเวณกระทบร้อน (HAZ) หลังการให้ความร้อนจะส่งผลทำให้โครงสร้างที่ไม่สมดุลได้แก่ โครงสร้างมาร์เทนไซต์หรือเบนไนต์ โครงสร้างเหล่านี้จะปรับตัวไปสู่สภาวะสมดุลในบางส่วน (กรณีให้ความร้อนสูงหรือใช้เวลานานอาจปรับตัวทั้งหมด) ส่งผลทำให้สมบัติของโครงสร้างบริเวณกระทบร้อนนี้มีสมบัติที่ใกล้เคียงหรือเหมือนกันกับแนวเชื่อมและโลหะหลัก โดยเฉพาะสมบัติทางกลด้านความแข็ง (Hardness) ทั้งนี้ก็ต้องขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของขบวนการให้ความร้อน กล่าวคือ ระดับของอุณหภูมิความร้อนที่ป้อนเข้าไป (Heating temperature) เวลาที่ใช้ป้อนความร้อน (Holding time) และอัตรา

ความเร็วของการให้และลดลงของอุณหภูมิ (Heating and Cooling rate) ซึ่งในทางปฏิบัติวิศวกรงานเชื่อมหรือช่างเชื่อมสามารถกำหนดรายละเอียดข้อปฏิบัติต่าง ๆ เหล่านี้ได้จากมาตรฐานข้อกำหนดได้แก่มาตรฐาน ISO/TR 14745:2015 หรือมาตรฐาน ASME Section VIII Division 1 เป็นต้น ขบวนการให้ความร้อนโลหะชิ้นงานหลังการเชื่อม (PWHT) สำหรับโลหะเชื่อมแต่ละชนิดแต่ละเกรดจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนกับเวลาที่แตกต่างกัน แต่จะมีลำดับขั้นตอน (Step) ที่เกิดขึ้นเหมือนกันหรือคล้ายกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.62 และแสดงตัวอย่างของการเตรียมให้ความร้อนด้วยขดลวดความร้อนและชิ้นงานขณะร้อนบนแนวเชื่อมโลหะท่อ ในรูปที่ 6.63 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) วิธีการประกอบเตรียมขดลวดความร้อน



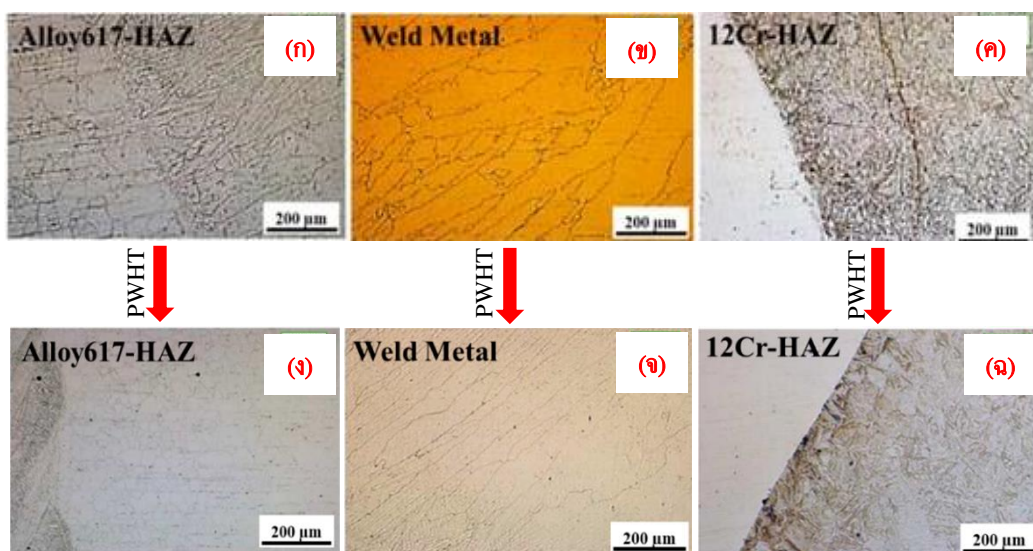
(ข) ความร้อนที่เกิดจากขดลวดความร้อน

รูปที่ 6.63 การเตรียมและการให้ความร้อนแก่โลหะชิ้นงานหลังจากการเชื่อม (PWHT)

ที่มา: *Steel Heat Treatment Services : Post Weld Heat Treatment. 2017*

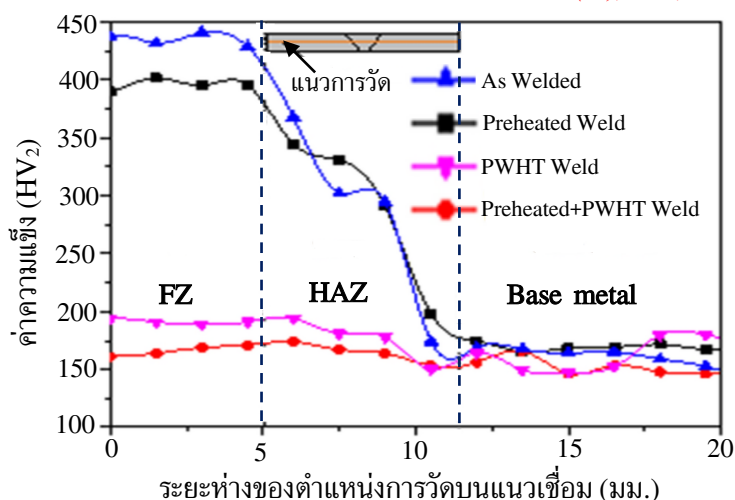
การเปลี่ยนแปลงในทางโลหะวิทยางานเชื่อมของการทำ PWHT เป็นการนำพลังงานความร้อนไปใช้เพื่อปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคในโลหะที่เชื่อม ดังแสดงตัวอย่างงานผลวิจัยเชิงทดลองของการเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่าง Alloy 617 กับ Alloy 12 Cr ของ Umer Masood Chaudry et al. (2020) โดยเปรียบเทียบโครงสร้างก่อนและหลังการทำ PWHT ดังแสดงในรูปที่ 6.64 พบว่าผลของการให้ความร้อนแก่โลหะชิ้นงานหลังการเชื่อมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเนื้อเกรนภายในชัดเจนมาก ทั้งที่บริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) และที่บริเวณกระทบร้อน (HAZ) ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงมีอิทธิพลต่อสมบัติของชิ้นงานเชื่อม โดยเฉพาะสมบัติทางกลด้านความแข็ง ดังรายงานผลการวิจัยเชิงเปรียบเทียบระดับค่าความแข็งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงหลังจากที่ผ่านขบวนการให้ความร้อนที่แตกต่างกันระหว่าง

