

อิทธิพลของการให้ความร้อนก่อนและหลังการเชื่อมบริเวณผลกระทบจากความร้อน ต่ออัตราการขยายตัวของรอยแตกจากความล้า ของเหล็ก เกรด เอไอเอสไอ 4340

Influence of Preheat and Post Weld Heat Treatment at Heat Affected Zone on Fatigue Crack Growth Rate of AISI 4340 Steel Grade

ณรงค์ฤทธิ์ โทรรัตน์

กองโรงงานเหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง 52220

โทร. 0-54254521, โทรสาร 0-54254521 E-mail: mmpnrr@egat.or.th

ตะวัน สุจริตกุล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ถ. ห้วยแก้ว อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 502000

โทร. 0-53944149, โทรสาร 0-53210320 E-mail: thawan@dome.eng.cmu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของการให้ความร้อนก่อนและหลังการเชื่อมบริเวณผลกระทบจากความร้อนต่ออัตราการขยายตัวของรอยแตกจากความล้าของเหล็กเกรด เอไอเอสไอ 4340 ซึ่งเป็นเหล็กที่เชื่อมยาก ผลของกระบวนการเชื่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมความล้าที่บริเวณผลกระทบจากความร้อน ชิ้นทดสอบกลุ่มแรกถูกให้ความร้อนก่อนเชื่อมแต่ละชิ้นที่อุณหภูมิ 250°C, 300°C, 350°C และ 380°C โดยไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ชิ้นทดสอบกลุ่มที่สองถูกให้ความร้อนก่อนเชื่อมแต่ละชิ้นที่อุณหภูมิ 250°C, 300°C, 350°C, 380°C และให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่อุณหภูมิ 550°C 1 ชม. รอยบากถูกสร้างขึ้นบนชิ้นทดสอบที่บริเวณผลกระทบจากความร้อนเพื่อกำหนดจุดเริ่มของรอยแตก การทดสอบหาอัตราการเติบโตรอยแตกทำตาม ASTM E647-95a ผลการศึกษาพบว่าอัตราการขยายตัวของรอยแตกจากความล้า บริเวณผลกระทบจากความร้อนของชิ้นทดสอบที่ผ่านการให้ความร้อนก่อนเชื่อมเพียงอย่างเดียวมีอัตราการขยายตัวของรอยแตกจากความล้าต่ำกว่า ชิ้นทดสอบที่ผ่านการให้ความร้อนก่อนเชื่อมและหลังการเชื่อม ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าผลดีที่สุด เกิดที่ให้ความร้อนก่อนเชื่อมที่อุณหภูมิ 350°C โดยไม่ต้องให้ความร้อนหลังการเชื่อม

Abstract

This research study the effect of preheat and post-weld heat treatment at heat affected zone to fatigue crack growth rate of AISI 4340 steels grade which is hard welding steel. The results

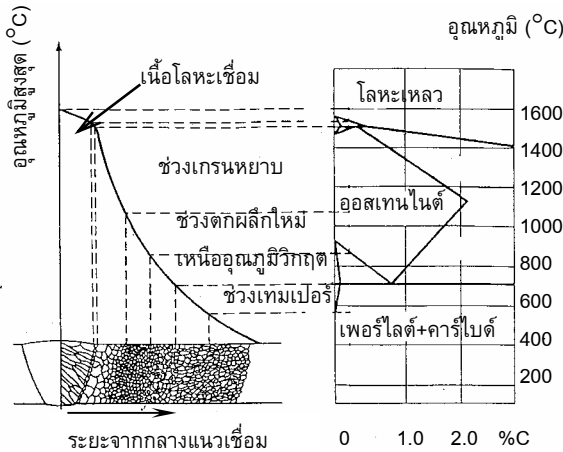
indicate that the welding process used transformed the microstructure of the material as well as changed the fatigue behaviors in the heat-affected zone. First group of test specimens were pre-heated to 250°C, 300°C, 350°C and 380°C prior to welding without post-weld heat treatment, the second were pre-heated to 250°C, 300°C, 350°C and 380°C prior to welding and upon completion test pieces were post-weld heat treated at 550°C for a period of 1 hour. A notch was produced on each test piece at the heat affected zone to initiate the crack. ASTM-E647-95a Standard was used to establish the fatigue crack growth rate. The results of this research has clearly indicated that the fatigue crack growth rate of the heat-affected zone from pre-heat is lower than that of post-weld heat treatment. Therefore, the research results indicate that the lowest crack growth rate and best fatigue resistance result from pre-heat treatment at 350°C without post-weld heat treatment.

