

Unit 8

ข้อบกพร่องงานเชื่อมและการป้องกัน Welding Defects & Prevention



ที่มา : Bancroft Engineering-Welding Problems, 2013

จุดประสงค์การเรียนรู้ บทที่ 8 ข้อบกพร่องงานเชื่อมและการป้องกัน

- รู้และเข้าใจถึงความหมายและความสำคัญของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานเชื่อม
 - รู้จักชนิดของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานเชื่อม
 - สามารถพิจารณาแยกแยะ และระบุประเภทหรือชนิดของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานเชื่อม
 - อธิบายถึงสาเหตุของการเกิดข้อบกพร่อง และสามารถหาวิธีการป้องกันหรือลดข้อบกพร่องที่จะเกิดในงานเชื่อม
 - อธิบายถึงกลไกการเกิดข้อบกพร่องชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในงานเชื่อม
 - สามารถอธิบายหรือให้คำแนะนำถึงวิธีการตรวจสอบหาข้อบกพร่องของแนวเชื่อมเบื้องต้น
 - ตระหนักและมีจิตใต้สำนึกให้ความสำคัญกับข้อบกพร่องในงานเชื่อมที่มีผลกระทบต่อสังคม
 - มีจรรยาบรรณในการพิจารณาและตัดสินใจในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นแล้ว และยอมรับความคิดเห็นเมื่อต้องตัดสินใจร่วมกับเพื่อนร่วมงานหรือผู้อื่นที่เกี่ยวข้อง
-

“Defects”**“Prevention”**

หมายถึง ข้อบกพร่อง หรืออาจเรียกว่า “ตำหนิ” ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เชื่อม หมายถึง การป้องกันไม่ให้เกิดข้อบกพร่องขึ้นในชิ้นงานเชื่อม ในงานวิศวกรรมการเชื่อมทั้งสองอย่างนี้เป็นสิ่งที่เกิดควบคู่กัน วิศวกรงานเชื่อมหรือช่างเชื่อมจะต้องมีความรู้เป็นพื้นฐานถึงกลไกของการเกิดข้อบกพร่องและรู้ถึงวิธีการป้องกันสาเหตุที่ก่อให้เกิดข้อบกพร่องขึ้น จึงได้พยายามนำมาเขียนเรียบเรียงไว้ในบทนี้ ด้วยเล็งเห็นว่าถ้าช่างเชื่อมรู้ถึงสาเหตุและกลไกการเกิดของข้อบกพร่อง จะได้ป้องกันและลดโอกาสที่จะเกิดข้อบกพร่องได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นการเป้าหมายหลักของการเชื่อม เพราะเมื่อไม่มีข้อบกพร่องจะทำให้งานเชื่อมมีประสิทธิภาพสูง ช่วยลดขั้นตอนการแก้ไขข้อบกพร่อง ช่วยลดต้นทุนการผลิตชิ้นงาน และเพิ่มประสิทธิภาพของการประกอบงานเชื่อมได้สูง

อย่างไรก็ตาม เป็นที่ทราบกันดีว่าการควบคุมหรือป้องกันไม่ให้เกิดข้อบกพร่องใด ๆ ในขบวนการเชื่อมนั้นทำได้ยากมาก ด้วยเหตุเพราะตัวแปรหรือปัจจัยของการเชื่อมนั้นมีมากมาย จึงได้แต่คาดหวังว่าจะปฏิบัติการอย่างไรที่จะเป็นการลดหรือขจัดช่วงโอกาสที่จะนำไปสู่การเกิดข้อบกพร่องในแนวเชื่อมให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ หรือเท่าที่เป็นไปได้ จนเป็นที่มาของคำกล่าวกันเล่น ๆ ในของกลุ่มช่างเชื่อมที่ว่า “ ถ้าคุณหยุดหายใจได้ คุณก็หยุดข้อบกพร่องในการเชื่อมได้” สิ่งนี้ผู้เขียนสนับสนุนและคิดว่าคำกล่าวนี้นั้นเป็นจริงก็เพราะว่าประเภทและชนิดของข้อบกพร่องที่พบในงานเชื่อมนั้นมีมากมายจนอาจไม่สามารถควบคุมหรือป้องกันไม่ให้เกิดได้ทั้งหมดนั่นเอง สมาคมวิศวกรรมเครื่องกลแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society of Mechanical Engineering : ASME) ได้ทำการสังเคราะห์ข้อมูลต้นเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องมี ดังนี้ พบว่า 45% มาจากการปรับตั้งค่าของการเชื่อมไม่เหมาะสม 31% มาจากความผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงาน 10% มาจากการเลือกใช้เทคนิควิธีการไม่ถูกต้อง 9% มาจากการเลือกใช้สวดยเชื่อมไม่เหมาะสม และ 5% มาจากการเตรียมรอยต่อการเชื่อมไม่ดีพอ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสาเหตุของการเกิดข้อบกพร่องนั้นสามารถควบคุมได้ทั้งหมดขึ้นอยู่ว่าจะสามารถปฏิบัติได้ละเอียดสมบูรณ์แบบหรือไม่

เนื้อหาสาระของบทนี้ผู้เขียนใคร่ขอนำเสนอองค์ความรู้และความเข้าใจถึง ชนิด ประเภท ลักษณะรูปแบบ ขนาด รูปร่าง ความอันตราย กลไกการเกิด ตำแหน่งการเกิด และโอกาสของการเกิด ของข้อบกพร่องต่าง ๆ และพร้อมก็นำเสนอควบคู่ไปกับวิธีการ เทคนิค ยุทธวิธี เพื่อการป้องกันการเกิดข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางของวิศวกรงานเชื่อม ช่างเชื่อม หรือบุคคลที่สนใจนำไปใช้เพื่อสร้างแนวเชื่อมที่มีคุณภาพ โดยจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่าง ๆ ของข้อบกพร่องที่สำคัญและน่าสนใจ

ข้อบกพร่องจากการเชื่อม (Weld defects) เป็นผลที่เกิดขึ้นหลังจากที่โลหะผ่านขบวนการเชื่อมมาเรียบร้อยแล้ว โดยส่วนใหญ่พบว่าข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นมักเป็นลักษณะรูปแบบของความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuities) ของเนื้อโลหะที่เชื่อมกับการสูญเสียรูปทรงที่ถูกต้องไป (Changes of geometry) ข้อบกพร่องเหล่านี้ ได้แก่ รอยแตกร้าว (Cracks) โพรงอากาศ (Cavities) สารมลทินฝังใน (Inclusion) การหลอมละลายและการซึมลึกไม่สมบูรณ์ (Incomplete fusion and penetration) รูปทรงผิดรูปไม่ถูกต้อง (Incorrect shape) และข้อบกพร่องอื่น ๆ (Miscellaneous discontinuities) เป็นต้น ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าข้อบกพร่องแบบเนื้อโลหะไม่ต่อเนื่องของงานเชื่อม (Discontinuities) จะก่อให้เกิดความ

เสียหายมาก ซึ่งมีทั้งที่เห็นได้จากภายนอกและที่เกิดขึ้นอยู่ภายใน จึงต้องมีการตรวจสอบแนวเชื่อมโดยเฉพาะที่เกิดขึ้นภายในที่เรียกกันว่า การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing : NDT) ส่วนรูปทรงของแนวเชื่อมสามารถดูจากภายนอกและตรวจวัดขนาดและรูปทรงด้วยเครื่องมือวัด (Welding gauge) ในทางวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเชื่อม การที่ปฏิบัติการเชื่อมที่ไร้ซึ่งข้อบกพร่องนั้นอาจจะยากหรือมีต้นทุนการผลิตที่สูง จึงมีการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานการยอมรับข้อบกพร่องที่มีได้ขึ้น (Standard acceptance criteria) ซึ่งมีทั้งมาตรฐานของกลุ่มสหรัฐอเมริกา ASME Sec.VIII DIV.I หรือ AWS D1.1/D1.1M และ ของประเทศกลุ่มยุโรป (EN ISO 5817) หรือ EN ISO 10042 สำหรับการเชื่อมโลหะอลูมิเนียม หรือ API STD 1104 การเชื่อมท่อหรือมาตรฐานของประเทศไทย เช่น มาตรฐานการตรวจสอบรอยเชื่อมโครงเหล็กรูปพรรณด้วยวิธีแบบไม่ทำลาย มยผ. 1561-51 ถึง มยผ. 1565-51 เป็นต้น ซึ่งจะกล่าวถึงเกณฑ์ของการยอมรับข้อบกพร่องที่ยอมให้มีได้หรือปฏิเสธแนวเชื่อมในบทเรียนนี้ โดยจะกล่าวควบคู่ไปกับชนิดและการป้องกันข้อบกพร่องชนิดต่าง ๆ

ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับงานเชื่อมมีสาเหตุและที่มาของการเกิดที่หลากหลายปัจจัย หลากหลายรูปแบบ และหลากหลายชนิด จึงได้มีการศึกษาและรวบรวมข้อบกพร่องในรูปแบบต่าง ๆ ออกเป็นกลุ่มจะพบว่าแบ่งออกให้เป็น 2 กลุ่มหลัก คือ กลุ่มของข้อบกพร่องภายนอก (External defects) ซึ่งหมายถึงข้อบกพร่องที่สามารถเห็นได้จากภายนอก หรือบางครั้งเรียกว่า ข้อบกพร่องผิวเปิด และ อีกกลุ่มคือ กลุ่มของข้อบกพร่องภายใน (Internal defects) ซึ่งหมายถึงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นอยู่ภายในเนื้อโลหะเชื่อมที่ไม่สามารถมองเห็นได้จากภายนอก โดยในแต่ละกลุ่มจะมีชนิดหรือรูปแบบของข้อบกพร่องที่หลากหลายมาก ดังแสดงเป็นตัวอย่างของการแบ่งกลุ่มของข้อบกพร่องใน **ตารางที่ 8.1**

ตารางที่ 8.1 การแบ่งกลุ่มตัวอย่างข้อบกพร่องภายนอกและภายในของแนวเชื่อม

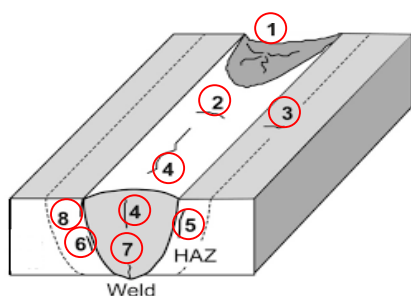
ที่มา : *Welding defect-Definition, Type, Causes & Remedies, 2019*

| กลุ่มของข้อบกพร่อง (Group of welding defects) | |
|--|---|
| ข้อบกพร่องที่เกิดอยู่ภายนอก (External defects) | ข้อบกพร่องที่เกิดอยู่ภายใน (Internal defects) |
| <ul style="list-style-type: none"> ● แตกกึ่งกลางบ่อหลอม (Crater crack) ● สะเก็ดเชื่อม (Spatters) ● รอยกัดแห้ว (Undercut) ● รอยเชื่อมเกย (Overlap) ● แนวเชื่อมบิดตัว (Distortion) ● แนวซึมลึกมากเกินไป (Excessive penetration) ● รอยแยกชั้น (Lamination) | <ul style="list-style-type: none"> ● โพรงอากาศภายใน (Internal porosity) ● รอยแตกภายใน (Internal cracks) ● สลัดฝังใน (Slag inclusion) ● การหลอมไม่สมบูรณ์ (Incomplete fusion) ● รอยซึมลึกไม่สมบูรณ์ (Incomplete penetration) ● แก๊สฝังใน (Gas inclusion) ● รอยฉีกภายใน (Internal lamella tearing) |

8.1 รอยแตกร้าวของงานเชื่อม (Weld cracking)

ข้อบกพร่องของแนวเชื่อมที่เป็นลักษณะของการแตกร้าวจัดได้ว่าเป็นข้อบกพร่องที่ร้ายแรงที่สุด และมักไม่ผ่านเกณฑ์การยอมรับในทุก ๆ มาตรฐานการตรวจสอบ โดยรอยแตกร้าวจะมีทั้งแบบที่ปรากฏ

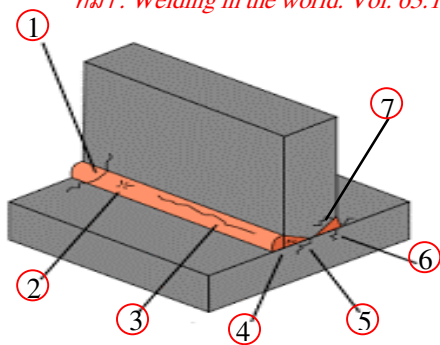
บนพื้นผิวสามารถมองเห็นได้ชัดเจนด้วยสายตา หรืออาจต้องใช้เครื่องมือเพิ่มกำลังขยายในการมองเห็น และแบบที่เกิดการแตกร้าวอยู่ภายในที่ไม่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งทั้งสองแบบสามารถเกิดได้ทั้งในตำแหน่งของแนวเชื่อม บริเวณกระทบร้อน และบริเวณของโลหะหลัก และยังพบว่า การออกแบบรอยต่อต่างกันจะมีผลต่อรูปแบบตำแหน่งของการแตกร้าวต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 8.1 (ก) และ (ข) ที่บ่งชี้ถึงโอกาสที่จะเกิดชนิดของรอยร้าว และตำแหน่งของรอยแตกร้าวของรอยเชื่อมที่ได้รับแรงเค้นเกินกำลังสูงสุดที่สามารถรับได้ ที่เป็นรอยเชื่อมแบบต่อชน (Butt weld) และรอยเชื่อมตอมุม (Fillet weld) ตามลำดับ รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในงานเชื่อมสามารถเกิดขึ้นได้ในขณะขึ้นงานกำลังร้อนที่มักเรียกกันว่า การแตกขณะร้อน (Hot crack) ที่มักจะเกิดที่ระดับอุณหภูมิใกล้จะเสร็จสิ้นการแข็งตัวของบ่อหลอมละลาย และนอกจากนี้ยังสามารถเกิดขึ้นได้ในสภาวะที่แนวเชื่อมเย็นตัวสมบูรณ์ไปแล้ว ที่มักจะเกิดขึ้นหลังการเชื่อมงานเสร็จไปแล้ว หรือนำไปใช้งานแล้วเป็นเวลาอาจหลายวันหรืออาจหลายเดือน ที่มักเรียกการแตกร้าวนี้ว่า การแตกขณะเย็น หรือแตกแบบเย็น (Cold crack) ซึ่งในลักษณะของการแตกของทั้งสองกลุ่มนี้ สามารถแยกย่อยออกเป็นรูปแบบของรอยแตกร้าวได้อีกหลากหลายที่พิจารณาจากรูปแบบการเกิดและตำแหน่งของการเกิดรอยแตกร้าว ซึ่งจะได้อธิบายถึงในรายละเอียดในหัวข้อต่อไป



- 1) การแตกร้าวปลายบ่อหลอม (Crater crack)
- 2) การแตกร้าวขวางแนวเชื่อม (Transverse weld crack)
- 3) การแตกร้าวขวางแนว HAZ (Transverse HAZ crack)
- 4) การแตกร้าวตามแนวเชื่อม (Longitudinal crack)
- 5) การแตกร้าวขณะเย็นของ HAZ (Cold HAZ crack)
- 6) การแตกร้าวที่ไม่หลอมละลาย (Lack of fusion crack)
- 7) การแตกร้าวแนวซิมลึก (Root crack)
- 8) การแตกร้าวที่ขอบแนวเชื่อม (Edge crack)

(ก) ตำแหน่งของการแตกร้าวบนแนวเชื่อมต่อชน (Butt weld)

ที่มา: *Welding in the world. Vol. 63:1715-1732, 2019*



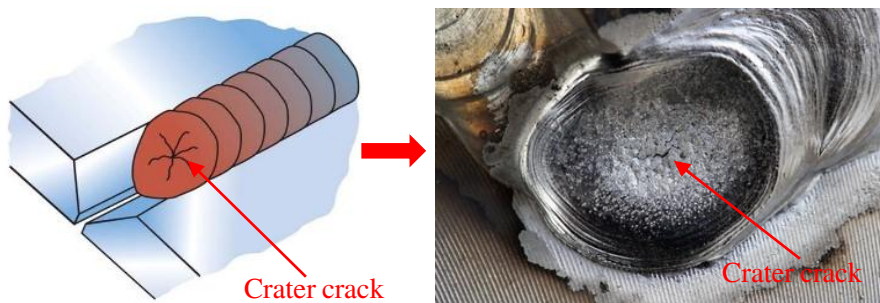
- 1) การแตกร้าวขวางแนวเชื่อม (Transverse weld crack)
- 2) การแตกร้าวกึ่งกลางบ่อหลอม (Crater crack)
- 3) การแตกร้าวตามแนวเชื่อม (Longitudinal crack)
- 4) การแตกร้าวในแนวเชื่อม (Fusion line crack)
- 5) การแตกร้าวแนวซิมลึก (Root crack)
- 6) การแตกร้าวที่ตีนแนวเชื่อม (Toe crack)
- 7) การแตกร้าวที่ HAZ (HAZ crack)

(ข) ตำแหน่งของการแตกร้าวบนแนวเชื่อมตอมุม (Fillet weld)

ที่มา: *Welding imperfections, 2011*

รูปที่ 8.1 ตำแหน่งและรูปแบบของการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อมต่อชนและตอมุม

1. รอยแตกร้าวปลายบ่อหลอม (Crater crack) หรือบางครั้งเรียกว่า รอยแตกกึ่งกลางบ่อหลอม ละลาย ด้วยเหตุเพราะว่ารอยแตกจะเกิดขึ้นที่บ่อหลอมละลายของปลายทางสิ้นสุดแนวเชื่อม โดยจะเกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางของการหลอมเมื่อหยุดการอาร์กหรือหยุดการเติมเนื้อโลหะเชื่อมทันที ทำให้ที่บ่อหลอมของปลายแนวเชื่อมมีปริมาณเนื้อโลหะหลอมเหลวเพื่อเติมเต็มไม่มากเพียงพอ เมื่อเกิดการเย็นตัวบริเวณกึ่งกลางจะเย็นตัวที่ช้ากว่าบริเวณรอบ ๆ บ่อหลอม ซึ่งที่กึ่งกลางจำเป็นต้องมีปริมาณน้ำโลหะมากพอต่อการหดเซยเพื่อการแข็งตัว แต่กลับมีปริมาณที่น้อยเกินไป ทำให้เกิดการดึงน้ำโลหะขึ้นจนเกิดเป็นรอยยุบตัว (Shrink) ที่กึ่งกลาง พร้อมกับเกิดความเค้นขึ้นรอบทิศทางของบ่อหลอม เป็นเหตุให้เกิดรอยแตกเป็นรูปคล้ายดวงดาว (Star crack) หรือ แบบอื่น ๆ เช่นแบบตาข่าย (Network crack) ที่กึ่งกลางของบ่อหลอมละลายที่ปลายของแนวเชื่อม ลักษณะของรอยแตกร้าวจะเป็นรอยแตกแบบตื้น ๆ เท่านั้นไม่ลึกมาก และจัดอยู่ในประเภทของการแตกแบบร้อน ดังแสดงลักษณะของรอยแตกร้าวในรูปที่ 8.2 การแตกร้าวแบบนี้มีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นได้ง่ายกับการเชื่อมโลหะประเภทที่มีสมบัติการขยายตัวสูง เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนเนติก โดยรูปแบบการแตกจะเป็นแบบเปิดที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา หรือสามารถเลือกใช้การตรวจสอบด้วยวิธี VT



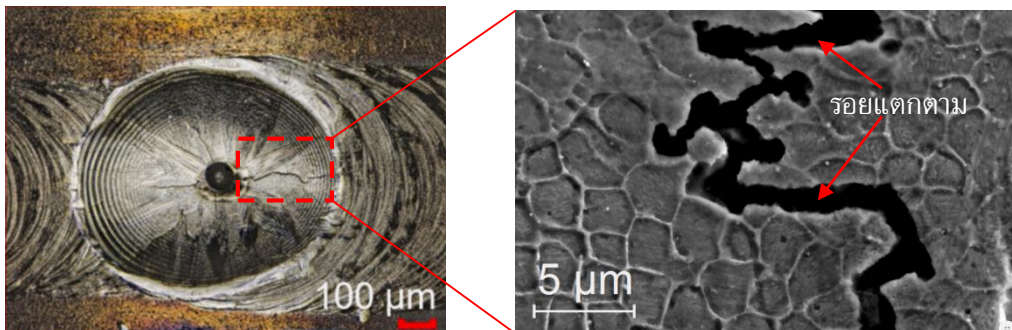
รูปที่ 8.2 รอยแตกร้าวที่บ่อหลอมละลายปลายแนวเชื่อม (Crater crack)

ที่มา : Shutterstock : Crater Crack Star Weld Joining, 2010

กลไกการแตกร้าวของ Crater crack เมื่อวิเคราะห์ในทางโลหะวิทยาพบว่ามักจะเป็นการแตกร้าวที่เกิดขึ้นตามขอบเกรน (Intergranular cracking) ซึ่งเป็นไปตามผลการทดลองวิจัยเชื่อมโลหะ Inconel 602 CA ด้วยขบวนเชื่อมเลเซอร์ ดังแสดงผลการทดลองของ Miha Kenda et al. (2021) ในรูปที่ 8.3 (ก) และ (ข) ที่แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งและรูปแบบของการแตก และขยายภาพรอยแตกให้เห็นถึงลักษณะกลไกของของแตกที่เกิดขึ้นตามบริเวณขอบของเกรน นอกจากนี้ในงานวิจัยยังอภิปรายเพิ่มเติมอีกว่ารูพรุน (Porosity) จะเป็นตัวส่งเสริมให้เกิดการแตกร้าวแบบ Crater ได้ง่ายมากยิ่งขึ้น ดังนั้น จึงเป็นแนวทางที่ต้องพิจารณาในการเลือกใช้แก๊สปกคลุมขณะเชื่อมชิ้นงานให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพเพื่อลดรูพรุนจากภายนอกจะได้ลดอัตราการแตกร้าวที่เกิดบนบ่อหลอมละลายได้

เมื่อพิจารณาจากกลไกการเกิดของการแตกร้าวก็จะพบว่าสาเหตุหลักเกิดจากการที่เนื้อโลหะหลอมเหลวไม่เติมเต็มให้มากเพียงพอ ซึ่งมักจะเกิดขึ้นกับการเชื่อมโลหะแบบไม่เติมลวดเชื่อม

(Autogenous welding) หรือการเชื่อมโลหะแผ่นบาง หรือการเชื่อมมุม (Fillet welding) เป็นต้น เพราะขบวนการเชื่อมเหล่านี้ควบคุมบ่อหลอมละลายตอนปลายแนวเชื่อมค่อนข้างยาก เนื่องด้วยเกิดความร้อนสะสมในบ่อหลอมละลายมาตลอดการเชื่อม



(ก) รอยแตกบ่อหลอม (Crater crack)

(ข) ขยายรอยแตกด้วย SEM

รูปที่ 8.3 กลไกการแตกร้าตามขอบเกรนของรอยแตกปลายบ่อหลอมละลาย (Crater crack)

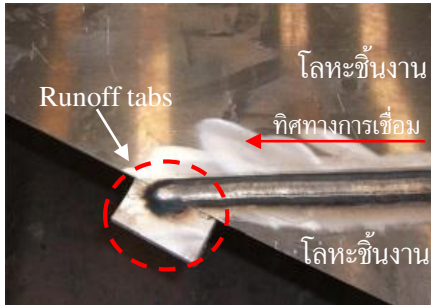
ที่มา : *Journal of Engineering failure Analysis*, 128:105579, 2021

วิธีการป้องกันการเกิดการแตกร้าที่กึ่งกลางของปลายบ่อหลอมละลาย กรณีที่เป็นการเชื่อมแบบเต็มลวดเชื่อม สามารถแก้ไขได้ง่ายด้วยการเดินวถเติมลวดเชื่อมไป-มาลงในบ่อหลอมละลายให้มากขึ้น เพื่อที่จะนำเนื้อโลหะไปชดเชยที่ต้องยุบตัวลง และทำให้บ่อหลอมสูงขึ้น สำหรับกรณีของการเชื่อมโลหะที่มีความหนาและมีร่องบาก สามารถป้องกันการแตกร้าแบบนี้ได้โดยการสร้างแผ่นโลหะรองรับเสริมที่ปลายของแนวเชื่อม ที่เรียกว่า Runoff tabs ดังแสดงในรูปที่ 8.4 (ก) และ (ข) อ้างอิงตาม Stavros Kairis (2012) เพื่อใช้เป็นตัวรองรับจุดสิ้นสุดของการเชื่อมที่อยู่นอกเหนือไปจากแนวเชื่อมที่ต้องการ วิธีการนี้ถือว่ามีประสิทธิภาพสูงมากในการป้องกันหรือการจัดข้อบกพร่องในลักษณะนี้ โดยเฉพาะการเชื่อมงานโครงสร้างโลหะหรือท่อที่มีขนาดใหญ่ ๆ นอกจากนี้ยังมีเทคนิคการเชื่อมที่สามารถใช้ป้องกันการเกิดรอยแตกร้าแบบนี้ได้อีกด้วย โดยอาศัยวิธีการควบคุมปัจจัยการเชื่อม เช่น

- การลดระยะอาร์กให้ชิดกับบ่อหลอมละลายเมื่อถึงจุดสิ้นสุดการเชื่อม เพราะระยะอาร์กชิดจะช่วยลดขนาดของบ่อหลอมละลายลง และลดการยุบหรือหดตัวที่รุนแรง ลดแรงเค้นดึงของเนื้อโลหะ จะช่วยลดหรือจัดโอกาสของการที่จะเกิดการแตกร้าแบบ Crater crack ได้เป็นอย่างดี

- การปรับมุมของหัวเชื่อมเพื่อลดขนาดบ่อหลอมละลายและเพิ่มความหนาของน้ำโลหะหลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 8.5 (ก) เป็นมุมของหัวเชื่อมที่ทำการเชื่อมปกติตลอดการเชื่อมซึ่งเป็นเทคนิคแบบดัน (Push technique) แต่เมื่อจะสิ้นสุดหรือปลายของแนวเชื่อมให้ทำการปรับมุมของหัวเชื่อมเป็นเทคนิคแบบดึง (Pull technique) ดังรูป (ข) เพื่อทำการปรับลดขนาดของบ่อหลอมละลายให้เล็กลง ช่วยป้องกันการเกิดการแตกร้าแบบ Crater ได้

- เทคนิคการเลือกขนาดของลวดเชื่อมที่เหมาะสม เพราะถ้าวัดเชื่อมเล็กมากจะส่งผลต่อปริมาณน้ำโลหะที่เพียงพอต่อการแข็งตัวของบ่อหลอมละลาย



(ก) การสร้าง Runoff tab โลหะแผ่นบาง

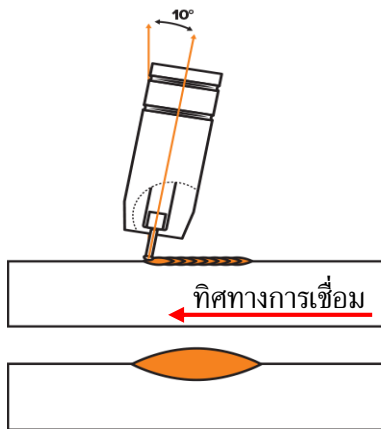
ที่มา : Aluminum alloys MIG Welding, 2012



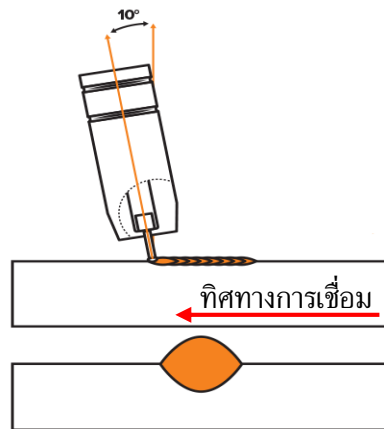
(ข) การสร้าง Runoff tab โลหะแผ่นหนา

ที่มา : AWS Syracuse section, 2012

รูปที่ 8.4 วิธีป้องกันการแตกร้าวที่ปลายบ่อหลอม (Crater crack) ด้วยการสร้าง Runoff tabs



(ก) มุมหัวเชื่อมขณะทำการเชื่อม



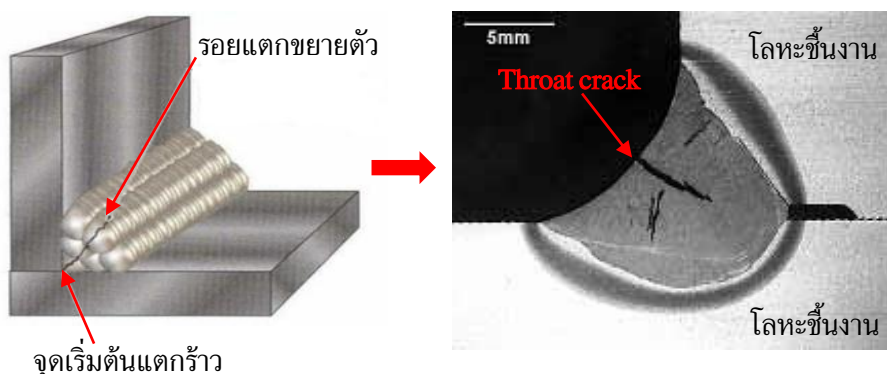
(ข) ปรับมุมหัวเชื่อมขณะสิ้นสุดรอยเชื่อม

รูปที่ 8.5 เทคนิคการปรับมุมของหัวเชื่อมเพื่อลดการแตกร้าวที่บ่อหลอม (Crater crack)

ที่มา : Unimig – The Ultimate Guide to MIG Welding, 2021

2. รอยแตกร้าวกึ่งกลางตามแนวเชื่อม (Throat crack) เป็นรอยแตกร้าวแบบเปิดผิวที่สามารถมองเห็นได้ โดยเกิดเป็นรอยแตกที่กึ่งกลาง (Throat) ของขนาดความกว้างของแนวเชื่อม และมักเป็นรอยแตกที่ไปในทิศทางเดียวกับแนวเชื่อม (Longitudinal crack) ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งการแตกขณะร้อนและการแตกขณะเย็นตัว ส่วนใหญ่จะพบในการแตกแบบร้อนมากกว่า โดยมักเริ่มต้นแตกที่รากของแนวเชื่อม (Root welding) จากนั้นจะลุกลามหรือแตกขยายออกไปสู่ผิวหน้าที่บริเวณกึ่งกลางของแนวเชื่อม (Multi pass weld) พบว่าแนวแรกของการเชื่อมหรือแนวซึมลึก (Root pass weld) การเกิดแตกได้ง่าย และต้องทำการขจัดรอยแตกออกไปก่อนที่จะเชื่อมแนวถัดไป ถ้าไม่กำจัดออกหรือกำจัดออกไม่หมดจะเกิดการแตกแบบต่อเนื่องออกมาเรื่อย ๆ จนมาปรากฏเป็นรอยแตกร้าวขึ้นที่บริเวณผิวของแนวเชื่อมแนวสุดท้ายเมื่อ

เชื่อมเสร็จ ดังแสดงลักษณะของรอยแตกในรูปที่ 8.6 การแตกร้าที่จุดกึ่งกลางตามแนวยาวของรอยเชื่อมนี้สาเหตุมาจากกระแสไฟเริ่มต้นเชื่อมต่ำเกินไป หรือมาจากการเลือกใช้ชนิดและขนาดของลวดเชื่อมไม่เหมาะสม นอกจากนี้ต้นเหตุของความชื้นหรือไฮโดรเจนขณะเริ่มเชื่อมมีมากเกินไป เป็นเหตุให้ไม่สามารถควบคุมหรือป้องกันแก๊สไฮโดรเจนที่เข้ามาปะปนอยู่ในแนวเชื่อม จนเกิดเนื้อเชื่อมที่เปราะจากไฮโดรเจน อ้างอิงจากบทความของ Phi Evans (2012)



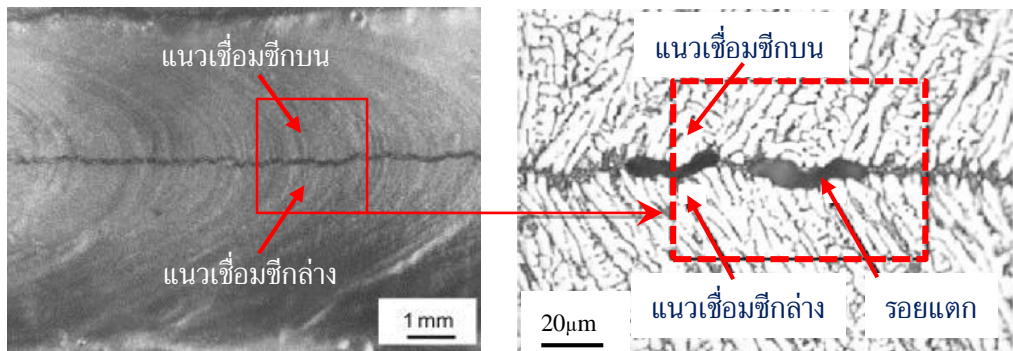
รูปที่ 8.6 รอยแตกร้าที่กึ่งกลางตามยาวของแนวเชื่อม (Throat crack)

ที่มา : Weld Discontinuities, 2010

วิธีการป้องกันการเกิดที่ไม่เกิดการแตกร้าแบบนี้ ประการแรก เป็นเรื่องของการเลือกใช้ชนิดและขนาดของลวดเชื่อมให้เหมาะสม เช่น การเลือกใช้ลวดเชื่อมที่สมบัติด้านความเหนียวสูง และประการที่สอง แนะนำให้ทำการให้ความร้อนโลหะชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม (Pre-heat) เพื่อช่วยจัดความชื้นจัดแก๊สไฮโดรเจน และยังช่วยเพิ่มระดับอุณหภูมิพื้นฐานให้กับการอาร์กเริ่มต้นเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มกระแสอาร์กให้สูงขึ้น ขณะเดียวกันการเพิ่มกระแสอาร์กเริ่มต้นเป็นอีกแนวทางที่สามารถนำมาใช้ลดปัญหาการแตกร้าในลักษณะนี้ได้ นอกจากนี้ที่กล่าวมาแล้วนั้นยังมีวิธีการออกแบบรอยต่อที่เหมาะสมให้มีพื้นที่มากเพียงพอสำหรับการรองรับเพื่อให้น้ำโลหะที่เต็มสามารถเย็นตัวได้โดยไม่เกิดความเค้นที่มากเกินไป (Stress concentration) จนเป็นเหตุให้เกิดการแตกร้าที่กึ่งกลางของแนวเชื่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของการเชื่อมโลหะต่างชนิดที่มีจุดหลอมเหลวต่างกัน ทำให้เกิดอัตราการระบายความร้อนเพื่อการเย็นตัวที่ต่างกัน จะส่งผลให้เกิดแรงเค้นดึงขึ้นจากการหดตัวของน้ำโลหะขณะเย็นตัว ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ได้ด้วยวิธีการอุ่นชิ้นงานช่วยในการทำให้จุดหลอมเหลวเท่ากันหรือใกล้เคียง

การตรวจสอบรอยร้าวกึ่งกลางตามแนวเชื่อมนี้ สามารถตรวจสอบได้ง่ายเพราะเป็นรอยแตกภายนอกที่รอยแตกเป็นผิวเปิดสามารถมองเห็นได้ด้วยสายตา จึงนิยมที่จะเลือกใช้วิธีการตรวจสอบได้ทั้งแบบตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Testing : VT) หรือแบบที่ใช้น้ำยาแทรกซึม (Penetrant Testing : PT) และการวิเคราะห์รอยแตกค่อนข้างง่ายไม่ซับซ้อน ด้วยเหตุเพราะลักษณะรูปแบบของรอยแตกจะเกิดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแนวเชื่อม และแตกเป็นแนวเส้นที่ยาวและค่อนข้างเป็นเส้นตรงตามยาวของ

แนวเชื่อมจะไม่ขยายออกมาในทิศทางแนวขวาง ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 8.7 ที่เป็นลักษณะของรอยแตกในการเชื่อมโลหะอะลูมิเนียม – 3% ซิลิกอน



รูปที่ 8.7 ตัวอย่างลักษณะรอยแตกกว้างที่กลางตามยาวของแนวเชื่อม (Throat crack)

ที่มา : *Integrated mechanical metallurgical approach to modeling, 2005*

3. รอยแตกกว้างใต้แนวเชื่อม (Underbead crack) รอยแตกกว้างชนิดนี้จะเกิดขึ้นที่บริเวณข้าง ๆ ของแนวเชื่อม โดยเฉพาะด้านล่างของแนวเชื่อมที่เป็นพื้นที่บริเวณกระทบร้อน ดังแสดงตำแหน่งของการเกิดในรูปที่ 8.8 ซึ่งโดยปกติรอยแตกกว้างเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะไม่ขยายตัวขึ้นไปสู่ผิวหน้าด้านบนของชิ้นงานเชื่อม ลักษณะของรอยแตกมีโอกาสเป็นได้ทั้งแบบแตกตามยาว (Longitudinal) และแตกตามขวาง (Transverse) ซึ่งขึ้นอยู่กับทิศทางของแรงเค้นในแนวเชื่อมเป็นสำคัญ อ้างอิงจากบทความของ Phi Evans (2012)

การแตกกว้างใต้แนวเชื่อมนี้จัดอยู่ในกลุ่มของการแตกเย็น (Cold cracks) ซึ่งเกิดการแตกเมื่อการเชื่อมสิ้นสุดไปแล้ว หรือนำงานเชื่อมไปประกอบใช้งานเรียบร้อยแล้ว โดยพบว่าสาเหตุหลักมาจากอิทธิพลของแก๊สไฮโดรเจนที่ละลายเข้ามาขณะเชื่อมอาจมาจากลวดเชื่อมหรือมาจากโลหะที่นำมาเชื่อม ซึ่งขณะเย็นตัวแก๊สไฮโดรเจนจะแพร่ออกไปตามทิศทางของการระบายความร้อน แต่ระบายออกไปไม่สุดทางจะไปหยุดอยู่ที่บริเวณกระทบร้อน ซึ่งเป็นบริเวณของการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ที่มีสมบัติพื้นฐานที่มีความยืดหยุ่นต่ำ มีความแข็งสูง และมีความเปราะสูง ดังนั้น เมื่อเวลาผ่านไปหลังการเชื่อม จะเกิดการรวมตัวของแก๊สไฮโดรเจนขึ้นเพียงเล็กน้อยส่งผลให้เกิดการแตกขึ้นได้ง่าย รอยแตกที่เกิดขึ้นเป็นเส้นตรงแต่จะไม่ขยายตัว นอกจากนี้ ยังมีสาเหตุมาจากการหดตัวที่ไม่เท่ากันระหว่างการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายและเนื้อโลหะงานที่เชื่อม ก่อให้เกิดแรงเค้นขึ้นภายในและในขณะเดียวกันก็มีเฟสโครงสร้างมาร์เทนไซต์เกิดขึ้นจากการเย็นตัวเร็วที่บริเวณกระทบร้อน เมื่อแนวเชื่อมรับภาระโหลดเข้ามามากขึ้น ความเค้นรวมเพิ่มขึ้นจึงเกิดการแตกกว้างและมักเกิดการแตกที่บริเวณ HAZ ดังแสดงตัวอย่างผลจากการวิจัยทดลองเชื่อมโลหะนิกเกิลผสมเมกเนต 617 ที่ตรวจพบรอยแตกกว้างที่บริเวณกระทบร้อนใต้แนวเชื่อมแบบต่อชนในรูปที่ 8.9