แนวเชื่อมปกติ (As welded) ผ่านการอุ่นขึ้นงาน (Preheated weld) ผ่านการให้ความร้อนหลังการเชื่อม (PWHT weld) และผ่านการให้ความร้อนก่อนและหลังการเชื่อม (Preheated + PWHT weld) ดังแสดงผลในกราฟรูปที่ 6.65 ซึ่งพิสูจน์ให้เห็นว่าการใช้ความร้อนจากแหล่งภายนอกการเชื่อม เข้าไปเพื่อเป็นฐานของอุณหภูมิความร้อนใช้งาน ไม่ว่าจะให้ก่อนหรือหลังการเชื่อมก็เกิดผลดีกับแนวเชื่อม ซึ่งเห็นได้ชัดว่าช่วยลดความแข็งลงให้เท่ากันหรือใกล้เคียงกับโลหะหลัก และจะดีมากยิ่งขึ้นถ้าขบวนการเชื่อมนั้นสามารถทำการให้ความร้อนได้ทั้งก่อนและหลังการเชื่อม อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนขึ้นงานหลังการเชื่อมก็ต้องระมัดระวังเรื่องระดับความร้อนที่ใช้ และระยะเวลาของการให้ความร้อน เพราะทั้งคู่จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน เช่น ถ้าใช้ความร้อนสูงเกินไปหรือไม่สูงมากแต่เวลานานเกินไป ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างมากจนเกินไป จะทำให้เกิดเป็นข้อด้อยอื่น ๆ ตามมา ได้แก่ จะเกิด



รูปที่ 6.64 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะขึ้นงานเชื่อมหลังจากการทำ PWHT

ที่มา : MDPI- Materials Vol.13(20), 4512, 2020



รูปที่ 6.65 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแนวของเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่างกัน

ที่มา : ASM International -JMEPEG , 29:8271-8285, 2020

การผสมก้อนเกรนเข้าด้วยกันทำให้เกิดเป็นเกรนที่โตส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม หรือเกิดการแพร่ของธาตุผสม (Diffusion) ที่มีประโยชน์เคลื่อนที่ไปอยู่ในตำแหน่งที่ไม่พึงประสงค์ เป็นต้น

6.6 โลหะวิทยาการเชื่อมของแก๊สปกคลุม (Welding metallurgy of shielding gases)

เทคโนโลยีการเชื่อมแบบหลอมละลายกับแก๊สปกคลุม (Shielding gas) เป็นสิ่งที่ต้องใช้ร่วมกัน เพราะความร้อนจากการเชื่อมทำให้เกิดการหลอมเหลวจากนั้นก็ปล่อยให้เกิดการเย็นตัว ในระหว่างการเปลี่ยนสถานะของโลหะเชื่อมจะได้ผลกระทบจากแก๊สต่าง ๆ ในบรรยากาศรอบ ๆ บ่อหลอมละลาย ซึ่งแก๊สภายนอกนี้จะเข้าไปรวมตัวกับน้ำโลหะในบ่อหลอมละลายได้ง่าย ส่งผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมในเชิงลบ จึงต้องใช้แก๊สมาปกคลุมป้องกันไว้ โดยแก๊สที่ใช้จะเป็นแก๊สที่มีน้ำหนักที่เรียกกันว่า แก๊สเฉื่อย (Inert gas) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาแก๊สปกคลุมที่ผสมแอคทีฟแก๊ส (Active gas) และแก๊สที่ผสมเพื่อควบคุมปริมาณเฟสโครงสร้างในแนวเชื่อม ซึ่งแก๊สเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อแนวเชื่อมที่ได้หลังการเย็นตัว โดยจะได้กล่าวถึงแก๊สที่นิยมใช้งานกันในแต่ละกลุ่ม ที่มุ่งเน้นผลกระทบในทางโลหะวิทยาของงานเชื่อมเป็นสำคัญ ซึ่งอ้างอิงข้อมูลของ Robert W. Messler, Jr. (2004) ดังนี้

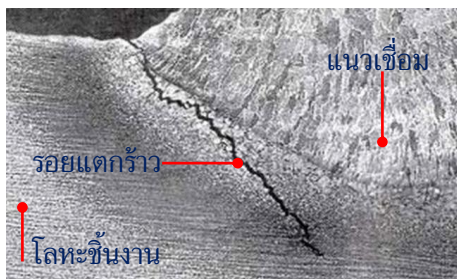
1. กลุ่มแก๊สเฉื่อยปกคลุม (Inert shielding gas) ที่นิยมใช้งานคือ แก๊สฮีเลียม (He) และแก๊สอาร์กอน (Ar) โดยฮีเลียมจะอาร์กอนได้ง่ายกว่าและมีเสถียรภาพมากกว่า หน้าที่หลักของแก๊สกลุ่มนี้จะปกป้องบ่อหลอมละลายไม่ให้แก๊สจากภายนอกเข้ารวมตัว เช่น ออกซิเจน (O_2) หรือไฮโดรเจน (H_2) ถ้าปริมาณแก๊สปกคลุมไม่มากเพียงพอแก๊สจากภายนอกสามารถทะลุผ่านเข้าไปได้จะทำให้เกิดรูพรุน (Porosity) ดังแสดงตัวอย่างรูพรุนที่เกิดจากการเชื่อมมิกในรูปที่ 6.66 (ก) ซึ่งเกิดจากแก๊สออกซิเจนไปรวมตัวกับโลหะเหล็กเกิดเป็นเหล็กออกไซด์หรือสนิม (Fe_2O_3 หรือ Fe_3O_4) ซึ่งมีสมบัติเป็นสารประกอบที่ไม่สามารถรวมตัวเป็นสารเนื้อเดียวได้ ประจวบกับความชื้นเมื่อได้รับความร้อนเกิดเป็นฟองอากาศขึ้น เมื่อเย็นตัวจะถูกพลักออกมาสู่ภายนอกจึงเกิดเป็นรูพรุนขึ้นบริเวณผิวแนวเชื่อม สำหรับความเสียหายของแนวเชื่อมเมื่อแก๊สไฮโดรเจนผาด่านแก๊สปกคลุมเข้ามาได้ก็จะทำให้แนวเชื่อมเกิดการแตกร้าวได้ ดังตัวอย่างการแตกร้าวจากแก๊สไฮโดรเจนในรูปที่ 6.66 (ข) มักพบการแตกร้าวแบบนี้ที่บริเวณเกรนหยาบ (Coarse zone) เนื่องจากอะตอมของแก๊สไฮโดรเจนที่เข้าไปผสมอยู่จะแพร่ไปรวมตัวกันที่บริเวณขอบเกรน เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นก็จะรวมกันได้มากขึ้นและมากขึ้นเรื่อย ๆ จนเกิดเป็นแรงดันภายในที่เนื้อเชื่อมไม่สามารถทนได้ก็จะเกิดการแตกร้าวขึ้น ที่เรียกกันว่า Hydrogen cracking หรืออาจเรียกว่า Cold crack ซึ่งกลไกการแพร่ซึมของแก๊สไฮโดรเจนที่เรียกว่า Hydrogen embrittlement ดังแสดงในรูปที่ 6.66 (ค) อย่างไรก็ตามความอันตรายจากแก๊สไฮโดรเจนนี้สามารถแก้ไขได้ ด้วยวิธีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม (PWHT) ซึ่งความร้อนจะไปเพิ่มแรงดันให้กับแก๊สไฮโดรเจนและขณะเดียวกันก็ช่วยลดแรงยึดเหนี่ยวที่ขอบเกรน ทำให้แก๊สไฮโดรเจนภายในแพร่ซึมออกมาได้ง่ายและหมดไปหรืออาจหลงเหลืออยู่บ้างในปริมาณที่ไม่มากพอที่จะสร้างแรงดันให้เกิดการแตกร้าวได้ ขบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์จะมีโอกาสเกิดแก๊สไฮโดรเจนในแนวเชื่อมสูง เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนจะติดมากับ

ความชื้นของฟลักซ์ที่หุ้มลวด ดังนั้น จึงต้องมีการนำลวดเชื่อมไปอบไล่ความชื้นเพื่อขจัดแก๊สไฮโดรเจนให้หมดไป เป็นวิธีการลดหรือป้องกันแก๊สไฮโดรเจนเข้ามาสะสมอยู่ในเนื้อโลหะเชื่อม



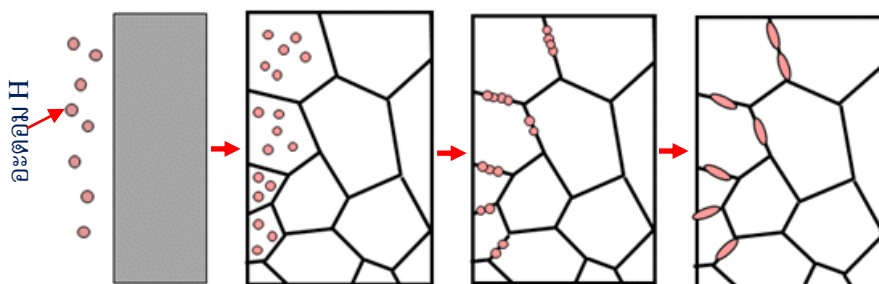
(ก) การเกิดรูพรุนจากแก๊สออกซิเจน

ที่มา : ARC HELMENTS, 2020



(ข) การแตกร้าวจากแก๊สไฮโดรเจน

ที่มา : Miller, Hydrogen in welding, 2013



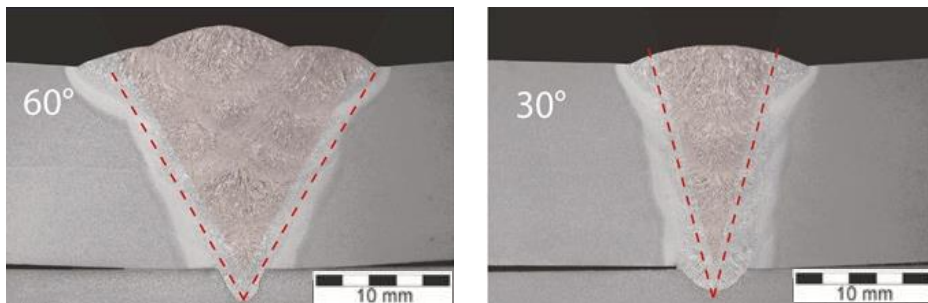
(ค) จำลองกลไกการแพร่ซึมของแก๊สไฮโดรเจนในแนวเชื่อม

ที่มา : Industrial Metallurgists. Hydrogen embrittlement of steel, 2020

รูปที่ 6.66 ผลกระทบของแก๊สออกซิเจนและแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในการเชื่อม

2. กลุ่มแก๊สแอคทีฟปกคลุม (Active shielding gas) ที่นิยมใช้กันคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) อย่างเดียวและผสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับแก๊สเฉื่อย โดยมีมาตรฐานของแก๊สปกคลุม EN-ISO 14175 การเลือกใช้แอคทีฟแก๊สในการเชื่อมก็เพราะต้องการปริมาณความร้อนจากแก๊สที่ทำปฏิกิริยากับความร้อนมาช่วยเสริมความร้อนจากการอาร์กให้เกิดการหลอมละลายได้ง่ายขึ้น บ่อหลอมมีอุณหภูมิสูงขึ้น เชื่อมได้เร็วขึ้น และเชื่อมโลหะหนาได้มากขึ้น ด้วยเหตุผลเหล่านี้จึงเกิดการผสมแก๊สแอคทีฟหลายชนิดหลายสัดส่วนตามความเหมาะสมใช้งาน ในทางโลหะวิทยางานเชื่อมแก๊สแอคทีฟจะทำให้โลหะหลอมละลายเร็วขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้บริเวณกระทบร้อน (HAZ) มีขนาดที่เล็กลง ซึ่งเป็นผลดีต่อชิ้นงานโลหะเชื่อม และเหมาะกับการเชื่อมโลหะที่มีจุดการหลอมเหลวที่สูง ๆ หรือการเชื่อมโลหะต่างชนิดที่จุดหลอมเหลวต่างกันมาก ๆ เป็นต้น นอกจากนี้การหลอมละลายที่เร็วของโลหะงานจะทำให้มีขนาดบ่อหลอมที่เล็กและแคบ ส่งผลให้เกิดอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วซึ่งจะได้แนวเชื่อมที่แคบแต่ลึก ดังแสดงเปรียบเทียบแนวเชื่อมจากการเชื่อมด้วยขบวนการ GMAW ที่ใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุม (Inert gas)

กับการใช้แก๊สแอคทีฟแก๊สปกคลุม (Active gas) ในรูปที่ 6.67 (ก) และ (ข) ตามลำดับ และยังเป็นที่ยอมรับกันเป็นอย่างดีว่าการใช้แก๊สแอคทีฟจะทำให้ได้ขนาดเกรนที่เล็ก (Fine grain) กว่า การใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุม



(ก) แนวเชื่อมใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุม (Ar) (ข) แนวเชื่อมใช้แก๊สแอคทีฟปกคลุม (CO_2)

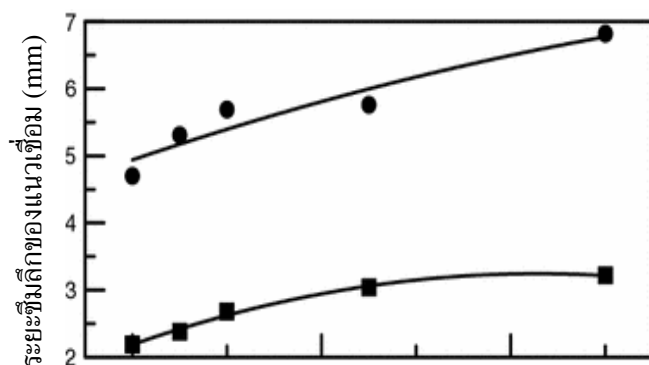
รูปที่ 6.67 เปรียบเทียบลักษณะของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยขบวนการเชื่อม MIG และ MAG