1. บทนำ

เหมืองแม่เมาะเป็นเหมืองลิกไนต์แบบเปิดที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย และต้องส่งถ่านหินให้โรงไฟฟ้าแม่เมาะประมาณ 40,000 ตันต่อวัน จึงมีความจำเป็นต้องใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ในการขุดขน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเครื่องจักรที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนอะไหล่สูงปี่ละนับร้อยล้านบาท ซึ่งอะไหล่หลายชนิดเมื่อชำรุดแล้วการซ่อมกลับมาใช้งานใหม่กระทำได้ยาก แต่การซ่อมเพื่อฟื้นฟูสภาพ

ชิ้นส่วนยังมีความจำเป็น เนื่องจากสามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา แต่ละปีประหยัดเงินได้หลายสิบล้านบาท แต่ยังมีอะไหล่ที่ทำจากเหล็กกล้าบางชนิดเช่น AISI 4340 เป็นเหล็กกล้าผสมต่ำ มีความแข็งแรงสูง ใช้ในการทำเพลาส่งกำลังขนาดใหญ่ หรือเพื่องขนาดใหญ่ เมื่อเกิดการชำรุด เช่น การสึกหรอรุนแรงบริเวณผิว หรือการแตกร้าว กระบวนการเชื่อมซ่อมจึงถูกเลือกใช้ เพราะเป็นวิธีการซ่อมที่ถูกลงและสามารถดำเนินการได้เองในหน่วยงาน แต่อายุของชิ้นงานหลังจากการซ่อมพวบล้านกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการซ่อม และการชำรุดส่วนใหญ่จะเป็นการชำรุดจากความล้า (Fatigue failure) โดยมีจุดเริ่มที่บริเวณผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone, HAZ)

มาตรฐานการเชื่อมเหล็ก AISI 4340 ของ American Welding Society [4,5] และคู่มือการเชื่อมบำรุงรักษาของผู้ผลิตเครื่องจักร ไม่ได้กำหนดวิธีการอย่างชัดเจน การหาความสามารถในการเชื่อม (Weldability) ของ Welding Technology Institute of Australia (WTIA) [15] ได้ค่าปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า (Carbon equivalent, CE) มากกว่า 0.8 และจัดกลุ่มความสามารถของการเชื่อมเป็นกลุ่ม 12 ทำให้เป็นเหล็กที่เชื่อมยาก ง่ายต่อการแตกร้าว และทำให้คุณสมบัติและพฤติกรรมทางกลของ HAZ แตกต่างไปจากเดิมเช่น ความแข็งแรงคราก ความแข็งแรงดึง ความแข็ง และพฤติกรรมการล้า



รูปที่ 1 บริเวณผลกระทบจากความร้อน
ที่มา: [11]

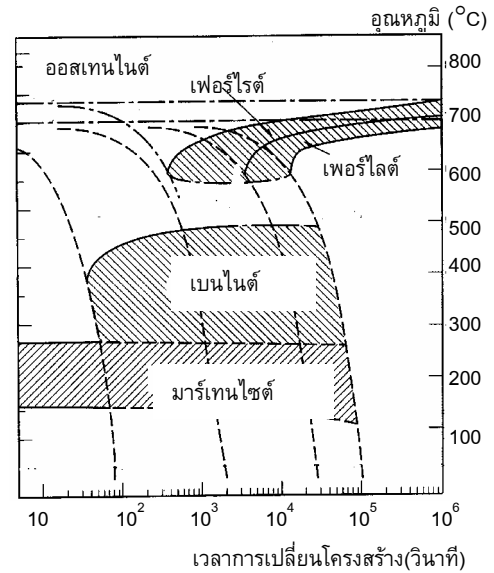
1.1 ตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างจุลภาคของและความแข็งแรงบริเวณ HAZ