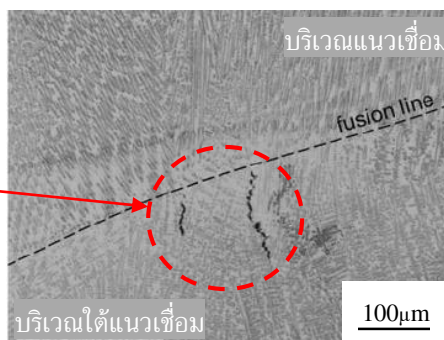
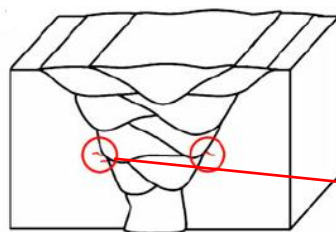
วิธีการป้องกันการแตกร้าวแบบนี้ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ประเด็นสำคัญจะเป็นการลดหรือป้องกันแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปรวมตัวในแนวเชื่อม เพราะเป็นเหตุการณ์สำคัญที่ส่งเสริมให้เกิดการแตกร้าว เช่น การเลือกโลหะเชื่อมที่ปริมาณไฮโดรเจนผสมต่ำ หรือต้องทำการอบลดความเค้น หรือหลีกเลี่ยงสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูงมากเกินไป ซึ่งรวมไปถึงวิธีการต่าง ๆ ที่สามารถขจัดแก๊สไฮโดรเจนออกไปได้ เช่น การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม (Pre-heating) หรือการให้ความร้อนแก่แนวเชื่อมหลังทำการเชื่อมเสร็จทันที (Post-heating) เพื่อที่จะไล่แก๊สไฮโดรเจนที่ติดมาอยู่ในแนวเชื่อมแล้วให้หนีออกไปอ้างอิงจากผลการวิจัยของ Carolin Fink & Manuela Zinke (2013)

การตรวจสอบรอยแตกที่งอตัวที่เกิดในแนวเชื่อมนี้ส่วนใหญ่จะเป็นแบบรอยแตกภายใน (Internal crack) ไม่เกิดที่ผิวจึงไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาได้ อาจมีบางกรณีที่เกิดแตกที่ริมของของชิ้นงานที่เริ่มต้นหรือสิ้นสุดของการเชื่อม วิธีการตรวจสอบเพื่อหารอยร้าวในลักษณะนี้ต้องใช้วิธีการของ UT หรือ RT แนวเชื่อมที่เกิดได้แนวเชื่อมนี้จะตรวจสอบค่อนข้างยาก เพราะรอยแตกมักอยู่ติดกับแนวหลอมละลายของการเชื่อม (Fusion line) และเป็นลักษณะรอยแตกแบบสั้น ๆ เล็ก ๆ ยากต่อการตรวจพบและต้องใช้ความเชี่ยวชาญในการวิเคราะห์ ดังนั้น ต้องใช้ทักษะของผู้ตรวจสอบที่มีความชำนาญสูง



รูปที่ 8.8 ตำแหน่งและลักษณะของรอยแตกร้าวชนิดที่แตกใต้แนวเชื่อม (Underbead crack)

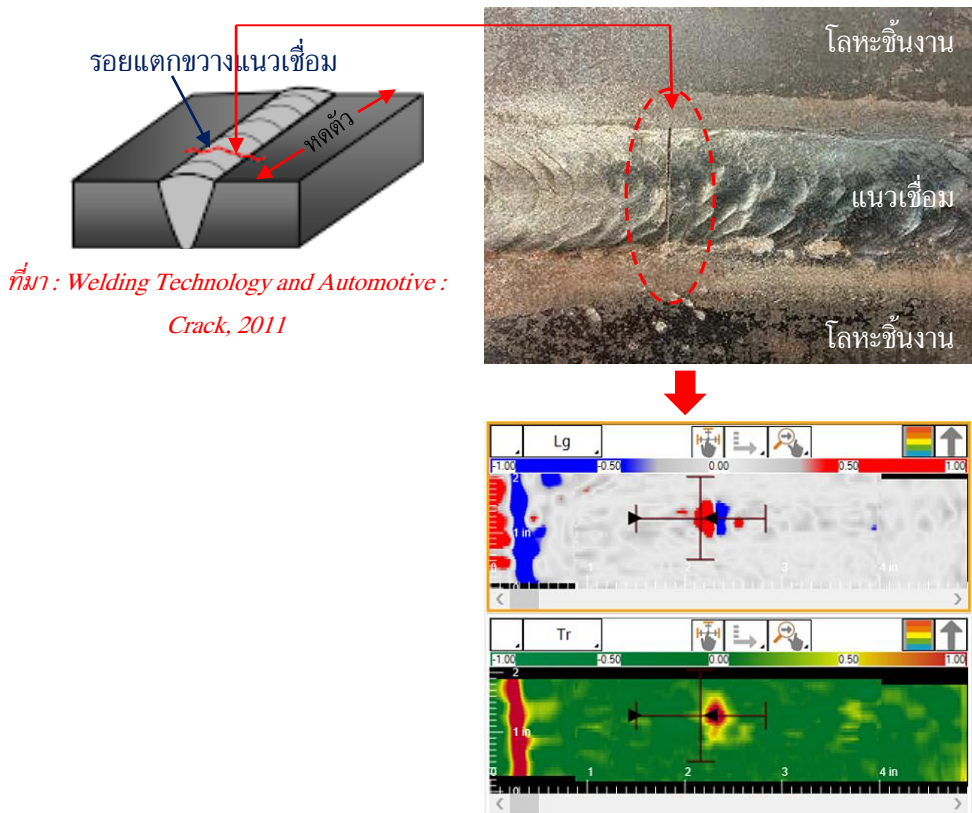
ที่มา : *The most common welding defects : Causes and Remedies, 2014*



รูปที่ 8.9 การตรวจพบรอยแตกร้าวของการเชื่อมโลหะนิเกิลผสม 617 ที่ตำแหน่งใต้แนวเชื่อม

ที่มา : *IIW-Journal of Weld World. Vol. 57:323-333, 2013*

4. การแตกร้าวขวางแนวเชื่อม (Transverse weld crack) เป็นลักษณะของรอยแตกร้าวที่จัดอยู่ในกลุ่มข้อบกพร่องที่เกิดอยู่ภายนอก (External defects) ผิวของรอยแตกสามารถมองเห็นได้ด้วยสายตาเหมือนกับรอยแตกที่ผิวอื่น ๆ แต่แตกต่างกันที่เป็นรอยแตกที่เกิดในแนวทิศทางขวางหรือตั้งฉากกับแนวเชื่อม และถ้าเกิดการขยายตัวรอยแตกเพิ่มขึ้นโดยจะลุกลามเข้าไปในโลหะหลัก (Base metal) ของทั้งสองข้าง การแตกร้าวตามขวางแนวเชื่อมนี้จัดเป็นการแตกเย็น (Cold crack) เพราะมักเกิดขึ้นเมื่อนำแนวเชื่อมไปใช้งานหรือรับภาระโหลดแล้วเกิดการแตกร้าวขึ้น สาเหตุหลักเกิดจากความเค้นดึงอันเนื่องมาจากการหดตัวของบ่อหลอมละลายขณะเย็นตัวในทิศทางตามแนวยาวของโลหะชิ้นงานที่กระทำต่อแนวเชื่อม เมื่อความเค้นที่ค้างอยู่ผสมกับภาระโหลดที่เพิ่มขึ้น และร่วมด้วยสมบัติของแนวเชื่อมที่มีความเหนียวต่ำ ความเปราะสูง ปัจจัยร่วมเหล่านี้เป็นชนวนเหตุของการแตกร้าวในแนวทิศทางตามขวางกับแนวเชื่อม โดยมีงานวิจัยหลายกรณีศึกษาอภิปรายสรุปว่ามีอิทธิพลของปริมาณแก๊สไฮโดรเจนภายในเนื้อเชื่อมร่วมด้วย ดังในรูปที่ 8.10 ที่แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของการเกิดรอยแตกร้าว และตัวอย่างรอยแตกที่พบในการเชื่อมจริง ที่มีการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยวิธีกระแสไหลวน (Eddy Current Testing : ET)



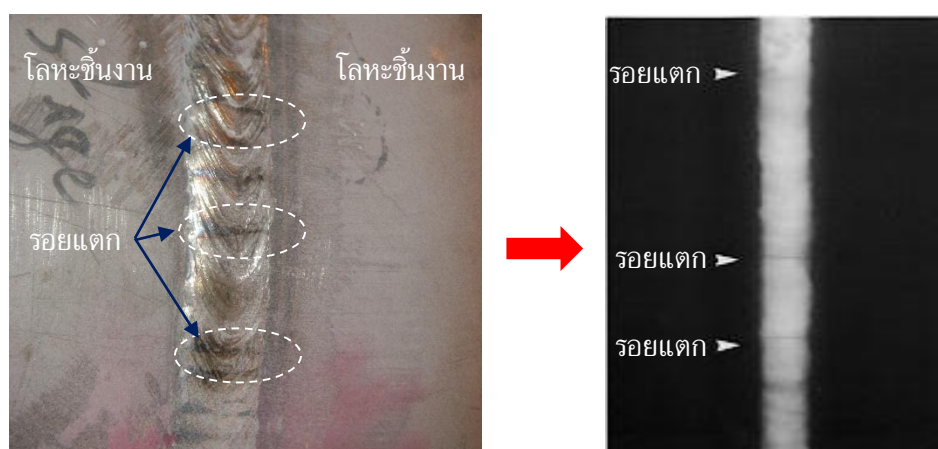
ผลการทดสอบโดยวิธีกระแสไหลวน (ET)

ที่มา : Eddyfi Technology, 2010

รูปที่ 8.10 ตำแหน่ง ลักษณะรอยแตก และการตรวจสอบรอยแตกร้าวแบบขวางแนวเชื่อม

วิธีการป้องกันการแตกร้าวในแนวทิศทางขวางแนวเชื่อม ประเด็นสำคัญจะเน้นวิธีการลดแรงเค้นดึงตามแนวยาว (ขนานแนวเชื่อม) ให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ซึ่งได้มีการเสนอแนะไว้ว่าสามารถทำได้โดยการเลือกปัจจัยการเชื่อมให้เหมาะสมโดยเฉพาะประเด็นการเลือกขนาดลวดเชื่อมที่เล็กเกินไป เลือกลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมทางเคมีที่ก่อให้เกิดการหดตัวสูง (Welding shrinkage) ผลที่ตามมาคือเกิดอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วมาก (Rapid cooling) จะเกิดความเค้นดึงที่มากภายในเนื้อเชื่อม นอกจากนี้ยังมีปัจจัยของกระแสไฟเชื่อมที่ควรต้องสูงมากเพียงพอที่จะใช้กับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมที่มีขนาดโต ๆ เพื่อที่สร้างขนาดแนวเชื่อมสุดท้ายให้น้ำโลหะมากพอต่อการชดเชยในหดตัวของน้ำโลหะในบ่อหลอม หรืออาจมีการอุ่นชิ้นงานโลหะก่อนเชื่อม ซึ่งช่วยในการไล่แก๊สไฮโดรเจนบริเวณผิวชิ้นงาน การเลือกกรรมวิธีการเชื่อมและออกแบบรอยต่อที่สามารถลดการสร้างแรงเค้นดึงเป็นอีกทางเลือกที่สามารถนำมาใช้ป้องกันการแตกร้าวแบบขวางแนวเชื่อมได้

วิธีการตรวจสอบสามารถเลือกใช้ได้กับการทดสอบผิวย่อยแตกแบบเปิดทั้งหมด เช่น VT หรือ PT หรือ MT และยุ่งยากในการตรวจสอบและวิเคราะห์ผล ด้วยเหตุเพราะรอยแตกกว้างค่อนข้างใหญ่เป็นเส้นตรง และทิศทางตั้งฉากกับแนวเชื่อม อย่างไรก็ตามโอกาสที่จะเกิดการแตกร้าวภายในสามารถเกิดขึ้นได้แต่ค่อนข้างน้อย เพราะกลไกการหดตัวจะสร้างความเค้นแรงดึงที่ผิว ซึ่งเย็นตัวช้าสุดมากกว่าบริเวณแนวลึกของแนวเชื่อม ดังนั้น เมื่อแรงเค้นดึงด้านแนวลึกมีน้อยมักไม่เกิดการแตกแบบแนวขวาง แต่ถ้ากรณีที่มีความประสงค์ตรวจสอบการแตกร้าวแนวขวางภายในเนื้อแนวเชื่อมด้านลึก จะต้องเลือกใช้วิธีการทดสอบแบบ RT หรือ UT ดังตัวอย่างชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมที่เกิดการแตกร้าวแบบขวางแนวเชื่อม และฟิล์มเอ็กซเรย์จากการทดสอบแบบ RT แสดงในรูปที่ 8.11 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



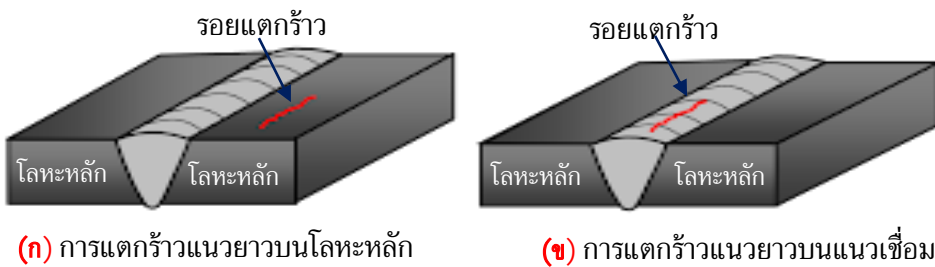
(ก) ชิ้นงานแนวเชื่อมที่ต้องการตรวจสอบแบบ RT

(ข) ฟิล์มเอ็กซเรย์จากการทดสอบ

รูปที่ 8.11 การตรวจพบรอยแตกแนวขวางของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยการทดสอบแบบ RT

ที่มา : Allusion of Transverse Cracking, 2010

5. การแตกร้าตามยาวแนวเชื่อม (Longitudinal weld crack) เป็นการแตกร้าที่มีลักษณะของรอยแตกเป็นไปในทิศทางเดียวกันแนวเชื่อมหรือขนานไปกับแนวเชื่อม ซึ่งเป็นรอยแตกที่จัดอยู่ในประเภทข้อบกพร่องภายนอกเพราะส่วนใหญ่สามารถเห็นรอยแตกได้จากภายนอก รอยแตกร้าแบบนี้สามารถพบเห็นได้ 2 ลักษณะ คือ ลักษณะของรอยแตกที่เกิดขึ้นบริเวณเนื้อโลหะหลักที่นำมาเชื่อม (Longitudinal parent metal crack) และลักษณะของรอยแตกร้าที่เกิดขึ้นบนบริเวณแนวเชื่อม (Longitudinal weld metal crack) อ้างอิงตาม Lincoln Electric Weld Cracking (2015) ดังแสดงในรูปที่ 8.12 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 8.12 ตำแหน่งและลักษณะของรอยแตกร้าแบบตามยาวแนวเชื่อม

ที่มา : *Welding Technology and Automotive : Crack, 2011*

- การแตกร้าตามแนวยาวที่เกิดขึ้นบริเวณเนื้อโลหะหลักที่นำมาเชื่อม (Longitudinal parent metal crack) ส่วนใหญ่เกิดที่บริเวณกระแทกร้อนที่เกิดจากการอิทธิพลของเชื่อม (HAZ) หรือบริเวณรอยต่อของบริเวณกระแทกร้อน (HAZ) กับบริเวณไม่กระแทกร้อน (Non-HAZ) โดยสาเหตุที่สำคัญเกิดจากผลของความเค้นในการหดและขยายตัวของเนื้อโลหะเมื่อทำการเชื่อม โดยเฉพาะการที่เกิดมีโครงสร้างโลหะที่มีความแข็งสูงขึ้นเนื่องจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของบริเวณกระแทกร้อน ซึ่งมีสมบัติทางกลที่แตกต่างกับบริเวณไม่กระแทกร้อน (โครงสร้างเดิมของโลหะเชื่อม) และมีความสามารถทนแรงเค้นดึงจากการหดตัวไม่เท่ากันจึงเกิดการแตกร้าขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นที่น่าสังเกตว่าลักษณะของรอยแตกจะเป็นแนวเส้นตรงยาวขนานไปกับแนวเชื่อม และขนานกับแนวของ HAZ ซึ่งรอยแตกมักพบที่ตำแหน่งของรอยต่อระหว่างของโซนโครงสร้างใหม่กับโครงสร้างเดิม ดังแสดงลักษณะของรอยแตกร้าในรูปที่ 8.13 (ก) การแตกร้าตามแนวยาวบนโลหะหลักที่เชื่อมนี้ บางครั้งพบว่าเกิดจากข้อบกพร่องจากการรีดขึ้นรูปของโลหะ (Rolling forming) ที่เกิดจากสารมลทินโดนรีดฝังทับอยู่ภายใน หรือบางครั้งเกิดจากการที่เลือกวงทิศทางของการรีดโลหะที่ขนานกับทิศทางของการเชื่อม ซึ่งตั้งฉากกับแรงเค้นดึงขณะหดตัว ดังแสดงทิศทางของเกรนที่เกิดจากการรีดขึ้นรูปของเนื้อโลหะที่นำมาทำการเชื่อมในทิศทางตามแนวยาว (Longitudinal grain direction) และทิศทางในแนวขวาง (Transverse grain direction) ในรูปที่ 8.14 ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งเสริมให้เกิดการแตกร้าทั้งสิ้นจึงต้องทำการป้องกัน

วิธีการป้องกันรอยแตกร้าในลักษณะนี้ไม่ซับซ้อนเน้นการลดแรงเค้นที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของความร้อนจากการเชื่อมด้วยวิธีการอุ่นโลหะหลักก่อนทำการเชื่อม (Pre-heat base metal) หรือ วิธีการ

ปรับให้อัตราการเย็นตัวเป็นไปอย่างช้า ๆ เพื่อต้องการให้โลหะหลักได้ระบายความร้อนออกไปอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งอัตราการเย็นตัวที่ช้านี้จะช่วยลดการเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่มีความแข็งแรงสูง (Martensite structure) ที่เกิดบริเวณกระทบร้อนลง และจะลดโครงสร้างที่มีความแข็งแรงนี้ได้มากสำหรับการเชื่อมเหล็กที่มีปริมาณของธาตุคาร์บอนต่ำ และนอกจากนี้ยังสามารถใช้วิธีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมเสร็จทันที (Post-heat base metal) เพื่อสร้างความสม่ำเสมอของความเค้นภายในเนื้อโลหะเชื่อม สำหรับการตรวจสอบเนื้อเกรนโลหะจากทิศทางของการรีดขึ้นรูปที่ไม่ให้ทิศทางไปในแนวเดียวกันกับแนวเชื่อมหรือขนานกับแนวเชื่อม จะช่วยลดอัตราการเกิดการแตกร้าวในลักษณะนี้ที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับอิทธิพลของความร้อนจากการเชื่อมได้เป็นอย่างดี

วิธีการตรวจสอบรอยร้าวจะต้องใช้มากกว่าหนึ่งวิธี ด้วยเหตุเพราะรอยแตกร้าวมีทั้งส่วนที่เป็นแบบเปิดผิวที่สามารถมองเห็นได้ด้วยสายตาและส่วนที่ลึกลงไปในเนื้อโลหะ ดังนั้น จึงต้องมีทั้งวิธีการตรวจสอบแบบ VT หรือ PT หรือ MT ที่รวม กับ UT หรือ RT สำหรับการวิเคราะห์ผลค่อนข้างแม่นยำ เนื่องจากการประมวลผลของหลายวิธีการตรวจสอบร่วมกัน และแนวโน้มของรูปแบบการแตกจะเป็นแนวเส้นตรงยาว อ้างอิงข้อมูลจาก TWI Lid WIS 5 (2003)

- การแตกร้าวตามแนวยาวที่เกิดขึ้นบริเวณบนแนวเชื่อม (Longitudinal weld metal crack) ลักษณะรูปแบบหรือทิศทางของรอยแตกจะเหมือนกับการแตกที่บริเวณโลหะหลัก ต่างกันที่รอยแตกนี้จะแตกบนเนื้อโลหะแนวเชื่อม (Fusion zone) เป็นแนวยาวไปในทิศทางเดียวกันกับแนวเชื่อม ซึ่งบนตำแหน่งของแนวเชื่อมนี้อาจเกิดที่แนวกึ่งกลางของแนวเชื่อม (Center line) หรือเอียงไปข้างหนึ่งข้างใดก็ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยขึ้นในการเกิดแรงเค้นดึง การแตกร้าวแบบนี้เกิดจากความเค้นดึงจากการหดตัวของน้ำโลหะเหลวขณะแข็งตัวเป็นปัจจัยสำคัญ ดังแสดงลักษณะของรอยแตกในรูปที่ 8.13 (ข) โดยส่วนใหญ่กรณีเชื่อมโลหะชนิดเดียวกัน (Similar welding) ความเค้นดึงทั้งสองข้างของโลหะหลักเท่ากันการแตกร้าวจึงเกิดที่กึ่งกลางของแนวเชื่อม ส่วนจุดเริ่มต้นของรอยร้าวเริ่มจากด้านผิวบนแล้วลุกลามไปข้างล่าง หรือเริ่มต้นจากข้างล่างแล้วลุกลามขึ้นมาด้านบนนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ เช่น จากการวิจัยทดลองเชื่อมแนวแรกที่ทำเนื้ราก (Root pass) ด้วยลวดเชื่อมขนาดเล็ก ๆ พบว่าเมื่อเชื่อมทับแนวถัดมาหลาย ๆ แนว (Multi pass) เกิดการแตกร้าวที่แนวแรกแล้วรอยแตกจะขยายตัวขึ้นมาสู่ผิวแนวเชื่อมด้านบน ซึ่งผลการตรวจสอบได้ข้อสรุปว่าเกิดจากแนวเชื่อมแรกมีขนาดเล็กมากเกินไป ความร้อนจากการเชื่อมของแนวถัดมาเกิดแรงดึงหดตัวมากขึ้น เนื้อเชื่อมที่น้อยไม่สามารถรับแรงต้านได้จึงเกิดการแตกร้าวขึ้นด้านล่าง รูปแบบกลไกของการเกิดรอยแตกร้าวแบบนี้จะเรียกกันว่า “Full centerline”

สำหรับกรณีที่เชื่อมโลหะต่างชนิดกัน (Dissimilar welding) มีโอกาสที่อาจจะไม่เกิดตรงกึ่งกลางของแนวเชื่อม ขึ้นอยู่กับว่าด้านใดของโลหะหลักจะต้านแรงเค้นดึงของการหดตัวได้มากกว่ากัน ซึ่งมีปัจจัยทางด้านโลหะวิทยาเชื่อม เช่น ชนิดของโลหะเชื่อม การแข็งตัว ส่วนผสมทางเคมี ขนาดความหนา การระบายความร้อน และการออกแบบรอยต่อ เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างผลการวิจัยทดลองเชื่อมโลหะอลูมิเนียมผสมต่างเกรดกัน ระหว่าง AL7075 ที่เหมาะกับงานโครงสร้างเครื่องบิน กับ

AL6061 ที่ออกแบบมาสำหรับงานยานยนต์ โดยใช้ลวดเชื่อมต่างชนิดกัน พบว่าเกิดการแตกร้าวขึ้น ซึ่งไม่เกิดตรงกึ่งกลาง แต่เกิดในพื้นที่ฝั่งของโลหะอลูมิเนียมเกรด AL6061 ดังแสดงในรูปที่ 8.15



(ก) การแตกร้าวแนวยาวบนโลหะหลัก



(ข) การแตกร้าวแนวยาวบนแนวเชื่อม

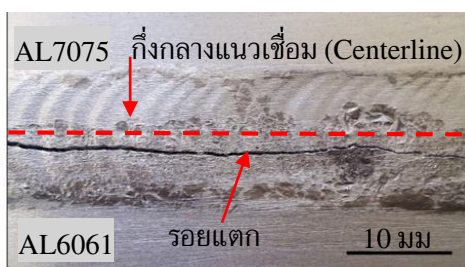
รูปที่ 8.13 ตัวอย่างชิ้นงานเชื่อมที่เกิดการแตกร้าวแบบตามยาวบนโลหะหลัก และบนแนวเชื่อม

ที่มา : *Welding Answers : Why welds crack, 2009*

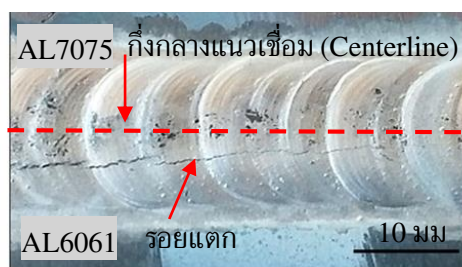


รูปที่ 8.14 แสดงทิศทางการเกิดร้าวที่เกิดขึ้นตามทิศทางการรีดขึ้นรูป

ที่มา : *Matt Kerster in Metals : Metal grain direction, 2012*



(ก) เชื่อมด้วยลวด AA7075



(ข) เชื่อมด้วยลวด ER5356

รูปที่ 8.15 รอยแตกงานเชื่อมโลหะอลูมิเนียมผสม 7075 ด้วยลวดเชื่อมต่างชนิดกัน

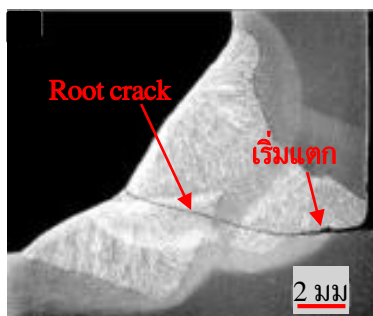
ที่มา : *Nature Communications Vol. 10.1038 : S41467-018-07989-y, 2019*

สำหรับการป้องกันการแตกร้าวในแนวยาวตรงกึ่งกลางแนวเชื่อมนี้ ประเด็นสำคัญคือการหาวิธีการที่จะลดหรือขจัดแรงเค้นดึงที่เกิดจากการหดตัวให้หายไป หรือยอมให้มีน้อยที่สุดซึ่งมีเทคนิคที่

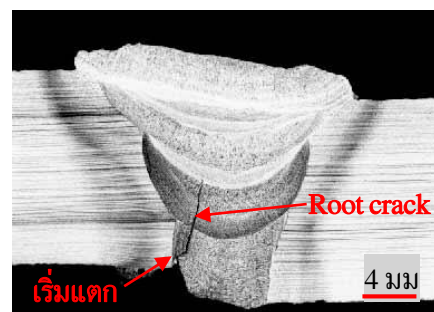
หลากหลายที่สามารถทำได้ เช่น การอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมเพื่อลดช่องว่างความแตกต่างของอุณหภูมิที่โลหะหลักและที่บ่อหลอมละลาย ส่วนในกรณีที่เชื่อมโลหะต่างชนิดจะต้องหาวิธีการที่จะทำให้โลหะทั้งคู่มีอัตราการเย็นตัวที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด เช่น การเอียงหัวเชื่อมเพื่อให้บ่อหลอมละลายสมดุลทั้งสองข้าง เมื่อเย็นตัวจะสมดุลแรงเค้นในแนวเชื่อม หรือการสร้างอุปกรณ์เสริม เช่น ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบแก๊สหล่อเย็น เพื่อควบคุมอัตราการระบายความร้อนกรณีที่เชื่อมโลหะต่างชนิดที่มีสมบัติการเป็นตัวนำความร้อนที่ต่างกัน เป็นต้น สำหรับการแตกร้าวที่แนวราก (Root) จะต้องเลือกใช้ลวดที่มีขนาดโตมากพอที่จะมีเนื้อเชื่อมรองรับการเชื่อมแนวถัดไปได้ นอกจากนี้ที่กล่าวมายังมีปัจจัยของการเชื่อมซึ่งถือว่าสำคัญที่ต้องกำหนดให้ถูกต้องทั้ง กระแสไฟเชื่อม ความเร็วเชื่อม ระยะอาร์ก แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม ลวดเชื่อมและปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น สำหรับวิธีการตรวจสอบรอยแตกร้าวบนแนวเชื่อมที่มีลักษณะของรอยแตกที่เป็นเส้นตรงตามแนวยาว จะตรวจและวิเคราะห์ได้ไม่ยาก โดยเฉพาะกรณีที่เป็ รอยแตกแบบผิวเปิดออกสู่ภายนอกสามารถเลือกใช้ได้หลายวิธี ทั้ง VT PT และ MT เป็นต้น

6. การแตกร้าวที่รากและขอบแนวเชื่อม (Root and toe crack) การแตกร้าวของทั้งสองลักษณะนี้เกิดขึ้นที่บริเวณด้านล่างหรือด้านใต้ของรอยเชื่อม โดยมีกลไกของการเกิดที่เหมือนกัน คือ จุดเริ่มต้นของรอยร้าวจะอยู่ที่ตำแหน่งขอบรอยต่อระหว่างแนวเชื่อม (Weld metal) กับโลหะหลัก (Base metal) ซึ่งการแตกร้าวที่รากและที่ขอบหรือตีนของแนวเชื่อมนี้สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งการเชื่อมต่อบนต่อชน (Butt joint) และแบบต่อมุม (Fillet joint) และมักเกิดกับแนวเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมเสร็จสิ้นมาแล้วหลายชั่วโมงหรือหลายวัน ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของการแตกร้าวแบบเย็น (Cold crack) โดยจะได้กล่าวในรายละเอียดของการแตกร้าวทั้งสองลักษณะดังต่อไปนี้

● การแตกร้าวที่รากของแนวเชื่อม (Root crack) เป็นการแตกร้าวที่สามารถพบได้ทั้งการเชื่อมที่ออกแบบรอยต่อแบบต่อมุมและแบบต่อชน ดังแสดงในรูปที่ 8.16 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยส่วนใหญ่ที่พบมักจะเป็นการแตกที่เกิดขึ้นหลังจากที่เชื่อมชิ้นงานเสร็จสิ้นแล้วเป็นเวลานาน บางรอยแตกใช้เวลา



(ก) รอยแตกแบบต่อมุม (Fillet joint)

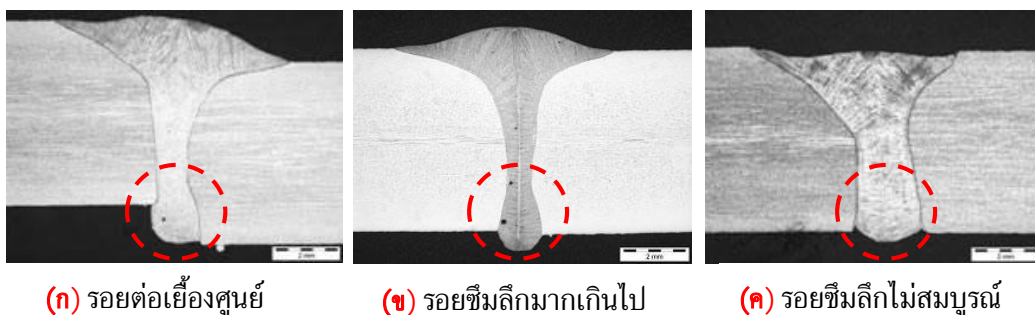


(ข) รอยแตกแบบต่อชน (Butt joint)

รูปที่ 8.16 รอยแตกร้าวที่รากแนวเชื่อมของการเชื่อมแบบต่อมุมกับการเชื่อมแบบต่อชน

ที่มา : ALTAIR – Weld Structures, 2011

หลายสัปดาห์หรือหลายเดือน จึงจัดอยู่ในกลุ่มของการแตกแบบเย็น แต่อาจมีบ้างในบางครั้งที่อาจพบรอยแตกลักษณะนี้ที่เกิดการแตกขณะที่ชิ้นงานกำลังเย็นตัวที่เรียกว่า “การแตกร้อน” ที่เกิดจากความผิดปกติของการออกแบบรอยต่อเป็นสำคัญ เช่น การออกแบบรอยต่อที่เกิดการเยื้องศูนย์ของรอยต่อ (Misalignment) แล้วเกิดการบิดตัวอย่างรุนแรง หรือเกิดจากส่วนของแนวเชื่อมลึกที่เกินออกไปมากจนเกิดชอกมุมแหลมขึ้น (Excess penetration) หรือเกิดจากแนวเชื่อมรากเชื่อมลึกไม่สมบูรณ์ (Incomplete root penetration) ดังแสดงในรูปที่ 8.17 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ เป็นต้น อย่างไรก็ตามกลไกการแตกร้าวที่รากของแนวเชื่อมนี้จะคล้ายกันหรือเหมือนกันก็ว่าได้ กล่าวคือ เริ่มต้นแตกที่ขอบหรือมุมด้านล่างของรอยต่อซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความเค้นสูงสุด (Stress concentration) หรือที่เข้าใจกันง่าย ๆ ว่าเป็นบริเวณที่มีมุมแหลม ๆ หรือชอกเล็ก ๆ นั้นเอง จากนั้นแตกรอยร้าวก็ลุกลามเข้าไปในเนื้อเชื่อมจนเกิดความแตกหักในที่สุด (Fracture)



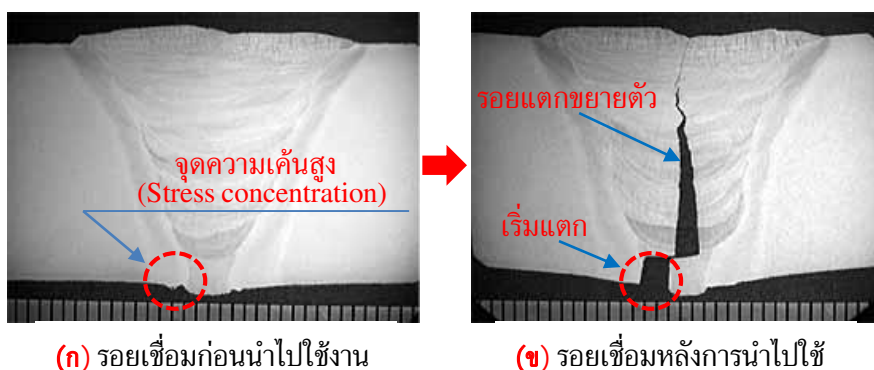
รูปที่ 8.17 ลักษณะของรอยต่อที่มีความไวต่อการเริ่มต้นแตกร้าวที่รากแนวเชื่อม

ที่มา : TWI-Increasing the tolerance to Fit-Up gap, 2012

การแตกร้าวที่รากของแนวเชื่อมส่วนใหญ่เป็นรูปแบบของการแตกร้าวขณะชิ้นงานเย็น หรือแตกแบบเย็น (Cold crack) ซึ่งจากการศึกษารวบรวมผลของทดลองวิจัยพบว่า เกิดจากเหตุร่วมของ 3 ประการหลักที่สำคัญ ประการแรก เกิดจากความบกพร่องของการออกแบบรอยต่อและแนวเชื่อม ประการที่สอง เกิดจากภาระโหลดที่ได้รับ และประการที่สาม เกิดจากอิทธิพลของแก๊สไฮโดรเจนที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อเชื่อมซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญมาก ด้วยเพราะแก๊สไฮโดรเจนจะแพร่ซึมเข้ามารวมตัวกันจนเกิดเป็นแรงดันแก๊สภายใน ผ่นวกกับอีกสองประการที่กล่าวมาทำให้เริ่มเกิดการแตกร้าวขึ้นและแตกหักเสียหาย ดังแสดงตัวอย่างการเกิดและขยายตัวของรอยแตกที่ลุกลามเข้าสู่เนื้อเชื่อมในการเชื่อมเหล็กกล้าผสมสูง (High alloy steel) หลังจากการนำไปรับภาระโหลดมา โดยเปรียบเทียบกับแนวเชื่อมก่อนและหลังการนำไปใช้งานจนเกิดความเสียหาย ในรูปที่ 8.18 (ก) และ (ข)

การควบคุมปัจจัยหรือเลือกใช้เทคนิคการเชื่อมที่เหมาะสมจะช่วยลดการแตกร้าวที่เกิดที่แนวรากได้เป็นอย่างดี ด้วยเพราะตัวการที่ทำให้เริ่มเกิดรอยร้าวมาจากความไม่สมบูรณ์ของการเชื่อม ดังนั้น ถ้าสามารถควบคุมการเชื่อมให้ได้แนวเชื่อมที่สมบูรณ์จะลดหรือขจัดปัญหาการแตกร้าวได้ ซึ่งปัจจัยหรือ

เทคนิคการเชื่อมที่สับคั่นและรวบรวมได้พอจะสรุปได้ดังแสดงใน **ตารางที่ 8.2** หรือเทคนิคการลดความไม่สมบูรณ์ของแนวรากด้วยวิธีการใช้แผ่นรองหลัง (Backing strip/Backing bar) ก่อนการเชื่อม



รูปที่ 8.18 การเกิดและการขยายตัวของการแตกร้าวที่รากแนวเชื่อม

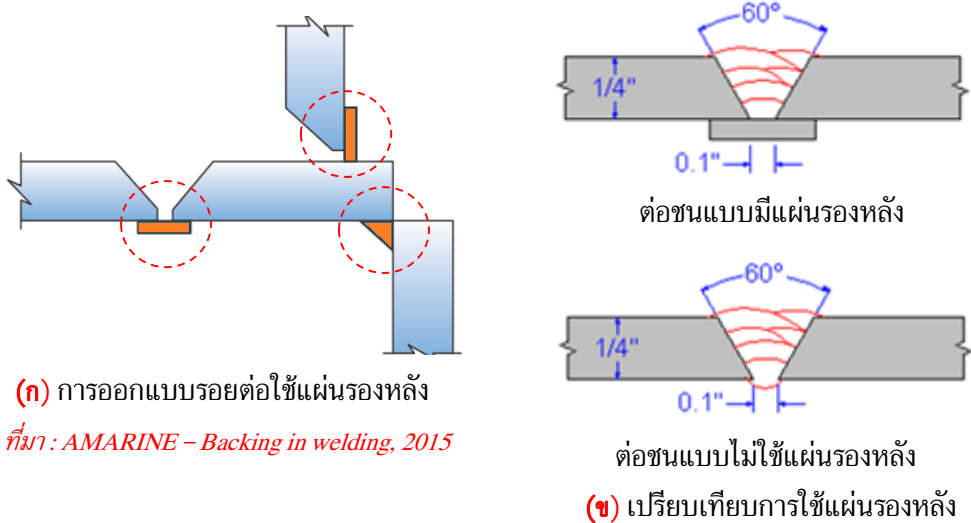
ที่มา : TWI-Strain and sulfide stress cracking in pipeline girth welds, 2005

ตารางที่ 8.2 ปัจจัยหรือเทคนิคการป้องกันการแตกร้าวที่รากของแนวเชื่อม (Root weld)

ที่มา : KOBELCO-Cold cracks in weld metal, 2008

| ปัจจัยหรือเทคนิคการเชื่อม | จุดประสงค์ |
|---|--|
| ● การอุ่นโลหะชิ้นงานก่อนเชื่อม (Pre-heat of base metals) | เพื่อให้อัตราเย็นตัวที่ช้า ช่วยลดแรงเค้นจากการหดตัวของแนวเชื่อมเย็นตัว |
| ● รักษาอุณหภูมิระหว่างแนวเชื่อม (Inter-pass temperature of welding) | เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้แตกต่างกันน้อย ช่วยรักษาสมดุลแรงเค้นที่เกิดขึ้นภายใน |
| ● การอุ่นแนวเชื่อมหลังการเชื่อม (Post-heat of weld metal) | เพื่อให้แก๊สไฮโดรเจนแพร่ออกจากเนื้อเชื่อมและคลายความเครียดของแนวเชื่อม |
| ● เลือกใช้ขบวนการเชื่อมที่ลดไฮโดรเจนได้ดี (Selected welding process) | เลือกใช้ TIG แทน MMAW ที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันแก๊สได้ดีกว่า |
| ● เลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีไฮโดรเจนต่ำหรือต้องผ่านการอบ (Selected of consumable) | เพื่อลดปริมาณไฮโดรเจนที่จะเข้าไปรวมอยู่ในแนวเชื่อม ซึ่งเข้าไปด้วยโดยตรงในเนื้อเชื่อม |
| ● เลือกใช้แก๊สปกคลุมที่มีความชื้นต่ำ (Selected of shielding gases) | เพื่อขจัดหรือลดโอกาสที่แก๊สไฮโดรเจนจะเข้าไปรวมตัวกับน้ำโลหะขณะแข็งตัว |
| ● ออกแบบรอยต่อที่ลดมุมแหลมหรือซอกเล็ก ๆ (Design of weld joint) | เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดจุดรวมความเค้นสะสมที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งของรอยเชื่อม |
| ● เลือกใช้วิธีทางความร้อนเพื่อลดความเค้นตกค้าง (Heat treatment weld metal) | เพื่อใช้ความร้อนไปช่วยลดหรือขจัดความเค้นที่ตกค้างในโครงสร้างของเนื้อเชื่อม |

