

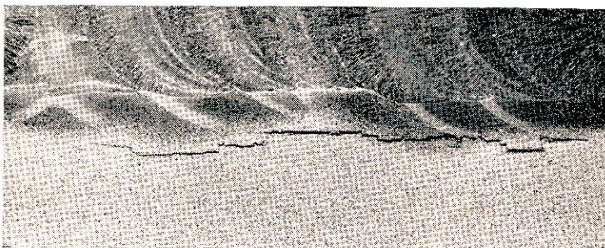
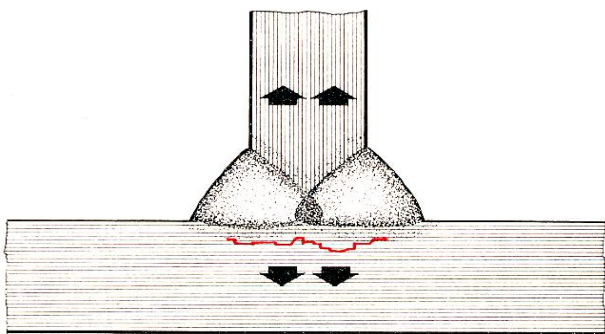
การฉีกร้าวในงานเชื่อมเหล็ก

Lamellar Tearing in Welded Steels

มนูญ เลิศวิจิตรพันธุ์¹

1. บทนำ

ได้เกิดการวิบัติของโครงสร้างเหล็กในหลายๆ เช่น แท่นขุดเจาะในทะเล เรือเดินสมุทร ภาชนะแรงดัน โดยเฉพาะที่สร้างจากแผ่นเหล็กหนา การวิบัติแต่ละครั้งก่อให้เกิดการสูญเสียจำนวนมากทั้งทรัพย์สินและชีวิตของผู้ปฏิบัติงาน สถาบัน TWI และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องจึงได้ร่วมมือกันศึกษา ค้นคว้า วิจัยหาสาเหตุเพื่อเป็นแนวทางในการป้องกันการวิบัติที่จะเกิดต่อไปในอนาคต



รูปที่ 1 รอยฉีกร้าวได้รอยเชื่อมฟิลเลท (Fillet Weld) ที่เกิดจากการหดตัวของรอยเชื่อมแล้วดึงเนื่องจากงานฉีกร้าวได้รอยเชื่อม

2. ลักษณะจำเพาะและบริเวณที่เกิด

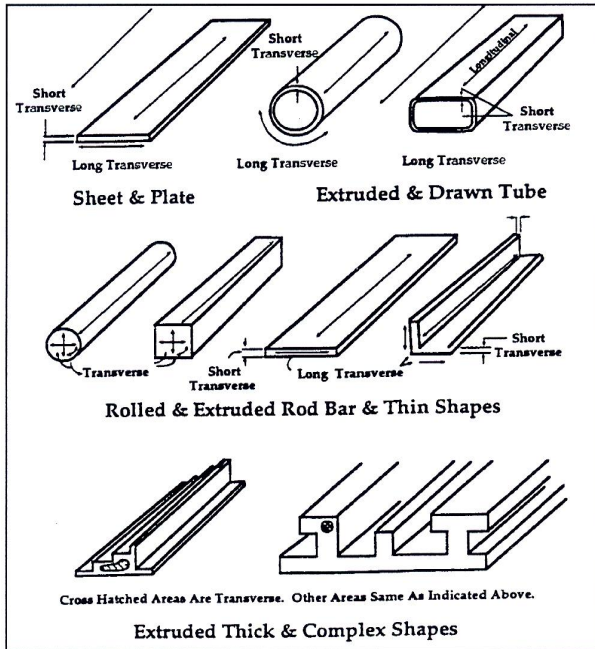
การฉีกร้าว (Lamellar Tearing) เป็นรอยแตกร้าวที่มีลักษณะจำเพาะที่แตกต่างจากรอยแตกร้าวอื่นๆ ทั้งสาเหตุ ลักษณะและตำแหน่งที่เกิด คือ รอยแตกร้าวจะเกิดในแนวหน้า (short transverse section:st) ของแผ่นเหล็กอยู่ใต้รอยเชื่อมที่ขอบบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) โดยเฉพาะรอยเชื่อมฟิลเลท (Fillet weld) หรือรอยต่อรูปตัว T รอยฉีกร้าวจะเรียงตัวขนานกับผิวแผ่นโดยเชื่อมต่อกันด้วยรอยแตกร้าวสั้นๆ ในแนวตั้ง ทำให้รอยแตกมีลักษณะเป็นขั้นๆ ขึ้น-ลงตามแนวการเรียงตัวของสารมลทินในแนวรีดของเหล็กแผ่น (ยิ่งหนามากก็ยิ่งเกิดได้ง่ายมากขึ้น) ผิวหน้ารอยแตก (Fracture Surface) จะมีลักษณะคล้ายใยของไม้เนื้ออ่อนที่ถูกดึงจนฉีกขาดจากกัน ในบางครั้งรอยฉีกร้าวจะยาวมากในบางกรณีอาจพบว่า รอยฉีกร้าวมีความยาวหลายฟุต แล้วขยายจนสังเกตเห็นได้ที่ขอบรอยเชื่อม (Toe) คล้ายกับรอยเชื่อมถูกดึงถอนออกจากแผ่นโลหะงาน