ในกระบวนการเชื่อม HAZ จะมีอุณหภูมิ 1,100-1,500°C ทำให้โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนไปจากเดิมที่เป็นอยู่ เช่น เทมเปอร์มาเทนไซต์ (Tempered martensite) เทมเปอร์เบนไนต์ (Tempered bainite) หรือ เฟอไรต์-เพอร์ไลต์ (Ferrite-pearlite) เปลี่ยนเป็น ออสเทนไนต์ (Austenite) แต่เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงเกิน 1,100°C ทำให้เกรนเติบโต (Grain growth) จากขนาดเดิม ASTM G#7- ASTM G#8 โตขึ้นเป็น ASTM G#1- ASTM G#3 [12] ซึ่งเป็นเกรนที่หยาบ (Coarse grain) ดังรูปที่ 1 ความร้อนจะถูกถ่ายเทอย่างรวดเร็ว ทำให้โครงสร้างออสเทน

ไนต์ เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ หรือเบนไนต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว รูปที่ 2

ความแข็งของ HAZ ขึ้นอยู่กับ ส่วนผสมทางเคมี (Chemical composition) ของเหล็ก และความเร็วในการเย็นตัวของ HAZ ซึ่ง Lorenz และ Duren [17] ได้เสนอสมการหาความแข็งวิกเกอร์ (HV_{HAZ}) สูงสุดของ HAZ ตามสมการที่ 1

$$HV_{HAZ} = 2019[(1-0.5 \log t_{6/5})C + 0.3(CE_B - C)] + 66(1-0.8 \log t_{6/5}) \quad (1)$$



รูปที่ 2 แผนภาพการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง AISI 4340
ที่มา: [16]

เมื่อ

$$CE_B = C + \frac{Mn}{8} + \frac{Si}{11} + \frac{Ni}{17} + \frac{Cr}{5} + \frac{Cu}{9} + \frac{Mo}{6} + \frac{V}{3} \quad (2)$$

$t_{6/5}$ คือ เวลาในการเย็นตัวจากอุณหภูมิ 800°C ถึง 500°C

เมื่อโครงสร้างเป็น มาร์เทนไซต์ 100 % จะให้ความแข็งแรง (HV_M) สูงสุดตามสมการที่ 3 และถ้าเป็นโครงสร้าง เบนไนต์ 100 % จะให้ความแข็งแรงสูงสุด (HV_B) ตามสมการที่ 4