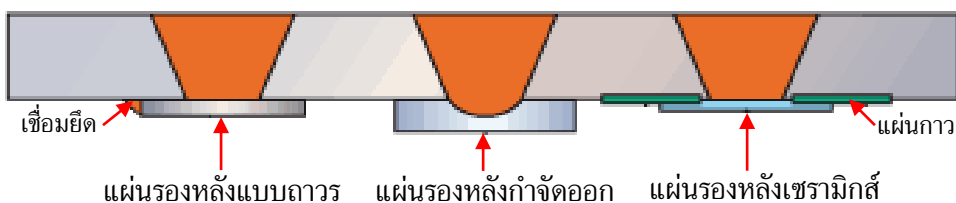
ซึ่งจะได้แนวเชื่อมที่หลีกเลี่ยงจุดบกพร่องที่เป็นมุมแหลมอันจะก่อให้เกิดความเค้นสูง ดังแสดงตัวอย่างการออกแบบแผ่นรองหลังของการเชื่อมในแบบรอยต่อต่าง ๆ ในรูปที่ 8.19 (ก) และรูป (ข) แสดงตัวอย่างเปรียบเทียบด้านราก (Root) ของการออกแบบต่อชนที่ใช้กับไม่ใช่แผ่นรองหลัง



ที่มา : Upright welding inspection considerations, 2010

รูปที่ 8.19 การใช้เทคนิคแผ่นรองหลังเพื่อลดความไม่สมบูรณ์ด้านรากของแนวเชื่อม

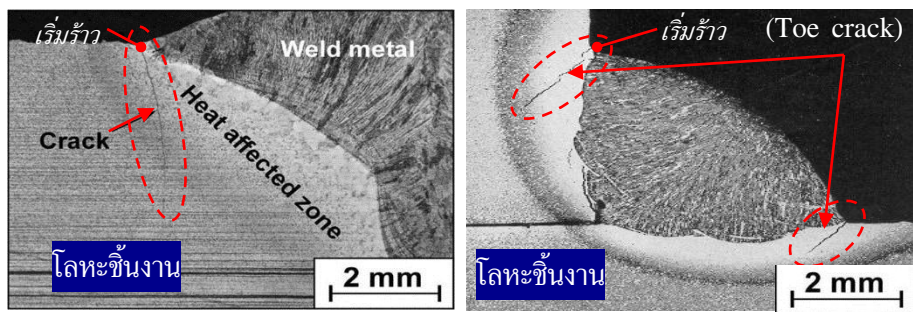
เทคนิคการใช้แผ่นรองหลังที่นิยมใช้กันมีสามแบบ ดังแสดงในรูปที่ 8.20 แบบแรกจะเป็นแผ่นรองหลังแบบถาวรที่หลอมละลายกลายเป็นแนวเชื่อมไม่มีการกำจัดออก จะนิยมใช้วัสดุชนิดเดียวกันกับงานที่เชื่อม แบบที่สองจะเป็นแผ่นรองหลังกำจัดออก จะนิยมใช้กับการเชื่อมงานที่หนาต้องการแนวเชื่อมลึกที่มาก แบบนี้จะใช้วัสดุรองหลังที่หนาเพื่อรองรับน้ำโลหะของบ่อหลอมละลายและแผ่นรองก็เกิดการหลอมละลายบางส่วน โดยหลังจากเชื่อมเสร็จจะต้องมีการกำจัดออกจากแนวเชื่อม ส่วนแบบที่สามเป็นแบบกำจัดออกเช่นกันแต่แผ่นรองไม่เกิดการหลอมละลาย โดยจะใช้วัสดุชนิดเซรามิกส์ที่ไม่หลอมละลายติดกับแนวเชื่อม (Non-melting) การใช้แผ่นรองหลังทั้งสามแบบนี้มีประโยชน์มากสำหรับการเชื่อมโลหะที่มีความหนาและมีร่องบากที่กว้างมาก และขจัดปัญหาความไม่สมบูรณ์ของแนวเชื่อมด้านรากได้ค่อนข้างดี โดยเฉพาะการลดความเค้นที่เป็นต้นเหตุหลักของการแตกร้าวที่ด้านรากของแนวเชื่อม



รูปที่ 8.20 ชนิดของการเลือกใช้แผ่นรองหลังการเชื่อม (Backing strip)

ที่มา : AMARINE – Backing in welding, 2015

● การแตกร้าวที่ขอบของแนวเชื่อม (Toe crack) เป็นรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหน้าของแนวเชื่อม (Face side) มีโอกาสเกิดขึ้นได้เสมอของการเชื่อมตอทั้งแบบตอชน (Butt joint) และแบบตอมุม (Fillet joint) ดังแสดงลักษณะของรอยแตกของทั้งสองแบบของการตอ ในรูปที่ 8.21(ก) และ (ข) ตามลำดับ แต่ส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นกับการเชื่อมแบบตอมุมมากกว่า รูปแบบของรอยแตกจะเป็นแบบข้อบกพร่องภายนอกที่สามารถสังเกตเห็นด้วยสายตาหรือแว่นขยาย และเกิดที่ตำแหน่งขอบของรอยเชื่อมที่เป็นรอยต่อระหว่างเนื้อโลหะเชื่อมกับเนื้อโลหะหลัก ซึ่งมักเป็นอาณานิคมของผลกระทบร้อน (HAZ) รอยแตกร้าวจะเริ่มต้นที่ผิวภายนอกจากนั้นก็ลุกลามเข้าไปข้างในเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่องจนกว่าจะเกิดการแตกหักในที่สุด อ้างอิงจากข้อมูลการวิเคราะห์ของ Sandeep Anand (2017)



(ก) รอยแตกขอบของรอยตอชน (Butt joint) (ข) รอยแตกขอบของรอยตอมุม (Fillet joint)

รูปที่ 8.21 รอยแตกร้าวที่ขอบของแนวเชื่อม (Toe crack)

ที่มา : AMARINE – Backing in welding, 2015

การแตกหักที่ขอบของรอยเชื่อมนี้เกิดขึ้นได้ง่ายกับการเชื่อมตอแบบที่ตอเป็นตัว T โดยรอยแตกจะเกิดที่ขอบของแนวเชื่อม ซึ่งบางครั้งอาจเรียกว่า “ตีนของรอยเชื่อม (Toe weld)” สาเหตุสำคัญของการแตกเกิดจากความอ่อนแอของโครงสร้างที่บริเวณผลกระทบร้อน ที่เมื่อมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมาสะสมอยู่บริเวณส่วนของก้อนเกรนที่มีขนาดใหญ่ (Grain coarsened) ร่วมกับความเค้นดึงที่ตกค้างอยู่ภายในจากการเย็นตัว โดยพบว่ารอยแตกลักษณะนี้มีโอกาสที่จะเกิดขึ้นที่ขอบข้างเดียว (Single toe crack) หรืออาจเกิดขึ้นทั้งสองข้างของขอบรอยเชื่อม โดยขึ้นอยู่กับทิศทางของแรงเค้นและภาระโหลดที่ได้รับจากการใช้งาน ดังแสดงผลการวิจัยทดสอบหาโอกาสของการเกิดรอยแตกร้าวด้วยวิธี Fatigue bending test โดยพบว่ารอยแตกร้าวที่ขอบนี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้แตกต่างกัน เมื่อทิศทางของการรับแรงที่กระทำแตกต่างกัน ดังแสดงเปรียบเทียบผลการทดสอบ ในรูปที่ 8.22 โดยรูป (ก) เป็นแนวเชื่อมที่สมบูรณ์หลังการเชื่อมเสร็จสิ้นจะปราศจากรอยแตกร้าว รูป (ข) ผลการทดสอบที่เกิดการแตกร้าวเพียงด้านเดียว และ รูป (ค) เป็นผลการทดสอบที่เกิดการแตกร้าวทั้งสองด้านของขอบแนวเชื่อม สำหรับสาเหตุอื่น ๆ ที่ร่วมด้วยจะเหมือนกับกลไกการแตกร้าวที่รากของแนวเชื่อม (Root crack) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

การควบคุมความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมบริเวณขอบผิวด้านบนมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพราะเป็นตำแหน่งเริ่มต้นของการเกิดรอยร้าว ซึ่งถ้าผิวหน้ารอยเชื่อม (Face weld) เกิดมีขอบหรือมีมุมแหลม ๆ ที่เป็นจุดสะสมความเค้น (Stress concentration) ก็จะส่งเสริมให้เกิดการเริ่มแตกร้าวได้ง่าย ดังแสดงใน **รูปที่ 8.23** ที่เป็นข้อบกพร่องที่จะต้องไม่เกิดขึ้น หรือถ้าเกิดขึ้นแล้วก็ต้องซ่อมแซมให้หายไป ดังนั้น การสร้างแนวเชื่อมที่มีความสม่ำเสมอของผิวหน้าหรือปราศจากข้อบกพร่องใด ๆ ก็เป็นลดโอกาสของการแตกร้าวที่ตำแหน่งขอบของแนวเชื่อมนี้ได้ ซึ่งอ้างอิงผลการทดลองของ Minhaj M. Alam et al. (2009)



(ก) รอยเชื่อมสมบูรณ์

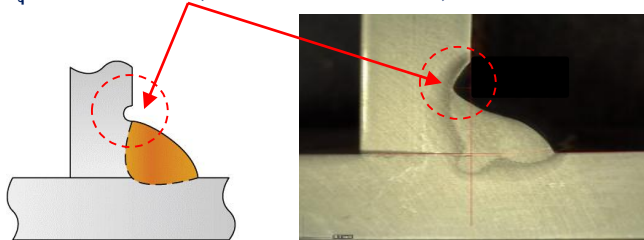
(ข) รอยเชื่อมแตกข้างเดียว

(ค) รอยเชื่อมแตกสองข้าง

รูปที่ 8.22 แสดงลักษณะของการเกิดรอยแตกที่ขอบของแนวเชื่อม (Toe crack)

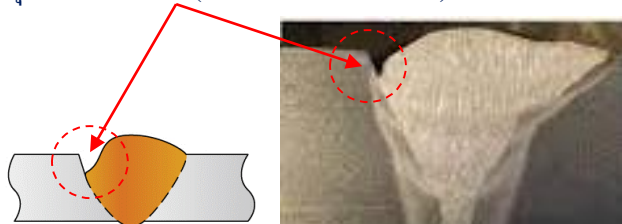
ที่มา : Journal of Materials Science, ID 43268653, 2009

จุดรวมความเค้น (Stress concentration)



(ก) ข้อบกพร่องที่ขอบรอยเชื่อมต่อมุม

จุดรวมความเค้น (Stress concentration)

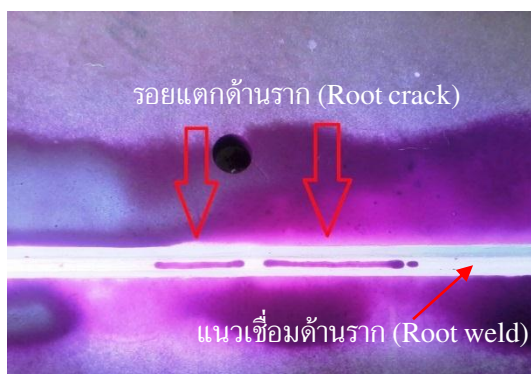


(ข) ข้อบกพร่องที่ขอบรอยเชื่อมต่อชน

รูปที่ 8.23 ข้อบกพร่องบนผิวหน้าแนวเชื่อมที่เป็นจุดรวมความเค้นสูง และเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกร้าวที่ขอบของแนวเชื่อม (Toe crack)

ที่มา : Automated Welding Basics, 2011

การตรวจสอบรอยแตกร้าวของแนวเชื่อม สำหรับรอยแตกร้าวที่เกิดบริเวณราก (Root crack) และรอยแตกร้าวที่เกิดบริเวณขอบ (Toe crack) ของแนวเชื่อมนั้นจะมีวิธีการตรวจสอบที่เหมือนกัน เพราะมีรูปแบบของการแตกที่คล้ายกันมากเพียงอยู่ในตำแหน่งที่เกิดต่างกัน โดยมีลักษณะของรอยแตกเป็นแบบผิวเปิด (External crack) ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยสายตาหรืออาจใช้เครื่องมือช่วยขยายกรณีที่ย่อยแตกมีขนาดเล็กสามารถเลือกใช้วิธีการตรวจสอบแบบ VT หรือ PT หรือ MT เพื่อตรวจสอบในแนวยาวของรอยแตก ส่วนในแนวลึกเข้าไปในเนื้อเชื่อมไม่ว่าจะเป็นรอยแตกที่รากหรือที่ขอบจะต้องใช้วิธีการตรวจสอบแบบ UT หรือ RT เข้ามาพิจารณาผลร่วมกัน ดังแสดงเป็นตัวอย่างของการตรวจสอบด้วยวิธี PT ของรอยแตกที่เกิดบริเวณด้านรากและเกิดที่บริเวณขอบด้านบนของแนวเชื่อม ในรูปที่ 8.24 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) รอยแตกร้าวที่ด้านรากแนวเชื่อม

ที่มา: *Welding & NDT, 2017*



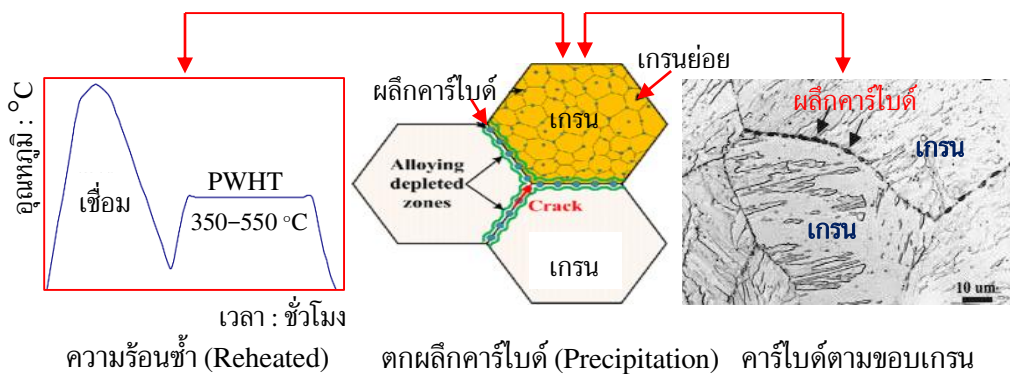
(ข) รอยแตกร้าวที่ขอบแนวเชื่อม

ที่มา: *Qnet-Dye Penetrant Testing, 2013*

รูปที่ 8.24 ตัวอย่างการตรวจสอบรอยแตกที่ด้านรากและบริเวณที่ขอบแนวเชื่อมด้วยวิธี PT

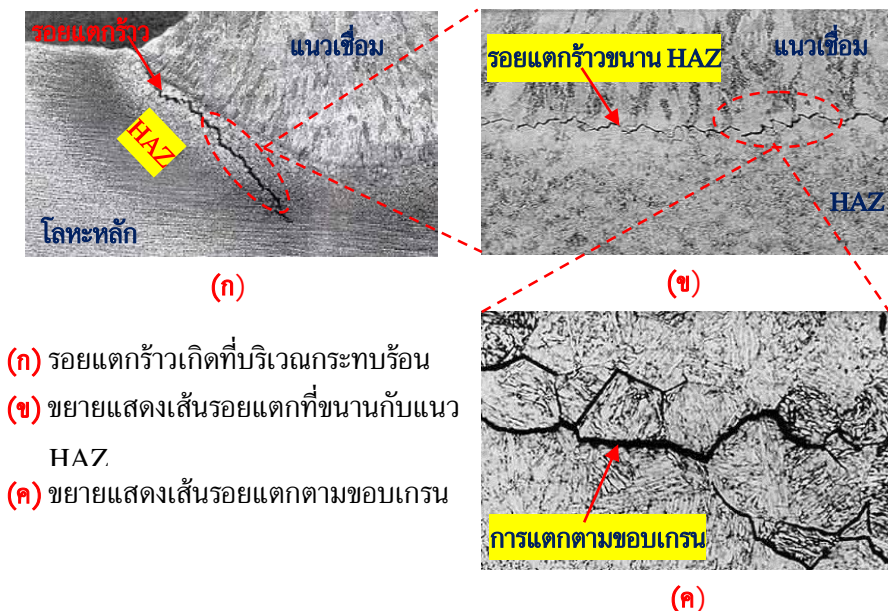
7. การแตกร้าวเมื่อได้รับความร้อนซ้ำ (Reheat crack) เป็นการแตกร้าวที่เกิดจากการที่แนวเชื่อมได้รับอิทธิพลของความร้อนอีกครั้งหลังการเชื่อมเสร็จสิ้น เช่น จากการอุ่นชิ้นงานหลังการเชื่อม (Post weld heat treatment : PWHT) หรือการอบคลายความเครียด (Stress relief annealing) ของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก หรือวิธีการทางความร้อนอื่น ๆ ที่นำความร้อนไปกระทำต่อแนวเชื่อมหลังการเชื่อม เป็นต้น การแตกร้าวในลักษณะนี้จะเกิดกับการเชื่อมโลหะกลุ่มของเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (HSLA) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของธาตุโครเมียม โมลิบดีนัม วานาเดียม และนิโอเบียม ซึ่งธาตุเหล่านี้เป็นตัวส่งเสริมให้เกิดรอยร้าว กล่าวคือ เมื่อทำการเชื่อมโลหะผสมที่มีธาตุดังกล่าวผสมอยู่เสร็จสิ้นแล้วทำการให้ความร้อนหลังการเชื่อม (Reheating) ซึ่งปกติจะอยู่ที่อุณหภูมิระหว่าง 350 ถึง 550 °C ซึ่งที่ระดับอุณหภูมินี้จะเกิดการตกผลึกของธาตุผสมดังกล่าว (Precipitation) ตามบริเวณขอบเกรนและจะเกิดได้มากเมื่อเกรนมีขนาดที่หยาบหรือเกรนโต (Coarse

grained) ผลึกตามขอบเกรนจะเป็นผลึกของคาร์ไบด์ที่มีความแข็งแรงสูง จึงก่อให้เกิดรอยแตกได้ง่าย ดังแสดงกลไกการตกผลึกตามขอบเกรนในรูปที่ 8.25 ซึ่งขบวนการนี้จะเกิดขึ้นที่บริเวณผลกระทบร้อน และอาจเกิดกับการเชื่อมเสริมผิวหน้า (Cladding weld) เป็นสำคัญ จากรูปโดยลำดับกลไกของการเกิดจะเริ่มที่การนำชิ้นงานหลังการเชื่อมเสร็จไปทำการให้ความร้อน (PWHT) ซึ่งเป็นการให้ความร้อนซ้ำ ผลของความร้อนทำให้ธาตุผสมเกิดการตกผลึกเป็นคาร์ไบด์ตามขอบเกรน และเกิดได้ง่ายและปริมาณมากที่ก้อนเกรนขนาดใหญ่ ๆ โดยเฉพาะตำแหน่งที่บริเวณกระทบร้อน (HAZ) ด้วยผลึกของคาร์ไบด์ที่มีความแข็งแรงสูงมีความเหนียวต่ำ ทำให้สมบัติที่ตำแหน่งขอบเกรนต้านทานการรับแรงได้น้อยลง ดังนั้น เมื่อแนวเชื่อมมีแรงมากระทำที่ไม่ต้องมากเกินจะเกิดการแตกร้าวทันที และในรูปที่ 8.26 แสดงถึงตัวอย่าง



รูปที่ 8.25 การให้ความร้อนซ้ำและเกิดการตกผลึกของคาร์ไบด์ตามขอบเกรน

ที่มา : *Journal of Materials Engineering and Performance, Vol.23 : 1231-1239, 2014*

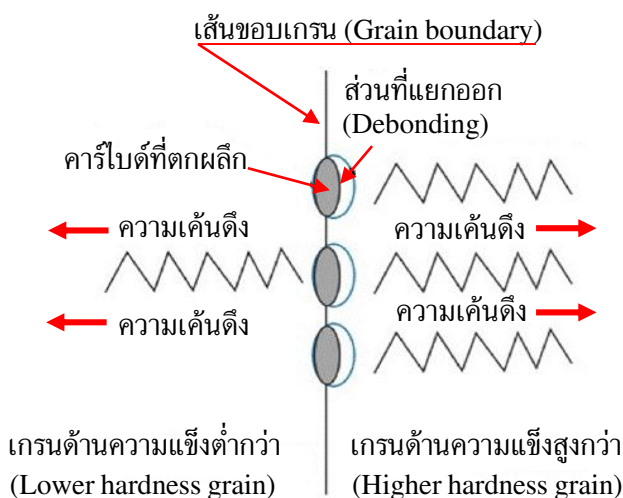


- (ก) รอยแตกร้าวเกิดที่บริเวณกระทบร้อน
- (ข) ขยายแสดงเส้นรอยแตกที่ขนานกับแนว HAZ
- (ค) ขยายแสดงเส้นรอยแตกตามขอบเกรน

รูปที่ 8.26 ตำแหน่งการเกิดและกลไกของการแตกร้าวตามขอบเกรนจากการให้ความร้อนซ้ำ

ที่มา : *TWI-Defects/Imperfections in welds-Reheat cracking, Vol.23 : 1231-1239, 2011*

ของการเกิดการแตกร้าวจากการให้ความร้อนซ้ำของชิ้นงานแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก พบว่าการแตกร้าวจะเริ่มเกิดที่ขอบด้านหน้าของแนวเชื่อม (Face weld) ตรงบริเวณเส้นหลอมละลาย (Fusion line) จากนั้นลุกลามเข้ามาภายใน **ดั่งรูป (ก)** โดยเป็นที่น่าสนใจว่ารอยแตกจะร้าวมาในทิศทางที่ขนานกับบริเวณของผลกระทบร้อน **ดั่งรูป (ข)** ซึ่งมีลักษณะของการแตกเป็นแบบซิกแซกไปตามขอบของก้อนเกรน (Grain boundary) จะเรียกรูปแบบของการแตกร้าวนี้ว่า “การแตกตามขอบเกรน (Intergranular crack)” ดังแสดงใน **รูป (ค)** ที่เป็นผลกระทบมาจากอิทธิพลของคาร์ไบด์ที่มีพฤติกรรมชอบตกผลึกอยู่ตามขอบเกรนจากการอุ่นชิ้นงานหลังการเชื่อม (PWHT) ที่เรียกกลไกของการเกิดการแตกร้าวแบบนี้ว่า “การแตกจากการให้ความร้อนซ้ำ (Reheat crack)” ซึ่งจากคำอธิบายถึงขบวนการของการเกิดรอยแตกร้าวที่เกิดจากการให้ความร้อนซ้ำนั้น สามารถที่จะเขียนเป็นแผนภาพกลไกของการแตกร้าวตามขอบเกรนได้ดังแสดงใน **รูปที่ 8.27**



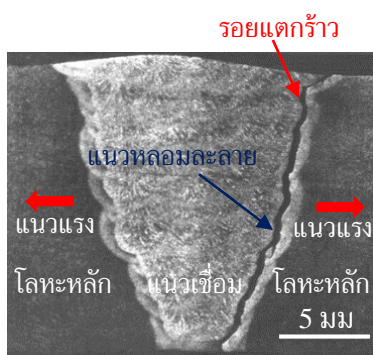
รูปที่ 8.27 กลไกของการแตกร้าวตามขอบเกรนจากการให้ความร้อนซ้ำบนแนวเชื่อม (Mechanism of reheat cracking)
ที่มา : *Korean Journal Metals and Materials, Vol.56, No.8 : 580-588, 2018*

รูปแบบการแตกร้าวในลักษณะนี้จะสามารถพบได้บ่อยในปัญหาของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก (ซีรีย์ 300) ทั้งหมด อาจรวมไปถึงกลุ่มของดูเพล็กซ์ (Duplex stainless steels) ด้วย เหตุเพราะโลหะเหล็กกล้าผสมกลุ่มนี้มีโครงสร้างพื้นเป็นเฟสออสเทนไนต์ (Austenite matrix) เมื่อนำไปเชื่อม ความร้อนที่ช่วง ๆ บ่อหลอมละลายที่มีความร้อนสูง เมื่อเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะเกิดเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ หรือเบนไนต์โดยอัตโนมัติ ซึ่งมีความแข็งสูงเกิดที่บริเวณกระทบร้อน เป็นปัญหาของสมบัติทางกลและประจวบเหมาะที่โดยพื้นฐานเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีสมบัติด้านความเหนียวจากการคืบตัวที่อุณหภูมิสูงได้ไม่ดี (Creep ductility) จึงต้องนำไปผ่านขบวนการทางความร้อนเพื่อต้องการคลายความแข็งของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ให้ลดลงลง ที่เรียกว่า “Solution annealing process” แต่พบว่าเกิดผลกระทบข้างเคียงที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการแตกร้าว จากการให้ความร้อนซ้ำได้ ซึ่งเป็นปัญหาที่ช่างเชื่อมต้องระมัดระวังและต้องควบคุมขบวนการทางความร้อนอย่างดี

การป้องกันและการตรวจสอบรอยแตกร้าว สำหรับแนวทางการป้องกันประการแรก ถ้าช่างเชื่อมสามารถเลือกได้วัสดุเชื่อมได้ จะต้องทำการเลือกวัสดุโลหะที่มีส่วนผสมของธาตุที่มีความไวต่อการตกผลึกเป็นคาร์ไบด์ตามขอบเกรนให้ผสมอยู่น้อยที่สุดจำพวก Cr Mo V และ Nb เป็นต้น ประเด็นถัดมาจะเป็นเรื่องของ การควบคุมปัจจัยการเชื่อมให้ได้แนวเชื่อมที่สมบูรณ์ ไม่ให้เกิดข้อบกพร่องที่เป็นจุดความเค้นสูงสุดขึ้นโดยเฉพาะที่ขอบของแนวเชื่อมด้านบน (Toe weld) และในระดับโครงสร้างจุลภาค จะต้องควบคุมความร้อนในการเชื่อม (Heat input) ที่จะไปช่วยลดโอกาสที่ทำให้เกิดเกรนขนาดใหญ่ ขนาดที่บริเวณของ HAZ และประเด็นที่มีผลโดยตรงคือ วิธีการให้ความร้อนซ้ำ (PWHT) โดยใช้เทคนิคการป้อนความร้อนที่ระดับของอุณหภูมิต่ำ ๆ และ ช้า ๆ ในช่วงตอนแรก (First step) จากนั้นค่อยเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว (Second step) เพื่อเจตนาหลีกเลี่ยงช่วงอุณหภูมิวิกฤติที่จะเกิดกับวัสดุ (ยอมให้เกิดได้น้อยที่สุด) จากนั้นจะต้องรักษาระดับของอุณหภูมิความร้อนให้ลดต่ำลงอย่างสม่ำเสมอ จนถึงอุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตาม ในขณะที่แช่ไว้ที่อุณหภูมิสูงนั้นก็ต้องรักษาระดับของอุณหภูมิสูงสุดไว้ให้คงที่ ซึ่งต้องไม่สูงมากเกินไปที่จะไปส่งเสริมให้เกิดการแพร่ของคาร์ไบด์ไปตกผลึกยังขอบเกรนได้ง่ายขึ้น สำหรับการตรวจสอบรอยแตกร้าวค่อนข้างทำได้ง่าย เพราะเป็นรอยแตกร้าวแบบผิวเปิด และมีตำแหน่งกับทิศทางการแตกร้าวที่ชัดเจนไม่ซับซ้อน ส่วนใหญ่สามารถมองเห็นจากสายตาหรือเครื่องมือที่เพิ่มกำลังขยาย ส่วนระดับของความลึกของรอยแตกเข้าไปในเนื้อเชื่อมต้องใช้วิธีการตรวจสอบวิธีในแนวลึก ซึ่งในทางปฏิบัติจำเป็นต้องใช้วิธีการตรวจสอบหลายวิธีร่วมกัน ได้แก่ วิธีการตรวจสอบแบบ VT, PT, MT ร่วมกับ UT และ RT เป็นต้น

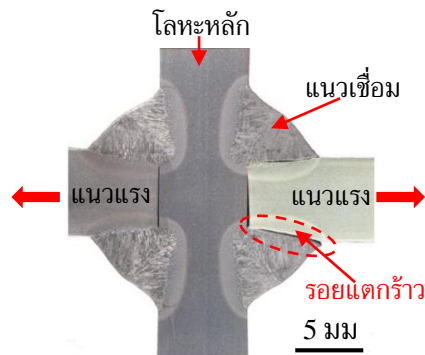
8. การแตกร้าวแนวหลอมละลาย (Fusion line crack)/(Weld interface crack) เป็นลักษณะรูปแบบของการแตกร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณแนวรอยต่อระหว่างส่วนที่หลอมละลาย (Weld pool) กับส่วนที่ไม่หลอมละลาย (Base metal) หรือที่เรียกบริเวณนี้ว่า “Interface zone” รอยแตกร้าวจะแตกเป็นเส้นตรงไปตามแนวเส้นของการหลอมละลายแนวเชื่อม รอยแตกร้าวสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งแบบเปิดที่สามารถเห็นได้จากภายนอก หรือรอยแตกที่เกิดขึ้นภายใน ดังแสดงตัวอย่างของรอยแตกร้าวใน **รูปที่ 8.28 (ก)** แสดงถึงรอยแตกร้าวที่เกิดในกรณีการเชื่อมแบบต่อชน และ **รูป (ข)** เป็นรอยแตกร้าวที่เกิดในกรณีการเชื่อมแบบมุม ต้นเหตุของการแตกร้าวในลักษณะนี้เกิดจากความอ่อนแอของโครงสร้างของแนวเชื่อมที่แตกต่างกันที่อยู่ติดกัน กล่าวคือ เป็นความแตกต่างของโครงสร้างที่เกิดขึ้นใหม่ในบ่อหลอมละลายของแนวเชื่อมกับโครงสร้างเดิมของโลหะหลัก ซึ่งเห็นได้ชัดเจนดังแสดงใน **รูปที่ 8.29** ที่เป็นแนวเส้นยาวขนานไปตามแนวเชื่อม ดังนั้น เมื่อโครงสร้างมีความแตกต่างกันจะส่งผลต่อความสามารถของสมบัติทางกล โดยเฉพาะด้านความเค้นดึงหรือความเค้นดัดจะแตกต่างกันไปด้วย เมื่อรับภาระโหลด โครงสร้างเกิดการยึดตัวได้ไม่เท่ากันจึงเกิดการฉีกของรอยต่อที่แนวหลอมละลาย จนเกิดเป็นรอยแตกร้าวขึ้น การแตกร้าวในลักษณะนี้จะพบเจอได้มากกับกรณีเป็นการเชื่อมโลหะต่างชนิด (Dissimilar welding) เพราะนอกจากจุดอ่อนแอของแนวหลอมละลายที่เป็นปกติแล้ว การใช้วัสดุโลหะต่างชนิดจะยังสร้างความแตกต่างของโครงสร้างที่แนวหลอมละลายของทั้งสองด้านของแนวหลอมละลายที่แตกต่างกัน

อีกด้วย ดังตัวอย่างการความแตกต่างของแนวเส้นหลอมละลายในการทดลองวิจัยเชื่อมโลหะต่างชนิดระหว่างเหล็กไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิค กรดซีรีย์ 200 (204Cu) กับกรดซีรีย์ 300 (304) ดังแสดงในรูปที่ 8.29 พบว่าแนวหลอมละลายด้านโลหะ 304 จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรนที่โตมากกว่าด้านโลหะ 204Cu จึงทำให้โอกาสที่จะเกิดการแตกร้าแนวหลอมละลายมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าการแตกร้าที่แนวหลอมละลายนี้ยังมักเกิดขึ้นกับการเชื่อมโลหะเพื่อเสริมผิวหน้า (Buttering welding) ดังแสดงในรูปที่ 8.30 โดยจะแตกร้าด้านที่ติดกับโลหะหลัก ซึ่งสาเหตุก็เกิดจากพฤติกรรมของการเชื่อมโลหะต่างชนิดดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งมีระดับของค่าความเค้นดึง (Stress tension) ที่เข้ามาาร่วมด้วยเนื่องจากโดยทั่วไปการเชื่อมโลหะต่างชนิดแนวเชื่อมก็จะมีอัตราการหดตัวจากการแข็งตัวที่ไม่เท่ากันหรือบางครั้งการแตกร้าในลักษณะนี้ก็สามารถพบเห็นได้จากกรณีการเชื่อมโลหะที่ต่างขนาดความหนาหรือความแตกต่างในการออกแบบเตรียมรอยบากหน้างาน เป็นต้น



(ก) รอยแตกร้าแนวหลอมละลายแบบต่อชน

ที่มา : ECCC Creep Conference. 21–23, 2009

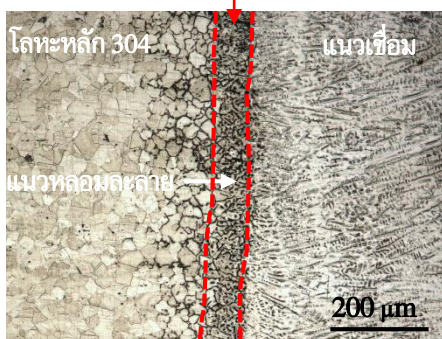


(ข) รอยแตกร้าแนวหลอมละลายแบบต่อมุม

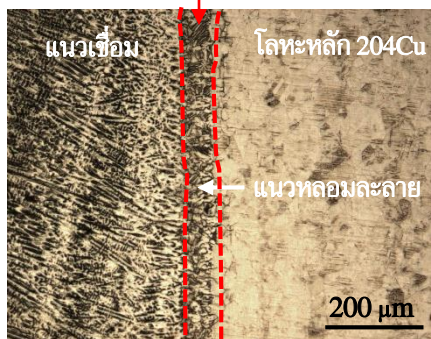
ที่มา : Welding in the world. 62:985, 2018

รูปที่ 8.28 ลักษณะของรอยแตกร้าที่เกิดขึ้นบริเวณของแนวหลอมละลาย (Fusion line crack)

แนวหลอมละลายบางส่วน (Partially zone)

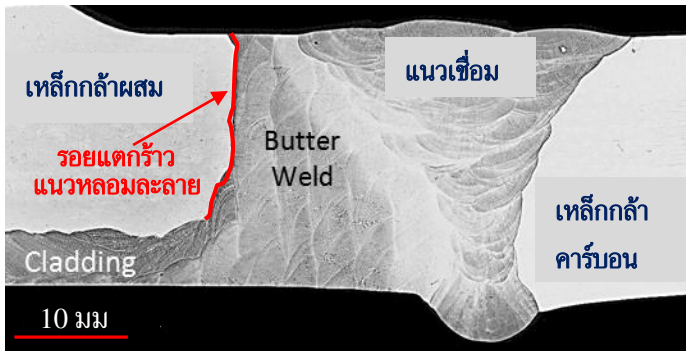


แนวหลอมละลายบางส่วน (Partially zone)



รูปที่ 8.29 ลักษณะของแนวเส้นหลอมละลาย (Fusion line) / Interface zone

ที่มา : Wichan Chuaiphan and et.al., JMR&T Vol. 9(3) : 5174–5183, 2020

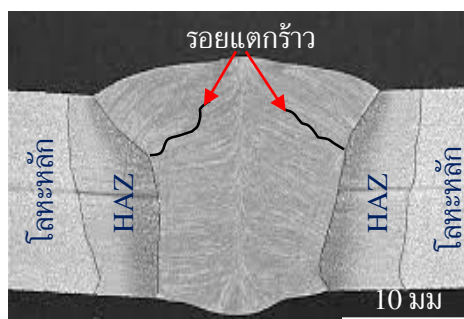
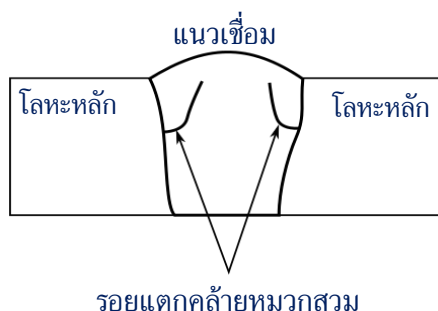


รูปที่ 8.30 ลักษณะของการแตกร้าวตามแนวเส้นหลอมละลายของการเชื่อมเสริมผิวหน้า (Buttering)
ที่มา : M.F. Dodge and H.B. Dong. Proceeding conference, ASME 31st, 2012

นอกจากรอยแตกร้าวตามแนวหลอมละลายที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น พบว่ายังมีการแตกร้าวในลักษณะที่คล้าย ๆ กันที่ก่อให้เกิดความเสียหายของแนวเชื่อม คือ การแตกร้าวที่เริ่มแตกที่บริเวณกึ่งกลางของแนวหลอมละลายแล้วลุกลามไปในทิศทางขึ้นสู่ผิวด้านบน ซึ่งรูปทรงของรอยแตกมีลักษณะคล้ายกับหมวกสวมหัวจึงเรียกรอยแตกร้าวแบบนี้ว่า “Hat cracking” หรือบางครั้งมีการเรียกรอยแตกร้าวแบบนี้ว่า “Mushroom cracking” ด้วยเพราะบางคนมองว่ามันคล้ายกับดอกเห็ด ดังแสดงรูปทรงของรอยแตกบนชิ้นงานเชื่อมในรูปที่ 8.31 รอยแตกร้าวแบบนี้สาเหตุเกิดจากความผิดพลาดของการตั้งค่าปัจจัยการเชื่อมที่กำหนดให้มีความเร็วที่สูงมากเกินไป และร่วมกับการความเร็วในการเชื่อมที่ช้าเกินไป กล่าวคือการเชื่อมที่มีอาร์คโวลต์สูงมากจะทำให้บ่อหลอมละลายที่ผิวบนกว้างมาก น้ำโลหะที่หลอมละลายจะเป็นวงกว้างแต่ไม่ลึก และถ้าเลือกใช้ความเร็วเชื่อมที่ช้าจะเกิดบ่อหลอมลึกมากขึ้น เมื่อปัจจัยทั้งสองเกิดขึ้นพร้อมกันจะทำให้ขนาดของบ่อหลอมละลายทั้งด้านบน (Face) และด้านล่าง (Root) มีขนาดใกล้เคียงกัน แต่ด้วยน้ำโลหะในบ่อหลอมด้านผิวบนระบายความร้อนได้เร็วกว่าด้านล่าง จึงแข็งตัวก่อนและอัตราการเย็นตัวก็เร็วกว่าด้านล่าง พฤติกรรมดังกล่าวจะส่งผลทำให้เกิดแรงเค้นดึงที่มีทิศทางไปสู่ด้านผิวบน รอยแตกร้าวจึงลุกลามไปสู่ด้านผิวบนของแนวเชื่อม (Face side weld) ส่วนเหตุผลที่จุดเริ่มต้นของรอยร้าวที่แนวหลอมละลายเกิดที่บริเวณกึ่งกลาง (ค่อนข้างทางด้านบน) ของความลึกแนวเชื่อม เหตุเพราะบริเวณกึ่งกลางดังกล่าวเป็นจุดแยกของทิศทางการระบายความร้อนขณะเย็นตัว กล่าวคือ บ่อหลอมครึ่งด้านบน ความร้อนจะระบายออกไปในทิศทางด้านผิวบน ส่วนครึ่งล่างของบ่อหลอมความร้อนจะระบายไปในทิศทางด้านล่าง ซึ่งทิศทางการระบายความร้อนก็จะเป็นทิศทางการเกิดแรงเค้นดึงจากการแข็งตัว นอกจากนี้ อิทธิพลของธาตุผสมที่มีความไวต่อการแตกร้าว (Crack susceptibility) ผสมอยู่มาก ได้แก่ ซัลเฟอร์ (S) ฟอสฟอรัส (P) ซิลิกอน (Si) และแมงกานีส (Mn) การแตกร้าวในลักษณะนี้จัดเป็นการแตกร้าวขณะร้อน (Hot crack) และมักจะพบในขบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (SAW) โดยเฉพาะการเชื่อมโลหะที่มีความหนาแน่นมาก ๆ เช่น ท่อขนาดใหญ่ หรือแผ่นเหล็กถึงความหนาที่หนาแน่นมาก ๆ เป็นต้น