การฉีกร้าวจะไม่เกี่ยวกับไฮโดรเจน แต่หากมีไฮโดรเจนเข้าร่วมจะทำให้เกิดง่าย เร็วและรุนแรงขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจนทำให้เหล็กเปราะรอยฉีกร้าวจะเกิดที่ความเค้นต่ำลงและจะแพร่ขยายตัวได้ง่ายและเร็วขึ้น

2.1 สารมลทินสาเหตุของการฉีกร้าว

ในเหล็กแผ่นที่ผ่านกระบวนการรีด (Wrought Products) สารมลทินมักอยู่ในรูปสารประกอบซัลไฟด์ (FeMnS) และ/หรือสารประกอบอ็อกไซด์ ($\text{Fe-Al}_2\text{O}_3$) สารประกอบซิลิเกต (FeSiO_2) สารมลทินเหล่านี้จะเกิดปะปนมากับสินแร่เหล็กและถูกเติมลงในกระบวนการผลิตเหล็กสารมลทินเหล่านี้หากมีไม่มากจะไม่ส่งผลต่อคุณภาพของเหล็กแต่หากมีมากและรวมตัวกันหนาแน่นจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของเหล็กอย่างมาก

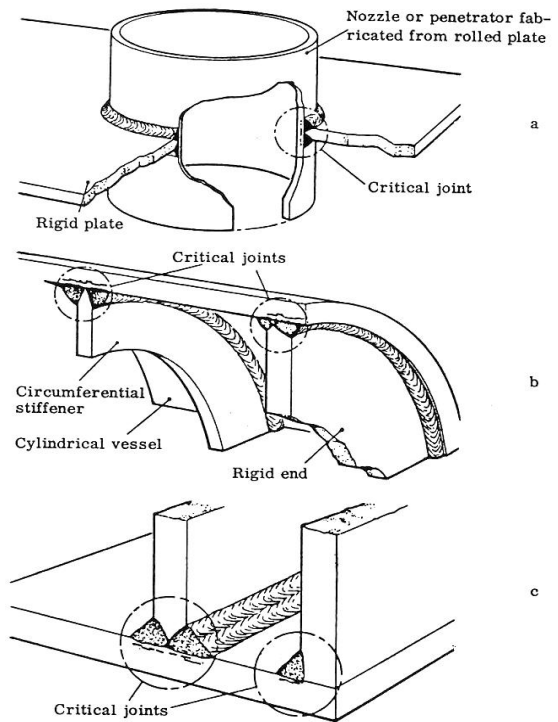
¹อาจารย์, ภาควิชาเทคโนโลยีการเชื่อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