$$HV_M = 802C + 305 \quad (3)$$

$$HV_B = 350CE_B + 101 \quad (4)$$

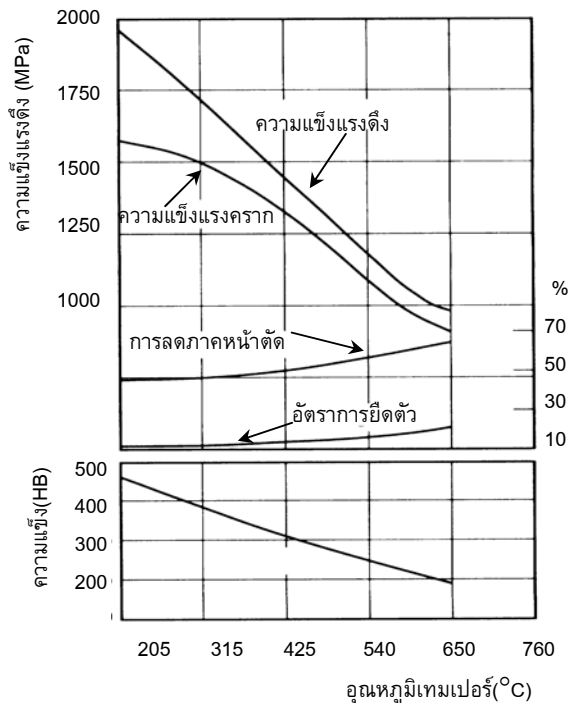
ในการควบคุมความแข็ง HAZ นอกจากการควบคุมอุณหภูมิ ขณะเชื่อมชิ้นงานตามสมการที่ 1 แล้ว การให้ความร้อนหลังการเชื่อมสามารถลดความแข็งของ HAZ ได้เมื่อใช้อุณหภูมิสูงมากพอ รูปที่ 3 แต่ค่าความแข็งแรงคราก และความแข็งแรงดึงจะลดตามลงไปด้วย

Pageter และ Hall [6] ได้เสนอสมการประมาณค่าความแข็งแรงคราก (S_y) ของ HAZ จากค่าความแข็งวิกเกอร์ (HV) สมการที่ 5

$$S_y = 3.25HV - 349 \quad \text{MPa} \quad (5)$$

Dastko[14] เสนอสมการการประมาณค่าความแข็งแรงดึง(S_u) จากผลการทดสอบความแข็งบริเนล(HB)ของเหล็ก สมการที่ 6

$$S_u = 3.45HB \quad \text{MPa} \quad (6)$$



รูปที่ 3 ผลของอุณหภูมิเทมเปอร์ต่อความแข็งแรงเหล็ก AISI 4340 ที่มา: [16]

1.2 อายุของความล้า

อายุของการชำรุดจากความล้าประกอบด้วย 2 ช่วงอายุหลัก สมการที่ 7

$$N_F = N_i + N_p \quad (7)$$

เมื่อ N_i คืออายุการกำเนิดรอยแตก และ N_p อายุการขยายตัวของรอยแตก หากวัสดุรับความเค้นวัฏจักร รอยแตกจะก่อกำเนิดจากจุดที่มีความเค้นสูง การประมาณค่าอายุการกำเนิดรอยแตก สามารถใช้การพิจารณา ความเค้น-ความเครียดเฉพาะจุด(Local Stress-strain Approach)[10] ซึ่งประยุกต์สมการของ Basquin และการแก้ไขความเค้นเฉลี่ยของ Morrow สมการที่ 8

$$\frac{\Delta\sigma K_f}{2} = (\sigma_f' - \sigma_m)(2N_i)^b \quad (8)$$

เมื่อ $\Delta\sigma$ คือ พิสัยของความเค้น, K_f คือ ตัวประกอบเพิ่มความล้า

σ_f' คือ สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงแรงล้าและ b คือ เลขชี้กำลังความแข็งแรงหลังจากรอยแตกก่อกำเนิด หากความลึกเกิน 0.25 mm Rolfe และ Barsom[13], Hertzberge[8] นิยามให้เป็นรอยแตกจากความล้าเริ่มต้น (Fatigue crack initiation) และรอยแตกจะสามารถขยายตัว(Crack propagation)ต่อไปได้ ซึ่งโดยทั่วไปแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการขยายตัวของรอยแตก(da/dN)กับการเปลี่ยนแปลงขนาดความเข้มข้นความเค้น(Stress intensity) ตามสมการของ Paris สมการที่ 9

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta K)^m \quad (9)$$

2. วิธีวิจัย

2.1 อุปกรณ์

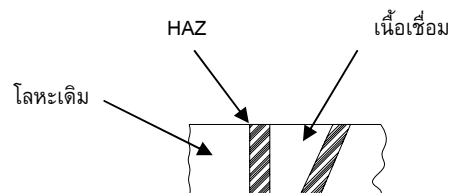
- ก. เครื่องทดสอบหาอัตราการขยายตัวจากความล้า
- ข. เกจวัดรอยแตก Kyowa Type KV-25B
- ค. เครื่องวัดความแข็ง Sonohard รุ่น SH-75
- ง. เครื่องเชื่อมกระแสตรง Fronius รุ่น Transpocket 450P
- จ. เครื่องให้ความร้อนและควบคุมอุณหภูมิ Weldotherm