ที่มา : EWM- We are welding. MIG/MAG Welding processes, 2018

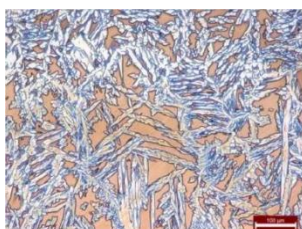
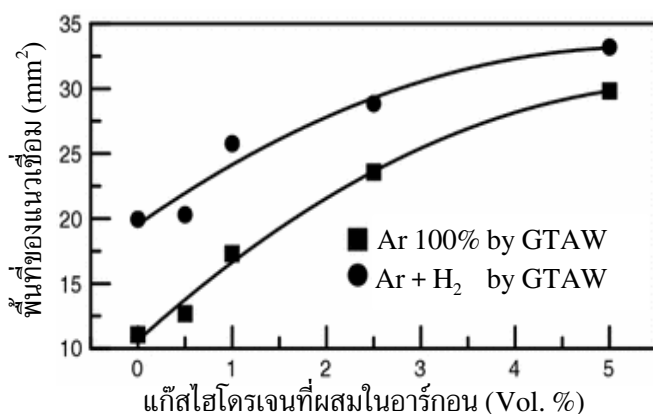
นอกจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่กล่าวมา ยังมีแก๊สแอคทีฟแบบผสม (Mixture gases) ที่ใช้แก๊สเฉื่อยเป็นตัวหลักแล้วผสมแก๊สแอคทีฟเข้าไปตามสัดส่วนที่เหมาะสมกับชนิดของโลหะที่เชื่อม แก๊สแอคทีฟที่นิยมนำมาใช้ผสมเพื่อการเชื่อม Metal Active Gases : MAG ได้แก่ ออกซิเจน (O_2) ไฮโดรเจน (H_2) ไนโตรเจน (N_2) โดยจะผสมกันตามสัดส่วนที่เหมาะสม ซึ่งอาจผสมกันมากกว่าสองชนิดแก๊ส ดังตัวอย่างเช่น $\text{Ar} + \text{O}_2$ หรือ $\text{Ar} + \text{CO}_2$ หรือ $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ หรือ $\text{Ar} + \text{H}_2$ หรือ $\text{Ar} + \text{He} + \text{CO}_2$ และอื่น ๆ อีกมากซึ่งสามารถที่จะระบุให้ผู้ผลิตแก๊สเชื่อมผสมปริมาณแก๊สที่เหมาะสมกับแต่ละชนิดของวัสดุโลหะที่ต้องการเชื่อมได้ โดยบทบาทของแก๊สที่นำมาผสมแต่ละตัวจะแตกต่างกัน ดังผลการวิจัยเชิงทดลองของ Her Yuen Huang (2009) ที่เปรียบเทียบการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนเนติกเกรด AISI 304 ด้วยแก๊สปกคลุมระหว่าง Ar 100 % กับแก๊สผสม $\text{Ar} + 0-5\% \text{H}_2$ ผลการทดลอง ในรูปที่ 6.68 จะเห็นได้ชัดเจนว่าการผสมแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สอาร์กอนปกคลุมจะส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีขนาดที่โตขึ้นและมีอัตราการซึมลึกที่สูงขึ้น โดยจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฮโดรเจนที่ผสม เพราะแก๊สไฮโดรเจนเมื่อได้รับความร้อนจะเป็นตัวช่วยเร่งเพิ่มปริมาณความร้อนให้กับอาร์ก และยิ่งช่วยเพิ่มความเร็วในการเชื่อมได้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้แก๊สแอคทีฟไนโตรเจน (N_2) เป็นแก๊สที่นิยมนำมาใช้ผสมกับแก๊สเฉื่อยอาร์กอนหรือฮีเลียมในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนเนติกและกลุ่มดูเพล็กซ์ โดยต้องการให้แก๊สไนโตรเจนเป็นตัวควบคุมปริมาณการเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ (δ -ferrite) และยิ่งช่วยเพิ่มปริมาณความร้อนให้กับอาร์กได้ดี ดังแสดงผลการทดลองผสมแก๊สไนโตรเจนในอาร์กอนที่ปริมาณสัดส่วนต่าง ๆ ระหว่าง 1-9% โดยปริมาตร สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรด S32205 ผลการทดลองระบุชัดเจนว่าเมื่อใช้ปริมาณไนโตรเจนผสมที่สูงขึ้นจะช่วยลดปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ลงอย่างเห็นได้ชัดในรูปที่ 6.69 ด้วยเพราะไนโตรเจนมีสมบัติที่เสถียรภาพเฟสออสเทนไนต์สูง (Austenite stabilizer)

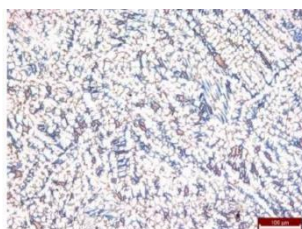
จึงทำหน้าที่ช่วยสร้างเฟสออสเทนไนต์ได้เร็วขึ้นและรั้งไม่ให้เกิดเฟสเฟอร์ไรต์ได้ง่าย นอกจากตัวอย่างของแก๊สผสมที่กล่าวมาแล้วนั้น ยังมีการผสมแก๊สที่ใช้งานเฉพาะทางอีกหลายชนิด โดยมีการกำหนดเป็นกลุ่มของแก๊สปกคลุมตามมาตรฐานสากล โดยมีทั้งมาตรฐานของอเมริกา และยุโรป เช่น มาตรฐานกลุ่มประเทศยุโรป EN-ISO 14175 เป็นต้น



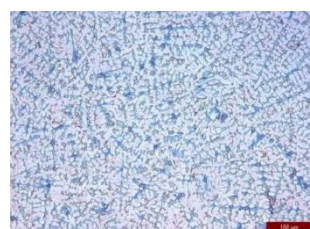
รูปที่ 6.68 อิทธิพลของแก๊สไฮโดรเจนที่ผสมในแก๊สอาร์กอนใช้เป็นแก๊สปกคลุมมีผลต่อขนาดและการซึมลึกของแนวเชื่อม
ที่มา : *Journal of Materials & Design. Vol. 30 (7), 2404–2409, 2009*



3% N₂ (δ -ferrite 55.6%)



6% N₂ (δ -ferrite 36.5%)



9% N₂ (δ -ferrite 28.8%)

รูปที่ 6.69 เปรียบเทียบโครงสร้างแนวเชื่อมที่ N₂ผสมเพิ่มขึ้นและ δ -ferrite ลดลง

ที่มา : *Journal of MDPI-Metals. Vol. 8 (226), doi:10.3390/met8040226, 2018*

อย่างไรก็ตามในทางโลหะวิทยาจะพบว่าวัสดุโลหะแต่ละชนิดมีความสามารถหรือยินยอมให้แก๊สแอคทีฟที่ผสมอยู่ในแก๊สปกคลุมเข้าไปอยู่ในปริมาณจำกัด ถ้ามากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อแนวเชื่อม ดังนั้น จึงต้องเข้าใจถึงคุณลักษณะทางโลหะวิทยาของโลหะที่ต้องการเชื่อมกับชนิดและปริมาณแก๊สแอคทีฟที่เหมาะสม เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับการปรับปรุงคุณภาพของแนวเชื่อม

ดัชนีคำศัพท์บทที่ 6

Afm (Area filler metal) – บริเวณเนื้อโลหะของลวดเติมเชื่อม

After weld condition – สภาพโครงสร้างเนื้อโลหะหลังทำการเชื่อม

Arc energy – พลังงานของการอาร์กเชื่อม

As-received condition – สภาพโครงสร้างเนื้อโลหะก่อนทำการเชื่อม

As-weld condition – สภาพโครงสร้างเนื้อโลหะระหว่างทำการเชื่อม

Balance pearlite – เนื้อเชื่อมที่มีเฟส α กับเฟส Fe_3C เท่ากัน

Black & White Welding – การเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน (นิยมเรียกกันในแถบยุโรป)