การป้องกันและการตรวจสอบรอยแตกร้าวแนวหลอมละลายหรือแนวรอยต่อขอบเชื่อมสามารถป้องกันได้ไม่ยุ่งยากนัก เพราะปัจจัยส่งเสริมการแตกร้าวมีเพียงปัจจัยการเชื่อมเป็นสำคัญ โดยทำการ

ปรับตั้งค่าอาร์คโวลท์ (Arc voltage) ให้สัมพันธ์กับความเร็วในการเชื่อม (Welding speed) และเลือกวัสดุโลหะที่นำมาเชื่อมมีส่วนผสมของธาตุที่มีความไวต่อการแตกร้าวต่ำ ๆ ซึ่งรวมไปถึงปัจจัยในการออกแบบรอยต่อแนวเชื่อมที่ลดความเค้นดึงลงให้มาก ๆ เช่น ออกแบบรอยต่อแบบรอยบาก 2 ด้าน (Double V groove) หรือแบบรอยต่อใด ๆ ที่รักษาสมดุลแรงเค้นดึงได้ทั้งบริเวณผิวด้านบน (Face side weld) และบริเวณด้านล่างได้ (Root side weld) เป็นต้น การแตกร้าวตามแนวเส้นขอบเขตการหลอมละลายนี้สามารถเกิดได้ทั้งชนิดแตกแบบผิวเปิด (External crack) และ ชนิดแตกแบบผิวปิด (Internal crack) กรณีผิวรอยแตกเปิดสามารถพิจารณาได้จากภายนอกด้วยสายตา หรือใช้วิธีการตรวจสอบแบบ PT หรือ MT ร่วมด้วย แต่กรณีที่เกิดการแตกร้าวอยู่ภายในเป็นแบบผิวปิด โดยเฉพาะการแตกร้าวแบบ HAT จำเป็นที่จะต้องใช้วิธีการตรวจสอบแบบ RT หรือ UT ส่วนการวิเคราะห์รอยแตกร้าวไม่ยากเพราะตำแหน่งของการเกิดรอยแตกจะอยู่ตามแนวเส้นของการหลอมละลายจากการเชื่อม



(ก) รูปแบบการแตกร้าวแบบรูปทรงหมวก

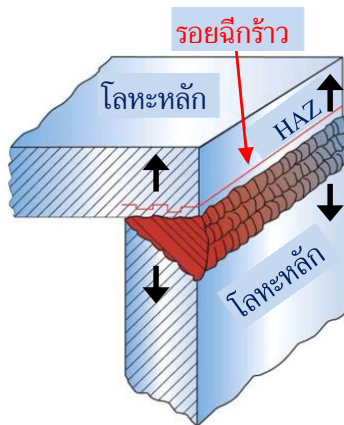
(ข) ตัวอย่างการแตกร้าวแบบรูปทรงหมวก

รูปที่ 8.31 ลักษณะและตัวอย่างการแตกร้าวแนวหลอมละลายแบบรูปทรงหมวก (HAT)

ที่มา : *Journal of Marine Engineering & Technology*, No. A18:2056–8487, 2010

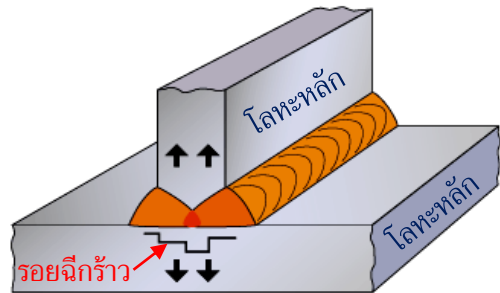
9. การฉีกร้าวของแนวเชื่อม (Lamellar tearing) เป็นรูปแบบความเสียหายของงานเชื่อมที่มีลักษณะเป็นแบบการฉีกขาด (Tearing) ของเนื้อโลหะข้าง ๆ แนวเชื่อม ซึ่งจะแตกต่างไปจากการแตกร้าวแบบอื่น ๆ ทั้งสาเหตุของการเกิดและตำแหน่งของการเกิด โดยจะพบรอยฉีกเกิดในแนวส่วนหนา (Short transvers section : ST) ของแผ่นโลหะหลักที่นำมาเชื่อมและก็จะเกิดที่ขอบของบริเวณกระแทบร้อนด้านที่ติดกับแนวเชื่อม ลักษณะรูปแบบของการฉีกจะมีทิศทางการฉีกไปในทิศเดียวกันกับทิศทางการรีดขึ้นรูปของโลหะ (Rolling direction) โดยรอยฉีกร้าวจะเป็นแนวตรงที่มีลักษณะเป็นขั้น ๆ ขึ้น-ลงไปตามเนื้อโลหะที่มีข้อบกพร่องจากการรีดทับสารมลทินจำพวกสารประกอบซัลไฟด์ (FeMnS) สารประกอบออกไซด์ (FeAl_2O_3) และสารประกอบซิลิเกต (FeSiO_4) ซึ่งรอยฉีกร้าวจะตั้งฉากกับทิศทางการแรงเค้นดึงที่สามารถเกิดขึ้นได้กับการเชื่อมต่อทุกรูปแบบที่ทิศทางการเชื่อมเป็นไปในทิศทางการรีดขึ้นรูปของเนื้อโลหะ (ซึ่งมีรูปแบบคล้าย ๆ กับทิศทางการเสี้ยนของเนื้อไม้) ดังแสดงลักษณะและตำแหน่งของการฉีกร้าวในการเชื่อมแบบต่อชน (Butt weld) และการเชื่อมแบบต่อมุมตัวที่

(T-joint) ในรูปที่ 8.32 (ก) และ (ข) ตามลำดับ แต่จากประสบการณ์ด้านงานเชื่อมของผู้เขียนที่และจากการค้นคว้าจากงานวิจัยพบว่า เรามักเจอรอยฉีกร้าแบบนี้ในการเชื่อมแบบต่อมุม (Fillet welding) เป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะการเชื่อมงานที่มีความหนาหลายๆ จะมีความไวต่อการเกิดรอยฉีกแบบนี้มากขึ้น ดังตัวอย่างรูปแบบจำลองตำแหน่งและทิศทางของแรงเค้นที่มีต่อการฉีกร้าที่สามารถเกิดขึ้นได้ในการเชื่อมต่อในรูปแบบต่าง ๆ ในรูปที่ 8.33 รอยฉีกร้ามีโอกาสที่จะฉีกเป็นช่วง ๆ แล้วหยุด (สิ้นสุดแนวบกพร่อง) หรือติดต่อกันเป็นแนวยาวขนานไปตามแนวเชื่อม (แนวบกพร่องยาวต่อเนื่อง)



(ก) รอยฉีกร้าของการเชื่อมแบบต่อชน

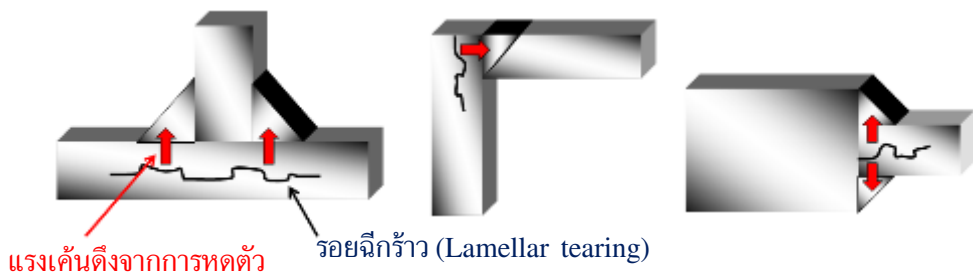
ที่มา : Materials Welding-Lamellar tearing, 2018



(ข) รอยฉีกร้าของการเชื่อมแบบต่อมุม

ที่มา : TWI-Defects : Lamellar Tearing, 2015

รูปที่ 8.32 ลักษณะและตำแหน่งของการฉีกร้าในการเชื่อมแบบต่อชนและแบบต่อมุม

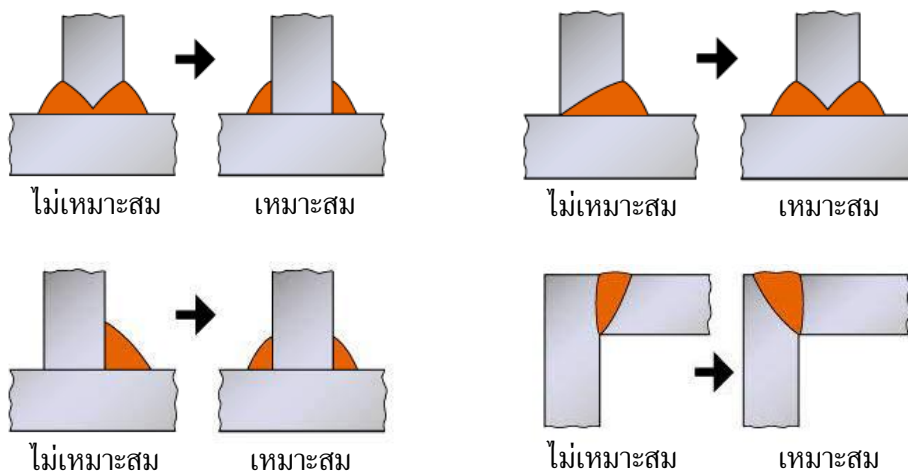


รูปที่ 8.33 รูปแบบจำลองตำแหน่งรอยเชื่อมและทิศทางของแรงเค้นกับการฉีกร้า

ที่มา : AMARINE-What is lamellar tearing, 2011

สาเหตุหลักของการฉีกร้ามาจาก 2 ปัจจัยหลัก คือ ปัจจัยความไม่สมบูรณ์ของเนื้อโลหะหลักที่นำมาเชื่อม (Laminated inclusion) โดยผ่านการรีดขึ้นรูปที่เกิดการบีบอัดสารมลทินฝังติดอยู่ภายในที่เป็นระนาบเดียวกับเนื้อโลหะกับปัจจัยของการออกแบบรอยเชื่อม (Welding design) ที่ส่งผลทำให้เกิดความเค้นดึงที่รุนแรงขึ้นเนื่องจากพฤติกรรมจากการหดตัวของแนวเชื่อม ซึ่งปัจจัยที่สำคัญทั้งสองที่กล่าวมาสามารถแก้ไขได้ไม่ยุ่งยากนัก โดยเตรียมการตรวจสอบหาความบกพร่องของเนื้อโลหะที่เป็นแบบ

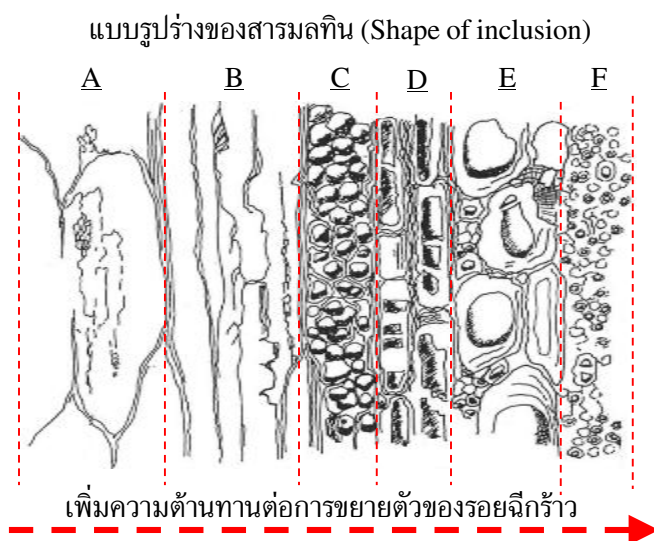
แผ่นระนาบ (Laminated) ของสารมลทินตรงตำแหน่งด้านใต้ของบริเวณที่จะเชื่อมต่อและรวมถึงบริเวณใกล้เคียง ๆ ว่ามีสารมลทินดังกล่าวฝังตัวอยู่หรือไม่ และพยายามออกแบบรอยต่อที่ไม่ให้เกิดแรงเค้นดึงในแนวที่ตั้งฉากกับทิศทางของแนวรีด ที่เหมาะสมต้องให้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับแนวของการรีด ซึ่งรวมไปถึงการกำหนดตำแหน่งของรอยเชื่อมต่อที่จะต้องสามารถช่วยลดอัตราการฉีกกร้าวได้เมื่อรับแรงกระทำ ดังแสดงยกตัวอย่างเปรียบเทียบการออกแบบกำหนดตำแหน่งรอยเชื่อมที่เหมาะสมกับที่ไม่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 8.34 ซึ่งช่างเชื่อมหรือวิศวกรงานเชื่อมสามารถกำหนดให้เหมาะสมได้



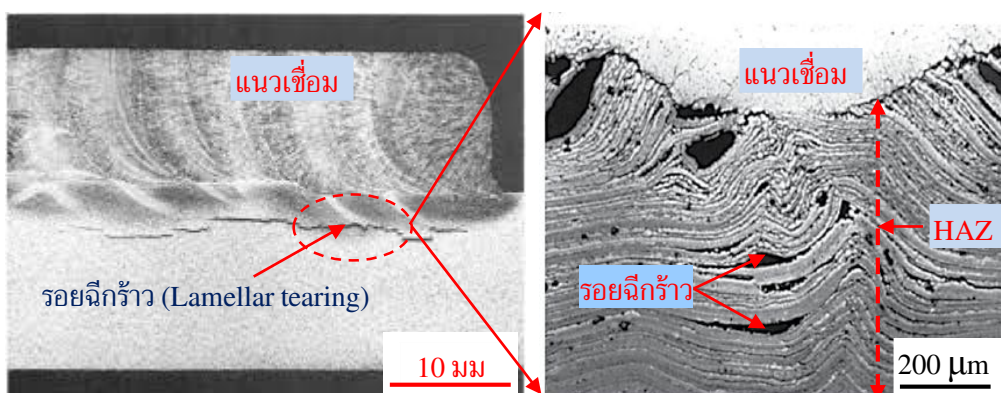
รูปที่ 8.34 ตัวอย่างการออกแบบตำแหน่งรอยเชื่อมต่อที่เหมาะสมเพื่อลดการฉีกกร้าว

ที่มา : TWI-Defects lamellar tearing, 2012

ลักษณะรูปร่างของสารมลทินที่โดนบีบอัดจากการรีดขึ้นรูปที่อยู่ภายในเนื้อของโลหะที่นำมาเชื่อม นั้นจะมีรูปร่างที่แตกต่างกันจากความต่างชนิดของสารประกอบตั้งต้นก่อนการรีด โดยการจัดเรียงตัวตามแนวรีดที่ต่างกันมีผลต่อระดับความต้านทานการเกิดและการขยายตัวของรอยฉีกกร้าว ดังแสดงในรูปที่ 8.35 จะพบว่าสารมลทินที่มีรูปร่างเป็นเส้นแบนยาวจะต้านทานการเกิดและการขยายตัวของรอยฉีกกร้าวได้น้อยกว่ารูปร่างแบบทรงกลม เพราะก้อนกลมจะลดมุมที่แหลมที่มีจุดรวมของความเค้นสูง จึงต้านทานได้มากกว่า (High resistance to crack propagation) ดังนั้น กรณีที่มีการตรวจพบสารมลทินสามารถพิจารณาตัดสินใจความเหมาะสมได้จากลักษณะรูปร่างของสารมลทินได้ แต่อย่างไรก็ตาม การที่ไม่มีข้อบกพร่องใด ๆ ถือเป็นเรื่องที่ดีที่สุด เพราะถ้าไม่มีการตรวจสอบโลหะหลักก่อนที่จะนำมาเชื่อมประกอบก็จะพบกับปัญหาเกิดการฉีกกร้าวเกิดขึ้น ซึ่งเป็นความเสียหายที่แก้ไขยุ่งยากมาก ดังแสดงลักษณะของรอยฉีกกร้าวของชิ้นงานเชื่อมในงานวิจัยที่แสดงให้เห็นถึงรอยฉีกตามแนวเส้นของการรีดและแรงเค้นดึงที่มีทิศทางตั้งฉากกับรอยฉีกที่เกิดจากอิทธิพลของการหดตัวขณะเย็นตัวของแนวเชื่อม ในรูปที่ 8.36



รูปที่ 8.35 ลักษณะรูปร่างของสารมลทินที่โดนรีดฝังตัวติดอยู่ในเนื้อโลหะ
ที่มา : *The Journal of Industrial Technology*, Vol.3, No.1, 2007



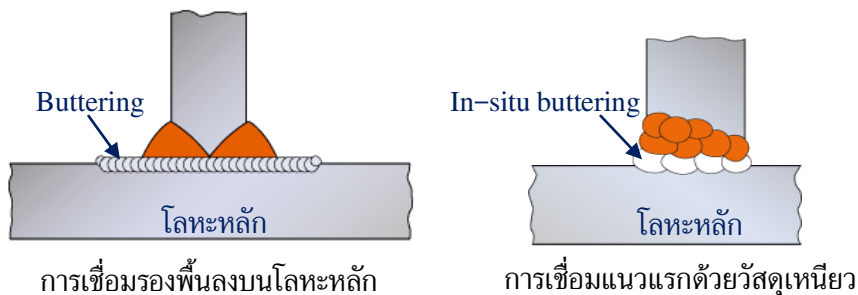
รูปที่ 8.36 ตัวอย่างรอยฉีกฉีกแนวเชื่อมและลักษณะของทิศทางการฉีกตามแนวรีด
ที่มา : *Journal of Marine Engineering & Technology*, No. A18 : 2056–8487, 2010

การป้องกันหรือลดความเสี่ยงของการเกิดรอยฉีกฉีก (Lamellar tearing) ในงานเชื่อมนี้สามารถทำได้บนพื้นฐานปัจจัยด้านต่าง ๆ ดังนี้

- เลือกวัสดุโลหะหลัก (Base metal) ที่นำมาทำการเชื่อมต้องไม่มีสารมลทินฝังตัวอยู่ในเนื้อโลหะในรูปแบบของระนาบแบนราบ (Laminated)
- การออกแบบรอยต่อ (Joint design) มีบทบาทโดยตรงที่ช่วยลดระดับค่าความเค้นและช่วยเบี่ยงเบนทิศทางของแรงเค้นดึงในแนวหน้าของชิ้นงาน โดยถ้าสามารถเลือกแนวทิศทางการรีดของโลหะให้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของแรงเค้นดึงจากการหดตัวของแนวเชื่อมได้ จะเป็นการช่วยเพิ่มแรงต้านทานการฉีกฉีกได้เป็นอย่างดี

● การลดขนาดแนวเชื่อมให้เล็ก (Weld size) ปกติการฉีกร้าวมักมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นกับรอยเชื่อมที่มีขนาดใหญ่ เพราะมีพื้นที่หดตัวมากขึ้นโดยเฉพาะรอยเชื่อมแบบต่อมุม (Fillet weld) หรือต่อชนที่มี ความยาวของรอยต่อมากกว่า 20 มิลลิเมตร ดังนั้น การกำหนดขนาดรอยเชื่อมที่มีขนาดเล็กจะลดความ เสี่ยงของการฉีกร้าวดีกว่า นอกจากการลดขนาดของแนวเชื่อมแล้วนั้น ยังสามารถเลือกตำแหน่งที่จะ เชื่อมที่ไม่ให้เกิดแรงดึงในแนวหน้าของงาน

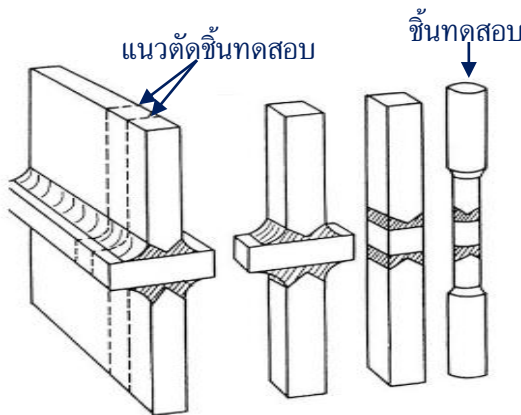
● การเชื่อมรองพื้น (Buttering weld) เป็นการสร้างพื้นผิวบนโลหะหลักที่ได้ตำแหน่งรอยเชื่อม ด้วยวัสดุโลหะที่มีความเหนียวสูงให้มีพื้นที่กว้างมากขึ้น เพื่อทำหน้าที่ช่วยกระจายความเค้นที่ดึงจากการ หดตัวของแนวเชื่อมจะช่วยลดความเสี่ยงของความเค้นสูงแล้วเกิดการฉีกร้าวนั่นเอง หรืออาจใช้วิธีการเชื่อม ด้วยลวดที่มีความแข็งแรงต่ำซึ่งมีความเหนียวเป็นแนวแรก (In-situ buttering) เพื่อให้ทำหน้าที่รับแรง เค้นแทนก็จะสามารถลดอัตราเสี่ยงของการฉีกร้าวดีกได้ ดังแสดงลักษณะของวิธีการทำในรูปที่ 8.37 วิธีการเหล่านี้ต้องคำนวณให้แน่ใจว่าวัสดุโลหะที่นำมารองพื้นต้องมีความแข็งแรงมากเพียงพอต่อการ นำไปใช้รับภาระโหลดของงาน



รูปที่ 8.37 วิธีการป้องกันการฉีกร้าวด้วยการเชื่อมวัสดุโลหะอื่นรับความเค้นแทนโลหะหลัก

ที่มา : TWI-Defects : Lamellar tearing, 2012

การตรวจสอบรอยฉีกร้าวมักมีทั้งแบบที่เกิดเป็นรอยร้าวมองเห็นและตรวจสอบได้ด้วย สายตาได้ เพราะมักเป็นแนวยาวและเป็นแบบขั้น ๆ ขึ้น-ลงสังเกตเห็นได้ง่ายและเป็นรอยฉีกอยู่ภายใน ใต้พื้นที่ของรอยเชื่อม รอยแตกภายในจะต้องใช้วิธีการตรวจสอบแบบ RT หรือ UT การวิเคราะห์ผลอาจ ยุ่งยากพอสมควร เนื่องจากต้องแยกให้ชัดเจนระหว่างภาพรอยที่ฉีกร้าวนั้น (Tearing) กับภาพของสาร มลทินที่ยังไม่ฉีกร้าวนั้น (Non-tearing) ซึ่งอาจต้องใช้ผลการตรวจสอบวิธีอื่นร่วมตัดสินใจ แต่อย่างไรก็ ตามตำแหน่งของรอยฉีกร้าวมักสามารถคาดเดาได้ ด้วยเพราะรอยฉีกขาดจะเกิดขึ้นที่บริเวณกระแทกร้อน และจะขยายตัวไปในแนวที่ขนานไปกับแนวเชื่อม ซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการหดตัวของบ่อหลอมละลาย ส่วนการตรวจสอบประสิทธิภาพทางกลของความสามารถต้านทานการเกิดแนวเชื่อมฉีกร้าวนั้น ภายใต้แรง เค้นดึงได้มีการกำหนดเป็นรูปแบบและกฎเกณฑ์การเตรียมชิ้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 8.38 โดยถ้าชิ้น ทดสอบไม่เกิดการฉีกขาดที่ตำแหน่งบริเวณใต้แนวเชื่อม แสดงว่าเป็นที่ยอมรับและผ่านการทดสอบที่ คงทนต่อความไวในการฉีกร้าวนั้น (Lamellar tearing sensitivity)



รูปที่ 8.38 วิธีการตรวจสอบประสิทธิภาพ
ทางกลของความสามารถด้านทานการ
เกิดรอยฉีกกร้าวของแนวเชื่อม
*ที่มา : The Journal of Industrial
Technology, Vol.3, No.1, 2007*

● การอุ่นให้ความร้อนโลหะขึ้นงานทั้งก่อนและหลังการเชื่อม (Pre-heating and Post-heating) ถึงแม้ว่าแก๊สไฮโดรเจนในแนวเชื่อมจะมีผลกระทบน้อยต่อการแตกแบบฉีกกร้าว แต่ถ้ามีอยู่ในปริมาณที่มากเกินไปจะกลายเป็นตัวช่วยส่งเสริมที่จะทำให้เกิดการฉีกกร้าวได้ง่าย ได้เร็วและรุนแรงมากขึ้น เพราะไฮโดรเจนทำให้เหล็กแข็งและเปราะแนวเชื่อมจะรับแรงเค้นได้ต่ำลงและเป็นชนวนของการขยายรอยฉีกได้ง่ายและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ดังนั้น การให้ความร้อนเพื่อการขจัดแก๊สไฮโดรเจนก็เป็นช่องทางที่สามารถลดความเสี่ยงที่จะเกิดรอยฉีกกร้าวได้

8.2 ข้อบกพร่องโพรงอากาศงานเชื่อม (Cavities in weld)

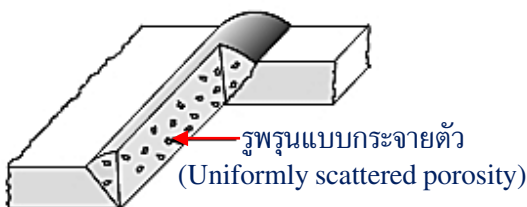
ข้อบกพร่องแบบที่เป็นลักษณะของโพรงอากาศนี้จะเป็นความไม่ต่อเนื่องของเนื้อเชื่อมอีกชนิดหนึ่ง (Discontinuities) ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ง่ายมากถ้าไม่มีการควบคุมการเชื่อมให้สมบูรณ์ โดยรูปแบบของข้อบกพร่องจะมีลักษณะเป็นรูหรือหลุมกลม ๆ ที่สามารถเกิดได้ทั้งที่ผิวภายนอกและภายในแนวเชื่อม จากการศึกษาค้นคว้าพบว่า กลไกการเกิดโพรงอากาศในแนวเชื่อมนั้นเกิดจากสองสาเหตุหลัก คือ เกิดจากฟองอากาศในขบวนการเชื่อมที่ไม่สามารถระบายออกมาสู่ภายนอกได้ทันในขณะที่น้ำโลหะเย็นตัวอย่างรวดเร็ว หรือเกิดจากฟองอากาศจากสภาพแวดล้อมภายนอกที่ถูกดึงเข้ารวมตัวกันในบ่อหลอมละลายขณะเย็นตัว ซึ่งลักษณะของโพรงอากาศที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบรูพรุน (Porosity) กับแบบโพรงหนอน (Wormholes) การที่จะเกิดเป็นโพรงอากาศแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะและอัตราความเร็วในการเคลื่อนที่ของแก๊ส ส่วนอีกสาเหตุหนึ่งเกิดจากพฤติกรรมของการหดตัว (Shrinkage) ของน้ำโลหะในบ่อหลอมละลาย โดยกลไกการหดตัวทำให้เกิดแรงเค้นดึงขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามทำให้เกิดเป็นลักษณะของช่องว่างที่เรียกว่า “ช่องว่างจากการหดตัว (Shrinkage voids)” จากสาเหตุของการเกิดข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศที่กล่าวมานั้น จะเห็นได้ว่าป้องกันไม่ให้เกิดนั้นทำได้ยากมาก ดังนั้น ในทางปฏิบัติจึงยอมรับให้เกิดโพรงอากาศในแนวเชื่อมได้ในปริมาณจำกัด (Number) ขนาดที่จำกัด (Size) และแนวทิศทางของแรงกระทำ (Stress direction) ที่มีระดับเป็นเกณฑ์มาตรฐาน หรืออาจจะเป็นเกณฑ์ข้อตกลงกันตามลักษณะของเชื่อมบางประเภทที่ยอมรับกันได้ ด้วยเหตุที่ว่าข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศ

นั้นจะมีความเสี่ยงต่อความเสียหายของแนวเชื่อมน้อยกว่าข้อบกพร่องแบบรอยแตกร้าว (Cracking) เพราะโพรงหรือฟองอากาศมักมีรูปร่างที่โค้งมน (Rounded shape) ทำให้มีความเข้มข้นของความเค้นต่ำกว่ารอยแตกร้าวอย่างมีนัยสำคัญ

โดยเป็นที่ทราบกันดีในหมู่ช่างหรือวิศวกรงานเชื่อมว่า องค์ประกอบของขบวนการเชื่อมมีหลากหลายปัจจัยที่ต้องทำการควบคุมเพื่อป้องกันต่อการเกิดข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศ ทำให้เกิดข้อบกพร่องในลักษณะแบบนี้ที่คล้าย ๆ กัน แต่ไม่เหมือนกันพอจะแยกได้ดังนี้

1. รูพรุน (Porosity) เป็นข้อบกพร่องที่เกิดจากฟองอากาศที่ไม่สามารถระบายออกสู่ภายนอกได้ทันเวลาในขณะที่เย็นตัวลงตกค้างอยู่ที่แนวเชื่อม ซึ่งบ้างก็เกิดอยู่บริเวณส่วนด้านบนผิวของแนวเชื่อม บ้างก็ฝังตัวอยู่ลึกภายในเนื้อเชื่อม โดยส่วนใหญ่ฟองอากาศที่เป็นข้อบกพร่องนี้จะเกิดจากแก๊สจำพวก ไนโตรเจน (N_2) ออกซิเจน (O_2) และ ไฮโดรเจน (H_2) เป็นสำคัญ ซึ่งแก๊สเหล่านี้อาจมาจากสภาพความชื้นสถานที่เชื่อม ความชื้นจากลวดเชื่อม ชี้นงานเชื่อม ฟลักซ์เชื่อม รวมไปถึงสภาพพื้นผิวโลหะชิ้นงานที่มีสารเคลือบหรือสารปนเปื้อนที่กำจัดออกไม่หมด ด้วยความหลากหลายของแหล่งที่มาทำให้การควบคุมป้องกันอาจไม่สมบูรณ์ จึงมักเกิดรูพรุนในแนวเชื่อมได้ง่ายและพบเจออยู่เสมอ ๆ และพบว่าฟองอากาศหรือรูพรุนมีความหลากหลายรูปแบบและรูปร่าง ได้แก่

● **รูพรุนแบบกระจายตัว (Uniformly scattered porosity)** เป็นรูพรุนที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อมแบบกระจายตัวไปทั่วทั้งภายในเนื้อและผิวของแนวเชื่อม ไม่มีทิศทางที่แน่นอน ขนาดและรูปร่างของฟองอากาศจะเหมือนกัน สาเหตุหลักมาจากองค์ประกอบของการเชื่อม ได้แก่ เกิดจากเทคนิคการเชื่อมหรือการเลือกวัสดุเชื่อม ลวดเชื่อมและแก๊สปกคลุมแนวเชื่อมไม่ถูกต้อง รวมถึงอาจเกิดจากการเตรียมรอยต่อเชื่อมไม่ถูกต้อง ซึ่งสาเหตุดังกล่าวจะส่งผลต่อการหลอมละลายและอัตราการแข็งตัวของน้ำโลหะที่ทำให้การเคลื่อนที่ออกของแก๊สได้ไม่ทันจึงเกิดการกักตัวไว้ภายในเนื้อเชื่อม ดังแสดงลักษณะรูปแบบของรูพรุนแบบกระจายตัวในแนวเชื่อมในรูปที่ 8.39



รูปที่ 8.39 ลักษณะรูปแบบการเกิดรูพรุนแบบกระจายตัวในแนวเชื่อม

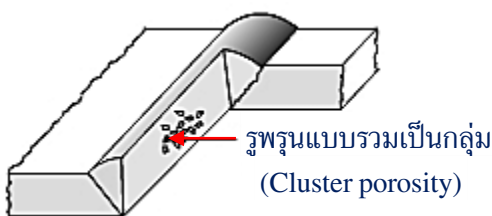
ที่มา : MECHANIC WIZ—Causes Porosity in Welding (Solution & Prevention), 2020

แนวทางการป้องกันหรือขจัดรูพรุนแบบที่กระจายตัวอยู่ทั่วไปสามารถทำได้โดยกำจัดแหล่งที่มาของแก๊สจากปัจจัยการเชื่อม เช่น การเลือกลวดเชื่อมที่ช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

เลือกฟลักซ์ไม่มีความชื้น (Dry flux) และควบคุมการไหลของแก๊สปกคลุมไม่ให้สูงมากเกินไป (High shielding gas flow) เป็นต้น ส่วนเทคนิคการเชื่อมต้องหลีกเลี่ยงความปั่นป่วนของบ่อหลอมละลาย (Weld pool turbulence) นอกจากนี้ ต้องทำความสะอาดผิวชิ้นงานโลหะที่จะเชื่อมจากสารปนเปื้อนและสารเคลือบต่าง ๆ พร้อมกับการทำให้ผิวชิ้นงานแห้งสนิทก่อนทำการเชื่อม

สำหรับการตรวจสอบหารูพรุนในแนวเชื่อมในกรณีที่เกิดบริเวณผิวสามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธี VT ส่วนรูพรุนภายในของเนื้อเชื่อมสามารถเลือกใช้วิธีการตรวจสอบแบบ RT หรือ UT ตามความเหมาะสมของลักษณะงานเชื่อม โดยนำผลการตรวจสอบมาพิจารณาผ่านเกณฑ์การยอมรับหรือปฏิเสธ ด้วยมาตรฐานของการตรวจสอบ ซึ่งมีหลายมาตรฐานที่นิยมใช้กัน เช่น ASME Section VIII Div. 1: ASME B31.3 หรือมาตรฐานของ American Welding Society : AWS D1.1 หรือกรณีสำหรับงานปิโตรเลียมเป็นมาตรฐานของ American Petroleum Institute (API 1104) เป็นต้น

● **รูพรุนแบบรวมเป็นกลุ่ม (Cluster porosity)** เป็นรูพรุนที่มีลักษณะของรูทรงปกติ เหมือนกับรูพรุนทั่ว ๆ ไป แต่จะเกิดอยู่กันเป็นกลุ่ม ๆ ไม่กระจายตัวซึ่งแต่ละกลุ่มก่อนอาจมีขนาดที่แตกต่างกันไป พบมากกับขบวนการเชื่อมแบบ MMAW สาเหตุหลักมักเกิดจากอิทธิพลของความชื้นที่สะสมอยู่ในฟลักซ์ที่เคลือบแท่งอิเล็กโทรด เมื่อทำการเชื่อมความร้อนทำให้ความชื้นกลายเป็นแก๊สและกักตัวอยู่ในเนื้อเชื่อมขณะแข็งตัว โดยทั่วไปมักเกิดกับแนวเชื่อมช่วงเริ่มต้นเชื่อม ด้วยเพราะความชื้นยังสูงและจะเกิดได้ง่ายกับการเชื่อมแนวแรก (Root pass) รวมถึงบริเวณช่วงรอยต่อของลวดเชื่อมแบบลวดเชื่อมไฟฟ้า ดังแสดงลักษณะการเกิดของรูพรุนบนแนวเชื่อมในรูปที่ 8.40



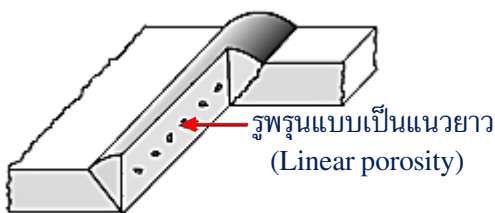
รูปที่ 8.40 ลักษณะรูปแบบการเกิดรูพรุนแบบรวมตัวเป็นกลุ่มในแนวเชื่อม

ที่มา : Arc Helments – Porosity in Welding, 2012

การป้องกันการเกิดรูพรุนแบบเป็นกลุ่มมุ่งเน้นในการขจัดความชื้นของลวดเชื่อมเป็นสำคัญ หรือกรณีขบวนการเชื่อมที่ใช้ผงฟลักซ์ต้องแห้งปราศจากความชื้น ส่วนกรณีฟลักซ์หุ้มลวดหรือไส้ฟลักซ์ต้องผ่านการอบไล่ความชื้นก่อนนำไปเชื่อม รวมถึงต้องระมัดระวังระดับอุณหภูมิของลวดเชื่อมที่ต้องใช้ ขณะที่ลวดอุณหภูมิของลวดต้องสม่ำเสมอ และถ้าสามารถควบคุมอัตราการเย็นตัวไม่ได้เร็วเกินไป ให้มีเวลามากพอสำหรับการหนีออกมาของแก๊สก็จะเป็นข้อดีในการกำจัดหรือลดปริมาณแก๊สที่จะติดอยู่ใน

แนวเชื่อมได้ สำหรับการตรวจสอบหาข้อบกพร่องรูปพรุนแบบนี้จะใช้วิธีการแบบไม่ทำลาย (NDT) ที่เหมือน ๆ กัน โดยมีข้อแนะนำเชิงปฏิบัติการจากมาตรฐานการตรวจสอบที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งมีเกณฑ์การยอมรับและปฏิเสธที่เป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน

● **รูปพรุนแบบเป็นแนวยาว (Linear porosity)** ลักษณะของรูปพรุนแบบนี้จะเกิดในรูปแบบที่เป็นฟองอากาศเรียงเป็นเส้นตรงยาวต่อเนื่องกันไป ขนาดและรูปทรงแต่ละฟองอากาศจะใกล้เคียงกันมาก เป็นข้อบกพร่องรูปพรุนที่มักเกิดที่บริเวณด้านผิวของแนวเชื่อมและจะเกิดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแนวเชื่อม (Center of weld) ที่ซึ่งเป็นจุดแข็งตัวของบ่อหลอมละลายหลังที่สุด สารมลทินหรือสารประกอบต่าง ๆ จะถูกผลักรวมออกมารวมตัวอยู่จุดนี้ แก๊สที่เกิดขึ้นในขบวนการเชื่อมก็ถูกผลักรวมออกเช่นกันและจะทยอยระบายออกสู่ภายนอก ถ้าแก๊สในการเชื่อมมากเกินไปบางส่วนหนีออกมาได้ไม่ทันจึงถูกกักไว้ในเนื้อเชื่อมในสภาพที่เป็นฟองอากาศที่เรียงรายไปตามเส้นกึ่งกลางของบ่อหลอมละลาย ดังแสดงรูปแบบและลักษณะของการปรากฏฟองอากาศที่เป็นเส้นตรง (Linear) ในรูปที่ 8.41 นอกจากนี้ที่กล่าวมาแล้วนั้นมีข้อสังเกตว่าในกรณีที่มีการเชื่อมโลหะต่างชนิดกัน (Dissimilar welding) โดยเฉพาะวัสดุโลหะที่มีอุณหภูมิจุดการเป็นของแข็งที่ต่างกัน (Eutectoid reaction temperature) ตำแหน่งของการเกิดรูปพรุนนี้จะไม่อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของแนวเชื่อม แต่ขยับไปทางที่โลหะหลักมีจุดแข็งตัวที่ช้ากว่า เหตุผลเพราะฟองอากาศถูกรีดออกไปได้ไม่หมดจะไปสะสมอยู่ที่ตำแหน่งเย็นตัวช้าสุดเกิดเป็นรูปพรุนเป็นแนวยาวตามเส้นจุดสุดท้ายของการแข็งตัว (Solidification line)

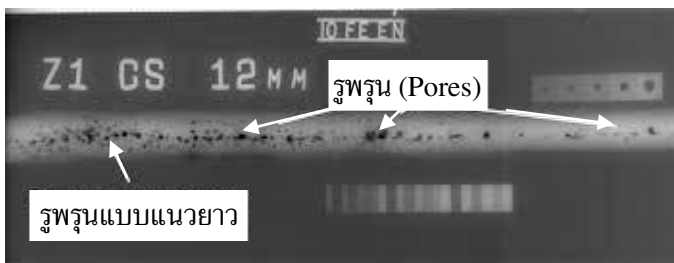


รูปที่ 8.41 ลักษณะรูปแบบการเกิดรูปพรุนแบบเป็นแนวยาวในแนวเชื่อม

ที่มา : *Global Welding Technology–Common imperfections in welding, 2018*

จากที่ได้กล่าวถึงกลไกของการเกิดรูปพรุนที่เป็นลักษณะแนวยาวในข้างต้น จะเห็นได้ว่าปัจจัยสำคัญคือ ความสกปรก หรือปริมาณสารมลทิน หรือปริมาณแก๊สในบ่อหลอมละลายที่มากเกินไปทำให้ขบวนการแข็งตัวไม่สมบูรณ์ ดังนั้น การป้องกันจึงไม่สลับซับซ้อนหรือยุ่งยากเพียงแต่ต้องควบคุมความสะอาดของขบวนการเชื่อม โดยเฉพาะความสะอาดที่ตำแหน่งของรอยต่อจากการเตรียมชิ้นงาน ส่วนปัจจัยการเชื่อมต้องด้านอื่น ๆ เช่น ต้องปราศจากความชื้น และความชื้นที่ต้องระมัดระวังเป็นพิเศษเป็นความชื้นที่ติดมากับฟลักซ์ลวดเชื่อมและแก๊สปกคลุมแนวเชื่อม