รูปที่ 2 การกำหนดทิศทางการรับแรงของเหล็กรูปพรรณตามทิศทางการรีดของเหล็กรูปพรรณ

2.2 ลักษณะการเรียงตัวของสารมลทิน

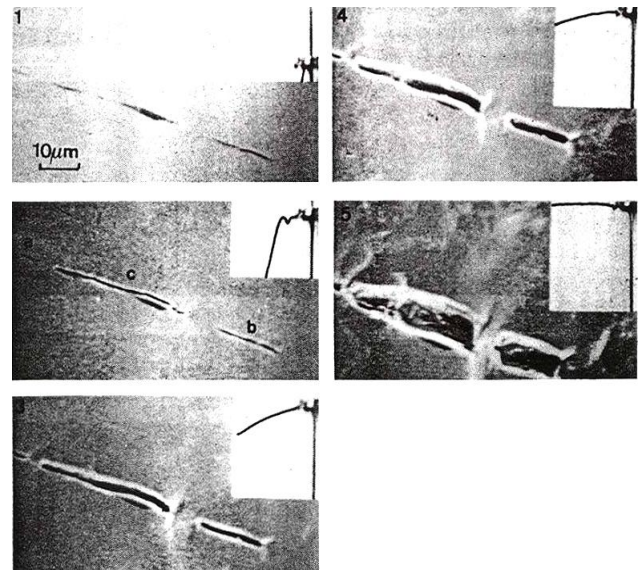
แรงบีบอัดจากการรีดจะทำให้สารมลทินซึ่งอยู่ในรูปของ $FeMnS$, และ/หรือ $Fe-Al_2O_3$, $FeSiO_4$ เรียงตัวไปตามแนวรีดหากในบริเวณที่มีสารมลทินน้อยหรือเจือจางก็จะเรียงตัวเป็นแนวเส้น (Stringer) ไปตามรอยรีด แต่ในบริเวณที่มีสารมลทินหนาแน่นมากแรงบีบอัดจากการรีดจะทำให้สารมลทินเหล่านี้แผ่กระจายออกเป็นระนาบ (Planar) กว้างหลายไมครอน (μm) แรงยึดเกาะระหว่างโมเลกุลของเหล็กกับโมเลกุลของสารมลทินนั้นต่ำมากหรือเกือบไม่มีเลยเมื่อเทียบกับแรงยึดเกาะระหว่างโมเลกุลของเหล็กด้วยกัน ดังนั้น บริเวณหน้าสัมผัสของเหล็กกับสารมลทินซึ่งขนานกับผิวรีด หรือผิวของเหล็กแผ่นจึงรับความเค้นได้ต่ำมาก ความสามารถรับความเค้นของเหล็กแผ่นจึงไม่เท่ากันในทุกทิศทาง (Anisotropic Properties) เช่น ในทิศทางตามรอยรีด (Longitudinal direction: L) จะรับแรงเค้นดึงได้ดี รองลงมา คือ ในทิศทางขนานกับการรีด (Long transverse: Lt) และทิศทางที่รับความเค้นได้ต่ำสุด คือ ทิศทางที่ตั้งฉากกับการรีด หรือแนวหนา (Short transverse :St) ในบาง ครั้งด้วยแรงดึงที่เกิดจากการหดตัวของรอยเชื่อมเพียงอย่างเดียวก็ทำให้เนื้องานเกิดการฉีกขาดได้



รูปที่ 3 ลักษณะรอยเชื่อมเหล็กและบริเวณที่มักเกิดการฉีกกร้าว

3. กลไกการเกิด

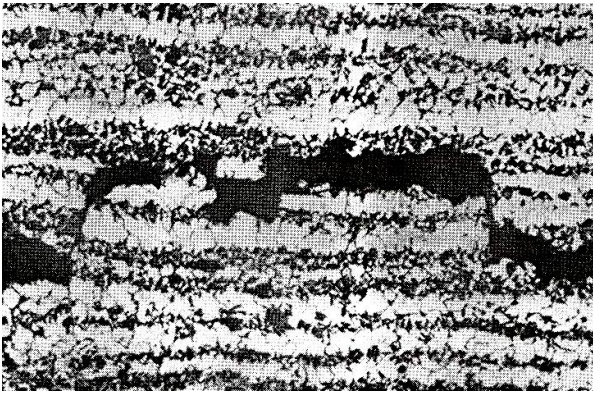
มีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ขั้นตอน คือ การเริ่มฉีกกร้าว และการขยายตัวของรอยฉีกกร้าว