Bond energy – พลังงานการเกาะยึดของผลึกโลหะ

Cladding weldment – โลหะเชื่อมแบบเสริมเนื้อโลหะ

Coarser structure weld – โครงสร้างเนื้อเชื่อมที่มีเกรนหยาบ

Columnar grains – รูปแบบเกรนที่เป็นแท่งยาว

Cooling rate – อัตราการเย็นตัวของบ่อหลอมละลาย

Crack propagation – การขยายตัวของรอยร้าว

Crystal structure – รูปแบบการเกาะยึดของผลึกโลหะ

Delta-ferrite fraction – โครงสร้างเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมออสเทนไนต์

Dilution (%) – ปริมาณสัดส่วนของการผสมกันของสารเคมี

Dilution in dissimilar – การละลายของสารเคมีในเนื้อเชื่อมโลหะต่างชนิด

Elliptical weld pool – บ่อหลอมละลายที่เป็นรูปวงรีที่เกิดจากความเร็วเชื่อมต่ำ

Finer structure weld – โครงสร้างเนื้อเชื่อมที่มีเกรนละเอียด

Grain boundary weld – ขอบเกรนของแนวเชื่อม

Grain growth weld – การเติบโตของเกรนขณะแข็งตัวของบ่อหลอมละลาย

Grain structure – โครงสร้างของเกรนในแนวเชื่อม

Heat input – พลังงานความร้อนที่ป้อนเข้าในการอาร์กเชื่อม

Heterogeneous welding – เรียกการเย็นตัวของการเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน

High dilution – การละลายของสารเคมีในเนื้อเชื่อมในปริมาณที่สูง

Hydrogen cracking – การแตกต้วจากอิทธิพลของไฮโดรเจน

Macrostructure weld – โครงสร้างเนื้อเชื่อมระดับมหภาค

Mass of joint area – มวลของพื้นที่เนื้อโลหะเชื่อม

Melting point – จุดหลอมเหลวของโลหะที่ทำการเชื่อม

Microstructure weld – โครงสร้างเนื้อเชื่อมระดับจุลภาค

Mushy state – สภาพการแข็งตัวที่มีส่วนของเหลวกับของแข็งผสมกัน

New grain weld – การเกิดเกรนใหม่ในเนื้อเชื่อม

Overlay weldment – โลหะเชื่อมแบบพอกเนื้อเชื่อม

Parent zone – บริเวณของเนื้อโลหะหลักที่ไม่เกิดผลกระทบจากการเชื่อม

Partially melted – เนื้อเชื่อมที่มีการหลอมละลายบางส่วน

Polycrystalline – โครงผลึกที่เกาะยึดกันหลาย ๆ ผลึก

PWHT weld – การอุ่นขึ้นงานหลังจากการเชื่อม

Rapid cooling rate – อัตราการเย็นตัวของการเชื่อมที่รวดเร็ว

Schaeffler diagram – แผนภาพทำนายโครงสร้างงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม

Solidification cracking – การแตกร้าวขณะเย็นตัว

Solidification mechanism – กลไกการแข็งตัวของโลหะ

Stress Concentration weld – ความเค้นสะสมในเนื้อเชื่อม

Teardrop weld pool – บ่อหลอมละลายที่เป็นรูปหยดน้ำที่เกิดจากความเร็วเชื่อมสูง

Tempering weld – การอบคืนตัวของเนื้อเชื่อม

Thermal conductivity – การนำความร้อนของโลหะหลักที่เชื่อม

Thermal diffusivity – การกระจายความร้อนผ่านวัสดุโลหะเชื่อม

Thermal efficiency – ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของขบวนการเชื่อม

Weld tension – แรงดึงที่เกิดขึ้นในเนื้อเชื่อมอันเนื่องจากการบิดตัวของโลหะขึ้นงาน

Weld zone – บริเวณของแนวเชื่อมทั้งหมด

Welding metallurgy – การเปลี่ยนแปลงเนื้อของโลหะจากอิทธิพลของการเชื่อม

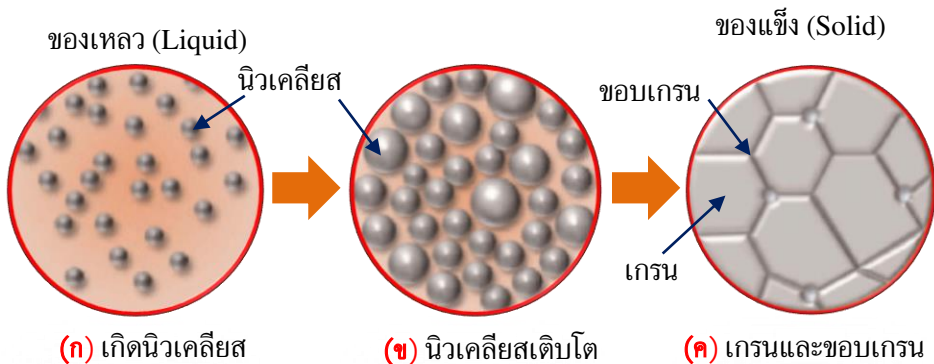
Welding parameter – ปัจจัยที่กำหนดขึ้นในขบวนการเชื่อม

Welding temperature – อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อม

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 6

ข้อที่ 1. จงบอกถึงความจำเป็นที่ช่างเชื่อมหรือวิศวกรงานเชื่อมต้องรู้และเข้าใจถึงบทบาทของโลหะวิทยาที่สัมพันธ์กันกับขบวนการเชื่อมโลหะ

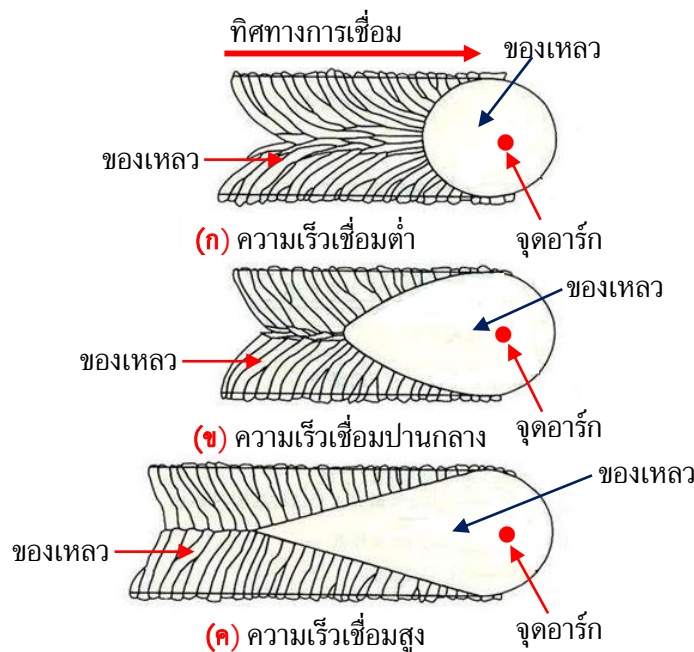
ข้อที่ 2. จากรูปข้างล่างนี้ จงอธิบายถึงกลไกการเกิดโครงสร้างของเกรนในเนื้อโลหะเชื่อมมาให้เข้าใจ



รูปกลไกของการเกิดโครงสร้างเกรนในเนื้อโลหะ

ที่มา : Solidification mechanisms 1, 2012

ข้อที่ 3. จากรูปจงอธิบายกลไกของการแข็งตัวของบ่อหลอมละลายที่เชื่อมด้วยอัตราความเร็วต่างกัน