การตรวจสอบหารูพรุนแบบแนวยาวนี้จะสามารถตรวจพบได้ด้วยวิธีการตรวจสอบด้วยวิธี VT หรือ PT หรือ MT ในกรณีที่เกิดเป็นฟองอากาศหรือรูพรุนอยู่ที่บริเวณผิวโพรงเปิดสู่ภายนอก แต่ในกรณีที่เกิดอยู่ภายในเนื้อเชื่อมที่ลึกหรือผิวปิดต้องใช้เทคนิคการตรวจสอบแบบวิธี UT หรือ RT โดยเฉพาะการตรวจสอบแบบวิธี RT มีข้อดีที่สามารถเห็นภาพรวมของตำแหน่งการเกิดรูพรุนได้ชัดเจนทั้งขนาดและตำแหน่ง ดังนั้น ถ้าเชื่อมชิ้นงานที่ต้องการความปลอดภัยสูง ๆ เช่น ถังความดันต่าง ๆ (Pressure vessel tank) มักนิยมและเป็นที่ยอมรับกัน ดังแสดงตัวอย่างภาพฟิล์มเอกซเรย์ของการตรวจสอบรูพรุนแบบแนวยาวในรูปที่ 8.42 จะเห็นได้ชัดเจนของการพบฟองอากาศที่เรียงตัวเป็นแนวยาวไปตามกึ่งกลางของแนวเชื่อม



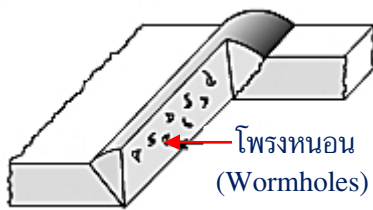
รูปที่ 8.42 ภาพถ่ายของฟิล์มเอกซเรย์รูพรุนแบบแนวยาวในแนวเชื่อม

ที่มา : *Journal of MDPI – Materials, Vol.13, 5535, 2020*

2. โพรงหนอน (Wormholes) เป็นลักษณะของฟองอากาศที่มีรูปร่างเหมือนตัวหนอนที่ยาวอยู่ในแนวเชื่อม ซึ่งถ้าเป็นรูแบบที่ลึกเข้าไปในเนื้อเชื่อมโดยที่รูมีขนาดเล็ก ๆ จะเรียกว่า “Pits porosity” แต่ถ้ารูมีขนาดที่โตขึ้นเหมือนเป็นรูท่อจะเรียกว่า “Piping porosity” ส่วนรูพรุนที่มีลักษณะเป็นแนวยาวขนานไปตามแนวเชื่อมจะเรียกว่า “โพรงอากาศแบบยาว (Elongated pores)” รูพรุนหรือโพรงอากาศเหล่านี้มักพบในขบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมใส่ฟลักซ์ (FCAW) หรือขบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (SAW) และยังพบในขบวนการเชื่อมแบบอิเล็กโตรสแลก (ESW) ซึ่งรูปแบบของรูพรุนอาจแตกต่างกันตามชนิดของรอยต่อ ดังแสดงรูปแบบและลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นทั้งรอยต่อแบบต่อชน (Butt weld) และรอยต่อแบบต่อมุม (Fillet weld) ในรูปที่ 8.43 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

สาเหตุหลักของการเกิดข้อบกพร่องแบบโพรงหนอนนั้นเกิดจากปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้นในขบวนการเชื่อมมีจำนวนที่มาก เมื่อแนวเชื่อมเย็นตัวลงแม้จะหนีออกมาได้แต่ยังเหลือในปริมาณที่มาก จึงเกิดความต่อเนื่องของฟองอากาศที่ติด ๆ กันเป็นแนวยาว (Elongated pores) หรือเป็นกลุ่ม ๆ บางครั้งเหมือนรูปร่างปลา (Worm holes) ซึ่งแก๊สที่เกิดขึ้นมาจากความชื้นหรือความไม่สะอาดของพื้นผิวชิ้นงานโลหะเชื่อม (Base metals) ที่อาจเป็นจำพวกสารเคลือบผิวต่าง ๆ ทั้งน้ำมันจาระบี สีเคลือบสารโลหะสังกะสีหรือดีบุกเคลือบผิว เป็นต้น ส่วนปัจจัยการเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อการเกิดแก๊สมากจะเป็นความชื้นจากฟลักซ์ปกคลุม ระยะเวลาการเชื่อม ระยะเวลาของหัวเชื่อมกับท่อส่งแก๊สไม่เหมาะสม ซึ่งรวมไปถึงการออกแบบรอยต่อที่มีช่องว่างให้แก๊สไปรวมตัวกัน

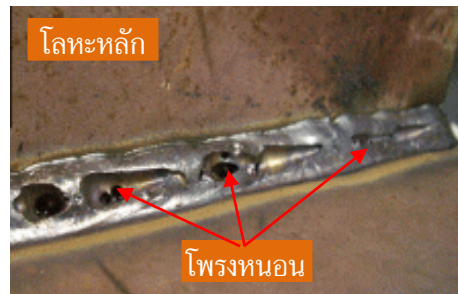
สำหรับการป้องกันการเกิดต้องอาศัยการจัดแหล่งที่มาของการเกิดแก๊สเป็นประเด็นสำคัญ รวมถึงการออกแบบรอยต่อและกำหนดปัจจัยการเชื่อมให้ถูกต้องเหมาะสม ปัญหาการเกิดโพรงหนอนจะหายไป ส่วนวิธีการตรวจสอบหาข้อบกพร่องสามารถตรวจพบได้ง่ายด้วยเหตุเพราะเป็นข้อบกพร่องที่เป็นโพรงอากาศที่เป็นโพรงค่อนข้างมีขนาดใหญ่ กรณีเกิดขึ้นที่ผิวงานเชื่อมก็สามารถมองเห็นได้ด้วยตา สำหรับกรณีที่เกิดเป็นแนวโพรงยาวขนานไปกับแนวเชื่อมจำเป็นที่จะต้องใช่วิธีการตรวจสอบแบบ RT หรือ UT หรือ MT ตามความเหมาะสมของแต่ละชนิดรอยต่อแนวเชื่อม



รูปที่ 8.43 ลักษณะรูปแบบของการเกิด
รูพรุนแบบโพรงหนอนในแนวเชื่อม
ที่มา : CSWIP 3.1- Weld defects, 2012



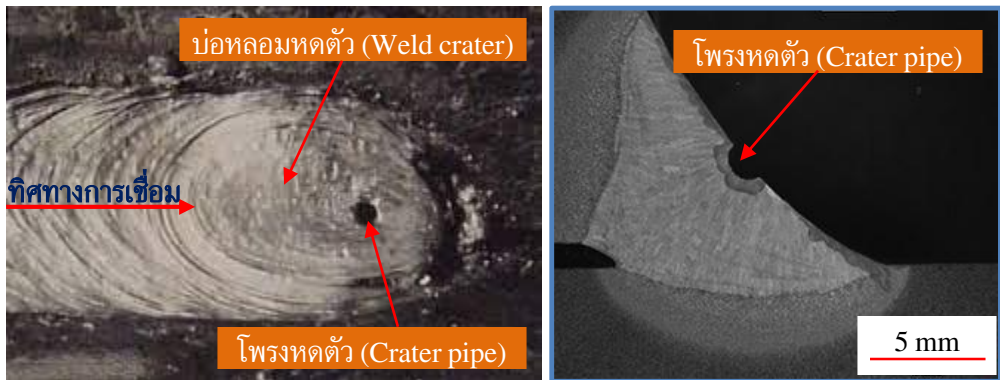
(ก) โพรงหนอนของการเชื่อมแบบต่อชน



(ข) โพรงหนอนของการเชื่อมแบบต่อมุม

3. ช่องว่างจากการหดตัว (Shrinkage voids) หรือปล่องอากาศจากการหดตัว (Shrinkage crater) เป็นข้อบกพร่องที่มีลักษณะรูปแบบของรูอากาศกลางที่เกิดขึ้นบริเวณบ่อหลอมละลายเมื่อสิ้นสุดการเชื่อม (End of welding) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของบ่อหลอม (จุดที่เย็นตัวลงที่สุด) บางครั้งก็จะเรียกว่า “จุดบกพร่องที่จุดหยุดลด (Stop filler)” จัดเป็นกลุ่มข้อบกพร่องชนิดโพรงอากาศที่ไม่ได้เกิดจากอิทธิพลของอากาศหรือแก๊สใด ๆ แต่เป็นผลมาจากพฤติกรรมของการหดตัวของโลหะในขณะที่แข็งตัวจากการเชื่อม ด้วยเหตุผลเพราะว่าที่ปลายสุดของการเชื่อมในบ่อหลอมละลายมีปริมาณของน้ำโลหะไม่มากพอที่จะชดเชยให้กับการหดตัวของ ทำให้กึ่งกลางบ่อหลอมที่เย็นที่สุดเกิดเป็นช่องว่าง (Voids) ที่มีลักษณะเป็นโพรงรูกลวงขึ้น จนบางครั้งเรียกว่า Crater pipe ที่พบเจอส่วนใหญ่มีรูเดียวขนาดค่อนข้างใหญ่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 8.44 (ก) และ (ข) จากการสืบค้นได้

พบข้อมูลเพิ่มเติมว่า ที่มาของการเรียกว่า Crater pipe นั้น คำว่า Pipe เจตนาจะหมายถึงรูอากาศที่กึ่งกลางจะมีลักษณะคล้ายกับอุปกรณ์สูบลมที่เรียกว่า Pipe



(ก) โพรงหดตัวแนวเชื่อม (มุมด้านบน)

(ข) โพรงหดตัวแนวเชื่อม (มุมด้านข้าง)

รูปที่ 8.44 ลักษณะรูปแบบของโพรงหดตัวของน้ำโลหะที่ปลายสิ้นสุดแนวเชื่อม

ที่มา : CSWIP 3.1- Weld defects, 2012

สาเหตุของการเกิดพบว่าถึงแม้จะมีลักษณะของข้อบกพร่องเป็นประเภทโพรงอากาศก็ตาม แต่กลไกของการเกิดไม่เกี่ยวกับฟองอากาศ แต่จะเป็นเหตุของการหดตัวของน้ำโลหะของบ่อหลอมละลายเป็นสำคัญ ดังแสดงตัวอย่างของลักษณะรูปทรงของรอยหดตัวที่ปลายสิ้นสุดแนวเชื่อมของความต่างในแบบรอยต่อ ในรูปที่ 8.45 ซึ่งจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้มากในกรณีที่เชื่อมโลหะด้วยขบวนการเชื่อมแบบไม่เติมลวด (Autogenous welding) ด้วยเพราะเป็นการเชื่อมที่ไม่มีเนื้อโลหะมาช่วยเติมเต็มที่จุดสิ้นสุดการเชื่อม ซึ่งที่จุดนี้ต้องใช้เนื้อโลหะที่มากเพียงพอต่อการชดเชยการหดตัว ส่วนการเชื่อมแบบเติมลวดต้องเติมเนื้อเชื่อมให้มากเกินพอที่ช่วยชดเชยการหดตัว อาจใช้เทคนิคของการเชื่อมเข้ามาช่วย เช่น การสร้างแผ่นรองรับให้จุดสิ้นสุดการเชื่อมอยู่นอกชิ้นงานเชื่อมที่เรียกกันว่า “Runoff tab” หรืออาจใช้เทคนิคการควบคุมการเติมลวดให้มากขึ้น เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการเกิดโพรงจากการหดตัวของ ได้แก่ อัตราการเย็นตัวที่เร็วเกินไป การเชื่อมโลหะต่างชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากของเหลวไปเป็นของแข็งต่างกัน ซึ่งปัจจัยของการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งเป็นกลไกสาเหตุหลักของการเกิดข้อบกพร่องในลักษณะนี้

ดังนั้น แนวทางป้องกันจึงไม่ซับซ้อน ถ้าเข้าใจต้นเหตุก็สามารถลดปัจจัยที่เสี่ยงในการเกิดข้อบกพร่องลงได้ ซึ่งก็จะช่วยขจัดข้อบกพร่องได้ โดยเป็นเทคนิคของการเชื่อมเป็นสำคัญที่ต้องอาศัยความชำนาญของช่างเชื่อม รวมไปถึงเทคนิคการกำหนดปัจจัยการเชื่อมให้เหมาะสม ได้แก่ การปรับตั้งกระแสไฟเชื่อม ระยะอาร์ก มุมลวดเชื่อม และความเร็วในการเชื่อม ที่ต้องใช้เทคนิคปรับเมื่อถึงจุดสิ้นสุดของแนวที่จะเชื่อม ตัวอย่างเช่น การเชื่อมทิก (TIG) มักพบข้อบกพร่องในลักษณะนี้ค่อนข้างมากเพราะเป็นขบวนการเชื่อมที่นิยมเชื่อมแบบไม่เติมลวดเชื่อม และเป็นขบวนการเชื่อมที่ใช้พลังงานความร้อน

ป้อนเข้าต่ำ (Low heat input) ดังนั้นการใช้เทคนิคปรับลดกระแสไฟเชื่อมแบบจากสูงไปต่ำ (Slope out) จนกว่าการอาร์กจะดับลง จะช่วยแก้ปัญหาได้ดี



การหดตัวปลายต่อชน

การหดตัวปลายต่อเกย

การหดตัวปลายต่อมุม

รูปที่ 8.45 ตัวอย่างลักษณะรูปแบบโพรงหดตัวของรอยต่อต่างแบบที่ปลายสิ้นสุดแนวเชื่อม

ที่มา : Crater crack of weld joint, 2017

การตรวจสอบหาข้อบกพร่องสามารถระบุตำแหน่งที่ต้องการตรวจสอบได้แน่นอนที่ตรงบริเวณปลายสุดของการเชื่อมหรือที่เรียกว่า “จุดหยุดถั่ว” ซึ่งมีรูปแบบที่เป็นรูหรือโพรงที่สามารถเห็นได้ด้วยสายตา (VT) แต่ในบางกรณีที่อาจเกิดมีช่องว่างหรือรูที่มีขนาดเล็ก ๆ สามารถใช้วิธีการตรวจสอบด้วยวิธี PT หรือ MT สำหรับกรณีที่ต้องการตรวจสอบในแนวลึกของข้อบกพร่องสามารถเลือกใช้วิธีตรวจสอบแบบ RT หรือ UT ได้ การวิเคราะห์ประเมินผลของการตรวจสอบค่อนข้างง่ายเพราะเป็นข้อบกพร่องที่มีรูปแบบที่แน่นอนตายตัว คือเป็นโพรงอากาศแนวตรงลึกเข้าไปในแนวเชื่อม

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องที่เกิดจากการหดตัวของบ่อหลอมละลาย (Weld shrinkage) พบว่าลักษณะของการเกิดรูหรือโพรงจากการหดตัวนี้มีลักษณะที่คล้ายกัน ๆ ที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับฟองอากาศ ซึ่งเกิดขึ้นในระดับจุลภาค (Microstructure voids) ได้แก่

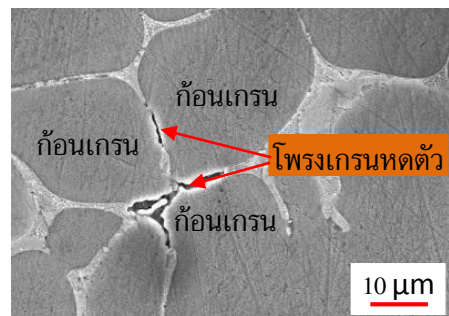
- การหดตัวจากโครงสร้างเดนไดร (Interdendritic microshrinkage) เป็นข้อบกพร่องที่มีลักษณะเป็นช่องอากาศเล็กที่เกิดขึ้นจากการหดตัวของน้ำโลหะในระดับจุลภาคที่บริเวณของการแข็งตัวเป็นโครงสร้างเดนไดร โดยจะมีรูปแบบที่เป็นแนวยาวไปตามร่องรอยต่อของเดนไดรในแต่ละแท่ง ตามกลไกของการเกิดเฟสของโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 8.46 (ก) สาเหตุหลักของการเกิดข้อบกพร่องในลักษณะนี้เกิดจากอัตราการเย็นตัวที่ไม่สมดุลกันในแต่ละโซนของการแข็งตัว (เนื่องจากปัจจัยของการระบายความร้อนที่ต่างกัน) และเกิดจากการที่บ่อหลอมละลายแต่ละโซนมีส่วนผสมทางเคมีที่ไม่สมดุลกัน ทำให้เกิดการเฟสของแข็งในของเหลวที่ไม่สมดุลกัน เกิดแรงเค้นดึงระหว่างขอบของก้อนเดนไดร (Stress dendrite) เป็นเหตุให้เกิดเป็นรอยแยกขึ้นและเป็นที่รวมของอากาศที่ติดค้างอยู่ภายในเนื้อเชื่อม จึงเสมือนว่าเป็นข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศ ข้อบกพร่องระดับจุลภาคนี้อาจต้องใช้กล้องที่มีกำลังขยายสูง ๆ ถึงจะสามารถมองเห็นได้ โดยปกติงานเชื่อมทั่ว ๆ ไปที่ไม่ใช่งานที่มีความเสี่ยงสูงหรืองานที่ต้องการประสิทธิภาพแนวเชื่อมสูง ข้อบกพร่องลักษณะนี้จะไม่

ผลกระทบต่อคุณภาพของแนวเชื่อม เนื่องจากเป็นความไม่ต่อเนื่องที่เล็กน้อย และที่สำคัญตรวจสอบหายากมาก

● การหดตัวที่ผ่านขอบเกรน (Transgranular microshrinkage) เป็นข้อบกพร่องระดับจุลภาคที่ต้องใช้กล้องที่มีกำลังขยายสูง ๆ มาตรวจหา ซึ่งจะเกิดที่รอยต่อของระหว่างก้อนเกรน โดยเป็นแนวยาวไปตามขอบเกรน สาเหตุหลักเกิดจากการหดตัวของก้อนเกรนของแต่ละก้อนที่เป็นเนื้อเดียวกันเข้าหากัน ปล่อยให้สารประกอบหรือสารมลทินอื่น ๆ ไปรวมตัวกันตามขอบเกรน ซึ่งสารประกอบที่ขอบเกรนมีการหดตัวที่ไม่เท่ากันจึงเกิดเป็นรอยแยกหรือช่องว่างเล็กขึ้นที่ขอบของเกรน ดังแสดงในรูปที่ 8.46 (ข)



(ก) การหดตัวจากโครงสร้างเดนไดรต์



(ข) การหดตัวที่ผ่านขอบเกรน

รูปที่ 8.46 ตัวอย่างลักษณะรูปแบบโพรงหดตัวในเนื้อเชื่อมระดับจุลภาค (Microshrinkage)

ที่มา : *Journal of Mechanical Engineering*. Vol. 67, No. 2, 2017

การป้องกันข้อบกพร่องจากการหดตัวระดับจุลภาคเหล่านี้ต้องทำความเข้าใจบริบททางด้านโลหะวิทยาเชื่อม (Welding metallurgy) ของโลหะที่นำมาเชื่อมโดยเฉพาะส่วนผสมทางเคมีต่อการเกิดเฟสของแข็ง เช่น การเกิดเฟสเดลตาเฟอร์ไรต์ (Delta-ferrite) ในการเชื่อมเหล็กไร้สนิมออสเทนนิติก ดังแสดงในรูปที่ 8.47 หรือการเชื่อมโลหะต่างชนิดที่มีอุณหภูมิการเป็นของแข็งต่างกัน จะเป็นต้นเหตุหลักของการเกิดโพรงอากาศจากการหดตัวขณะแข็งตัว รวมไปถึงอัตราการเย็นตัวที่เร็วเกินไป ถ้าสามารถควบคุมปัจจัยส่งเสริมเหล่านี้ก็สามารถลด หรือขจัดข้อบกพร่องจากการหดตัวในลักษณะนี้ได้

สำหรับการตรวจสอบหาข้อบกพร่องจากการหดตัวระดับจุลภาคนี้อาจต้องใช้ขบวนการทางด้านห้องปฏิบัติการโลหะวิทยา (Metallographic) ที่ต้องเตรียมผิวชิ้นงานสำหรับกล้องจุลทรรศน์เพื่อเพิ่มกำลังขยายจึงจะสามารถเห็นข้อบกพร่องได้ การวิเคราะห์ผลก็ต้องใช้ความชำนาญที่ต้องแยกแยะระหว่างเฟสโครงสร้างอื่น ๆ ที่เกิดร่วมด้วย ปัจจุบันได้มีการพัฒนานำโปรแกรมวิเคราะห์ทำนายถึงเชิงพฤติกรรมของวัสดุ (Finite element analysis : FEA) เพื่อที่จะทราบได้ว่ามีโอกาสที่จะเกิดโพรงอากาศหรือไม่ หรือจะเกิดที่บริเวณใดของเนื้อเชื่อม อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติของงานวิศวกรรมงานเชื่อมจะไม่ให้ความสำคัญกับข้อบกพร่องแบบนี้มากนัก ด้วยเพราะเป็นข้อบกพร่องระดับจุลภาคเล็ก ๆ ที่ส่งผลต่อ

ความเสียหายของการเชื่อมได้น้อยเมื่อเทียบกับข้อบกพร่องอื่น ๆ อีกหลากหลายในระดับมหภาค (Macro defected) ที่เกิดขึ้นได้จากปฏิบัติการเชื่อม



รูปที่ 8.47 การหดตัวจากการเกิดของเฟส เดลตาเฟอร์ไรต์ในโครงสร้างเดนไดรของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

ที่มา : *Welding Journal, Vol. 97, 2018*

8.3 ข้อบกพร่องมีสารแปลกปลอมฝังในงานเชื่อม (Inclusion in weld)

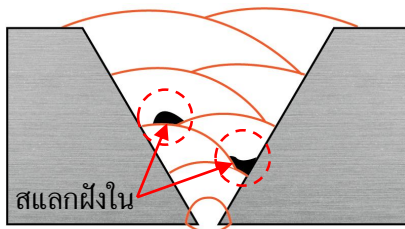
ข้อบกพร่องแบบที่เป็นลักษณะของการเกิดมีสารที่เป็นของแข็งฝังตัวติดอยู่ในแนวเชื่อม ซึ่งไม่เป็นที่พึงประสงค์ของการเชื่อม ทำให้เนื้อเชื่อมเกิดเป็นข้อบกพร่องขึ้น โดยรูปแบบของสิ่งแปลกปลอมที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อเชื่อมมีทั้งที่ฝังตัวเป็นลักษณะแบบเส้น (Line inclusions) และที่ฝังตัวเป็นลักษณะแบบกลม (Rounded inclusions) โดยทั้งสองแบบอาจฝังตัวอยู่กันเป็นกลุ่มก้อน (Cumulative) หรืออาจอยู่แบบอิสระโดดเดี่ยว (Isolated) โดยรูปแบบและลักษณะของการเกิดสิ่งแปลกปลอมที่ฝังตัวในแนวเชื่อม นั้นสามารถเกิดได้จากบทบาทของพวกสแลกจากฟลักซ์ของการเชื่อม (Slag) ออกไซด์ระหว่างการเชื่อม (Oxide) และเศษโลหะที่ไม่หลอมละลาย (Metallic) ดังจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดของแต่ละชนิดของสารแปลกปลอมที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อเชื่อมดังต่อไปนี้ อ้างอิงข้อมูลจาก Annette O'Brien (2017)

1. ข้อบกพร่องแบบสแลกฝังใน (Slag inclusion defect) เป็นข้อบกพร่องที่เกิดจากสารของแข็งแปลกปลอมที่ไม่ใช่โลหะที่เรียกว่า “สแลก” เกิดการฝังตัวอยู่ในเนื้อเชื่อม ซึ่งสแลกเกิดจากฟลักซ์ที่นำมาใช้ปกคลุมบ่อหลอมละลายทั้งที่เป็นผงฟลักซ์จากขบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (SAW) ผงฟลักซ์จากลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ของการเชื่อมมิก/แมก (GMAW) หรือฟลักซ์ที่หุ้มลวดเชื่อมของการเชื่อมไฟฟ้า (MMAW) ฟลักซ์ของขบวนการเชื่อมเหล่านี้เมื่อได้รับความร้อนจะหลอมละลายรวมอยู่กับน้ำโลหะ และด้วยสมบัติที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าโลหะจึงลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำโลหะ ขณะที่แนวเชื่อมแข็งตัวจะกลายเป็นสแลกที่ผิวแนวเชื่อม ถ้าช่างเชื่อมควบคุมการเชื่อมได้ไม่ดี หรือเกิดความผิดพลาดในการเชื่อม ทำให้ฟลักซ์ที่หลอมเหลวลอยขึ้นไม่ทันโดนกักตัวติดอยู่ภายใน เมื่อเย็นตัวกลายเป็นสแลกของแข็งติดอยู่ในเนื้อเชื่อมที่เรียกว่า “สแลกฝังใน” ดังแสดงตัวอย่างของสแลกฝังตัวอยู่ในแนวเชื่อมใน **รูปที่ 8.48**

สาเหตุที่ก่อให้เกิดข้อบกพร่องแบบสแลกฝังในนี้ตัวการสำคัญคือ ฟลักซ์ ที่อาจเกิดการหลอมตัวของผงฟลักซ์ไม่สมบูรณ์ หรือที่หลอมสมบูรณ์แต่ลอยตัวไม่ทัน หรือเกิดจากการเชื่อมซ้อนทับกันหลายแนว (Multi pass) ที่ทำความสะอาดแต่ละแนวไม่ดีพอหรือเกิดจากการออกแบบรอยต่อที่กำจัดสแลก

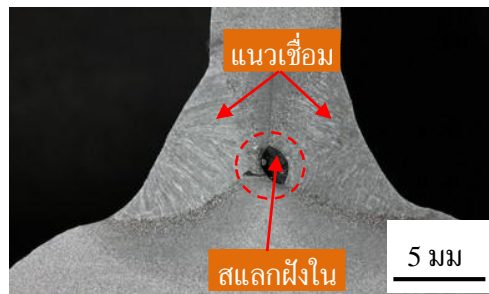
ออกได้ยาก เป็นต้น นอกจากที่เกิดจากฟลักซ์ที่กล่าวมาแล้วนั้น ยังสามารถเกิดได้จากการที่ผิวโลหะงานเชื่อมมีคราบสนิมหรือสารปนเปื้อนต่าง ๆ หรือเศษโลหะ เมื่อเชื่อมทับลงไปก็จะทำให้เกิดกลายเป็นสารแปลกปลอมฝังตัวอยู่ในเนื้อเชื่อมได้เช่นกัน ในส่วนของปัจจัยการเชื่อมที่ส่งเสริมให้เกิดสแลกฝังในได้แก่ การเชื่อมที่ด้วยกระแสไฟฟ้าต่ำเกินไป ความเร็วในการเดินลวดสูงเกินไป ลวดเชื่อมมีขนาดเล็กเกินไป และร่องบากรอยต่อที่แคบเกินไป ซึ่งกล่าวไว้ใน Welding Defects ของ F. Yusof et al. (2014)

การป้องกันและการตรวจสอบข้อบกพร่องในลักษณะนี้สามารถทำได้ไม่ยากนัก วิธีการป้องกันหลักสำคัญอยู่ที่พยายามให้สแลกมีเวลามากพอในการลอยตัวขึ้นสู่ผิวด้านบนของน้ำโลหะเหลว ด้วยการกำหนดปัจจัยการเชื่อมให้เหมาะสม เลือกฟลักซ์ที่ถูกต้อง รวมไปถึงการออกแบบรอยต่อให้สะดวกในการกำจัดสแลกได้ และทำความสะอาดชิ้นงานโลหะเชื่อม สำหรับการตรวจสอบหาข้อบกพร่องจำเป็นต้องใช้วิธีที่สามารถตรวจสอบภายในเนื้อโลหะได้ เช่น วิธีการแบบ RT หรือ UT เพราะส่วนใหญ่เป็นการฝังตัวอยู่ภายใน (Internal defect) ดังตัวอย่างชิ้นงานที่พบข้อบกพร่องบนแผ่นฟิล์มเอกซเรย์ที่มีสแลกฝังในของแนวเชื่อมในรูปที่ 8.49 ถ้ากรณีฝังอยู่ที่ผิวก็สามารถตรวจสอบได้ด้วยสายตา พบว่าตำแหน่งของการฝังตัวจะขนานไปกับขอบของแนวเชื่อม ลักษณะเป็นรูปทรงยาวโค้งมนและเป็นไปในทิศทางเดียวกับการเชื่อม



รูปที่ 8.48 ลักษณะตัวอย่างของงานเชื่อมที่มีข้อบกพร่องแบบสแลกฝังในของแนวเชื่อม (ก) แบบปิดผิว และ (ข) แบบเปิดผิว

ที่มา : *Welding Tips and Tricks, 2019*



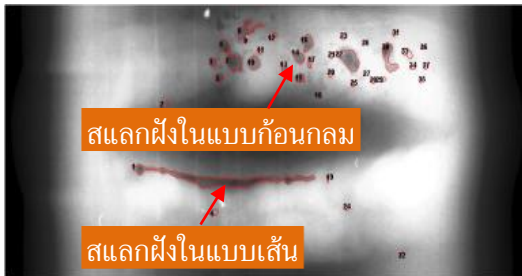
(ก) สแลกฝังในแบบปิดผิว (Internal defect)



(ข) สแลกฝังในแบบเปิดผิว (External defect)

อย่างไรก็ตามการตรวจสอบพบข้อบกพร่องที่มีสแลกฝังในเนื้อเชื่อม ก็ยังไม่สามารถสรุปได้ทันทีว่าไม่ผ่านคุณภาพ จะต้องนำผลไปตรวจเทียบกับมาตรฐานเกณฑ์การยอมรับให้มีได้ เพราะเนื่องจากเป็นข้อบกพร่องที่มีความเสี่ยงที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับข้อบกพร่องแบบรอยแตก (Cracks)

เช่น เกณฑ์ยอมรับคุณภาพรอยเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์ของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม มาตรฐาน มอก. 2722-2559 ของประเทศไทย หรือเกณฑ์ตามมาตรฐานของกลุ่มประเทศยุโรป BS EN ISO 5817 : 2017 มีเกณฑ์การยอมรับ 3 ระดับคุณภาพ หรือ เกณฑ์ตามมาตรฐานการยอมรับของ American Welding Society : AWS B1.11:2000 เป็นต้น



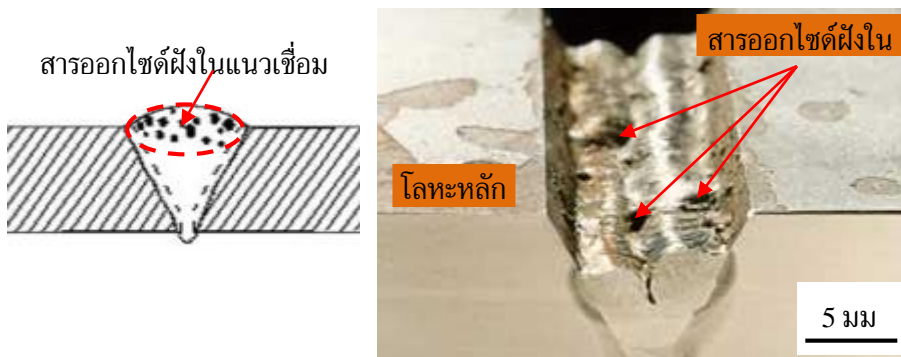
รูปที่ 8.49 ตัวอย่างชิ้นงานการเชื่อม
ท่อที่พบข้อบกพร่องแบบสแลกฝังใน
ของแนวเชื่อมที่ทดสอบด้วยวิธี RT

ที่มา : *Journal of NDT&E International*,
Vol. 86 (7-13), 2017

2. ข้อบกพร่องแบบสารออกไซด์ฝังใน (Oxide inclusion defect) จัดอยู่ในประเภทของข้อบกพร่องที่คล้าย ๆ กับแบบสแลกฝังในแต่จะต่างกันที่ต้นเหตุที่มาของสารแปลกปลอมของแข็ง (Non-metallic particle) โดยข้อบกพร่องนี้จะเกิดจากสารประกอบออกไซด์ที่ปะปน หรือเคลือบอยู่บนพื้นผิวโลหะงานที่นำมาเชื่อม (Base metals) และที่ผิวลวดเชื่อม (Filler metals) เช่น สารประกอบโครเมียมออกไซด์ (CrO_2) ที่เคลือบอยู่ที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม หรือสารประกอบอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่เคลือบอยู่ที่ผิวของโลหะอลูมิเนียม หรือที่เคลือบอยู่ที่ผิวไทเทเนียม (TiO_2) หรือที่ผิวโลหะชนิดอื่น ๆ ที่มีเคลือบผิวเพื่อป้องกันการกัดกร่อน (โลหะเคลือบสังกะสี เคลือบดีบุก และเคลือบโครเมียม) ซึ่งรวมไปถึงสีทาเคลือบผิวโลหะด้วย เป็นต้น สารประกอบออกไซด์บนพื้นผิวเหล่านี้เมื่อทำการเชื่อมทับลงไปมักจะไม่หลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกับบ่อหลอม แต่จะปะปนอยู่ภายในน้ำโลหะที่เหลว และด้วยเหตุที่ค่าความหนาแน่นที่มักต่ำกว่าน้ำโลหะเหลวจึงค่อย ๆ ลอยตัวขึ้นมาอยู่ที่ผิวบนของบ่อหลอมเป็นเหมือนขี้ตะก้นที่รู้นของงานหล่อโลหะ เมื่อน้ำโลหะเย็นตัวสารประกอบเหล่านี้ก็จะโดนฝังติดอยู่บริเวณด้านผิวบนของแนวเชื่อม ซึ่งจะเรียกสารของแข็งที่ฝังติดอยู่นี้ว่า “สารออกไซด์ฝังใน” ดังแสดงลักษณะของข้อบกพร่องแบบนี้ในรูปที่ 8.50 โดยอ้างอิงข้อมูลจาก CSWIP 3.1 (2009)

การป้องกันไม่ให้เกิดสารประกอบของแข็งที่เป็นจำพวกออกไซด์ต่าง ๆ ฝังติดอยู่ในเนื้อเชื่อมจนกลายเป็นข้อบกพร่องที่ไม่พึงประสงค์นั้น วิธีการที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ การทำความสะอาดเพื่อขจัดออกไซด์เคลือบผิวต่าง ๆ ให้หมดไปบนผิวโลหะชิ้นงานที่จะนำมาทำการเชื่อม ซึ่งอาจจะใช้เทคนิคทางกล เช่น การขัด การชุบ หรือการเจียรนัย หรืออาจใช้เทคนิคทางเคมี ที่อาศัยสารเคมีไปกำจัดเพื่อทำความสะอาด ซึ่งเมื่อไม่มีสารออกไซด์ที่เป็นต้นเหตุของปัญหา การป้องกันการเกิดสารออกไซด์ฝังในเนื้อเชื่อมก็จะประสบความสำเร็จ

การตรวจสอบหาข้อบกพร่องมักจะนิยมใช้วิธีการแบบ RT กับ UT เพราะความหลากหลายของรูปร่างออกไซด์ (Irregular oxide shape) ซึ่งต่างจากรูปร่างของโพรงอากาศ (Regular oxide shape) จึงต้องใช้ภาพบนแผ่นฟิล์มมาวิเคราะห์เปรียบเทียบ ซึ่งโดยปกติสมบัติของสารประกอบออกไซด์จะมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าเนื้อโลหะรอบ ๆ ดังนั้น จะปรากฏเห็นเป็นความไม่ต่อเนื่องที่มีรูปร่างหลากหลายและสีที่เข้ม (Dark) บนแผ่นฟิล์มภาพอย่างชัดเจน ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 8.51



รูปที่ 8.50 ลักษณะของข้อบกพร่องแบบสารออกไซด์ฝังตัวในของแนวเชื่อม

ที่มา : TWI-Defects / Imperfections in welds, 2016



รูปที่ 8.51 ตัวอย่างชิ้นงานเชื่อมและแผ่นฟิล์มตรวจสอบที่มีสารออกไซด์ฝังตัวในแนวเชื่อม

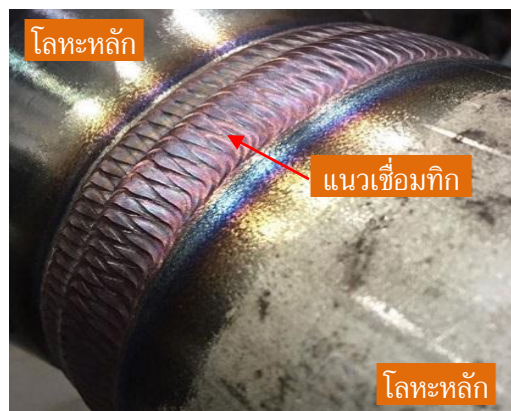
ที่มา : Defects observed in radiographic testing, 2013

3. ข้อบกพร่องแบบสารโลหะฝังใน (Metallic inclusion defect) เป็นข้อบกพร่องแบบชนิดที่มีสิ่งแปลกปลอมฝังตัวอยู่ในเนื้อเชื่อมอีกชนิดหนึ่ง โดยสิ่งแปลกปลอมนี้น่าจะเป็นจำพวกของโลหะ (Metallic) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นโลหะชนิดที่มีจุดหลอมเหลวสูง เช่น ทังสเตน ทองแดง หรือ โลหะอื่น ๆ โดยโลหะเหล่านี้จะหลุดเข้าไปปะปนอยู่ในบ่อหลอมละลายในรูปของเศษหรือก้อนเล็ก ๆ (Particles) เมื่อน้ำโลหะของบ่อหลอมละลายเย็นตัวลงก็เกิดเป็นช่องแข็งที่แปลกปลอมฝังตัวอยู่ในเนื้อเชื่อมที่เรียกว่า “ข้อบกพร่องสารโลหะฝังใน” จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า สารโลหะที่เป็นปัญหาและพบเจอ

กันบ่อย ๆ มักเกิดจากโลหะทั้งสแตนที่ใช้เป็นแท่งอิเล็กโทรด (Non-Consumable) เพื่อทำการอาร์กของ ขบวนการเชื่อมทิก (GTAW) ขบวนการเชื่อมพลาสมา (PAW) โดยปกติขณะที่อาร์กปลายของลวด ทั้งสแตนจะจ่ออยู่เหนือชิ้นงานที่มีระยะห่างเท่ากับระยะอาร์กของการเชื่อม (Arc length) ซึ่งต้องควบคุม ให้ระยะห่างเท่า ๆ กันไปตลอดการเชื่อม แต่ถ้าการควบคุมได้ไม่เที่ยงตรงเกิดการกดปลายลวดทั้งสแตน ให้จุ่มลงไปในบ่อหลอมละลาย ปลายของลวดที่แหลมและเล็กจะขาดหลุดเข้าไปในน้ำโลหะเหลว เมื่อน้ำ เหล็กแข็งตัวเศษโลหะทั้งสแตนก็จะเป็นสิ่งแปลกปลอมฝังตัวอยู่ในเนื้อเชื่อม (Metallic inclusion) นอกจากนี้ ยังสามารถเกิดจากปัจจัยอื่น ๆ ได้อีก เช่น เกิดจากการอาร์กเชื่อมด้วยกระแสไฟที่สูงมาก เกินไป หรือการกำหนดป้อนพลังงานความร้อนมากเกินไป (High heat input) หรือการใช้แก๊สปกคลุมที่มี ออกซิเจนผสมอยู่มาก โดยปัจจัยเหล่านี้จะเป็นตัวเพิ่มปริมาณความร้อนที่ทำให้ลวดทั้งสแตนหลอม ละลาย และสุดท้ายจะฝังตัวเป็นของแข็งอยู่ภายในแนวเชื่อมทั้งเส้น ดังรูปที่ 8.52 แสดงลักษณะของการ อาร์กเชื่อมด้วยลวดทั้งสแตนกับชิ้นงาน (รูป ก) กับแนวเชื่อมที่ใช้การอาร์กด้วยลวดทั้งสแตน (รูป ข) และ ลักษณะรูปแบบของสารโลหะทั้งสแตนที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อเชื่อม (รูป ค)