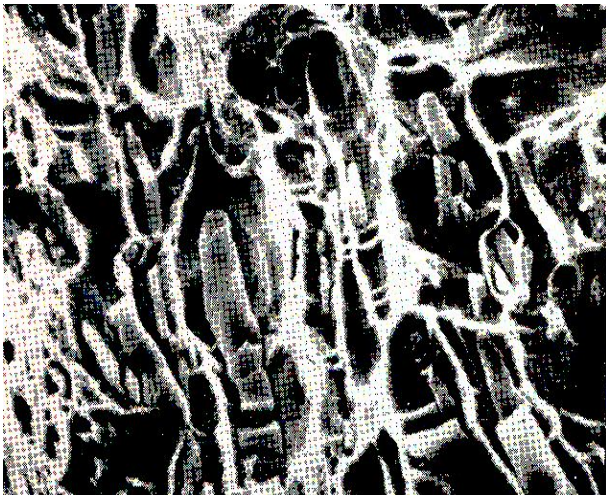
รูปที่ 4 ภาควัดผ่านบริเวณสารมลทินที่เรียงตัวในลักษณะเป็นแนวเส้นและระนาบของชิ้นทดสอบ

3.1 การเริ่มร้าว

จะเริ่มเกิดที่บริเวณผิวหน้าราบ หรือระนาบของสารมลทินที่เรียงตัวเป็นแนวยาว หรือเป็นระนาบในเนื้อเหล็ก ด้วยความเค้นดึง (Tensile stress) ที่เกิดจากการหดตัวของรอยเชื่อมและ/หรือความเค้นจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำตั้งฉากกับแนวหน้าทั้งในรูปของแรงเค้นสถิต หรือแรงเค้นวัฏจักร (Cyclic load) ระดับความเค้นที่ต่ำกว่าความเค้นคราก (Yield Stress) ก็สามารถทำให้เกิดการร้าวได้ ทั้งที่ในสภาพปกติเหล็กจะไม่เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรหรือเกิดการแตกร้าวได้ แตกรอยร้าวจะเริ่มเกิดที่ผิวหน้าสัมผัสระหว่างเหล็กกับสารมลทินที่เกือบไม่สามารถรับความเค้นดึงได้เลย



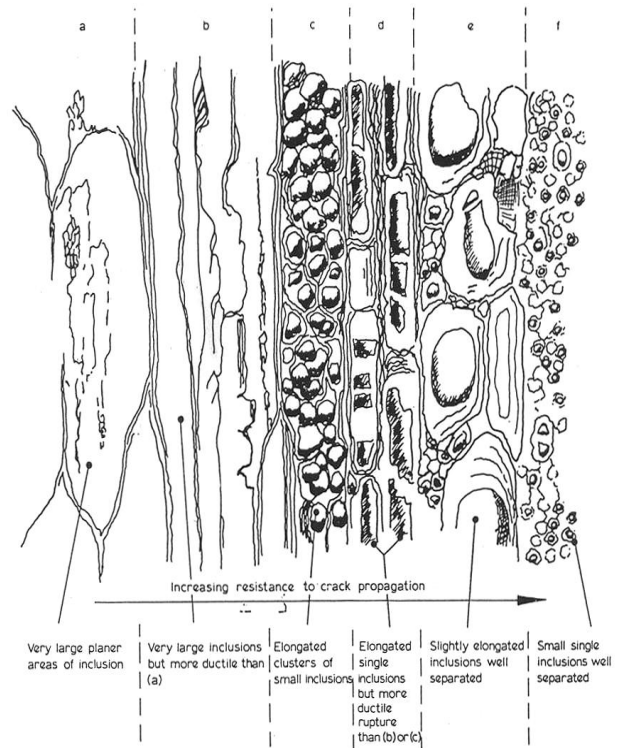
รูปที่ 5 ภาพตัดขวางระดับจุลภาคบริเวณรอยร้าวซึ่งเป็นบริเวณหน้าสัมผัสระหว่างเหล็กกับสารมลทิน



รูปที่ 6 ภาพขยายจากกล้อง Scanning Electron Microscope บริเวณผิวหน้ารอยแตกที่สารมลทินที่เรียงตัวอยู่บริเวณผิวหน้ารอยแตก