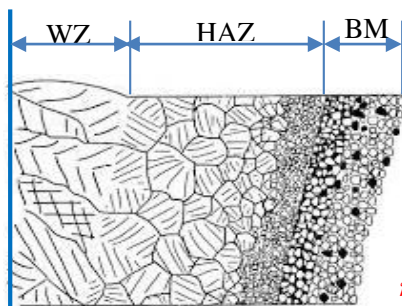
กลไกของการเกิดโครงสร้างเกรนในเนื้อโลหะที่ความเร็วเชื่อมต่างกัน

ที่มา : Solidification mechanisms 1, 2015

ข้อที่ 4. จงเขียนสูตรสมการหาพลังงานอาร์ก (Arc energy) พร้อมอธิบายถึงความหมายของตัวปัจจัยการเชื่อมที่นำมาทำการคำนวณ

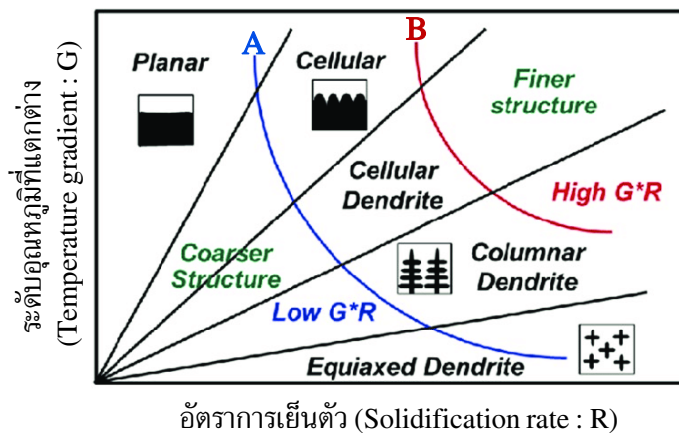
ข้อที่ 5. จงอธิบายความสัมพันธ์ของทิศทางการเกิดเกรน (Grain direction) กับทิศทางการระบายความร้อน (Heat flow direction) ของบ่อหลอมละลายในการเชื่อม

ข้อที่ 6. จากรูปข้างล่างนี้ จงอธิบายความแตกต่างเนื้อเกรนบริเวณของ WZ บริเวณของ HAZ และบริเวณของ BM ที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อมมาโดยละเอียด



ที่มา : Review, MAPI : Metals, Metallurgy Journal, 2017

ข้อที่ 7. จากรูปข้างล่างนี้ จงอธิบายความสัมพันธ์ของอัตราการเย็นตัว (Solidification rate) กับรูปแบบและขนาดของเกรนที่ได้ในเนื้อเชื่อม

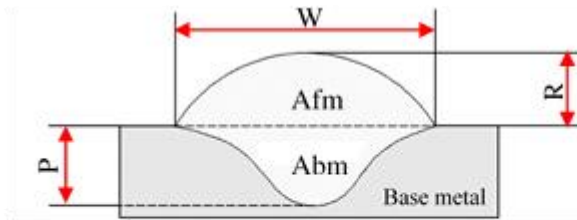


รูปความสัมพันธ์ของอัตราการเย็นตัวต่อกลไกการเกิดโครงสร้างของแนวเชื่อม

ที่มา : Chamara Kumara, Licentiate Thesis Production Technology, 2018

ข้อที่ 8. จงบอกประโยชน์ของแผนภาพ Schaeffler diagram สำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) มาพอสังเขป

ข้อที่ 9 จากรูปและสัญลักษณ์ที่กำหนดให้ดังแสดงในรูปข้างล่างนี้ จงเขียนสูตรการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การเจือจาง (% Dilution) ของส่วนผสมทางเคมีของเนื้อเชื่อม



W = ความกว้าง (Width) A_fm = บริเวณเนื้อโลหะลวดเติม (Filler metal area)
 R = ความสูง (Reinforcement) A_bm = บริเวณเนื้อโลหะหลัก (Base metal area)
 P = แนวซึมลึก (Penetration)

ข้อที่ 10. จงอธิบายความแตกต่างของ โครงสร้างจุลภาคแบบ Heterogeneous กับโครงสร้างจุลภาคแบบ Homogeneous โดยอ้างอิงตามรูปที่กำหนดให้ข้างล่างนี้



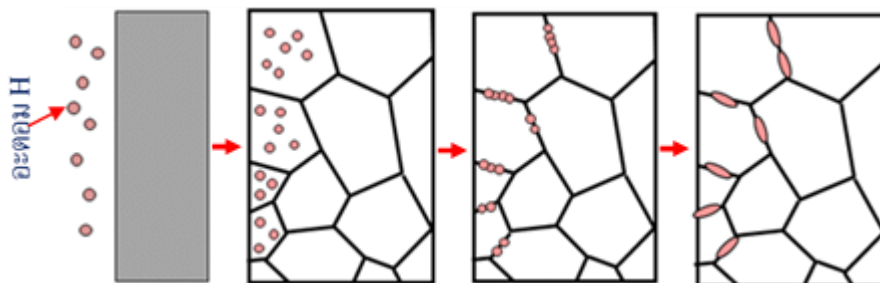
(ก) โครงสร้างจุลภาคแบบ Heterogeneous



(ข) โครงสร้างจุลภาคแบบ Homogeneous

ที่มา : TECS – Uniform microstructure of weld metal, 2012

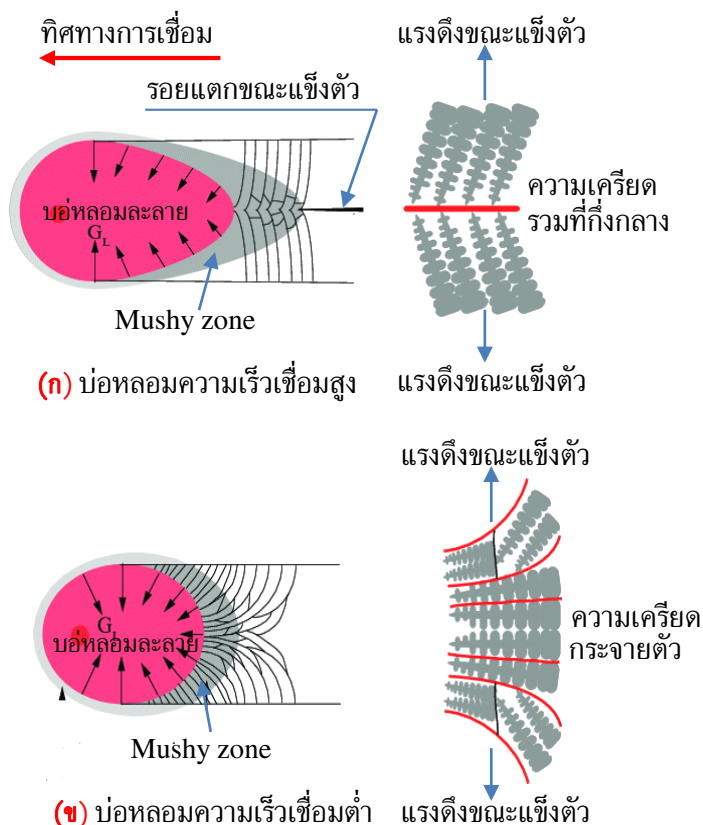
ข้อที่ 11. จากรูปที่กำหนดให้ข้างล่างนี้ จงอธิบายกลไกของการแพร่ซึมของแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในเนื้อเชื่อมมาพอเข้าใจ