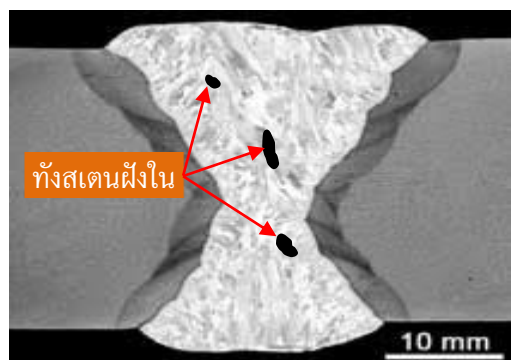


(ก) การอาร์กของลวดทั้งสแตน
ที่มา : American Torch Tip, 2021



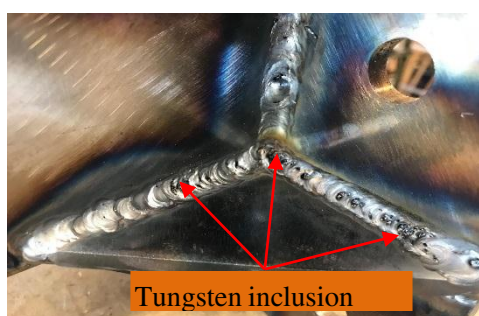
(ข) แนวเชื่อมที่มีโลหะทั้งสแตนฝังใน
ที่มา : Weld by scott raabe, 2015

รูปที่ 8.52 ลักษณะการเกิดและ รูปแบบของสารโลหะทั้งสแตนจาก การอาร์กที่เกิดการฝังตัวในแนว เชื่อม



(ค) ลักษณะของโลหะทั้งสแตนฝังใน
ที่มา : NDT&Condition Monitoring, 2012

การป้องกันและการตรวจสอบ สำหรับการป้องกันไม่ยุ่งยากสามารถทำได้ เพราะต้นเหตุของสารแปลกปลอมมาจากลวดทั้งสแตนเลสที่นำมาใช้อาร์กเชื่อม ได้รับความร้อนมากเกินไปจนเกิดการหลอมละลายปะปนเข้ามา แก้ไขด้วยการลดความร้อนลงหรือไม่ลดความร้อนแต่ใช้วิธีเพิ่มขนาดของลวดทั้งสแตนเลสให้โตขึ้น หรืออาจใช้วิธีการเลือกชนิดของลวดทั้งสแตนเลสแบบผสมที่มีจุดหลอมเหลวที่สูงขึ้น ใช้เป็น Thoriated tungsten หรือ Zirconium tungsten และเทคนิคหรือความชำนาญของช่างเชื่อมที่ช่วยในการรักษาหรือการควบคุมระยะอาร์กให้คงที่และเหมาะสมเพื่อไม่ให้เกิดการจุ่มปลายลวดทั้งสแตนเลสในบ่อหลอมละลาย ส่วนการตรวจสอบหาข้อบกพร่องที่เกิดจากโลหะทั้งสแตนเลสใน สามารถใช้วิธีแบบ VT กรณีที่เกิดบริเวณผิวบนแนวเชื่อมเพราะเป็นข้อบกพร่องที่เด่นชัดมาก ดังแสดงในรูปที่ 8.53



รูปที่ 8.53 การตรวจสอบหาข้อบกพร่องโลหะทั้งสแตนเลสในแนวเชื่อมที่เกิดบริเวณผิวด้วยวิธีแบบ VT
ที่มา : TIG welding problem, 2019

สำหรับกรณีที่เกิดการฝังตัวอยู่ลึกภายในจะเป็นต้องใช้วิธีแบบ RT ที่อาศัยพิจารณาจากภาพถ่าย เพราะรูปร่างของทั้งสแตนเลสในมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน และแยกตัวเกิดตามจุดต่าง ๆ ไม่แน่นอน ดังตัวอย่างแผ่นฟิล์มตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยวิธีแบบ RT ของงานวิจัยในการเชื่อมการต่อชนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316 ด้วยขบวนการเชื่อมทิก สามารถเห็นทั้งสแตนเลสในเป็นสีขาวสว่าง ในรูปที่ 8.54



รูปที่ 8.54 การตรวจสอบหาข้อบกพร่องโลหะทั้งสแตนเลสในแนวเชื่อมด้วยวิธีแบบ RT
ที่มา : Key Engineering Materials, Vol. 833, 2020



8.4 การหลอมละลายและหลอมลึกไม่สมบูรณ์ในแนวเชื่อม (Lack of fusion and penetration in weld)

การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding process) ที่ดีจะเกิดขึ้นบนขบวนการหลอมละลายของโลหะงานที่เชื่อมและลวดเชื่อมที่สมบูรณ์แบบ เพราะถ้าเกิดมีการหลอมละลายที่ไม่สมบูรณ์จะส่งผลทำให้แนวเชื่อมเกิดเป็นข้อบกพร่องขึ้น ซึ่งข้อบกพร่องที่เกิดจากสาเหตุนี้จะมีอยู่สองลักษณะ คือ การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Lack of fusion หรือ Incomplete fusion) กับ การหลอมลึกไม่สมบูรณ์ (Lack of penetration หรือ Incomplete penetration) โดยจะได้กล่าวในรายละเอียดของข้อบกพร่องทั้งสองดังต่อไปนี้ โดยอ้างอิงข้อมูลพื้นฐานจาก AROTEC Inspection Partner Co. (2021)

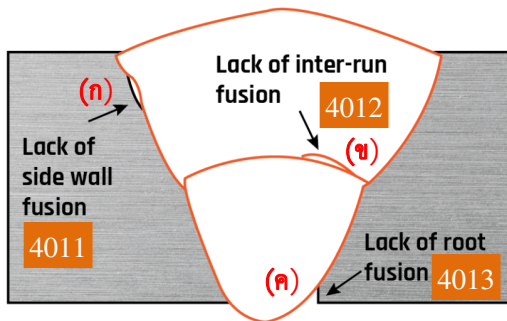
1. การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Lack of fusion) เป็นข้อบกพร่องที่พบเจอกันค่อนข้างบ่อยในการเชื่อมแบบหลอมละลายทุกขบวนการเชื่อมทั้งการเชื่อมแบบเดิมลวดและไม่เติมลวด โดยเป็นข้อบกพร่องที่มีลักษณะไม่เกิดการหลอมละลายในบางจุดหรือบางตำแหน่งของแนวเชื่อม (Non-melting) ซึ่งประเด็นเกิดจากการให้ความร้อนเชื่อมแล้วโลหะชิ้นงานไม่หลอมละลาย มาจากสาเหตุที่หลากหลาย ได้แก่ ความร้อนเชื่อมที่ป้อนเข้าต่ำเกินไป การออกแบบรอยต่อไม่ถูกต้อง การควบคุมหัวเชื่อมไม่ถูกต้อง (สายหัวเชื่อม) มุมหัวเชื่อมไม่ถูกต้องโดยเฉพาะการเชื่อมโลหะต่างชนิดที่จุดหลอมละลายต่างกัน เป็นต้น โดยปกติตำแหน่งของข้อบกพร่องที่เกิดโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 6520-1 และมาตรฐานของไทย ISO/TS 17845 ได้ระบุตำแหน่งของการเกิดข้อบกพร่องแบบหลอมละลายไม่สมบูรณ์ไว้ ดังแสดงในรูปที่ 8.55 มี 3 ตำแหน่ง ดังนี้

- การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ที่ผนังด้านข้าง (รหัสอ้างอิง 4011) ตำแหน่งนี้เกิดจากการไม่หลอมละลายของผิวหน้าหรือผนังของรอยต่อโลหะชิ้นงานเชื่อม มักเกิดจากการสายหัวเชื่อมหรือการควบคุมหัวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ กระแสไฟเชื่อมต่ำเกินไป มุมหัวเชื่อมไม่ถูกต้องทำให้น้ำโลหะไหลไปก่อนการอาร์ก และอาจเกิดจากผิวชิ้นงานมีออกไซด์ปะปน ดังแสดงตัวอย่างข้อบกพร่องในรูปที่ 8.55 (ก)

- การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ระหว่างแนวเชื่อม (รหัสอ้างอิง 4012) ความไม่สมบูรณ์ลักษณะนี้จะเกิดกับการเชื่อมโลหะที่หนา ที่มีการเดินลวดเชื่อมมากกว่าหนึ่งแนว (Multi pass welding) ตำแหน่งนี้จะเกิดที่บริเวณชั้นรอยต่อระหว่างแนวถัดไป สาเหตุหลักมาจากการใช้กระแสไฟเชื่อมต่ำเกินไป หรือความเร็วเชื่อมสูงเกินไป หรือใช้เทคนิคการเชื่อมไม่ถูกต้อง เช่น ในกรณีเชื่อมแนวราบกับเชื่อมทับหน้าใช้ขบวนการเชื่อมต่างกันหรือลวดเชื่อมต่างกัน (เชื่อมแนวราบด้วยขบวนการ TIG เชื่อมทับหน้าด้วยขบวนการ MIG) และนอกจากนี้ยังมีสาเหตุจากการทำความสะอาดแนวเชื่อมแรกไม่สมบูรณ์มีสแลกตกค้างปิดกั้นการอาร์ก เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 8.55 (ข)

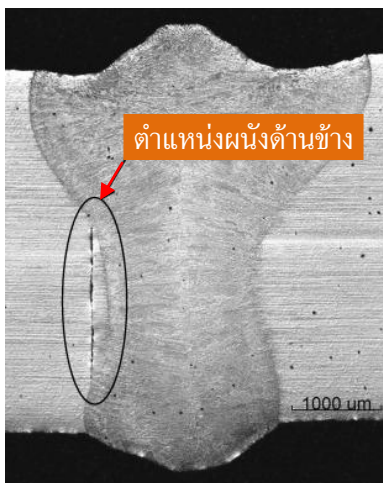
- การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ที่แนวราก (รหัสอ้างอิง 4013) ตำแหน่งนี้เกิดขึ้นที่ด้านราก (Root) ของแนวเชื่อม ที่เกิดการไม่หลอมละลายของโลหะหลักที่รอยบากหน้างานด้านล่าง สาเหตุเกิดจากหลายส่วนร่วมกัน ได้แก่ การเตรียมระยะห่างของช่องราก (Root gap) แคบหรือกว้างเกินไป ลวดเชื่อมเล็กหรือใหญ่เกินไปหรือมุมลวดไม่ถูกต้อง ความสัมพันธ์ของกระแสไฟกับความเร็วในการเชื่อมไม่เหมาะสม

รวมถึงการถ่ายโอนน้ำโลหะของการเชื่อม MIG/MAG เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างข้อบกพร่องในรูปที่ 8.55 (ค)



รูปที่ 8.55 การเกิดข้อบกพร่องแบบการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ในตำแหน่งต่างๆ ของแนวเชื่อม

ที่มา : Technoweld, Common Welding Defects, 2019



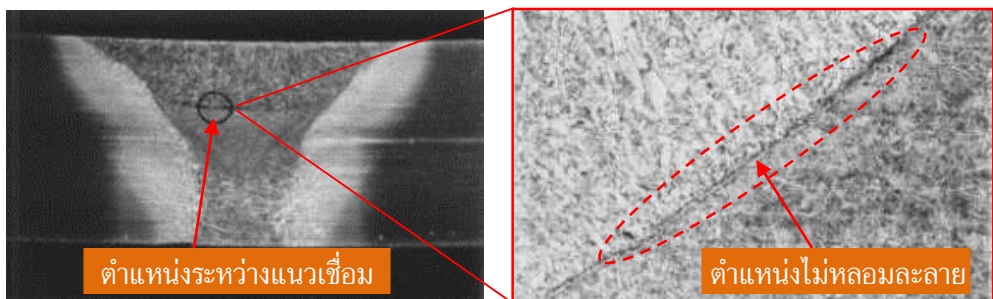
(ก) การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ที่ผนังด้านข้าง

ที่มา : Journal of Optics and Laser Tehnology, Vol. 90 : 107-116, 2017



(ค) การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ที่แนวราก

ที่มา : BOC –Lack of fusion, 2011



(ข) การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ระหว่างแนวเชื่อม

ที่มา : Gabriel RIHAR. Lack of fusion in welded joints, 2000

การป้องกันการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ทั้งสามตำแหน่งที่กล่าวถึงข้างต้นนั้น ทำได้ไม่ยากมากนัก พบว่ามีสองส่วนที่ต้องควบคุมให้ถูกต้องและเที่ยงตรง คือ ส่วนที่ 1. การเตรียมรอยต่อของโลหะชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 8.56 (ก) กล่าวคือ ต้องออกแบบรอยต่อให้สามารถวางมุมหัวเชื่อมได้ถูกต้อง โดยเฉพาะการเชื่อมโลหะต่างชนิดที่มีจุดหลอมละลายต่างกัน (ที่ต้องบังคับบ่อหลอมละลายด้วยมุมลวดเชื่อมให้เอียงไปทางโลหะที่มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่สูงกว่า) ต้องสร้างระยะห่างของช่องรากให้เหมาะสม ผิวชิ้นงานต้องสะอาด รวมถึงการเชื่อมแทค (Tack welding) ชิ้นงานต้องสมดุลและแนวเชื่อมต้องตรง (Alignment) ดังแสดงในรูปที่ 8.56 (ข) กับส่วนที่ 2. การกำหนดปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสม โดยเฉพาะความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงาน (Heat input) หรือการเลือกขบวนการเชื่อม ขนาดลวดเชื่อม แก๊สปกคลุมแนวเชื่อมที่เหมาะสม รวมไปถึงความเร็วในการเชื่อม และที่สำคัญที่สุด คือช่างเชื่อมต้องมีความทักษะในการควบคุมหัวเชื่อมไม่ว่าเป็นทักษะการส่ายลวดเชื่อม ทักษะการควบคุมระยะอาร์ก โดยเฉพาะการเชื่อมโลหะที่หนาต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 8.56 (ค) อย่างไรก็ตามให้ระลึกอยู่เสมอว่าความร้อนจากการอาร์กจะเป็นตัวการสำคัญที่จะทำให้เกิดข้อบกพร่องแบบหลอมละลายไม่สมบูรณ์ จึงต้องคอยควบคุมเป็นตัวหลักในการเชื่อม



(ก) การเตรียมบารรอยต่อโลหะงานที่จะเชื่อม



(ข) การเชื่อมแทครอยต่อโลหะงานที่จะเชื่อม

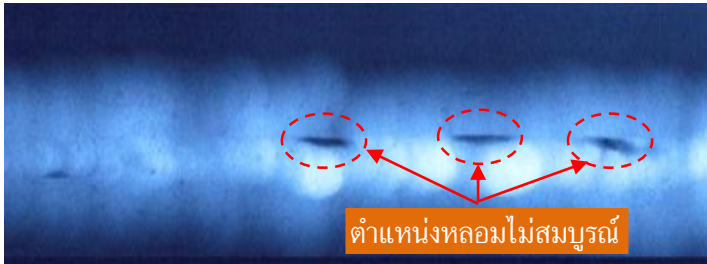


(ค) การเตรียมต่อโลหะงานที่หนาต่างกัน

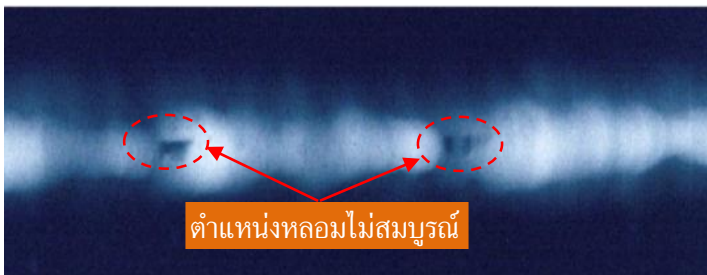
รูปที่ 8.56 การเตรียมงานที่ดีเพื่อป้องกันการเกิดข้อบกพร่องแบบการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ในตำแหน่งต่าง ๆ ของแนวเชื่อม

ที่มา : Tack welding-General Technical knowledge, 2018

การตรวจสอบหาข้อบกพร่องของความไม่สมบูรณ์ของการหลอมละลายนั้น ในกรณีที่เกิดบริเวณผิวด้านบนเป็นแบบผิวเปิดสามารถตรวจสอบด้วยสายตา (VT) หรือใช้วิธีแบบ PT และ MT แต่สำหรับกรณีที่ต้องการตรวจหาในตำแหน่งที่เกิดอยู่ภายในแนวเชื่อมต้องใช้วิธีแบบ RT หรือ UT การวิเคราะห์ผลค่อนข้างง่ายเพราะลักษณะรูปทรงจะเป็นเส้นและมีตำแหน่งของการเกิดที่คาดเดาได้ ดังแสดงในรูปที่ 8.57 แสดงตัวอย่างแผ่นฟิล์มจากวิธีการตรวจสอบแบบ RT ซึ่งจะเห็นข้อบกพร่องที่ไม่หลอมละลายเป็นเส้นตรงสีดำ



(ก) ตำแหน่งการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ที่ผนังด้านข้าง



(ข) ตำแหน่งการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ที่แนวราก

รูปที่ 8.57 แผ่นฟิล์ม

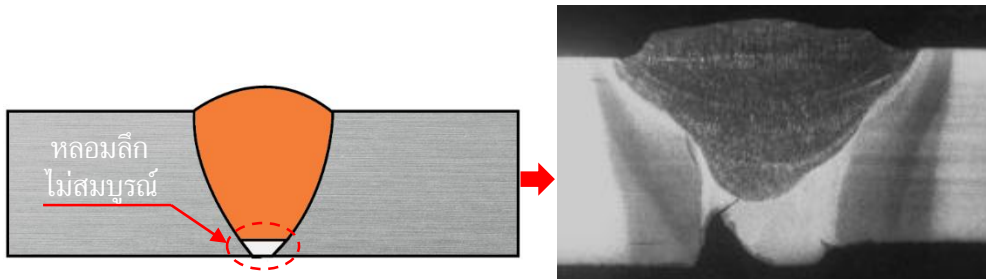
ตรวจสอบหาข้อบกพร่องของการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ของแนวเชื่อม

ที่มา : Image processing for radiographic film of weld inspection, 2011

2. การหลอมลึกไม่สมบูรณ์ (Lack of penetration) เป็นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับการเชื่อมต่อโลหะสองชิ้นเข้าด้วยกัน รูปแบบของข้อบกพร่องเป็นลักษณะแนวเชื่อมที่เนื้อโลหะหลอมละลายจากการอาร์กไม่มากเพียงพอต่อขนาดของแนวเชื่อมที่ต้องการหรือที่ระบุไว้ (การหลอมลึกที่ได้้น้อยกว่าการหลอมลึกที่ระบุ) โดยมักพบได้จากลักษณะของรอยต่อชนปากหน้างานแบบด้านเดียว (Single V joint) และแบบปากหน้างานสองด้าน (Double V joint) และรวมไปถึงรอยต่อแบบมุม (fillet joint) ดังรายละเอียดของแต่ละรูปแบบรอยต่อ ดังนี้

- การหลอมลึกไม่สมบูรณ์ของลักษณะรอยต่อชนปากหน้างานแบบด้านเดียว (Single V joint) ข้อบกพร่องลักษณะแบบนี้เกิดขึ้นค่อนข้างมาก เพราะเป็นการปากหน้างานด้านเดียวซึ่งร่องตัว V ที่ลึกจะมีอุปสรรคในการสร้างบ่อหลอมละลายให้มากพอที่จะทะลุไปหลอมอีกด้านได้ โดยเฉพาะโลหะงานที่มีความหนามาก ๆ และมีขีดจำกัดหรือบังคับให้สามารถบากร่องได้ด้านเดียว จึงมักเกิดการหลอมไม่สมบูรณ์ขึ้นที่ตำแหน่งบริเวณด้านรากของรอยต่อ (Root gap) ทำให้ขอบของรอยต่อไม่เกิดการหลอม

ละลาย และไม่เกิดเนื้อเชื่อมที่จะโผล่ออกมาเป็นส่วนของแนวซึ่มลึก ซึ่งบางครั้งเรียกข้อบกพร่องนี้ว่า “การหลอมลึกไม่สมบูรณ์แนวราก (Incomplete root penetration)” ดังแสดงในรูปที่ 8.58



(ก) รูปแบบของการหลอมลึกไม่สมบูรณ์ที่ราก

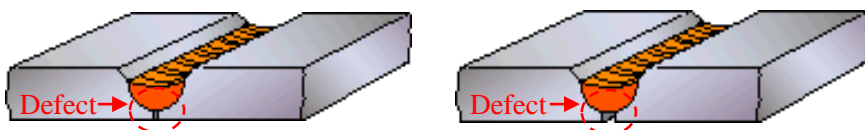
(ข) ตัวอย่างการหลอมลึกไม่สมบูรณ์ที่ราก

ที่มา : Australian Welding Institute, 2015

ที่มา : UT of butt weld joint by TOFD Technique

รูปที่ 8.58 การหลอมลึกไม่สมบูรณ์ของลักษณะรอยต่อชนปากงานแบบด้านเดียว

สาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดข้อบกพร่องลักษณะนี้มาจากการสร้างระยะของราก (Root gap) ไม่เหมาะสมที่อาจกว้างเกินไปหรือแคบมากเกินไป และการเลือกปริมาณกระแสไฟเชื่อมที่ไม่สัมพันธ์กันกับช่องว่างที่สร้างไว้ รวมไปถึงความสัมพันธ์ของการเลือกขนาดของลวดเชื่อม เช่น ช่องรากแคบใช้ลวดเชื่อมใหญ่กระแสต่ำ หรือช่องรากกว้างเลือกใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็ก เป็นต้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 8.59 (ก) แสดงลักษณะของการซึ่มลึกที่ไม่สมบูรณ์จากการกำหนดช่องรากที่แคบเกินไป ส่วน รูป (ข) แสดงถึงลักษณะของช่องรากที่กว้างเกินไป อย่างไรก็ตามช่างเชื่อมสามารถแก้ปัญหาเฉพาะหน้าได้ด้วยการปรับเปลี่ยนขนาดของลวดเชื่อมและกระแสไฟเชื่อม รวมถึงค่าความร้อนรวมที่ป้อนสู่การอาร์ก (Heat input) เช่น ช่องรากแคบมากปรับขนาดลวดเชื่อมลง เพิ่มกระแสไฟเชื่อม เดินลวดช้าลง หรือกรณีช่องรากกว้างมากสามารถปรับขนาดลวดเชื่อมให้โตขึ้น เดินลวดช้าลง เป็นต้น



(ก) สร้างช่องราก (Root) แคบเกินไป

(ข) สร้างช่องราก (Root) กว้างเกินไป

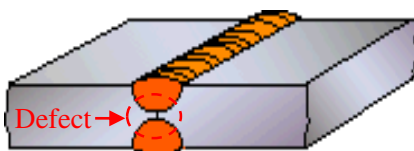
รูปที่ 8.59 ลักษณะของการเตรียมช่องราก (Root) ที่ผิดพลาดของรอยต่อชนปากงานด้านเดียว

ที่มา : TWI-Weld Defects/Imperfection-Incomplete root and Fusion Penetration, 2013

• การหลอมลึกไม่สมบูรณ์ของลักษณะรอยต่อชนปากงานแบบสองด้าน (Double V joint) มักจะเกิดกับการเชื่อมโลหะที่มีความหนามาก ๆ โดยทำการบากหน้างานทั้งสองด้านเพื่อลดความเสี่ยงจากการบากงานด้านเดียว แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีแนวโน้มที่จะเกิดการหลอมละลายที่ไม่สมบูรณ์ขึ้นที่จุดรอยต่อของรากตัว V ทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูปที่ 8.60 (ก) ซึ่งสาเหตุที่ส่งเสริมให้เกิดข้อบกพร่อง

ลักษณะนี้มาจากการเตรียมรอยบากไม่ถูกต้อง ที่ลวดเชื่อมเข้าไปอาร์กได้ไม่ถึง หรือใช้ขนาดลวดเชื่อมไม่เหมาะสมมีขนาดที่โตเกินไปกับช่องรากที่เล็ก ๆ พบว่า ในบางสถานการณ์ช่องรากถูกกำหนดไว้ในขีดจำกัดที่ปรับแก้ไม่ได้ ช่างเชื่อมสามารถเลือกใช้ขนาดลวดเชื่อมในขนาดต่าง ๆ ตามความเหมาะสม เช่น ขั้นตอนการเชื่อมแนวรากใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็ก (Root pass) แลวกทับหน้าใช้ลวดที่มีขนาดที่โตขึ้น หรือปัจจุบันที่นิยมใช้แก้ปัญหานี้ คือใช้ขบวนการเชื่อมทิก (TIG) ทำการเชื่อมแนวแรก เพราะการอาร์กเกิดจากลวดทั้งสแตน (Non-Consumable) ที่ควบคุมการหลอมละลายให้ทะลุขอบด้านล่างได้ จากนั้นเชื่อมทับหน้าในแนวถัดไปด้วยขบวนการเชื่อมมิก (MIG) หรือขบวนการเชื่อมไฟฟ้าลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (MMAW) จะช่วยลดปัญหาการเกิดข้อบกพร่องจากการไม่หลอมในแนวลึกได้ อย่างไรก็ตาม ทักษะ ความชำนาญของช่างเชื่อมต้องสูงมากเพียงพอในการควบคุมบ่อหลอมละลายด้านราก เพราะอาจก่อให้เกิดข้อบกพร่องชนิดรอยกัดแห้วของแนวราก (Undercut) หรือแนวเชื่อมรากโผล่ออกมากเกินไป (Excess penetration) หรืออาจเกิดความไม่สมบูรณ์ของรูปร่างแนวเชื่อม (Imperfect shape) เป็นต้น

นอกจากที่กล่าวมายังพบปัญหาที่เกิดจากการที่ต้องเชื่อมงานที่มีรอยบากที่เอียงกัน (Misplaced welds) ดังแสดงในรูปที่ 8.60 (ข) เป็นปัญหาที่แก้ไขยากต้องใช้ทักษะการเอียงมุมลวดเชื่อมเพื่อสร้างบ่อหลอมละลายให้ไปอยู่ในตำแหน่งของช่องรากที่ไม่ตรงกัน และอาจใช้เทคนิคการเชื่อมทิกที่สร้างและควบคุมบ่อหลอมได้ดีเชื่อมแนวรากให้สมบูรณ์ก่อนแล้วต่อด้วยขบวนการเชื่อมเติมลวดชนิดอื่น ๆ จากการสืบค้นงานวิจัยได้มีการนำเทคนิคการเชื่อมแบบไฮบริด (Hybrids) มาแก้ปัญหานี้ มีทั้งคู่ของ TIG + MIG/MAG หรือ TIG + MMAW หรือ LAW + MIG/MAG หรือ PAW + MIG/MAG เป็นต้น โดยที่นำเอาจุดเด่นของแต่ละวิธีมาใช้ โดยเฉพาะการเชื่อมแนวรากจะใช้วิธีการเชื่อมที่อาร์กแบบไม่เติมลวด (Non-Consumable) และยังพบว่าเทคนิคการเชื่อมแบบไฮบริดนี้ยังนิยมใช้กับการเชื่อมต่อโลหะที่ต่างชนิดกัน (Dissimilar welding) เพราะการเชื่อมแนวรากของโลหะที่ต่างชนิดกันจะมีความยุ่งยากมากขึ้น เพราะพฤติกรรมของการหลอมละลายจะแตกต่างกัน เช่น มีจุดหลอมเหลวต่างกัน มีส่วนผสมทางเคมีต่างกัน รวมถึงความหนาของโลหะงานที่นำมาเชื่อมต่างกัน ดังนั้น ช่างเชื่อมต้องพิจารณาให้รอบคอบทุก ๆ ปัจจัยที่จะช่วยในการลดความเสี่ยงของการเกิดข้อบกพร่องแบบการหลอมลึกไม่สมบูรณ์ของการเชื่อม



(ก) หลอมลึกไม่สมบูรณ์แบบปากสองด้าน

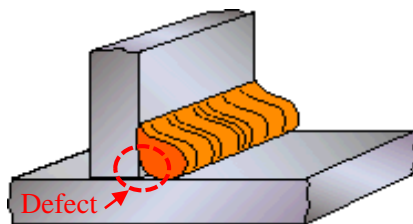


(ข) หลอมลึกไม่สมบูรณ์แบบรอยบากเอียง

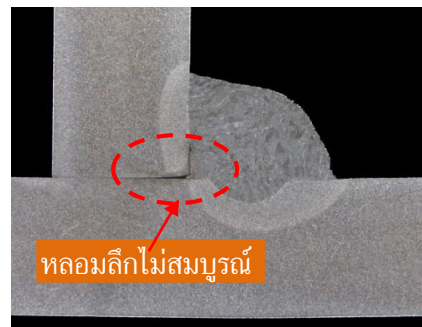
รูปที่ 8.60 การหลอมลึกไม่สมบูรณ์ของรอยต่อชนปากหน้างานสองด้าน (Double V joint)

ที่มา : TWI-Weld Defects/Imperfection-Incomplete root and Fusion Penetration, 2013

● การหลอมลึกไม่สมบูรณ์ของลักษณะรอยต่อมุม (Fillet joint) จัดอยู่ในข้อบกพร่องที่ค่อนข้างพบเจอได้บ่อยมากของการเชื่อมแบบต่อมุม โดยเป็นลักษณะของการเชื่อมที่บ่อหลอมละลายไม่ได้หลอมทะลุเข้าไปยังบริเวณมุมลึกสุดรอยต่อ ดังแสดงรูปแบบของข้อบกพร่องในรูปที่ 8.61 (ก) และชิ้นงานจริงที่เกิดข้อบกพร่องในรูปที่ 8.61 (ข) สาเหตุหลักเกิดจากความสัมพันธ์ของกระแสไฟเชื่อมกับความเร็วในการเชื่อม เช่น กระแสไฟเชื่อมสูงแต่ความเร็วเชื่อมช้า จะทำให้น้ำโลหะเหลวจากลวดเชื่อมไหลไปก่อนล่วงหน้าไปทับทางเดินแนวเชื่อม มักเกิดกับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (MMAW) โดยฟลักซ์ที่หลอมละลายจะเป็นฉนวนไหลไปกั้นการอาร์กทำให้ไม่เกิดการหลอมละลายในมุมอับ (ส่วนใหญ่เป็นมุมฉาก) นอกจากนี้ยังมีจะเกี่ยวข้องกับมุมเอียงและระยะอาร์กของลวดเชื่อมด้วยเป็นสำคัญ เพราะจะมีผลต่อการสร้างบ่อหลอมละลาย และทิศทางการไหลของน้ำลวดเหลว ซึ่งในทางปฏิบัติปัจจัยเหล่านี้ข้างเชื่อมต้องกำหนดและควบคุมปัจจัยในการเชื่อมให้ถูกต้องและเหมาะสม



(ก) รูปแบบของการหลอมลึกไม่สมบูรณ์ที่มุม



(ข) การหลอมลึกไม่สมบูรณ์รอยต่อมุม

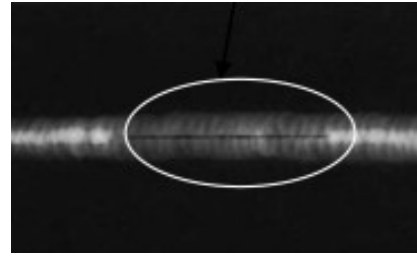
รูปที่ 8.61 การหลอมลึกไม่สมบูรณ์ของรอยต่อมุม (Fillet joint)

ที่มา : KEMPPI-MIG/MAG Welding Defects, 2021

การตรวจสอบหาข้อบกพร่องของการหลอมลึกไม่สมบูรณ์สามารถใช้วิธีการทดสอบได้ทุกวิธีแบบไม่ทำลาย (NDT) ขึ้นอยู่กับลักษณะของความไม่สมบูรณ์ กล่าวคือ กรณีที่เป็นข้อบกพร่องแนวเชื่อมรากไม่สมบูรณ์สามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธีแบบ VT เพราะเป็นลักษณะของข้อบกพร่องเปิดผิวพิจารณาได้จากด้านรากของรอยต่อ ถ้าเป็นงานที่พลิกดูไม่ได้จะนิยมใช้วิธีแบบ RT หรือ UT เช่น การเชื่อมปิดถัง ความดันหรือการเชื่อมท่อ เป็นต้น ส่วนกรณีของความไม่สมบูรณ์ที่ต่อแบบเชื่อมสองด้าน (Double V) และการเชื่อมต่อมุม ข้อบกพร่องจะเกิดขึ้นภายในแนวเชื่อมที่ไม่สามารถที่จะมองเห็นได้ จำเป็นต้องใช้วิธีแบบ MT หรือ UT หรือ RT ดังแสดงตัวอย่างของการตรวจสอบแบบวิธี RT ที่เห็นส่วนที่ไม่หลอมลึกบนแผ่นฟิล์มเอกซเรย์ในรูปที่ 8.62 ลักษณะของข้อบกพร่องจะพบเห็นเป็นเส้นตรงยาวต่อเนื่อง จึงสามารถวิเคราะห์ผลได้ค่อนข้างแม่นยำ และเป็นข้อบกพร่องที่มีขนาดใหญ่ หรือบางครั้งอาจจะมีลักษณะเป็นช่วง ๆ สั้น ๆ ในบางตำแหน่งที่เกิดการไม่หลอมละลาย แต่จะเป็นลักษณะคล้าย ๆ กัน คือมีทิศทางไปในแนวเดียวกันซึ่งขนานไปกับแนวรอยต่อชิ้นงาน



(ก) แนวเชื่อมที่หลอมลึกไม่สมบูรณ์แบบต่อชน



(ข) फिल्मเอกซเรย์

รูปที่ 8.62 ตัวอย่างการตรวจสอบหาการหลอมลึกไม่สมบูรณ์ด้วยวิธีแบบ RT

ที่มา : EURASIP Journal on Advance in Signal Processing, 1687–6180, 2012

8.5 ความไม่สมบูรณ์ของรูปร่างและมิติแนวเชื่อม (Imperfect shape)

ข้อบกพร่องลักษณะนี้เป็นประเภทที่เกิดกับรูปร่างภายนอกของแนวเชื่อมที่ไม่เป็นไปตามรูปทรงที่ควรจะเป็น ซึ่งเป็นข้อบกพร่องที่สามารถเห็นได้จากภายนอกชัดเจน บางครั้งข้อบกพร่องประเภทนี้จะส่งผลต่อความสวยงามและความเรียบร้อยของแนวเชื่อมด้วย ยิ่งโดยเฉพาะลักษณะงานที่เน้นความสวยงาม หรือเน้นความเรียบร้อยของโครงสร้างเชื่อมต่อ ข้อบกพร่องของรูปร่างแนวเชื่อมนี้แก้ไขซ่อมแซมได้ไม่ยาก ด้วยเพราะปรากฏให้เห็นชัดเจนอยู่ภายนอกที่สามารถขจัดออกแล้วทำการเชื่อมซ่อมแซมได้ โดยส่วนใหญ่มีผลกระทบกับสมบัติทางกลเป็นสำคัญ และรวมถึงปัญหาที่อาจเกิดกับการที่ต้องนำชิ้นงานไปประกอบร่วมกับชิ้นส่วนอื่น ๆ เป็นต้น ข้อบกพร่องในลักษณะนี้มีหลากหลายรูปแบบโดยจะได้นำกล่าวถึงในรูปแบบที่มีโอกาสเกิดขึ้นและพบเจออยู่บ่อย ๆ ดังต่อไปนี้

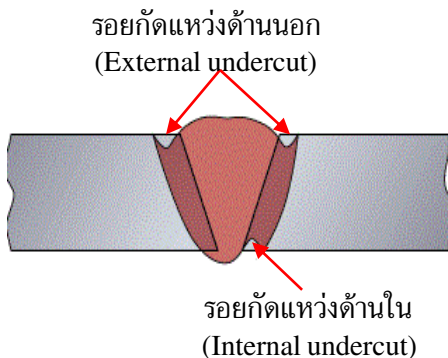
1. **รอยกัดแหว่ง (Undercut)** เป็นความไม่สมบูรณ์ของแนวเชื่อมที่เกิดในลักษณะที่เป็นร่องบริเวณขอบของโลหะหลักที่นำมาเชื่อม รูปแบบของร่องจะเป็นรอยแหว่งของบ่อหลอมละลายเหมือนโดนกัด จึงเรียกว่า “รอยกัดแหว่ง” โดยส่งผลทำให้ความหนาของโลหะหลักลดลงซึ่งจะสูญเสียความแข็งแรงของโครงสร้างแนวเชื่อม ข้อบกพร่องลักษณะนี้จะเกิดกับการเชื่อมต่อชน (Butt joint) กับการเชื่อมมุม (Fillet joint) รอยกัดแหว่งที่กล่าวถึงมีตำแหน่งที่จะเกิดได้สองบริเวณ คือ

- รอยกัดแหว่งบริเวณภายนอก (External undercut) หรือบางครั้งเรียกว่า Crown undercut เป็นรอยกัดแหว่งที่เกิดขึ้นที่บริเวณด้านหน้าของแนวเชื่อม (Face weld) ดังแสดงในรูปที่ 8.63 (ก) ซึ่งมีโอกาสเกิดได้ทั้งสองข้างของขอบแนวเชื่อม

- รอยกัดแหว่งบริเวณภายใน (Internal undercut) หรือบางครั้งเรียกว่า Root undercut เป็นความไม่สมบูรณ์ที่เกิดด้านรากหรือด้านในของการเชื่อมต่อ ซึ่งเกิดที่ด้านภายในท่อน ภายในถังหรือภายในโครงสร้างที่เชื่อมในรูปทรงต่าง ๆ โดยเป็นลักษณะที่กัดแหว่งของโลหะหลักที่ช่องราก (Root weld) ดังแสดงในรูปที่ 8.63 (ข)

สาเหตุที่ทำให้เกิดรอยกัดแหว่งมาจากหลายปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ การเชื่อมที่กระแสไฟเชื่อมสูงเกินไป ตั้งระยะอาร์กมากเกินไป กำหนดตำแหน่งที่เชื่อมที่ไม่เหมาะสม การเลือกขนาดลวดเชื่อมและ

เลือกแก๊สปกคลุมไม่ถูกต้อง และที่เป็นปัญหามากที่สุดคือ ทักษะการควบคุมหัวเชื่อมรวมถึงการส่ายลวดเชื่อมของช่างเชื่อมไม่ดีพอหรือไม่สม่ำเสมอ (กรณีที่ใช้เชื่อมด้วยแขนกล (Automatic welding) ปัญหานี้เกิดน้อย) ด้วยปัจจัยที่หลากหลายดังกล่าวทำให้เกิดรอยกัดแหว่งที่เป็นทั้งแบบแนวยาวต่อเนื่องตลอดแนวเชื่อม (Continuous undercut) และเป็นแบบกัดแหว่งเว้นระยะ (Intermittent undercut) ที่มีระยะสั้น ๆ เป็นช่วง ๆ ในแนวตรงเดียวกัน รวมถึงรอยกัดแหว่งที่เกิดระหว่างแนวเชื่อมของการเชื่อมทับกันหลายแนว ที่เรียกกันว่า “รอยกัดแหว่งระหว่างเที่ยวเชื่อม (Interpass undercut หรือ Inter-run undercut)” จะเกิดกับการเชื่อมโลหะที่มีความหนามาก ๆ ที่ต้องเชื่อมหลายเที่ยวหรือหลายแนว ซึ่งจะเกิดรอยกัดแหว่งระหว่างขอบของแนวเชื่อมแต่ละแนว