2.2 ขั้นตอนทดสอบ

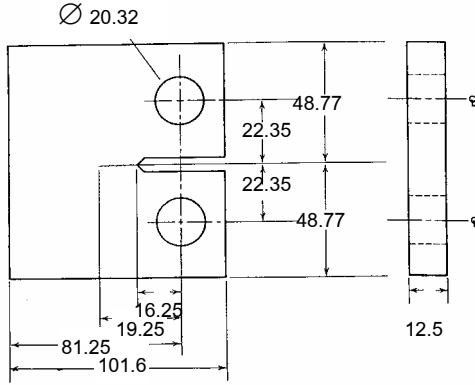
เตรียมจากเพลากลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 230 mm ตัดตามยาวเป็นแผ่นหนา 25 mm ยาว 100 mm เตรียมรอยต่อแบบต่อชนบากเอียงด้านเดียว รูปที่ 4 เชื่อมด้วยลวดเชื่อม มาตรฐาน DIN 8529 EY6975NiCrMoB ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 mm กระแสเชื่อม 145-150 amp. ความต่างศักย์ 24-27 V อัตราเดินแนวเชื่อม 160 mm/min พลังงานความร้อนในการเชื่อม 1.38 kJ/mm ให้ความร้อนชิ้นงานก่อนเชื่อม(Preheat) 4 ค่า คือ 250°C 300°C 350°C และ 380°C หลังจากเชื่อมเสร็จ แบ่งชิ้นงานเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 550°C เวลา 1 ชม. กลุ่มที่สองไม่ต้องอบ และนำชิ้นงานทั้งหมดเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E647-95a Fatigue crack growth rate ชนิด Compact Tension(CT)[3] ซึ่ง Khan[9] ได้กำหนดขนาดต่าง ๆ สำหรับการทดสอบเหล็ก AISI 4340 ตามรูปที่ 5 ร่องรูปตัววี จะบากที่บริเวณ HAZ เพื่อใช้ทดสอบอัตราการขยายตัวของรอยแตกจากความล้า

2.3 การทดสอบ

- ทดสอบหาการขยายตัวของรอยแตกจากการล้า โดยแอมพลิจูดของภาระคงที่(Constant-load-amplitude) และเป็นการทดสอบหาอัตราการขยายตัวของรอยแตกชนิดความเข้มข้นความเค้นเพิ่ม(Stress intensity increasing) ใช้ต้นกำลังไฮดรอลิก ลักษณะของภาระเป็นรูปคลื่นไซน์



รูปที่ 4 การเตรียมบริเวณผลกระทบจากความร้อน



รูปที่ 5 ขนาดชิ้นงานทดสอบการขยายตัวของรอยแตก

คาบเวลาที่ 3.6 วินาที ความถี่ 20.8 Hz ขนาดภาระสูงสุด 8 ตัน ต่ำสุด 0 ตัน ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความเค้นต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับศูนย์ ($R = 0$) วัสดุรอยแตกที่ขยายตัวกับจำนวนรอบที่ได้ เขียนกราฟมาตราส่วนลอการิทึมของอัตราการขยายตัวของรอยแตก (da/dN) และพิสัยความเค้มความเค้น (ΔK_I)

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 ผลการทดสอบอัตราการขยายตัวของรอยแตกจากความล้าของชิ้นทดสอบ