ภาพจำลองกลไกการแพร่ซึมของแก๊สไฮโดรเจนในแนวเชื่อม

ที่มา : Industrial Metallurgists. Hydrogen embrittlement of steel, 2020

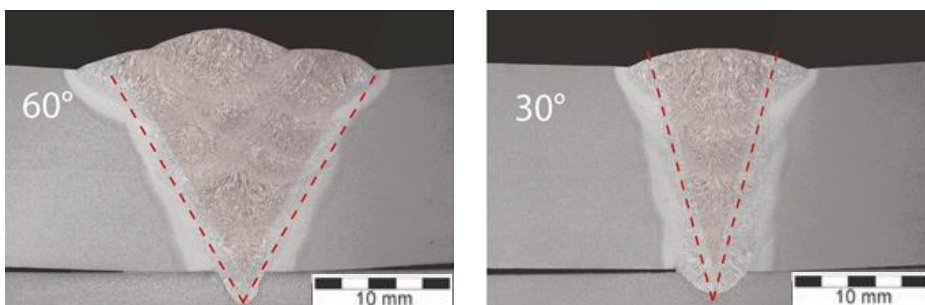
ข้อที่ 12. จงอธิบายวิธีการป้องกันการแตกร้าวขณะแข็งตัวของบ่อหลอมละลายด้วยวิธีการควบคุมความเร็วของการเชื่อม (Welding speed) โดยอ้างอิงจากรูปข้างล่างนี้



รูปการป้องกันการแตกร้าวขณะแข็งตัวด้วยวิธีการควบคุมความเร็วของขบวนการเชื่อม

ที่มา : Journal of Materials & Design, Vol. 183 (5), 108104, 2019

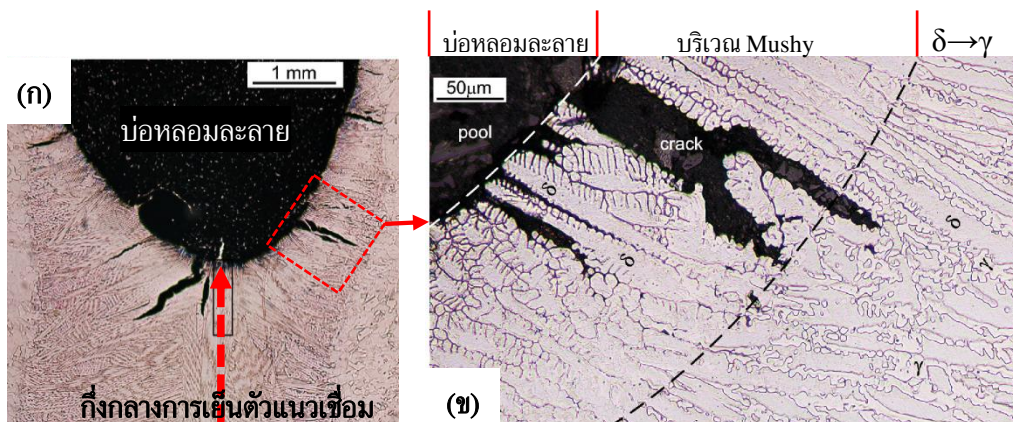
ข้อที่ 13. จงอธิบายความแตกต่างในสมบัติของแก๊สเฉื่อยกับแก๊สแอคทีฟที่มีต่อการเชื่อม โดยอ้างอิงจากรูปข้างล่างนี้ในการอธิบาย



(ก) แนวเชื่อมใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุม (Ar) (ข) แนวเชื่อมใช้แก๊สแอคทีฟปกคลุม (CO₂)

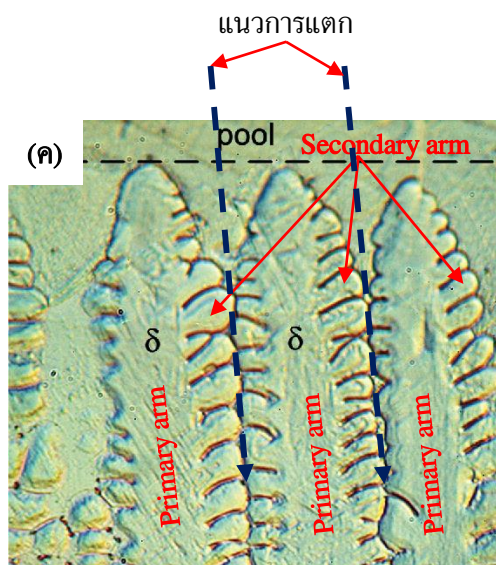
ที่มา : EWM- We are welding, MIG/MAG Welding processes, 2018

ข้อที่ 14. จากรูปข้างล่างเป็นการแสดงถึงกลไกของการแตกร้าวในทางโลหะวิทยาที่เกิดขึ้นในการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนเนติก (Austenitic stainless steel) จงอธิบายกลไกการเกิดมาให้สมบูรณ์



(ก) กลไกการเย็นตัวของบ่อหลอมละลาย

(ข) กลไกการแตกร้าวของบ่อหลอมละลาย



(ค) แนวของการแตกร้าวขณะแนวเชื่อมแข็งตัว

รูปตำแหน่งและทิศทางของการแตกขณะแข็งตัวของบ่อหลอมละลายในการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มของออสเทนเนติก

ที่มา : AWS – Welding Journal, Welding research. Doi.org/10.29391/2018.97.026, 2018

บรรณานุกรมบทที่ 6

- Alber Sadek. Dissimilar Materials Weldability Concepts. EWI–Technology lead –Materials Engineering. 15 December 2015.
- American Petroleum Institute. Welding Inspection and Metallurgy. 1st Edition, Copyright American Petroleum Institute. Washington, D.C. 2004.
- American Welding Society (AWS). AWS Resources for Engineering Welding Know – how for Engineering. Welding Metallurgy. Published by AWS, 2008.
- American Welding Society (AWS), Fundamentals Welding Metallurgy Vol.1 (AWS WM1), Published by AWS, 1994.
- American Welding Society (AWS). Publications Catalog : Standards, reference books, online education, and more – AWS D1.1/D1 Structural Welding Code Steel. An American National Standard, 2017.
- American Welding Society (AWS). Welding Journal. Vol. 86 No. 2, Published by AWS. 2007.
- American Welding Society (AWS). Welding Metallurgy : Carbon and Alloy Steels. Vol.1 and Vol.2, Published by AWS, 1965.
- American Welding Society (AWS) D18.2. Guide to Weld Discoloration Levels on Inside of Austenitic Stainless Steel Tube. Published by AWS, 2009.
- ASME. Section IX–Welding, Brazing, and Fusing Qualifications. An International Code, Edition, July 1, 2019.
- ASM International. Handbook : Hardfacing, Weld Cladding and Dissimilar Metal Joining. Vol. 6, 1993.
- ASM International. Handbook : Corrosion Materials. Vol. 13B, Published by ASM, 2005.
- B. J. Moniz and R. T. Miller. Welding Skills. 3rd Edition, American Technical Publishers, Inc. United States, 2004.
- Baldev Raj, V. Shankar and A.K. Bhaduri. Welding Technology for Engineers. 2nd Edition, Published by N.K. Mehra for Narosa House Pvt. Ltd., Delhi, India, 2008.
- BS EN 1011–1 (E). Welding–Recommendations for Welding of Metallic Materials–Part 1 : General Guidance for Arc Welding. English Version, 2009.
- Chamara Kumara. Microstructure Modelling of Additive Manufacturing of Alloy 718. Licentiate Thesis Production technology No. 3, 2018.