3.2 การขยายตัวของรอยร้าว

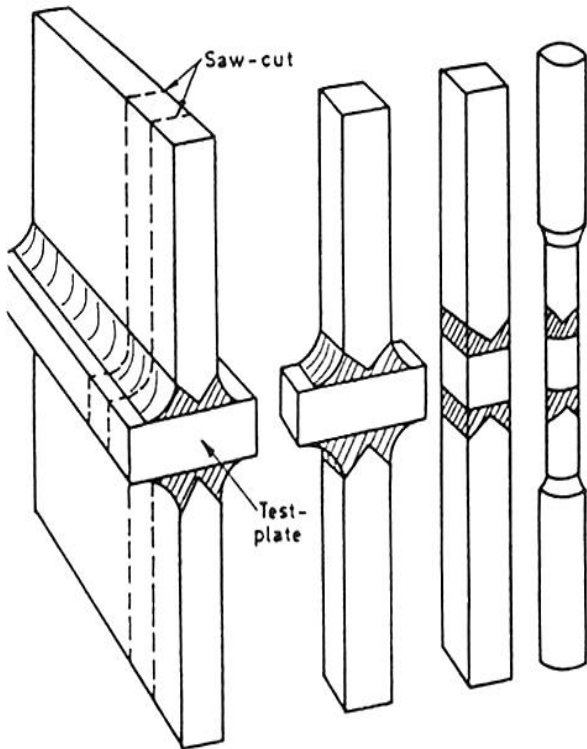
จากรอยร้าวที่เกิดในหน้าระนาบสารมลทิน เมื่อชิ้นงานยังคงอยู่ภายใต้ความเค้นดึงอยู่ รอยร้าวจะขยายออกตามค่าความเค้นที่กระทำจนกว่าค่าความเค้นจะถูกปลดปล่อยหมดแต่ หากความเค้นที่กระทำสูงมากขึ้นงานอาจเกิดการร้าวจากกัน (Fracture) จนเกิดการวิบัติของโครงสร้างได้



รูปที่ 7 ลักษณะการเรียงตัวตามแนวรัศของสารมลทินด้านซ้ายเป็นแนวเส้นและแผ่นพื้นที่มากขึ้นจนเป็นระนาบในด้านขวา

4. การทดสอบทางโลหะวิทยา

TWI ได้เสนอรูปแบบและเกณฑ์การทดสอบโดยกำหนดให้ชิ้นทดสอบมีรอยเชื่อมและถูกดึงในแนวหน้าจนชิ้นงานขาดออกจากกัน หากชิ้นทดสอบมีได้ขาดในบริเวณแนวหน้าได้รอยเชื่อม (Test Plate) แสดงว่าเหล็กที่ใช้ทำชิ้นทดสอบนั้นมีความคงทนและต้านต่อการร้าวได้ดี รูปแบบการทดสอบนี้สถาบันการเชื่อมอื่นก็ได้มีการกำหนดขึ้นในรูปแบบอื่นๆ ต่างลักษณะกันแต่หลักใหญ่ก็คือ การใส่ความเค้นในแนวหน้าของเหล็กแผ่นโดยต้องมีรอยเชื่อมเป็นส่วนประกอบสำคัญ



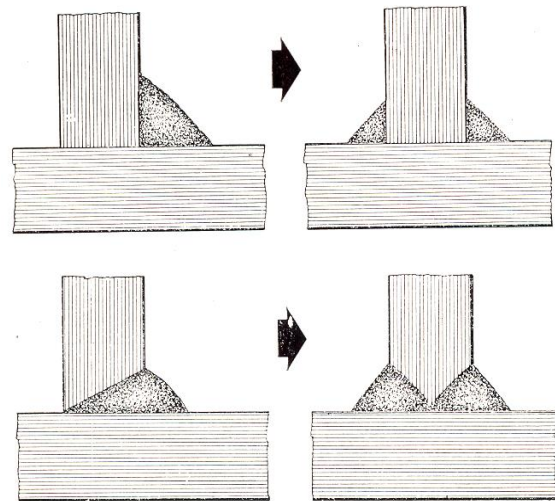
รูปที่ 8 รูปแบบชิ้นทดสอบของ TWI ที่เตรียมจากวัสดุงานเพื่อทดสอบค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับความไวต่อการฉีกร้าว (Lamellar Tearing Sensitivity)