เมื่อนำความยาวรอยแตกที่เพิ่มขึ้นของแต่ละช่วงการวัด เขียนกราฟมาตราส่วนลอการิทึม สำหรับชิ้นงานทดสอบกลุ่มที่ให้ความร้อนก่อนเชื่อมเพียงอย่างเดียว ได้กราฟรูปที่ 6 และชิ้นทดสอบกลุ่มที่ให้ความร้อนทั้งก่อนเชื่อมและหลังเชื่อม ได้กราฟรูปที่ 7 ในการพิจารณาวิเคราะห์ข้อมูลหาสมการ การขยายตัวของรอยแตก เพื่อหาค่า C และค่า m ในสมการของ Paris ซึ่งโดยทั่วไปจะนำ ข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติใช้การวิเคราะห์การถดถอย (regression) โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) ซึ่งได้แสดงผลในตารางที่ 1 และตารางที่ 2

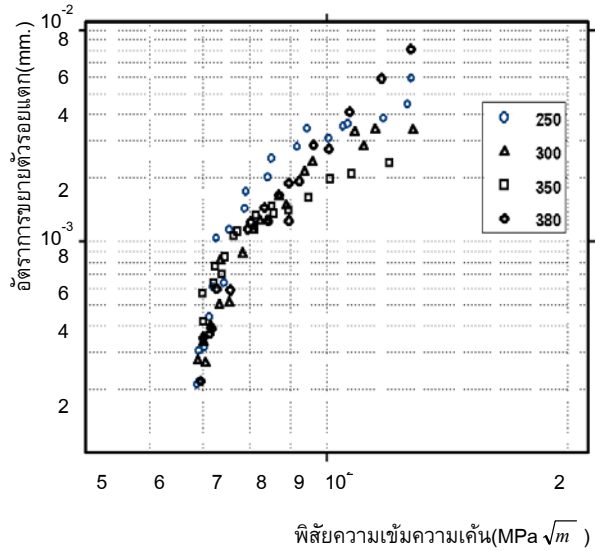
เมื่อแทนค่าที่พิสัยความเค้มความเค้นเท่ากัน กรณีที่ให้ความร้อนก่อนเชื่อมอย่างเดียว อัตราการขยายตัวของรอยแตกที่อุณหภูมิ 350°C มีอัตราการขยายตัวช้าที่สุด ตามด้วยที่ 250°C, 300°C และ 380°C ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีให้ความร้อนก่อนและหลังเชื่อม อัตราการขยายตัวของรอยแตกจะสูงขึ้น

ตารางที่ 1 สมการการขยายตัวของรอยแตก ให้ความร้อนก่อนเชื่อม

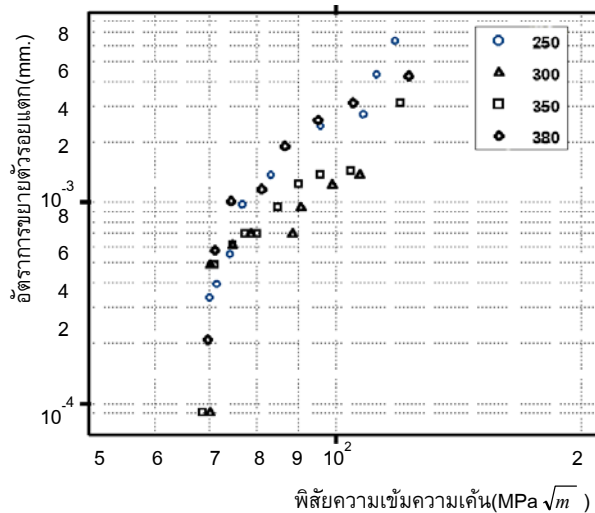
อุณหภูมิให้ความร้อน	สมการการขยายตัวของรอยแตก
250°C	$da/dN = 7.24e-9(\Delta K_I)^{2.8}$
300°C	$da/dN = 7.59e-9(\Delta K_I)^{2.74}$
350°C	$da/dN = 2.34e-9(\Delta K_I)^{2.8}$
380°C	$da/dN = 60.3e-9(\Delta K_I)^{3.33}$