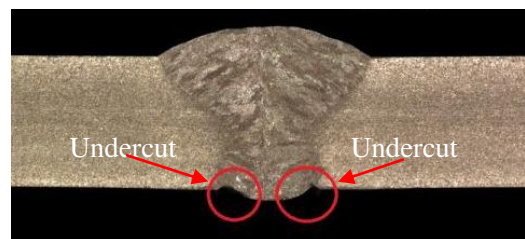


ที่มา : Arc Helmets, 2011



(ก) แนวเชื่อมที่เกิดรอยกัดแหว่งด้านนอก

ที่มา : Arc Helmets, 2000



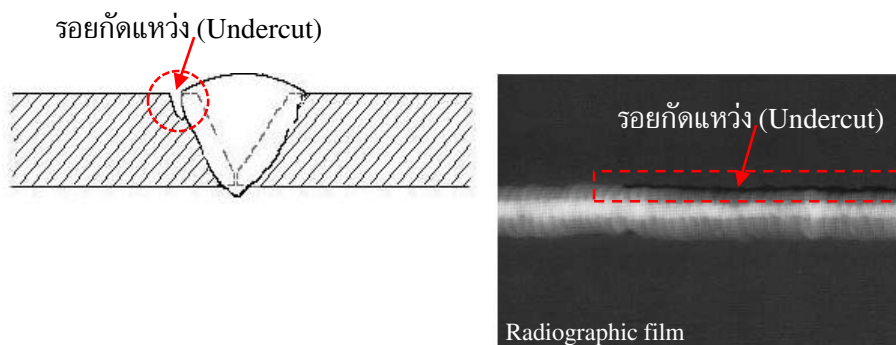
(ข) แนวเชื่อมที่เกิดรอยกัดแหว่งด้านใน

ที่มา : The main welding defects, 2014

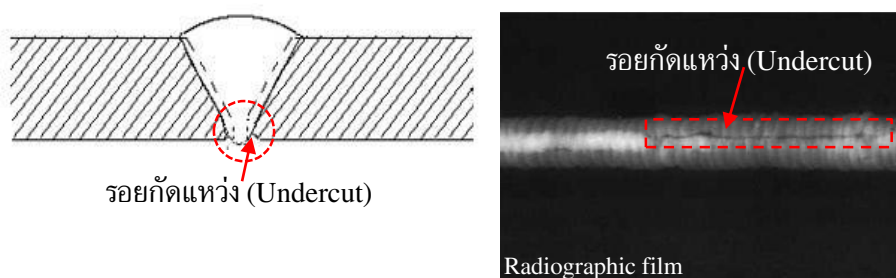
รูปที่ 8.63 ความไม่สมบูรณ์ของแนวเชื่อมจากการกัดแหว่ง (Undercut)

รอยกัดแหว่งถือเป็นข้อบกพร่องที่มีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม กล่าวคือ ลักษณะของรอยกัดแหว่งจะเป็นร่องหรือซอกที่เป็นมุมแหลม ซึ่งเป็นที่รวมของความเค้นสูง (Stress comtration) แนวเชื่อมเกิดการแตกร้าวได้ง่าย ดังนั้น ต้องตรวจสอบและซ่อมแซมเมื่อแนวเชื่อมเกิดรอยกัดแหว่ง โดยปกติรอยกัดแหว่งจะมีขนาดใหญ่มองเห็นได้ชัดเจนด้วยสายตาสามารถใช้วิธีการตรวจสอบแบบวิธี VT ยกเว้นในกรณีที่เกิดกับด้านภายในของแนวเชื่อมราก ไม่สามารถเข้าไปตรวจสอบได้จึงต้องใช้วิธีการตรวจสอบแบบวิธี RT ที่ได้จากแผ่นฟิล์มเอกซเรย์ ดังแสดงในรูปที่ 8.64 การวิเคราะห์ไม่ยาก เพราะรอยกัดแหว่งจะเห็นเส้นตรงที่อาจต่อเนื่องหรือเว้นเป็นระยะ แต่จะเป็นไปในแนวทิศทางเดียวกัน

ซึ่งคาดเดาหรือพยากรณ์ได้ง่าย ส่วนขนาดของรอยกัดแหว่งจะแตกต่างกันตามความรุนแรงของการกัดแหว่งที่เกิดขึ้น ซึ่งโดยปกติรอยกัดแหว่งจะแตกต่างกันตามชนิดขบวนการเชื่อม กล่าวคือ ขบวนการเชื่อมที่ใช้กระแสในการอาร์กที่รุนแรงมีโอกาสเกิดรอยกัดแหว่งที่ใหญ่ และโดยเฉพาะการที่ต้องส่ายหัวเชื่อมที่เป็นวงกว้าง ๆ



(ก) फिल्मเอกซเรย์แนวเชื่อมที่เกิดรอยกัดแหว่งด้านนอก (Face weld)



(ข) फिल्मเอกซเรย์แนวเชื่อมที่เกิดรอยกัดแหว่งด้านใน (Root weld)

รูปที่ 8.64 การตรวจสอบความไม่สมบูรณ์ของแนวเชื่อมจากการกัดแหว่งด้วยวิธี RT

ที่มา : Radiograph Interpretation Discontinuities Weld, 2012

การป้องกันและการซ่อมแซมแนวเชื่อมที่เกิดรอยกัดแหว่ง สำหรับการป้องกันไม่ซับซ้อนมากนัก เพียงปรับปรุงปัจจัยการเชื่อมและองค์ประกอบที่ต้องพิจารณาเลือกใช้ในการเชื่อมให้ถูกต้องเหมาะสมดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง ส่วนประเด็นของการซ่อมแซมหรือแก้ไขไม่ยุ่งยากสำหรับรอยกัดแหว่งด้านภายนอก ที่สามารถใช้เครื่องมือขจัดขอบรอยแหว่งออกไปให้มุมแหลมกลายเป็นมุมโค้งมน (การเจียรนัย) หรือต้องการเชื่อมเสริมแนวเชื่อมเพิ่มก็สามารถทำได้ แต่สำหรับรอยกัดแหว่งด้านภายในที่เป็นแนวเชื่อมรากของท่อหรือถังภาชนะความดัน ที่ไม่สามารถเข้าไปกำจัดได้นั้น จำเป็นต้องทำการตัดแนวเชื่อมทิ้งไปแล้วทำการเชื่อมใหม่ แต่อย่างไรก็ตาม ต้องพิจารณาร่วมกับเกณฑ์มาตรฐานการยอมรับให้มีได้ตามลักษณะของงาน และการกำจัดรอยกัดแหว่งต้องไม่ทำให้ความหนาของโลหะหลักลดลงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับ ซึ่งเกณฑ์มาตรฐานการยอมรับสามารถดูได้จากแต่ละมาตรฐานที่ยอมรับกัน ได้แก่ AWS D1.1/D1.1M:2015 หรือ BS EN ISO 5817 เป็นต้น

2. โลหะเชื่อมเกิดส่วนเกินผิวหน้าและราก (Excess face weld and root weld) เป็นข้อบกพร่องที่เป็นความผิดปกติของรูปร่างแนวเชื่อมไปจากที่ต้องการหรือออกแบบไว้ โดยเป็นลักษณะของการที่เติมเนื้อลวดเชื่อมเข้ามากเกินไปจนเกิดเป็นรอยนูนขึ้น ซึ่งในกรณีออกแบบรอยเชื่อมต่อชนมีโอกาที่จะเกิดเนื้อเชื่อมส่วนเกินได้ทั้งด้านหน้าและด้านรากของแนวเชื่อมแบบต่อชน กับส่วนเกินในด้านหน้าของการเชื่อมตอมุม ดังจะได้อธิบายถึงรายละเอียดเพิ่มเติมของแต่รูปแบบของข้อบกพร่องต่อไปนี้

- ส่วนเกินของด้านหน้าผิวแนวเชื่อม (Excess face weld) ในบางครั้งจะเรียกว่า Excess weld reinforcement มีรูปแบบที่แนวเชื่อมสูงกว่าพื้นผิวของโลหะหลักมากเกินไป ดังแสดงในรูปที่ 8.64 (ก) ระดับความสูงของแนวเชื่อมที่ต้องการโดยปกติจะเสมอเท่ากับผิวของโลหะหลัก แต่ยอมให้สูงขึ้นได้ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับซึ่งจะถูกกำหนดไว้ในคู่มือมาตรฐาน ปัญหาของข้อบกพร่องในลักษณะนี้จะทำให้โครงสร้างเนื้อเชื่อมหนาขึ้นและแข็งแรงมากกว่าโลหะหลัก ซึ่งจะก่อให้เกิดความเค้นสูง (Stress concentration) ที่ขอบของแนวเชื่อมที่ต่อกับโลหะหลัก นอกจากนี้ยังเป็นอุปสรรคของการประกอบเข้ากับชิ้นส่วนอื่นของงานโครงสร้าง และสิ้นเปลืองลวดเชื่อมเพิ่มต้นทุนการเชื่อม รวมถึงความไม่สวยงามของแนวเชื่อม ส่วนใหญ่เกิดจากข้อผิดพลาดของการกำหนดปัจจัยการเชื่อม เช่น การเลือกลวดเชื่อมที่มีขนาดโตมากเกินไป ความเร็วเชื่อมช้าเกินไป หรือการเชื่อมจำนวนแนวเชื่อมมากเกินไป รวมถึงการบากเตรียมหน้างานที่กว้างมากเกินไปที่ต้องเติมลวดเชื่อมมากขึ้น

การตรวจสอบข้อบกพร่องชนิดนี้ใช้วิธีตรวจสอบด้วยสายตา (VT) เพราะจะปรากฏชัดเจนบนแนวเชื่อม โดยมีเครื่องมือที่เป็นเกจวัดขนาดความสูงของแนวเชื่อมประกอบการตรวจสอบ ซึ่งมีความหลากหลายของเกจวัด ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 8.66 สำหรับแก้ไขหรือซ่อมแซมเมื่อตรวจพบเจอทำได้ไม่ยากนิยมใช้วิธีกำจัดออกด้วยการเจียรในเนื้อเชื่อมส่วนเกินออกไป

- ส่วนเกินของด้านแนวเชื่อมราก (Excess root weld) รูปแบบของข้อบกพร่องคล้ายกับแนวผิวหน้าแต่เกิดในตำแหน่งของแนวรากหรือแนวซิมลิกของด้านในแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 8.65 (ข) ส่วนใหญ่เกิดจากการเชื่อมที่กระแสบไปเชื่อมสูงเกินไปน้ำโลหะทะลุออกไปมาก หรือการสร้างระยะของรากกว้างเกินไป โดยปกติแนวเชื่อมซิมลิกที่สมบูรณ์จะโผล่ออกมาในระดับเดียวกับโลหะหลัก และยอมให้เกินออกมาได้เล็กน้อยตามเกณฑ์มาตรฐานการยอมรับ ที่ต้องไม่มากจนเกินไปที่จะต้องใช้เครื่องมือเกจวัดขนาดแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 8.66

การตรวจสอบหาข้อบกพร่องทำได้ง่ายด้วยการพิจารณาจากสายตาก็เพียงพอ โดยมีเกจวัดความเที่ยงตรง กรณีที่พบเจอก็ทำการแก้ไขซ่อมแซมด้วยการกำจัดออกด้วยการเจียรใน สำหรับกรณีที่แนวรากอยู่ภายในท่อหรือถังภาชนะที่แคบไม่สามารถเข้าไปตรวจวัดได้จะต้องใช้วิธีแบบ RT ถ้าพบขนาดของแนวเชื่อมรากส่วนเกินที่ไม่สามารถยอมรับได้ก็ต้องทำการเชื่อมใหม่ ดังนั้น การเชื่อมแนวรากในงานลักษณะดังกล่าวนี้ ต้องพิถีพิถันกับการเชื่อมเพื่อลดความเสี่ยงที่จะต้องแก้ไขเมื่อแนวเชื่อมโดนปฏิเสธที่จะยอมรับได้

● ส่วนเกินด้านหน้าของแนวเชื่อมมุม (Excess fillet weld) ข้อบกพร่องในลักษณะนี้เกิดที่แนวผิวหน้าบนแนวเชื่อม ที่มีเนื้อเชื่อมนูนขึ้นมามากกว่าที่กำหนดไว้ของการเชื่อมต่อมุม (Fillet joint) ที่รู้จักกันดีในการเชื่อมต่อแบบตัว T ซึ่งบางครั้งเรียกข้อบกพร่องแบบนี้ว่า “ความนูนส่วนเกิน (Excessive convexity)” ดังแสดงรูปแบบของส่วนนูนในรูปที่ 8.65 (ค) ส่วนนูนเกินของเนื้อเชื่อมแบบต่อมุมมีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายของแนวเชื่อมมากกว่าส่วนเกินของการต่อแบบต่อชน ด้วยเหตุเพราะความนูนของแนวเชื่อมในลักษณะนี้สร้างมุมหรือชอกมุมแหลมขึ้นระหว่างแนวเชื่อมส่วนเกินกับโลหะหลัก ตามมาตรฐานของ AWS D1.1 ดังเกณฑ์การยอมรับความนูนไว้ดังแสดงในตารางที่ 8.3 และยังมีมาตรฐานอื่น ๆ ที่มีเกณฑ์ที่คล้ายกันจะมีบางส่วนที่แตกต่างกันที่สามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการตรวจสอบการยอมรับได้ ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ระบุมาตรฐานที่ยอมรับตามข้อตกลง

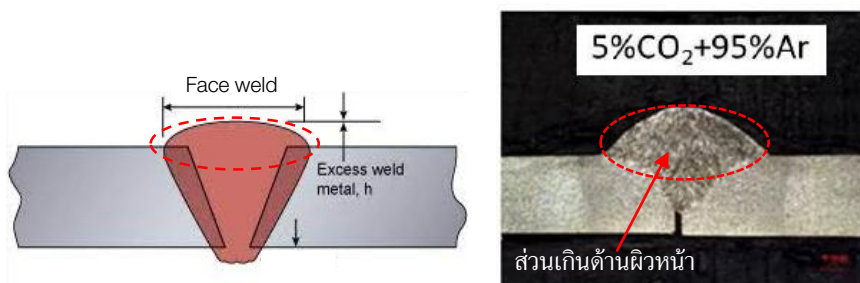
ตารางที่ 8.3 มาตรฐานเกณฑ์การยอมรับส่วนนูนเกินของการเชื่อมต่อมุม (Fillet joint)

ที่มา : AWS D1.1–Structure welding code steel, 17th Edition, 2000

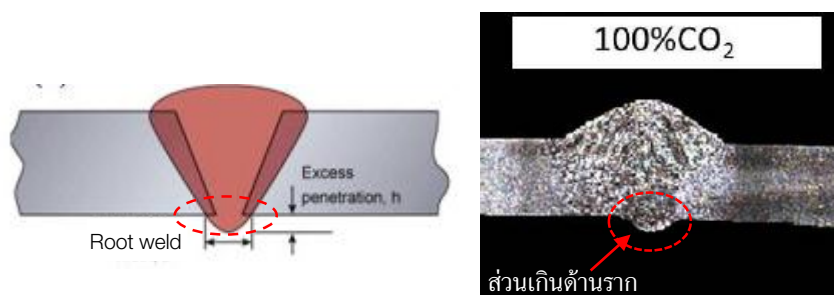
| มาตรฐาน AWS D1.1: 2000 Structure Welding Code Steel | |
|---|---------------------------------------|
| ความกว้างของแนวเชื่อมต่อมุม (Fillet weld) | ส่วนนูนเกินสูงสุด (Maximum convexity) |
| ความกว้าง (W) \leq 8 มม. | ยอมรับได้ที่ 2 มม. |
| ความกว้าง (W) < 8 ถึง (W) < 25 มม. | ยอมรับได้ที่ 3 มม. |
| ความกว้าง (W) ≥ 8 มม. | ยอมรับได้ที่ 5 มม. |

สาเหตุของการเกิดแนวเชื่อมที่นูนมากเกินไปจะเกิดจากทักษะของช่างเชื่อมผสมกับการกำหนดปัจจัยการเชื่อมที่ไม่ถูกต้อง เช่น กระแสไฟเชื่อมต่ำแต่เดินลวดมากและความเร็วเชื่อมต่ำ อย่างไรก็ตามซึ่งเป็นปกติของการเชื่อมต่อมุมแบบตัว T ช่างเชื่อมจะควบคุมบ่อหลอมละลายให้เกิดความสมมาตรกัน (Symmetrical) ของทั้งสองด้านของโลหะหลักค่อนข้างยากเพราะแนวด้านล่างมีแรงดึงดูดของโลกดึงน้ำโลหะไหลเอียงลงมา เมื่อต้องเดินเนื้อเชื่อมไปเสริมด้านบนก็ย่อมเสี่ยงที่จะทำให้แนวเชื่อมนูนขึ้นมากกว่าที่ควรจะเป็น แต่ปัญหานี้จะเกิดขึ้นน้อยมากกรณีที่ใช้เชื่อมด้วยแขนกล (Automatic welding) ที่อาศัยการเอียงหัวเชื่อมช่วย เป็นต้น จากการค้นคว้างานวิจัยในการเชื่อมต่อมุม พบว่าปัญหาการนูนของแนวเชื่อมมากเกินไปจะเกิดกับการเชื่อมโลหะต่างชนิดที่มีความสามารถในการเชื่อมแตกต่างกัน ทำให้ต้องควบคุมการเดินลวดที่ระมัดระวัง โดยเฉพาะโลหะที่มีจุดหลอมเหลวที่ต่างกันจะเกิดการกองนูนของแนวเชื่อมบนโลหะหลักที่หลอมยากกว่า ซึ่งต้องอาศัยทักษะการควบคุมหัวเชื่อมที่ชำนาญและเที่ยงตรง เป็นที่ทราบกันดีว่าการออกแบบการเชื่อมต่อมุม ต้องคำนึงถึงสามข้อกำหนดที่จะเกิดบนแนวเชื่อมตามมาตรฐานของ BS EN ISO 2553 คือ ค่า a = ความหนาของแนว (Throat thickness) และ z = ความยาวขา (Leg length) ส่วน s ระยะหลอมลึก (Deep penetration throat thickness) ดังแสดงในรูปที่ 8.67 ที่รองรับกับการออกแบบรอยต่อแบบเชื่อมมุม ทั้งแบบ T-joint แบบ Lap joint และแบบ Corner joint

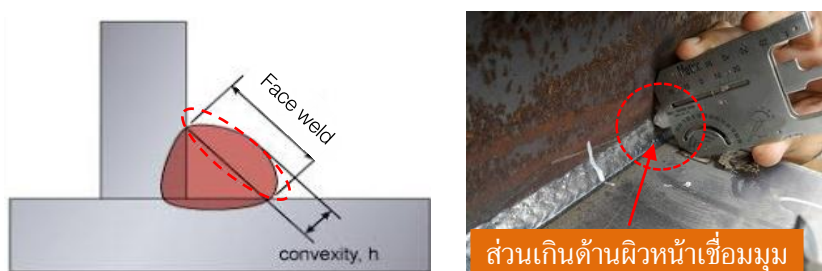
การตรวจสอบหาข้อบกพร่องส่วนเกินที่นูนขึ้นสามารถพิจารณาได้ด้วยสายตา (VT) เพราะเป็นข้อบกพร่องภายนอกที่ผิวชิ้นงาน โดยใช้เครื่องมือเกจวัดขนาดแนวเชื่อมมาช่วยในการตรวจสอบและตัดสินใจ ดังแสดงในรูปที่ 8.66 ส่วนการแก้ไขข้อบกพร่องสามารถใช้วิธีการกำจัดส่วนนูนเกินออกไปด้วยวิธีการเจียรระโนออก แต่ต้องระมัดระวังที่จะสร้างตำหนิบนโลหะหลักที่อาจเกิดเป็นปัญหาการไม่ยอมรับด้านอื่น ๆ ของแนวเชื่อมเพิ่มเติม โดยเฉพาะการเชื่อมมุมที่เป็นแบบต่อตัว T-joint กับแบบ Lab-joint ส่วนแบบ Corner-joint แก้ไขได้ง่ายที่สุดเพราะแนวเชื่อมอยู่ที่มุมภายนอกที่มีพื้นที่มากพอในการทำงานแก้ไขข้อบกพร่อง



(ก) แนวเชื่อมส่วนเกินด้านผิวหน้า (Excess face weld)



(ข) แนวเชื่อมส่วนเกินด้านแนวราก (Excess root weld)



(ค) แนวเชื่อมส่วนนูนเกินของการต่อมุม (Excess convexity weld)

รูปที่ 8.65 ข้อบกพร่องของโลหะแนวเชื่อมส่วนเกินที่ด้านผิวหน้าและด้านราก

ที่มา : TWI-The causes and acceptance of shape imperfections, part 2, 2012

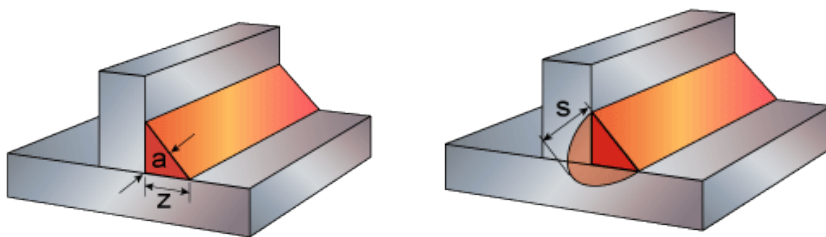


ที่มา : SUMO auge tool, 2011

ที่มา : INSICE auge tool, 2000

ที่มา : FUJI auge tool, 2009

รูปที่ 8.66 รูปแบบที่หลากหลายของเกจวัดขนาดแนวเชื่อม (Welding gauge)



(ก) แนวเชื่อมมุมสมมาตร
(Mitre fillet weld)

(ข) แนวเชื่อมมุมซึมลึก
(Deep penetration fillet weld)

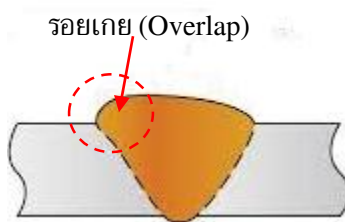
รูปที่ 8.67 การออกแบบรอยต่อเชื่อมมุมที่ต้องพิจารณา (อ้างอิง BS EN ISO 2553)

ที่มา : Standards of BS EN ISO 2553– Welding and allied processes, 2019

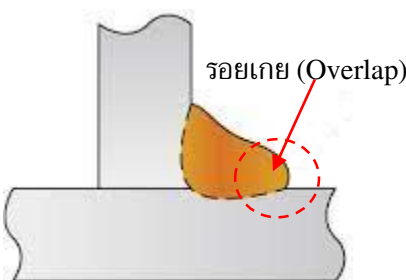
3. รอยเกย (Overlap) เป็นข้อบกพร่องเชิงรูปทรงของการเชื่อมที่เป็นลักษณะของการที่น้ำโลหะเหลวจากการอาร์กไหลตัวเลยไปบนผิวหน้าของโลหะชิ้นงานหรือโลหะหลักโดยที่ไม่มีการหลอมละลายติดกัน (ล้นไปทับ) ข้อบกพร่องในลักษณะนี้สามารถเกิดได้กับการเชื่อมต่องานแบบต่อชนและแบบต่อมุม ดังแสดงในรูปที่ 8.68 และทั้งแนวเชื่อมรากและแนวเชื่อมด้านผิวหน้า เป็นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นภายนอกสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนด้วยสายตา โดยส่วนของเนื้อโลหะที่ล้นหรือเกยออกมาทับกับบริเวณโลหะที่ไม่เกิดการหลอมละลายจะทำให้การหลอมละลายที่ขอบรอยต่อด้านในได้รอยเกยไม่สมบูรณ์ประสิทธิภาพของแนวเชื่อมลดลง เป็นแหล่งสะสมความเค้น ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อม นอกจากนี้ ยังจะเกิดปัญหาการกัดกร่อนภายในซอกแคบ ๆ ในที่อับ (Crevice corrosion) ภายในรอยเกย ซึ่งเป็นอันตรายเพราะไม่สามารถมองเห็นได้จากการตรวจสอบโดยทั่ว ๆ ไป ดังแสดงตัวอย่างของการเกิดการกัดกร่อนในรูปที่ 8.69

สาเหตุหลักของการเกิดข้อบกพร่องมาจากเทคนิคหรือทักษะของช่างเชื่อมที่ไม่ดี ซึ่งรวมไปถึงการเลือกขบวนการเชื่อม การเลือกลวดเชื่อม มุมการเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม สำหรับการเชื่อมต่องานแบบตัว T หรือเชื่อมมุมมักพบข้อบกพร่องในลักษณะนี้บ่อยมาก นอกจากปัจจัยการเชื่อมที่เลือกแล้ว

การไหลของน้ำโลหะขณะอาร์กลังมายังขอบด้านล่างเร็วและปริมาณมากจนล้นไปทับผิวโลหะหลักที่ยังไม่หลอม ด้วยเหตุของแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitation) ดังแสดงในรูปที่ 8.70 การแก้ปัญหาต้องอาศัยทักษะการควบคุมมุมของหัวเชื่อมเพื่อชะลอการไหลลงของน้ำโลหะ สำหรับการเชื่อมแบบต่อชนจะเกิดข้อบกพร่องแบบนี้ในกรณีที่มีการเชื่อมโลหะในท่าเชื่อมขนานนอน เนื่องจากโอกาสที่น้ำโลหะเชื่อมจะไหลลงมาทับกับขอบโลหะชิ้นงานชิ้นล่างเกิดขึ้นได้ง่าย ส่วนการเชื่อมในท่าราบมักเกิดกับการเชื่อมโลหะที่มีความหนามากจำเป็นต้องเชื่อมหลายแนว พบว่าแนวสุดท้ายมักทับแนวจนล้นออกไปนอกรอยต่อกลายเป็นรอยเกยขึ้น อย่างไรก็ตาม จากการศึกษารวบรวมการวิเคราะห์ของข้อบกพร่องรอยเกยพบว่าปัญหาส่วนใหญ่เกิดจากการป้อนลวดเชื่อมเข้าสู่บ่อหลอมละลายที่มากเกินไป ยิ่งเชื่อมด้วยความเร็วเชื่อมต่ำจะยิ่งเพิ่มปริมาณเนื้อโลหะจากลวดเชื่อมจนล้นออกนอกบ่อหลอมละลาย โดยแนวทางแก้ไขที่มีผลโดยตรง คือ ลดกระแสไฟเชื่อม เลือกใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็กลง ใช้เทคนิคการเชื่อมที่ถูกต้องและเหมาะสม โดยเฉพาะการปรับมุมเอียงของลวดเชื่อมที่จะช่วยในการประคองน้ำโลหะให้ไหลไปในตำแหน่งที่เหมาะสม ซึ่งอาจต้องใช้ช่างเชื่อมที่ต้องมีความชำนาญมากเพียงพอ ที่สามารถใช้ดุลพินิจในการแก้ปัญหาเฉพาะหน้า เช่น กรณีการเชื่อมต่อที่โลหะมีความหนาต่างกัน จะเลือกลวดเชื่อมอิงความหนาอย่างไร ซึ่งอาจไม่ได้ระบุไว้อย่างชัดเจนใน WPS (Welding procedure specification) เป็นต้น



(ก) รอยเกยแนวเชื่อมแบบต่อชน (Overlap butt weld)



(ข) รอยเกยแนวเชื่อมแบบต่อมุม (Overlap fillet weld)

รูปที่ 8.68 ข้อบกพร่องแนวเชื่อมชนิดรอยเกย

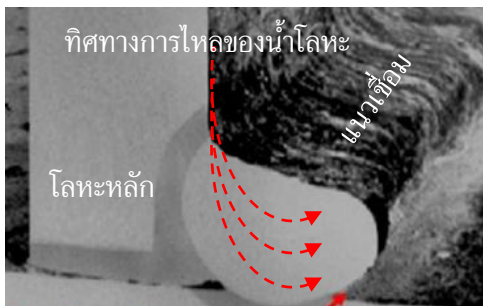
ที่มา : Macro Defects in Steel, 2017

การตรวจสอบหาข้อบกพร่องแบบรอยเกย จะค่อนข้างง่ายเพราะเป็นความไม่สมบูรณ์ของรูปทรงภายนอกที่สามารถพิจารณาได้จากสายตาหรือวิธีแบบ VT และตำแหน่งที่เกิดก็เฉพาะที่ขอบของรอยต่อทั้งแนวรากด้านในและแนวผิวด้านหน้า และถ้ามีการตรวจพบก็สามารถแก้ไขหรือซ่อมแซมได้ด้วยการกำจัดออกด้วยการเจียรระไน และถ้าเหลือเนื้อโลหะเชื่อมน้อยเกินที่จะยอมรับได้ก็สามารถเชื่อมแนวเพิ่มได้ตามความเหมาะสม อย่างไรก็ตาม ไม่ว่าจะทำตามขั้นตอนการแก้ไขหรือซ่อมแซมก็ต้องปฏิบัติตามด้วยความระมัดระวังแนวเชื่อมบริเวณอื่น ๆ ข้างเคียง ที่อาจไปกระทบจนก่อให้เกิดเป็นปัญหาข้อบกพร่องใหม่ขึ้นได้



รูปที่ 8.69 การกัดกร่อนแบบ Crevice ที่เกิดจากข้อบกพร่องรอยเกยของแนวเชื่อม

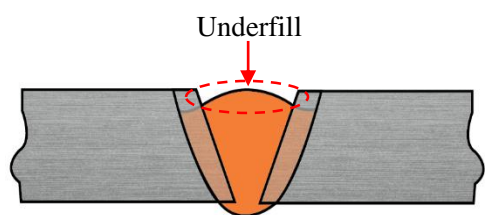
ที่มา : Thesis –Universiti Teknologi PETRONAS, 2016



รูปที่ 8.70 รอยเกยที่เกิดจากอิทธิพลน้ำโลหะ ถูกดึงให้ไหลลงเร็วด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก

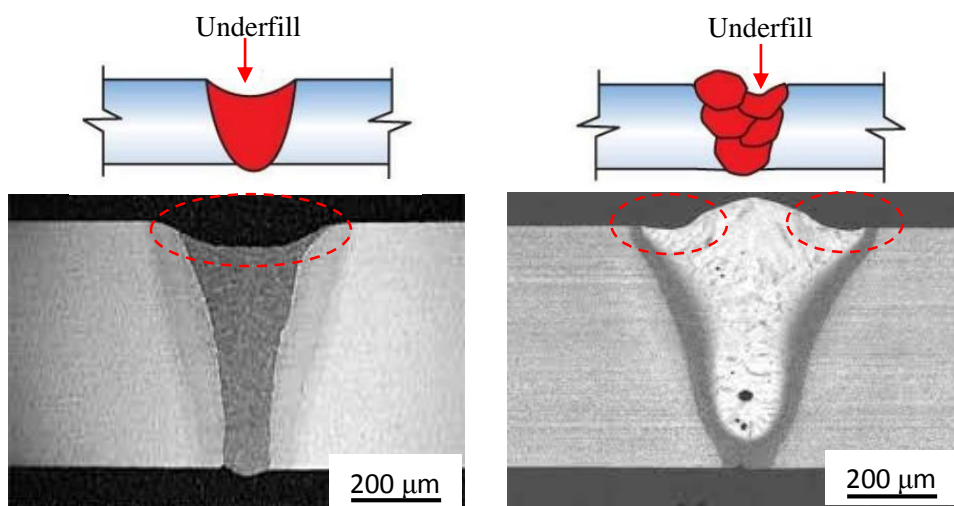
ที่มา : Weld defects fillet weld, 2012

4. การเติมร่องเชื่อมไม่สมบูรณ์ (Incompletely filled groove หรือ Underfill) เป็นอีกชนิดหนึ่งของข้อบกพร่องด้านมิติรูปทรงของแนวเชื่อม โดยเป็นลักษณะของการที่ช่วงเชื่อมไม่เต็มเนื้อเชื่อมให้เต็มพื้นที่ของร่องรอยบาก ลักษณะรูปแบบของข้อบกพร่องดังแสดงในรูปที่ 8.71 เมื่อพิจารณาจากรูปแบบของข้อบกพร่องพบว่าคล้าย ๆ กับข้อบกพร่องแบบรอยกัดแห้ว ต่างกันที่รอยกัดแห้วจะเกิดบนผิวโลหะชิ้นงานแต่ Underfill เกิดในร่องระหว่างรอยต่อ ซึ่งโดยมาตรฐานของการตรวจสอบข้อบกพร่องแนวเชื่อม การเติมร่องเชื่อมไม่สมบูรณ์นี้หมายถึงทั้งที่เกิดในแนวราก (Root weld) และแนวผิวด้านหน้า (Face weld) ที่เกิดจากการเติมเนื้อเชื่อมไม่เต็มพื้นที่ แต่พบว่าในทางปฏิบัติมักพบเห็นกันบ่อย ๆ ที่เกิดในตำแหน่งของแนวเชื่อมผิวด้านหน้า ซึ่งมีโอกาสเกิดได้ทั้งการเชื่อมแบบแนวเดียว (Single pass) และแบบหลายแนว (Multipass) ดังแสดงเป็นตัวอย่างของข้อบกพร่องในรูปที่ 8.72 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 8.71 ลักษณะของการเกิดข้อบกพร่องที่เติมเนื้อเชื่อมไม่สมบูรณ์ (Underfill)

ที่มา : *AWI- Weld imperfections that lead to poor geometric shape, 2019*



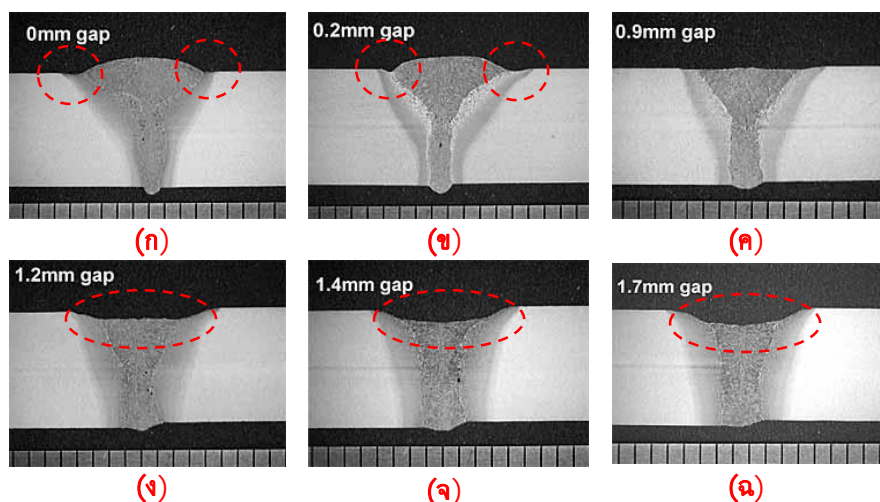
(ก) การเชื่อมแบบแนวเดียว (Single pass)

(ข) การเชื่อมแบบหลายแนว (Pulitipass)

รูปที่ 8.72 ลักษณะข้อบกพร่องที่เติมเนื้อเชื่อมไม่สมบูรณ์ที่ผิวหน้า (Underfill face weld)

ที่มา : *Laser Application in Materials Processing, 2010*

สาเหตุของการเกิดข้อบกพร่องที่ทำการเติมเนื้อในร่องเชื่อมไม่สมบูรณ์จะมาจากความผิดพลาดของสองส่วนประกอบหลัก คือ ส่วนของการออกแบบแนวเชื่อมที่กำหนดระยะของร่องบากไม่สัมพันธ์กันกับการเลือกขนาดลวดเชื่อมซึ่งต้องเกี่ยวพันกันกับจำนวนของรอบของการเชื่อมจนเต็มช่องร่องบาก จากงานวิจัยทดลองเชื่อมเหล็กกล้าผสมแมงกานีสสูง ด้วยขบวนการเชื่อมแบบไฮบริด Laser-MAG Welding ผลการทดลองพบว่าระยะห่างของรอยต่อมีผลการเกิด Underfill ดังแสดงภาพผลการทดลองในรูปที่ 8.73 โดยกรณีที่ระยะรอยต่อแคบ รูป (ก)-(ข) จะเกิด Underfill ที่บริเวณขอบแนวเชื่อมทั้งสองข้าง และถ้ากว้างมากขึ้นจะเกิดรอยร้าวลึกที่กึ่งกลางของแนวรูป (ง)-(จ) และถ้ากำหนดระยะที่เหมาะสมจะไม่เกิดข้อบกพร่องดัง รูป (ค) ดังนั้น จึงต้องออกแบบระยะของร่องเชื่อมให้เหมาะสมก็สามารถจัดปัญหาการเติมเนื้อเชื่อมในร่องแนวเชื่อมไม่สมบูรณ์ในลักษณะนี้ได้



รูปที่ 8.73 อิทธิพลของระยะรอยต่อที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องที่เติมเนื้อเชื่อมไม่สมบูรณ์ที่ผิวหน้า

ที่มา : Steve Shi, *Laser and hybrid laser MAG welding of thick section C-Mn steel*, 2005

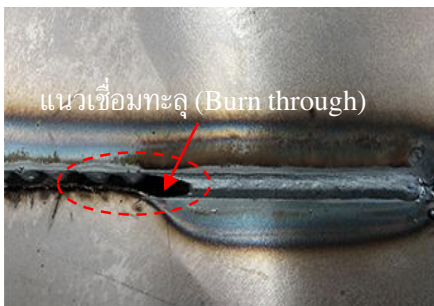
อีกส่วนที่มีอิทธิพลต่อการเกิดข้อบกพร่อง Underfill คือ ปัจจัยการเชื่อม โดยเฉพาะความสัมพันธที่เหมาะสมของกระแสไฟเชื่อม ขนาดลวดเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม รวมถึงเทคนิคการส่ายของลวดเชื่อม ปกติในการเติมเนื้อโลหะในร่องรอยต่อที่ต้องเชื่อมหลาย ๆ รอบในการออกแบบรอยต่อได้มีการคำนวณเนื้อลวดเชื่อมที่เพียงพอต่อการเชื่อมเต็มแนวด้วยหลักการพื้นที่ว่างทางคณิตศาสตร์ แต่ในทางปฏิบัติพบว่าเนื้อเชื่อมไม่เพียงเกิด Underfill ขึ้น ปัญหานี้เกิดจากการมองข้ามพฤติกรรมทางโลหะวิทยาของน้ำโลหะที่มีการหดตัวเมื่อเย็นตัวลง (Solidification of metal) ซึ่งจำเป็นต้องมีการเพื่อน้ำโลหะให้มีส่วนเกินไว้เพื่อการยุบตัวลงหลังการเชื่อมเสร็จ จะได้เนื้อโลหะเพียงพอในการเติมลงในร่องรอยต่อได้อย่างสมบูรณ์ สำหรับการตรวจสอบและการแก้ไขข้อบกพร่องที่ไม่เป็นอุปสรรคในทางปฏิบัติการ ด้วยเหตุเพราะเป็นข้อบกพร่องที่เกิดภายนอกสังเกตเห็นได้ชัด และสามารถเพิ่มเติมเนื้อเชื่อมจนเต็มร่องรอยต่ออย่างสมบูรณ์ได้ เพียงแต่เป็นการเพิ่มขั้นตอนการทำงาน เพิ่มค่าใช้จ่ายและใช้เวลาในการปฏิบัติที่มากขึ้นโดยไม่จำเป็น

5. แนวเชื่อมทะลุ (Burn through) เป็นข้อบกพร่องที่มีความรุนแรงที่ไม่สามารถยอมให้เกิดขึ้นได้ โดยเป็นลักษณะของการหลอมละลายจนโลหะหลักทะลุเป็นรู ซึ่งจะเกิดขึ้นได้กับการเชื่อมแนวราบและการเชื่อมแนวผิวหน้าที่จุดสิ้นสุดแนวเชื่อม ส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นกับขบวนการเชื่อมท่อหรือเชื่อมโลหะแผ่นบาง ดังแสดงลักษณะของข้อบกพร่องในรูปที่ 8.74 จากการวิเคราะห์ถึงสาเหตุพบว่าเกิดจากการเชื่อมที่ป้อนพลังงานความร้อนเข้าแนวเชื่อมมากเกินไป (High heat input) โดยมาจากการใช้กระแสไฟเชื่อมที่สูงเกินไป นอกจากนี้ จะเป็นความผิดพลาดของการกำหนดระยะห่างของรอยต่อที่กว้างมากเกินไป และที่มีอิทธิพลมากที่สุดคือความชำนาญของช่างเชื่อมในการควบคุมหัวเชื่อม หรือถ้าเป็นการเชื่อมด้วยหุ่นยนต์แขนกลจะต้องตั้งระยะอาร์กให้ถูกต้อง ข้อบกพร่องในลักษณะนี้นอกจากจะทะลุ