5. การป้องกันการฉีกร้าว

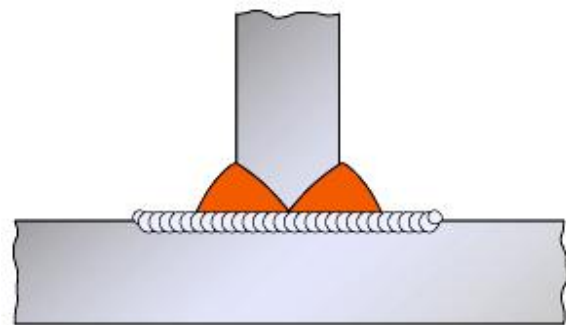
หากเหล็กที่ใช้งานเป็นหลักในชุดเดียวกับที่เคยเกิดการฉีกร้าว หรือเป็นเหล็กที่ได้รับประกันค่าความเค้นดึงในแนวนอน การป้องกันหรือลดความไวต่อการฉีกร้าวแรกมักใช้การลดค่าความเค้นที่กระทำต่อแนวนอน หรือเบี่ยงเบนแรงเค้นดึงมิให้กระทำตั้งฉากกับแนวนอน หรือการเลือกใช้เหล็กสะอาดที่มีการรับประกันค่าแรงเค้นดึงในแนวนอนของแผ่น (ซึ่งราคาต้องแพงขึ้น)

5.1 การลดระดับความเค้นและเบี่ยงเบนทิศทางแรงเค้นดึงในแนวนอน

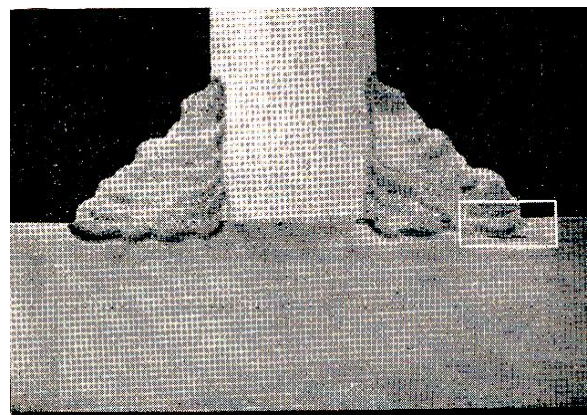
ความเค้นจากการหดตัวของรอยเชื่อมที่กระทำในแนวนอนของแผ่นงานซึ่งมีอยู่หลายวิธี เช่น ด้วยการออกแบบให้ขนาดรอยเชื่อมเล็กลง (เพื่อลดการหดตัว) การเปลี่ยนจำนวนรอยเชื่อมให้กระจายออกเพื่อลดความเค้นเข้มข้นที่จุดเดียว การเลือกตำแหน่งเชื่อมที่ไม่ทำให้เกิดแรงดึงในแนวนอนของงาน และลดความเค้นจากการใช้งาน



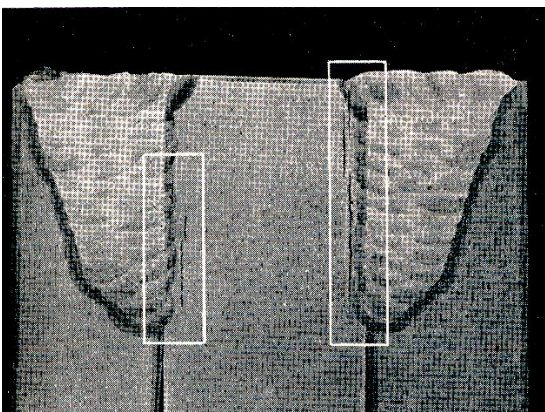
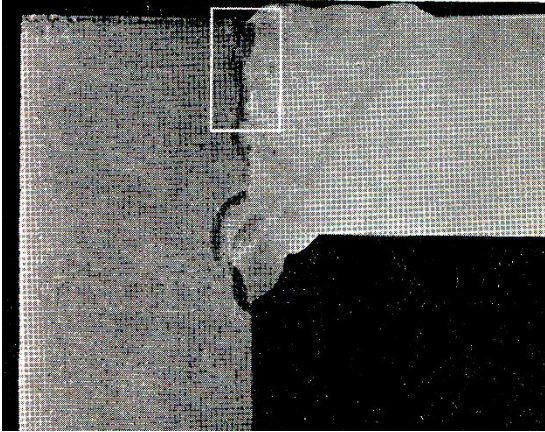
รูปที่ 9 การลดขนาดรอยเชื่อมลง และการเปลี่ยนจำนวนรอยเชื่อมจะช่วยลดค่าความเค้นออกในพื้นที่ที่กว้างขึ้น