- Chandan Pandey, Manas Mohan Mahaptra, Pradeep Kumar and Nitin Saini. *Some Studies on P91 Steel and their Weldments. Journal of Alloy and Compounds*. Vol. 743, pp. 332–364, 2018.
- C. Okechukwu et al., *Review on Hardfacing as Method of Improving the Service Life of Critical Component Subjected to Wear in Service*. Nigerian Journal of Technology, Vol. 36 No. 4. 1095–1103, 2017.
- D.K. Bhattacharya. *Microstructure of Welding Joints. National Metallurgical Laboratory, Jamshedpur*. 2009.
- Donald R. Askeland, Pradeep P. Fulay and Wendelin J. Wright. *The Science and Engineering of Materials*. 6th Edition, Cengage Learning Inc. Stamford USA, 2011.
- Ghusoon Ridha Mohammed, Mahadzir Ishak, Syarifah N. Aqida and Hassan A. Abdulhadi. *Effects of Heat Input on Microstructure, Corrosion and Mechanical Characteristics of Welded Austenitic and Duplex stainless Steels A. Review*. Article in Metals –Metallurgy Journal. (7), 39, 2017.
- G. Agarwal, A. Kumar, I.M. Richardson and M.J.M. Hermans. *Evaluation of Solidification Cracking Susceptibility during Laser Welding in Advanced High Strength Automotive Steels*. Journal of Materials and Design. Vol.183, 108104, 2019.
- G.M. Karthik, P. Mastanaiah, G.D. Janaki Ram and Ravi Sankar Kottada. *Friction Buttering : A New Technique for Dissimilar Welding*. Journal of Metallurgical and Transactions B, Vol. 48B, 2017.
- H. Granjon. *Fundamentals of Welding Metallurgy*. Woodhead Publishing, 1st Edition, 1991.
- Her-Yuen Huang. *Effects of Shielding Gas Composition and Activating Flux on GTAW Weldments*. Journal of Materials and Design, Vol. 30(7) pp. 2404–2409, 2009.
- ISO/TR 18491. *Welding and Allied processes–Guidelines for Measurement of Welding Energies*. Published 05, 2015.
- Jan Pawel Pilarczyk. *Welding Metallurgy*. Polish Welding Institute, Poland, 2004.
- Janette Brezinova et al. *Influence of the Hardfacing Welds Structure on Their Wear Resistance*. Journal of MDPI– Metal, (6), 36, 2016.
- Jinliang Zhang, Bo Song, Qingsong Wei, Dave Bourell and Yusheng Shi. *A Review of Selective Laser Melting of Aluminum Alloys : Processing, Microstructure, Property and Developing Trends*. Journal of Materials Science & Technology. Vol.35, Issue 2, pp. 270–284. 2019.

- John C. Lippold and Damian J. Kotecki. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels. Published by John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey United States, 2005.
- John N. Dupont, John C. Lippold and Samuel D. Kiser. Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys. Published by John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, United States, 2009.
- John Norrish. Advanced Welding Processes: Technologies and process control. 2nd Edition, Woodhead publishing limited, Cambridge, England, 2006.
- Junbo Lin, Changlun Chen, Min Zhang and Shunquan Wang. The Effects of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Tribaloy 400 Coatings Deposited by Laser Cladding. ASM International, JMEPEG 27:6339–6348, 2018.
- Kenneth Easterling. Introduction to the Physical Metallurgy of Welding. 2nd Edition, Elsevier Science, 2013.
- KOBELCO. Welding Handbook : Welding consumables and Processes. Kobe Steel, Ltd. Welding Company. 2017.
- Larry Jeffus and Lawrence Bower. Welding : Skill, Processes and Practices for Entry-Level Welders. 1st Edition. Delmar Cengage Learning. Clifton Park, New York, UAS 2010.
- Materials & Tests Unit. Field Welding Procedures. 4th Edition, NCDOT Steel section Publishing, 2011.
- Moniz B.J. and Miller R.J. Welding Skills. 3rd Edition. American Technical Publisher, Inc., USA, 2004.
- Olga Gil. Welding Engineering. Revised Edition, Published by Research Word, New York, United States, 2016.
- P. YU, K.L. Thompson, J. McCarthy and S. Kou. Microstructure Evolution and Solidification Cracking in Austenitic Stainless Steel Welds. AWS Welding Research, November, 2018.
- Regis Blondeau. Metallurgy and Mechanics of Welding : Process and Industrial Applications. Published by John Wiley & Sons. Inc., New Jersey, United States, 2008.
- Robert W. Messler, Jr. Principles of Welding : Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy. Wiley-Vch Verlag GmbH&Co. KGaA, Troy, New York, United States, 2004.
- Sindo Kou. Welding Metallurgy. 2nd Edition, Published by John Wiley & Sons. Inc., New Jersey, United States, 2003.

- Sindo Kou. *Predicting Susceptibility to Solidification Cracking and Liquation Cracking By CALPHAD*. Journal of MDPI–Metals. 11 September, 2021.
- Umer Masood Chaudry, Hafiz Waqar Ahmad, Muhammad Rehan Tariq, Ameerq Farooq, Muhammad Kashif Khan, Farooq Sher, Hassan Zeb and Kotiba Hamad. *Effect of Post Weld Treatment on the Microstructure and Electrochemical Characteristics of Dissimilar Materials Welded by Butter Method*. Journal of MDPI–Materials. Vol. 13, 5412, 2020.
- Unitor. *Welding Handbook for Maritime Welders – Welding and related processes for repair and maintenance onboard*. 11th Edition, Wilhelmsen Ships Service. 2005.
- V.M. Radhakrishnan. *Welding Technology & Design*. 2nd Edition, New Age International Publishers, Chennai, India, 2005.
- Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Effect of Filler Alloy on Microstructure, Mechanical and Corrosion Behaviour of Dissimilar Welding between AISI 201 Stainless Steel and Low Carbon Steel Sheets Produced by a Gas Tungsten Arc Welding*. Journal of Advance Materials Research, Vol. 851(808–816), 2012.
- 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 Techonlogy, 15, 170–175, 2019.
- Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *The Behaviour of Nitrogen on the Welding Parameters of the Dissimilar Weld Joints between AISI 304 and AISI 316L Austenitic Stainless Steels Produced by Gas Tungsten Arc Welding*. Journal of Applied Mechanics and Materials, AMM. 248.365, 2012.
- Wichan Chuaiphan. *Metallurgical Investigation of Dissimilar Welding between AISI 304 Stainless Steel and Some Other Steels*. Thesis Ph.D. 2011.
- Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Microstructure, Mechanical Properties and Pitting Corrosion of TIG weld Joints Alternative Low–Cost Austenite Stainless Steel Grade 216*. Journal of Advanced Joining Processes. Vol. 2, 2020.