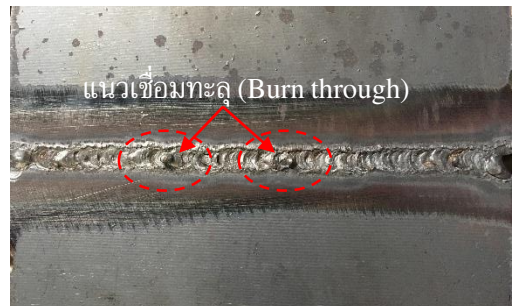
เกิดเป็นรูแล้วยังเป็นลักษณะของการหย่อนหรือยุบตัวของบ่อหลอมละลายจนเป็นหลุมลึก ซึ่งบางครั้งเรียกข้อบกพร่องนี้ว่า “การหย่อน (Sagging)” มักเกิดที่ตำแหน่งของจุดสิ้นสุดการเชื่อมหรือจุดรอยต่อของการเชื่อมแนวต่อแนว ดังแสดงในรูปที่ 8.75

การป้องกันการเกิดรอยเชื่อมทะลุทำได้ไม่ยากและไม่ซับซ้อน เพียงเพิ่มความละเอียดของขบวนการเชื่อม ได้แก่ การตรวจเช็ค WPS และองค์ประกอบอื่น ๆ ให้ถูกต้อง โดยเฉพาะปริมาณความร้อนที่ใช้ในการอาร์กหลอมต้องไม่มากเกินไป หรือความเร็วเชื่อมต้องไม่ช้าเกินไปจะทำให้เกิดความร้อนสะสมจนเป็นเหตุให้ผิวผนังด้านในท่อหรือด้านล่างเกิดการหลอมละลาย และด้วยมีแรงโน้มถ่วงร่วมด้วยทำให้โลหะเหลวไหลลงด้านล่างที่เร็วขึ้น ส่งผลทำให้เกิดรอยหย่อนหรือทะลุได้

สำหรับการตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องสามารถทำได้ค่อนข้างง่าย เพราะเป็นข้อบกพร่องภายนอกที่มีขนาดใหญ่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ส่วนการแก้ไขข้อบกพร่องสามารถทำการตกแต่งรอยต่อให้สะอาดและอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ จากนั้นก็ทำการเชื่อมเติมเนื้อเชื่อมให้เต็มรอยที่ทะลุหรือหย่อนตัว ซึ่งจะต้องระมัดระวังแนวเชื่อมซึมลึกที่ต้องไม่มากเกินไปจนเกินที่ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานข้อบกพร่องแนวเชื่อม



(ก) ข้อบกพร่องบนแนวเชื่อมผิวหน้า



(ข) ข้อบกพร่องบนแนวเชื่อมด้านหลัง

รูปที่ 8.74 ข้อบกพร่องแนวเชื่อมทะลุ (Burn through)

ที่มา : *Buen through in thin plate welding, 2012*



(ก) การหย่อนตัวเชื่อมโลหะท่อ

ที่มา : *Pipeline Pitting and Repair, 2021*



(ข) การหย่อนตัวเชื่อมโลหะแผ่นหนา

ที่มา : *Welder LAB, 2020*

รูปที่ 8.75 ข้อบกพร่องแบบทะลุของแนวเชื่อมที่เกิดจากการหย่อนตัว (Sagging)

ในกรณีของการเชื่อมโลหะที่เป็นท่อ หรือถึงแม้จะความดันที่ไม่สามารถเข้าไปทำการตรวจสอบภายในได้ด้วยสายตาได้ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 8.76 (ก) จำเป็นต้องใช้วิธีการตรวจสอบด้วยวิธีแบบ UT หรือ RT ดังแสดงตัวอย่างของการตรวจสอบแบบ RT บนชิ้นงานจำลองข้อบกพร่อง ในรูปที่ 8.76 (ข) ที่สามารถเห็นข้อบกพร่องที่รอยทะลุเป็นจุดค่อนข้างเด่นชัด ด้วยเพราะเป็นรอยบบกพร่องที่มีขนาดใหญ่ และถ้าพบข้อบกพร่องมีขนาดเกินเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ต้องทำการเชื่อมซ่อมแซม



(ก) แนวเชื่อมรากที่เกิดรอยเชื่อมทะลุ

(ข) การตรวจสอบแบบ RT บนแนวเชื่อมจำลอง

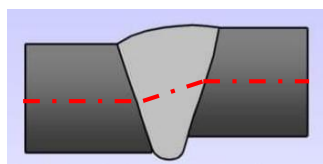
รูปที่ 8.76 ข้อบกพร่องแนวเชื่อมทะลุด้านรากของท่อและการตรวจสอบแบบวิธี RT

ที่มา : Welding fire protection piping 101, 2006

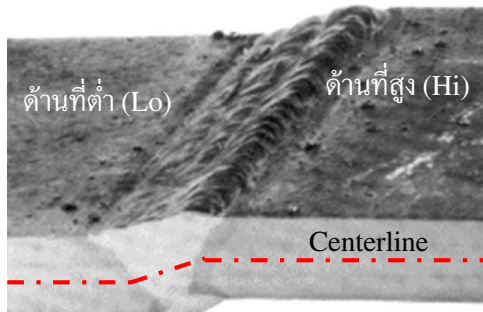
6. รอยต่อขอบเชื่อมเอียง (Weld misalignment) เป็นข้อบกพร่องที่สูญเสียรูปทรงความเป็นระนาบเดียวกันหรือเส้นตรงแนวเดียวกัน โดยแนวเชื่อมต่อจะเกิดการเอียงศูนย์กลางกันระหว่างชิ้นงานโลหะหลักที่นำมาเชื่อมต่อกัน (Misalignment) ข้อบกพร่องทำให้เกิดความยุ่งยากหรือไม่สามารถทำการประกอบงานของโครงสร้างงานเชื่อมได้ ซึ่งรูปแบบของการเอียงขอบแนวเชื่อมที่จะเกิดได้ 2 รูปแบบ คือ

- รอยต่อขอบเชื่อมเอียงเชิงเส้น (Linear misalignment) เป็นความเอียงในแนวระนาบของโลหะชิ้นงานทั้งสองที่นำมาเชื่อมต่อกัน โดยที่ชิ้นหนึ่งระดับต่ำลง (Low) อีกชิ้นหนึ่งระดับสูงขึ้น (High) จึงเป็นที่รู้จักกันในชื่อของ “Misalignment Hi-Lo” รอยขอบเอียงในลักษณะนี้มีทั้งที่เกิดกับการเชื่อมโลหะประเภทที่เป็นแผ่นหนา (Plate) และโลหะประเภทที่เป็นท่อหนา (Pipe) ดังแสดงในรูปที่ 8.77 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ข้อบกพร่องที่เอียงผิดตำแหน่งนี้สาเหตุส่วนใหญ่มาจากการเตรียมเชื่อมยึดที่เกิดความผิดพลาดของตำแหน่งยึด ที่อาจเกิดจากการวางในตำแหน่งที่ไม่ถูกต้อง ดังแสดงในรูปที่ 8.78 (ก) หรืออาจเกิดจากการบิดตัวขณะเชื่อมจนการเชื่อมจุดยึดแตก และที่เป็นปัญหามากที่สุดที่เคยพบเจอมาเป็นการเชื่อมชิ้นงานโลหะที่มีความหนาต่างกันทั้งประเภทแผ่นและประเภทท่อ ถึงแม้ว่าจะเตรียมการยึดตำแหน่งของรอยต่อโลหะที่ทำการเชื่อมได้สมบูรณ์ (Alignment centerline) แล้วก็ตาม เหตุด้วยเพราะอัตราการขยายและการหดตัวของโลหะเมื่อได้รับความร้อนในขณะที่เชื่อมที่ต่างกัน (หนาต่างกัน) จะเกิดการบิดตัวจนก่อให้เกิดการเอียงของขอบแนวเชื่อมได้ อย่างไรก็ตาม การเตรียมจับยึดชิ้นงานที่ดีไม่มี

ความผิดพลาดจะต้องมีการตรวจสอบความเที่ยงตรงด้วยเครื่องมือเกจวัดความเยื้องของรอยต่อ (Hi-Lo mismatch gauge) ดังแสดงตัวอย่างการตรวจสอบวัดความเยื้องในรูปที่ 8.78 (ข)



รูปแบบรอยเยื้องเชิงเส้น
(Linear misalignment)



(ก) รอยเยื้องที่เกิดจากการเชื่อมโลหะประเภทแผ่น

ที่มา : Defects and Discontinuities, 2014



(ข) รอยเยื้องที่เกิดจากการเชื่อมโลหะประเภทท่อ

ที่มา : Integrated weld defect : Linear misalignment, 2011

รูปที่ 8.77 ข้อบกพร่องรอยต่อขอบเชื่อมเยื้องเชิงเส้น (Linear misalignment weld)



(ก) การเตรียมรอยต่อที่เยื้องศูนย์ (Mismatch) (ข) การเตรียมรอยต่อที่ถูกต้อง (Match)

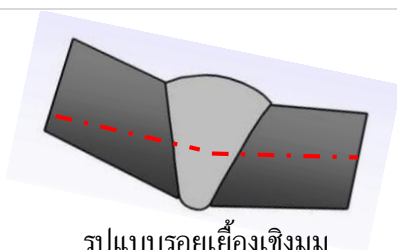
รูปที่ 8.78 การเตรียมรอยต่อที่มีอิทธิพลในการเกิดข้อบกพร่องแบบรอยขอบเชื่อมเยื้อง

ที่มา : Welddotcom, 2020

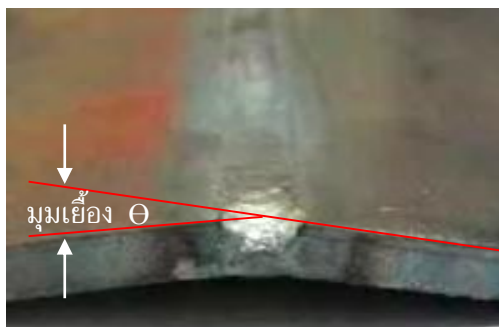
● รอยต่อขอบเชื่อมเยื้องเชิงมุม (Angular misalignment) เป็นข้อบกพร่องที่สูญเสียรูปทรงจากการที่โลหะชิ้นงานสองชิ้นมีระนาบผิวที่ไม่ขนานกันหรือไม่เป็นไปตามมุมมองศอกที่กำหนดไว้ มีรูปแบบคล้ายกับการบิดตัวของแนวเชื่อม ซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดขึ้นได้ทั้งการเชื่อมโลหะประเภทแผ่นและประเภทท่อ ดังแสดงรูปแบบของการเยื้องเชิงมุมในรูปที่ 8.79 (ก) และ (ข) ตามลำดับ สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการเตรียมรอยต่อที่ไม่สมดุล เช่น การเว้นระยะห่างของรอยต่อไม่เท่ากัน (Cap width) เมื่อทำการเชื่อมจะเกิดหดตัวลงไม่สัดส่วนที่ไม่เท่ากัน โดยมุมที่เยื้องไปในทิศทางที่มีระยะห่างของรอยต่อที่กว้าง กรณีนี้มักเกิดกับการเชื่อมโลหะประเภทท่อหนา ส่วนกรณีที่เกิดกับการเชื่อมโลหะประเภทแผ่นมักจะเกิดจากความกว้างของช่องราก (Root gap) ระบายของผิวราก (Root face) และมุมเอียงของผิวรอยบาก (Angle groove face) ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้ต้องสมมาตรกันทั้งสองข้างของชิ้นงานโลหะที่เตรียมเชื่อม เพราะถ้าไม่สมมาตรกันจะหดตัวไม่เท่ากัน ระยะที่ห่าง/กว้างจะเกิดการหดตัวที่มากกว่า ซึ่งเป็นต้นเหตุของการทำให้แนวเชื่อมเกิดการเอียงศูนย์หลังแนวเชื่อมเย็นตัวลง นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยที่มาจากขบวนการเชื่อม โดยเฉพาะมุมของหัวเชื่อมที่ต้องสร้างบ่อหลอมละลายที่สมดุลซ้าย-ขวาของชิ้นงาน เพราะถ้าเกิดการอาร์กหลอมละลายด้านใดมากด้านนั้นจะเกิดการหดตัวมากและเย็นตัวช้ากว่า จะดึงด้านตรงข้ามทำให้เกิดการบิดตัวเชิงมุมเกิดขึ้น ทำให้ชิ้นงานเชื่อมเกิดข้อบกพร่องแบบขอบเชื่อมเยื้องเชิงมุมขึ้น

แนวทางป้องกันที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ การเตรียมรอยต่อของโลหะชิ้นงานให้สมบูรณ์ตามที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น โดยการจับยึด เชื่อมจุด และวัดระยะต่าง ๆ ให้ถูกต้อง ดังแสดงตัวอย่างวิธีการในรูปที่ 8.80 การเชื่อมยึดต้องได้ตำแหน่งศูนย์กลาง (Centerline) พร้อมตรวจสอบความเที่ยงตรงของระยะห่างของรอยต่อที่ต้องมีระยะที่เท่ากันทุกตำแหน่ง (Gap) และทำการตรวจสอบผิวระนาบระดับสูง-ต่ำของผิว (Hi-Lo) อย่างไรก็ตามปัจจัยการเชื่อมที่เหมาะสมกับความชำนาญของช่างเชื่อมมีส่วนสำคัญยิ่ง เช่น ถ้าควบคุมบ่อหลอมละลายไม่สมดุลของทั้งสองขอบรอยต่อ รอยต่อจะเกิดการหลอมละลายที่ไม่เท่ากันและเย็นตัวช้าเร็วต่างกัน ซึ่งจะเป็ต้นเหตุของการบิดตัวแล้วเกิดการเยื้องขอบแนวเชื่อมขึ้น และยิ่งไปกว่านั้นถ้าเป็นการเชื่อมโลหะที่ต่างชนิดและต่างขนาดมักจะมีโอกาสเกิดข้อบกพร่องในลักษณะนี้ได้ง่ายขึ้น

การตรวจสอบข้อบกพร่องแบบขอบเชื่อมเยื้องนี้เป็นการตรวจสอบภายนอก ที่สามารถเห็นข้อบกพร่องได้ชัดเจนเพราะเกิดการเสียรูปทรงของโครงสร้างแนวเชื่อม การตรวจสอบจะใช้เครื่องมือช่วยในการตรวจสอบ คือ Hi-Lo Welding gage ดังแสดงในรูปที่ 8.81 เพื่อความแม่นยำของการตรวจสอบซึ่งถ้าพบข้อบกพร่องในลักษณะนี้ต้องแก้ไขซ่อมแซมซึ่งมักเป็นการแก้ไขด้วยการเชื่อมใหม่ทั้งแนว โดยเฉพาะที่เกิดกับการเชื่อมต่อโลหะประเภทท่อที่ใช้ในการส่งถ่ายของเหลวหรือแก๊ส ถ้ามีรอยเยื้องของขอบแนวเชื่อมจะเป็นจุดที่ทำให้เกิดการปะทะกับของเหลวที่ไหลผ่าน ซึ่งส่งผลต่อแนวเชื่อมจะเกิดอัตราการสึกหรอที่สูง เกิดความเค้นสูง และยังทำให้การไหลปั่นป่วนของของเหลวหรือแก๊สภายในท่อ จะทำให้ผนังท่อสึกหรอเร็วมากขึ้นหรืออาจทะลุจนเกิดความเสียหาย ดังนั้น การเชื่อมที่ไม่ได้ตำแหน่งศูนย์กลาง (Misalignment) จึงเป็นเรื่องที่ต้องป้องกันไม่ให้เกิดและถ้าเกิดจะต้องทำการแก้ไขให้สมบูรณ์

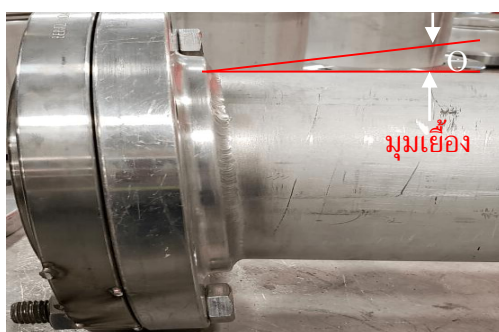


รูปแบบรอยเยื้องเชิงมุม
(Angular misalignment)



รูปที่ 8.79 ข้อบกพร่องรอยต่อขอบ
เชื่อมเยื้องเชิงมุม (Angular
misalignment weld)

(ก) รอยเยื้องเชิงมุมของการเชื่อมโลหะประเภทแผ่น
ที่มา : *Measurement of angular misalignment, 2012*



(ข) รอยเยื้องเชิงมุมของการเชื่อมโลหะประเภทท่อ
ที่มา : *Pipeline Safety, 2014*



การเชื่อมยึด (Tack weld)



การตรวจสอบระยะห่าง (Gap)



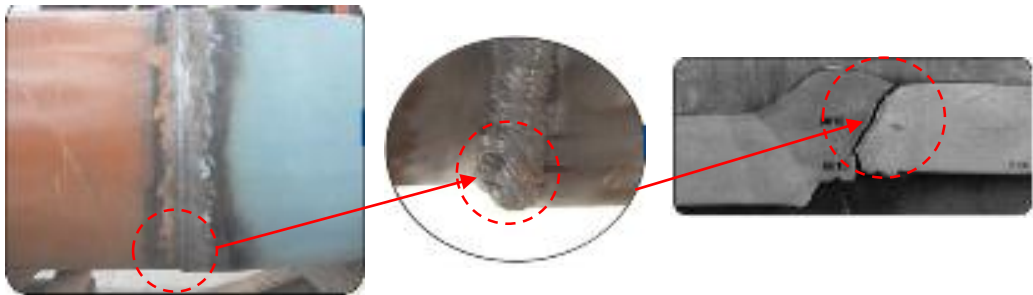
การตรวจสอบระดับ (Hi-Lo)

รูปที่ 8.80 การเตรียมและตรวจสอบรอยต่อก่อนทำการเชื่อมป้องกันแนวเชื่อมเยื้องเชิงมุม
ที่มา : *Assessment of Weld Misalignment and Shell Distortions, 2014*



รูปที่ 8.81 การตรวจสอบข้อบกพร่องรอยขอบเชื่อมเยื้องเชิงมุมด้วยเกจวัด
ที่มา : *G.A.L. Gade Co.-Hi-Lo Welding gage, 2011*

ข้อบกพร่องรอยต่อขอบเชื่อมเยื้องทั้งเชิงเส้นและเชิงมุม ต่างก็ทำให้โครงสร้างของแนวเชื่อมไม่สมดุลในแนวกึ่งกลาง (Unbalance centerline) ซึ่งมักมีผลกระทบโดยตรงต่อการนำไปประกอบเข้ากับชิ้นส่วนของโครงสร้างอื่นที่นอกจากจะประกอบยากขึ้นแล้ว ยังทำให้โครงสร้างเกิดการรัดหรือดัดงอ จนเกิดเป็นความเค้นสะสมขึ้น เมื่อใช้งานหรือรับภาระงานก็จะทำให้ชิ้นงานแนวเชื่อมเกิดการแตกหักขึ้นได้ ดังแสดงตัวอย่าง การเชื่อมโลหะท่อนที่เกิดการเยื้องเชิงเส้นขึ้นในรูปที่ 8.82 เมื่อนำไปใช้งานแนวเชื่อมต้องดัดงอขณะประกอบส่งผลให้แนวเชื่อมเกิดการแตกร้าวขึ้นภายใต้ภาระโหลดที่ต่ำกว่าที่สามารถรับได้จนเกินจริง



รูปที่ 8.82 ตัวอย่างข้อบกพร่องรอยขอบเชื่อมเยื้องเกิดการแตกร้าวเมื่อนำไปใช้งาน

ที่มา : *Welding Construction Issues* , 2013

ในบทเรียนนี้ผู้เขียนได้พยายามทำการรวบรวมข้อบกพร่องที่เกิดจากการเชื่อมต่อโลหะในรูปแบบต่าง ๆ ของงานเชื่อม ที่ซึ่งเป็นข้อบกพร่องที่มักพบเจอกันบ่อย ๆ และเป็นข้อบกพร่องที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงสร้างงานเชื่อม และได้พยายามค้นคว้าหาที่มาและต้นสายปลายเหตุของการเกิดข้อบกพร่องและรวมถึงวิธีการป้องกันไม่ให้เกิดข้อบกพร่องของรูปแบบต่าง ๆ นั้น พบว่าแท้จริงแล้วข้อบกพร่องของการเชื่อม (Weld defected) มีมากมายจนไม่อาจนำมาเสนอได้หมด ยังมีข้อบกพร่องอีกจำนวนมากที่มีโอกาสที่จะเกิดขึ้น ก็คงด้วยเพราะเทคโนโลยีของการเชื่อมต่อโลหะต้องอาศัยปัจจัยหรือองค์ประกอบร่วมหลายด้าน เช่น ด้านวัสดุที่นำมาเชื่อมทั้งโลหะชิ้นงานและวัสดุลวดเชื่อม ด้านปัจจัยของเครื่องมือเชื่อม ด้านทักษะของช่างเชื่อมหรือโปรแกรมสมองแกนกล และรวมถึงสภาพแวดล้อมของสถานที่เชื่อม ซึ่งแต่ละด้านก็มีองค์ประกอบย่อย ๆ ลงไปอีกมาก ดังนั้น ไม่ใช่เรื่องแปลกหรือเรื่องที่ต้องตระหนักตกใจอะไรเมื่อเชื่อมแล้วเกิดข้อบกพร่อง เพราะการที่จะทำการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ให้เป็นค่าคงที่ทั้งหมดคงทำได้ยากมาก แต่ถ้าช่างเชื่อมหรือผู้ที่ปฏิบัติการงานเชื่อมศึกษาเรียนรู้ถึงสาเหตุที่จะก่อให้เกิดข้อบกพร่องนั้น และหาวิธีการป้องกันก็สามารถขจัดปัญหาข้อบกพร่องที่จะเกิดขึ้นได้ โดยยิ่งลงมือปฏิบัติการด้วยตนเองมากเท่าไรก็ยิ่งจะสะสมประสบการณ์ความเชี่ยวชาญมากขึ้นเท่านั้น จึงเป็นที่มาของการสร้างมาตรฐานระดับความเชี่ยวชาญของบุคลากรด้านงานเชื่อมขึ้น ซึ่งมีทั้งมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา (AWS: American Welding Society) มาตรฐานยุโรป (IIW ; International Institute of Welding) เป็นต้น

ดัชนีคำศัพท์บทที่ 8

Angular misalignment – รอยเชื่อมที่เกิดการเยื้องในแบบเชิงมุม

Burn through – แนวเชื่อมทะลุ

Carter pipe – โพรงหดตัวที่จุดปลายบ่อหลอมที่คล้ายกับท่อสุบยาเส้น

Cavities – ข้อบกพร่องแบบโพรงอากาศ

Changes of geometry – การสูญเสียรูปทรงของแนวเชื่อม

Cluster porosity – รูพรุนแบบรวมเป็นกลุ่ม

Cold crack – การแตกขณะเย็น

Continuous undercut – รอยกัดแห้วแบบยาวต่อเนื่องตลอดแนวเชื่อม

Crack propagation – การขยายตัวของรอยร้าว

Crack susceptibility – ความไวต่อการแตกร้าว

Cracks – รอยร้าวของแนวเชื่อม

Crater crack – รอยแตกกึ่งกลางบ่อหลอม

Crown undercut – รอยกัดแห้วบริเวณด้านผิวหน้าแนวเชื่อม

Defect prevention – การป้องกันข้อบกพร่อง

Discontinuities – ความไม่ต่อเนื่องของเนื้อเชื่อม

Distortion – แนวเชื่อมเกิดการบิดตัว

Edge crack – การแตกร้าวที่ขอบแนวเชื่อ

Elongated pores – โพรงอากาศแบบแนวยาว

Excess fillet weld – ส่วนเกินของแนวเชื่อมมุม

Excess root weld – ส่วนเกินของด้านแนวเชื่อมราก

Excess weld reinforcement – ส่วนเกินของด้านหน้าผิวแนวเชื่อม

Excessive convexity – ความนูนส่วนเกิน

Excessive penetration – แนวเชื่อมซึมลึกมากเกินไป

External defects – ข้อบกพร่องภายนอก

Fusion line crack – การแตกร้าวในแนวเชื่อม

Hat cracking – รอยแตกที่มีรูปทรงคล้ายหมวกสวมหรือหัวดอกเห็ด

Hot crack – การแตกขณะร้อน

Imperfect shape – ความไม่สมบูรณ์ของรูปร่างและมิติของแนวเชื่อม

Inclusion – สารมลทินฝังในเนื้อเชื่อม

Incomplete fusion – การหลอมละลายไม่สมบูรณ์

Incorrect shape – รูปทรงผิดรูป

Intergranular crack – การแตกตามขอบเกรน

Intermittent undercut – รอยกัดแห้วแบบเว้นระยะ

Internal defects – ข้อบกพร่องภายใน

Internal porosity – โพรงอากาศภายใน

Interpass หรือ Inter-run undercut – รอยกัดแห้วระหว่างเที่ยวเชื่อม

Irregular oxide shape – รูปทรงของออกไซด์ที่ไม่แน่นอนตายตายตัว

Lack fusion crack – การแตกร้าวจุดที่เกิดการไม่หลอมละลายของแนวเชื่อม

Lamination defects – ข้อบกพร่องแบบรอยแยกชั้น

Linear misalignment – รอยต่อขอบเชื่อมเยื้องเชิงเส้น

Linear porosity – รูพรุนแบบเป็นแนวยาวต่อเนื่อง

Longitudinal crack – การแตกร้าตามแนวยาวของรอยเชื่อม

Metallic inclusion defect – ข้อบกพร่องแบบสารโลหะฝังใน

Misalignment defects – ข้อบกพร่องจากการเยื้องศูนย์ของรอยเชื่อม

Overlap – ข้อบกพร่องรอยเชื่อมเกย

Oxide inclusion defect – ข้อบกพร่องแบบสแลกฝังในแนวเชื่อม

Piping porosity – โพรงหนองแบบท่อใหญ่

Regular oxide shape – รูปทรงของออกไซด์ที่มีรูปทรงที่แน่นอนตายตัว

Reheat crack – การแตกร้าเมื่อได้รับความร้อนซ้ำ

Root crack – การแตกร้าที่แนวซิมลึก

Root undercut – รอยกัดแหว่งบริเวณผิวด้านในของแนวเชื่อม

Runoff tabs – แผ่นรองเสริมป้องกันการแตกที่ปลายแนวเชื่อม

Shape inclusion – รูปร่างของสารมลทิน

Shrink defects – ข้อบกพร่องแบบรอยยุบตัว

Single toe crack – การแตกด้านเดียวที่ตีนแนวเชื่อม

Spatters – สะเก็ดหรือเม็ดโลหะบนแนวเชื่อม

Star crack – รอยแตกที่เป็นรูปคล้ายดวงดาว

Stop filler defect – ข้อบกพร่องที่จุดหยุดลด

Stress concentration – จุดที่เกิดการสะสมของความเค้นที่สูง

Throat crack – รอยแตกกึ่งกลางตามยาวแนวเชื่อม

Toe crack – การแตกร้าที่ตีนแนวเชื่อม

Trangranular cracking – การแตกแบบผ่าก้อนเกรน

Transverse HAZ crack – การแตกร้าขวางแนวผลกระทบร้อนของแนวเชื่อม

Transverse weld crack – การแตกร้าขวางแนวเชื่อม

Unbalance centerline – แนวเชื่อมที่มีความไม่สมดุลในแนวกึ่งกลาง

Underbead crack – รอยแตกร้าใต้แนวเชื่อม

Undercut – รอยกัดแหว่งที่ขอบแนวเชื่อม

Underfill – การเติมเนื้อรอยเชื่อมไม่สมบูรณ์

Uniformly scattered porosity – รูพรุนแบบกระจายตัว

Welding defects – ข้อบกพร่องของงานเชื่อม

Welding shrinkage – การหดตัว/ยุบตัวของแนวเชื่อม

Worm holes – โพรงหนองเป็นกลุ่มเหมือนรูปล้ำปลา

Wormholes – ข้อบกพร่องแบบโพรงหนอง

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 8

ข้อที่ 1. จงเขียนอธิบายความแตกต่างของข้อบกพร่องที่เกิดภายใน (Internal defects) กับข้อบกพร่องที่เกิดอยู่ภายนอก (External defects) พร้อมยกตัวอย่างประกอบการอธิบายอย่างน้อยอย่างละ 4 ชนิด ข้อบกพร่อง

ข้อที่ 2. จงบอกความแตกต่างของการแตกร้าแบบ Hot crack กับ Cold crack พร้อมอธิบายกลไกของการเกิดการแตกร้าทั้งสองแบบมาพอสังเขป (ควรเขียนภาพประกอบการอธิบาย)

ข้อที่ 3. จงอธิบายความหมายของการแตกร้าในรูปแบบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ พร้อมระบุตำแหน่งของการเกิดบนแนวเชื่อมมาให้ชัดเจน (วาดภาพประกอบการระบุตำแหน่งรอยแตกร้า)

- รอยแตกร้าปลายบ่อหลอม (Crater crack)
- การแตกร้าขวางแนวเชื่อม (Transverse crack)
- การแตกร้าตามยาวของแนวเชื่อม (Longitudinal crack)
- การแตกร้าที่ไม่หลอมละลาย (Lack of fusion crack)
- การแตกร้าที่ขอบแนวเชื่อม (Edge crack)
- การแตกร้าแนวซึ่มลึก (Root crack)
- การแตกร้าขวางแนว HAZ (Transverse HAZ crack)
- การแตกร้าที่ตีนแนวเชื่อม (Toe crack)

ข้อที่ 4. จงบอกเทคนิคการป้องกันการแตกร้าที่รากของแนวเชื่อม (Root crack) พร้อมบอกผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้เทคนิคดังกล่าวอย่างชัดเจน

ข้อที่ 5. จงอธิบายกลไกการเกิดผลึกของคาร์ไบด์ตามขอบเกรนที่เกิดจากให้ความร้อนซ้ำ (Reheat)

ข้อที่ 6. จงอธิบายสาเหตุหลักของการเกิดรอยฉีกร้าของแนวเชื่อมแบบ Lamellar tearing พร้อมบอกถึงวิธีการป้องกันการเกิด (ควรวาดภาพประกอบการอธิบาย)

ข้อที่ 7. จงอธิบายความแตกต่างของข้อบกพร่องโพรงอากาศในงานเชื่อม ชนิดรูพรุน (Porosity) ชนิดโพรงหนอน (Wormholes) และชนิดช่องว่างจากการหดตัว (Shrinkage voids)

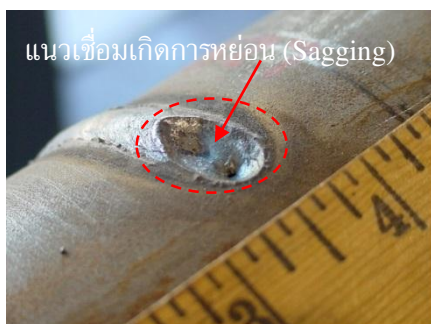
ข้อที่ 8. จงบอกถึงความแตกต่างของกลไกการเกิดพฤติกรรมของการหดตัวจากโครงสร้างเดนไดรต์ (Interdendritic microshrinkage) กับการหดตัวที่ผ่านขอบเกรน (Transgranular microshrinkage)

ข้อที่ 9. จงอธิบายถึงที่มาของข้อบกพร่องแนวเชื่อมที่มีโลหะทั้งเตนฝังใน (Tungsten inclusion)

ข้อที่ 10. จงบอกสาเหตุของการเกิดข้อบกพร่องแบบเกิดการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Lack of fusion) ในตำแหน่งดังต่อไปนี้

1. Lack of inter-run fusion
2. Lack of side wall fusion และ
3. Lack of root fusion

ข้อที่ 11. จากรูปเป็นข้อบกพร่องแบบทะเลของแนวเชื่อมที่เกิดจากการหย่อนตัว (Sagging) ของบ่อหลอมละลาย จงบอกวิธีการป้องกันการเกิดมาพอเข้าใจ



(ก) การหย่อนตัวเชื่อมโลหะท่อ

ที่มา : Pipeline Pitting and Repair, 2021



(ข) การหย่อนตัวเชื่อมโลหะแผ่นหนา

ที่มา : Welder LAB, 2020

ข้อที่ 12. จากรูป (ก) และ (ข) เป็นขบวนการขั้นตอนอะไร และทำเพื่ออะไร จงอธิบายอย่างละเอียด



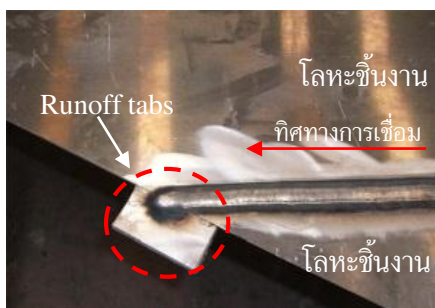
(ก)

ที่มา : Assessment of Weld Misalignment and Shell Distortions, 2014



(ข)

ข้อที่ 13. จากรูป (ก) และ (ข) เป็นขบวนการทำ Runoff tab จงอธิบายจุดประสงค์อย่างละเอียด



(ก) การสร้าง Runoff tab โลหะแผ่นบาง

ที่มา : Aluminum alloys MIG Welding, 2012



(ข) การสร้าง Runoff tab โลหะแผ่นหนา

ที่มา : AWS Syracuse section, 2012

บรรณานุกรมบทที่ 8

- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) เรื่องกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม การเชื่อมและกระบวนการที่เกี่ยวข้อง-การจำแนกประเภทของความไม่สมบูรณ์ทางเรขาคณิตในวัสดุโลหะ เล่ม 1 การเชื่อมหลอมละลาย มอก.2692 เล่ม 1-2558
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) มาตรฐานการตรวจสอบรอยเชื่อมโครงเหล็กรูปพรรณด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (มยผ. 1561-51) ถึง มยผ. 1565- กรมโยธาธิการและผังเมือง พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2551
- American National Standard: AWS. Standard Symbols for Welding, Brazing and Nondestructive Examination. Supersedes ANSI/AWS A2.4-98. 6th Edition, March 23, 2007.
- American Petroleum Institute (API). Welding Inspection and Metallurgy-Recommended Practice 577. 1st Edition, October, 2004.
- American Petroleum Institute. Welding Pipelines and Related Facilities-API Standard M 1104. 21st Edition, 2017.
- American Society of Mechanical Engineering (ASME). Setting: The Standard Boiler and Pressure Vessel Code (An International Code). Published by ASME, 2017.
- Annette O'Brien, Carlos Guzman. Welding Handbook Vol.4-Materials and Application, Part 1. 9th Edition. American Welding Society, 2011.
- AROTEC Inspection Partner Co. Welding Defects- Part 1. September 13, 2021.
- ASM International. Failure Analysis Case Histories : Processing Errors and Defects. Published by ASM, 2005.
- AWS-American Welding Society. Pocket Handbook for Visual Inspection and Weld Discontinuities Causes and Remedies. Published by AWS, 2004.
- Carolyn Fink and Manuela Zinke. Welding of Nickel-based Alloy 617 Using Modified Dip Arc Processes. Journal of Weld World-IIW. February, 2013.
- CSWIP 3.1 Welding Imperfections and Materials Inspection. TWI Training & Examination Services. Course Reference WIS 5. TWI Ltd., 2009.
- Edward R. Bohnart. Welding and Practices. Published by McGraw-Hill. 1st Edition, 2017.
- ESAB. Pipelines Welding Handbook-Welding techniques, Welding Consumable, Defects and Remedies. XA00105920, 65 pages, 2012.
- ESAB. Repair and Maintenance Welding Handbook. Second Edition, 2009.

- ESAB. *Repair and Maintenance Welding Handbook–Selection and Application Guide Esab Repair and Maintenance Consumables*. Sescond Edition. 2011.
- F. Yusof and MF. Jamaluddin. *Welding Defects and Implications on Welded Assemblies*. University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia. 2014.
- Friction Stir Welding European Qualifications (FSW–Tech). *Friction Stir Welding Handbook*. Published by FSW–Tech., 2017.
- Indian Railways Institute of Mechanical . *Welding Defects*. Jun 16, 2015.
- Indian Railways–Center for Advance Maintenance Technology. *Hanbook on Welding Technology*. February, 2015.
- Industrial Application & Chemical Section International Atomic Energy Agency (IAEA). *Training Course Series No.13. Guidebook for the Fabrication of Non–Destructive Testing (NDT) Test Specimens*. June, 2001.
- Intermediate Arc Welding Information Book. *ARC WELDING–Metals & Fabrication (ENG094)*. Department of Training and Workforce Development. January, 2009.
- Internation Standard: ISO 5817. *Welding–Fusion Welding joints in Steel, Nickel, Titanium and Alloys (Beam Welding Excluded)–Quality Levels for Imperfections*. Third Edition, 02–15–2014.
- ISO: *Petroleum and Natural Gas Industries–Steel pipe for pipeline Transportation Systems* ISO 3183:2007 Geneva. 2007.
- John N. DuPONT, John C. LIPPOLD and Samuel D. KISER. *Welding Metallurgy and Weldability of Nickel–Base Alloys*. Published by John Wiley & Sons, Inc. 2009.
- KOBELCO. *Welding Imperfections and Preventive Measures*. Published by Kome Steel, LTD. Tokyo, 2015.
- Larry Jeffus. *Welding and Metal Fabrication*. 1st Edition, 2011.
- LINCOLN Electric. *Weld Clacking –An Excerpt from The Fabricators and Erectors Guide to Welded Steel Construction*. Lincoln Arc Welding Foundation. 2015
- LINCOLN Electric. *Weld Discontinuities*. By U/LINC WC–514, Lincoln Global, Inc. 08–2015.
- MiHa Kenda, et.al. *Analysis and Prevention of Weld Crater Cracking in Circumferential Laser Microwelding of Automotive pressure sensors*. Engineering Failure Analysis, Vol.128, 2021.

- Minhaj M. Alam, Z. Barsoum and A. Kaplan. *The Effects of Surface Topography and Lack of Fusion on the Fatigue Strength of laser Hybrid Welds*. Journal of Materials Science. 2009.
- P.S. Wei. *The Physics of Weld Bead Defects*. Novenber 21st 2012.
- Phi Evans. *Cracking Down on Weld Cracks*. Publication in the Fabricator, July 16, 2012.
- Sandeep Anand. *Welding Defects*. Welding & NDT, December 6, 2017.
- Sonit Singh. *Analysis of Various Defects Involved in Welding Metallurgy*. Conference Paper, KIT University. March, 2018.
- Stavros Kairis. *Alumunum Alloys MIG Welding Procedure Instructions*. February 8, 2012.
- Technoweld. *The Most Common Welding Defects: Causes and Remedies*. Nov 13, 2019.
- TWI Ltd. *Welding Inspection-Defects/Repairs*, Course Reference WIS 5. 2003.
- U. Zerbst. *Application of Fracture Mechanics to Welds with Crack Origin at the Weld Toe: A Review Part 1: Consequences of Inhomogeneous Microstructure for Materials Testing and Failure Assessment*. Materials Science. Welding in the World. 13 September 2019.
- UNITOR-Maritime Welding Handbook: *Welding and Related Processes for Repair and Maintenance Onboard*. 14th Edition, 2nd Revision, 2015.
- WELD DEFECTS KIT. *Real Career-Welding Solutions 13 Models*. 2017.
- William R. Oates, Alexander M. Saitta. *Welding Handbook Vol.4- Materials and Application, Part 2*. 9th Edition. American Welding Society, January 1, 1987.