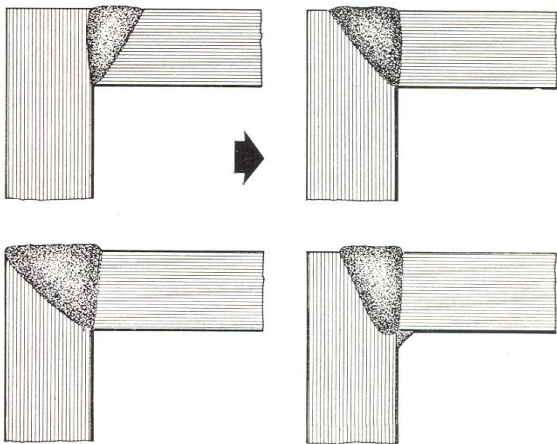
รูปที่ 10 การเชื่อมรองพื้นได้รอยเชื่อมจะช่วยกระจายความเค้นจากการรอยเชื่อมฟิวเลทออกให้กว้างขึ้น



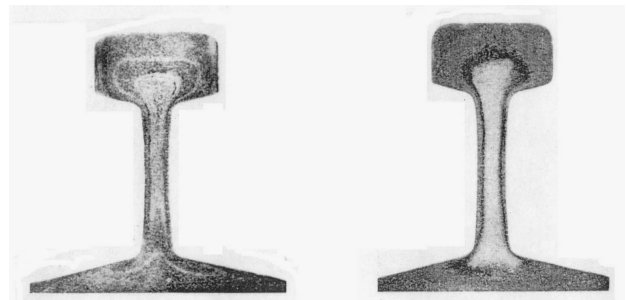
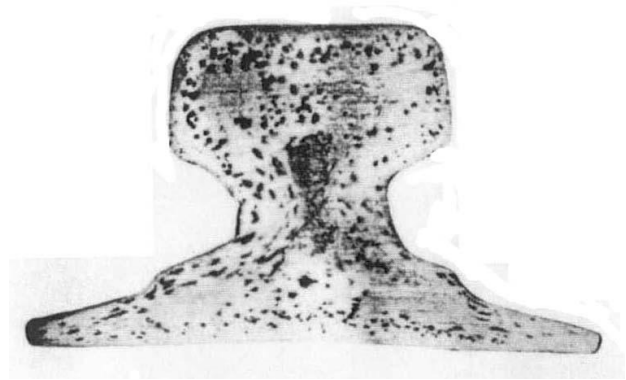
รูปที่ 11 รอยเชื่อมที่มีการซึมลึกบางส่วนและมีขนาดใหญ่เมื่อหดตัวหลังการเชื่อม บวกกับการค้ำของชิ้นงานรูปตัว T บริเวณที่ไม่เกิดการหลอมละลายทำให้เกิดแรงดึงสูงได้รอยเชื่อม จนถึงให้ชิ้นงานฉีกร้าวได้



รูปที่ 12 ลักษณะรอยต่อที่ทำให้เกิดแรงเค้นดึงสูงในแนวหน้าของรอยเชื่อมมุมและรอยเชื่อมขอบ



รูปที่ 13 การออกแบบรอยเชื่อมให้แนวแรงเค้นดึงเบี่ยงเบนไปจากแนวหน้าของแผ่นงาน



รูปที่ 14 ภาพตัดมภาคของเหล็ก Rimmed Steel ที่ผลิตจากการรีดผ่านการขัดและกัดกรด แสดงให้เห็นสารมลทินที่กระจายอยู่ในเนื้อเหล็ก ซึ่งเป็นสาเหตุของการฉีกฉีก

5.2 เลือกใช้เหล็กสะอาด

เหล็ก Rimmed steel จะมีสารมลทินชนิดต่างๆ ตกค้างมาก เมื่อผ่านการรีดสารมลทินจะถูกบีบอัดให้เรียงตัวไปตามแนวรีดทั้งชนิดเส้นและระนาบ การเลือกใช้เหล็กสะอาด (Cleaned or Killed steel) ซึ่งเป็นเหล็กที่ฆ่าสารมลทินจนเหลือน้อยมากจะป้องกันการฉีกฉีกได้ และถ้าให้มั่นใจให้เลือกใช้เหล็กแผ่นที่มีการรับประกันค่าแรงเค้นดึงกำหนดไว้ด้วย (Z Grade)

6. ผลกระทบเมื่อมีไฮโดรเจนเข้าร่วม

ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่มีน้ำหนักเบาที่สุด มีขนาดอะตอมที่เล็กที่สุดในธาตุทุกชนิด ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีมาก ละลายได้ดีในโลหะเหลวและแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อเหล็กได้ในสภาพที่เป็น Hydrogen ion (H^+) หากมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม เช่น ใช้งานในบริเวณที่มีสารประกอบที่มีไฮโดรเจนเป็นส่วนผสมอยู่ภายใต้อุณหภูมิและความเค้นสูง เมื่อไฮโดรเจนแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อเหล็กได้จะใช้เวลาในการรวมตัวเป็นโมเลกุล (H_2) ซึ่งหากมีปริมาณมากพอ H_2 จะก่อให้เกิดแรงดันได้นับ 1,000 ปอนด์ เบ่งให้เนื้อเหล็กเป็นโพรงเล็กๆ แล้วขยายใหญ่ตามปริมาณไฮโดรเจนที่สะสมอยู่โพรงเล็กๆ เหล่านี้เมื่อขยายใหญ่ขึ้นและมาบรรจบกันก็จะเกิดการเชื่อมต่องานเป็นรอยร้าว บริเวณที่ไฮโดรเจนรวมตัวกันอยู่จะสูญเสียความเหนียวไปจนเปราะมาก การก่อตัวจนกระทั่งเกิดรอยร้าวจะใช้

เวลามาก (48 ชั่วโมง จนเป็นปี) ขึ้นกับปริมาณไฮโดรเจนในเหล็กจึงเรียกการแตกร้าวนี้ว่า Delayed Crack หรือร้าวเย็น(Cold Crack) เพราะเกิดภายหลังการเชื่อมเสร็จสิ้นแล้ว

การร้าวเย็นและการฉีกร้าวต่างเสริมซึ่งกันและกันและเกิดในตำแหน่งได้รอยเชื่อมเช่นกัน ดังนั้น การป้องกันการฉีกร้าวจึงอาจต้องป้องกันการร้าวเย็นด้วยการอุ่นงานก่อนเชื่อม(Pre-heat) และการอบหลังการเชื่อม (Post-heat) ผสมผสานกับการออกแบบและเลือกใช้เหล็กสะอาดร่วมกัน

7. สรุป

การฉีกร้าวเป็นปรากฏการณ์ที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่องานเชื่อมโดยมีสาเหตุจากการเลือกใช้เหล็กที่มีสารมลทินมาก และการออกแบบรอยต่อเชื่อมที่ไม่เหมาะสม คือ ให้เหล็กแผ่นรับความเค้นสูงในแนวหนาซึ่งเป็นแนวที่อ่อนแอและมีสารมลทินเรียงตัวเป็นแนว หรือระนาบตามรอยรีด

การฉีกร้าวจะมีระดับความรุนแรงมากขึ้นหากมีไฮโดรเจนเข้าร่วมในปรากฏการณ์ฉีกร้าว

เอกสารอ้างอิง

1. J.C.M. Farrar and R.E. Dolby, Lamellar Tearing in Welded Steel Fabrication, The Welding Institute, Cambridge England
2. Kenneth Easterling, Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, The Welding Institute, Cambridge England, 1983
3. H Granjon, Fundamentals of Welding Metallurgy, The Welding Institute, Cambridge England
4. Brady and Holum, Fundamentals of Chemistry, Third Edition, John Wiley & Sons, 1988
5. Reed-Hill, R.E., Physical Metallurgy Principles, Van Nostrand Reinhold, 1964
6. Sindo Kou, Welding Metallurgy, Second Edition, John Wiley & Sons, 2002