ตารางที่ 1 สมการการขยายตัวของรอยแตกให้ความร้อนหลังเชื่อม

อุณหภูมิให้ความร้อน	สมการการขยายตัวของรอยแตกให้ความร้อนก่อนเชื่อมและหลังเชื่อม 550°C
250°C	$da/dN = 0.97e-9(\Delta K_I)^{3.19}$
300°C	$da/dN = 5.12e-9(\Delta K_I)^{2.82}$
350°C	$da/dN = 0.41e-9(\Delta K_I)^{3.29}$
380°C	$da/dN = 2.5e-9(\Delta K_I)^{3.21}$



รูปที่ 6 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของรอยแตก บริเวณ HAZ เหล็ก AISI 4340 ให้ความร้อนก่อนเชื่อมอย่างเดียว



รูปที่ 7 กราฟแสดงอัตราการขยายตัวของรอยแตก บริเวณ HAZ เหล็ก AISI 4340 ให้ความร้อนก่อนเชื่อมและหลังเชื่อม

4. สรุป

(1) อัตราการขยายตัวของรอยแตกของ HAZ ที่ให้ความร้อนก่อนเชื่อมเพียงอย่างเดียว ที่อุณหภูมิ 350°C ให้อัตราการขยายตัวช้าที่สุด สอดคล้องกับผลการทดสอบหาความแข็งแรงแล้ว[2] ที่อุณหภูมิดังกล่าวให้ความแข็งแรงล้าอายุยานานที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างจุลภาคของ HAZ คล้ายกับโครงสร้างจุลภาคเดิมที่เป็น เเทมเปอร์เบนไนท์ และความแข็งใกล้เคียงกับความแข็งก่อนเชื่อม[1,7]

[2] ขึ้นทดสอบที่ให้ความร้อนหลังเชื่อมที่อุณหภูมิ 550°C อัตราการขยายตัวมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบที่อุณหภูมิเดียวกันกับการให้ความร้อนก่อนเชื่อมเพียงอย่างเดียว เป็นผลของการเทมเปอร์ ทำให้ที่ HAZ มีความแข็งและความแข็งแรงลดลง[2]

[3] ในการปฏิบัติการเชื่อมชิ้นงานที่เป็นเหล็ก AISI 4340 การควบคุมโครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ ควรให้เป็น เเทมเปอร์เบนไนท์ ไม่ควรให้เป็น มาร์เทนไซต์ ซึ่งโอกาสจะเกิดการแตกร้าวดังสูง[6] และหากมีรอยแตกเริ่มต้น อัตราการขยายตัวของรอยแตก จะมากกว่าโครงสร้าง เเทมเปอร์เบนไนท์

[4] จากผลการวิจัย เมื่อวิเคราะห์เฉพาะอัตราการขยายตัวของรอยแตก จะเห็นได้ว่าไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนหลังการเชื่อม แต่อาจจำเป็นในเรื่องของการลดความเค้นตกค้าง(Residual stress) และไล่ไฮโดรเจนบริเวณผิวเชื่อม ซึ่งอุณหภูมิต้องไม่เกิน อุณหภูมิที่เหล็กผ่านกระบวนการอบอบคืนไฟ(Tempering)[6]

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่เป็นผู้สนับสนุนทุนสำหรับการวิจัยและขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่กรุณาให้คำแนะนำในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] ณรงค์ฤทธิ์ โทธรรัตน์, ตะวัน สุจริตกุล . “ผลกระทบของโครงสร้างจุลภาคของบริเวณ ผลกระทบจากความร้อนต่อความแข็งแรงล้าของเหล็ก เกรด เอไอเอสไอ 4340” การประชุมวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 2, ศูนย์พัฒนาเทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2545, หน้า 173-175

[2] ณรงค์ฤทธิ์ โทธรรัตน์, ตะวัน สุจริตกุล . “อิทธิพลของการให้ความร้อนก่อนและหลังการเชื่อมบริเวณ ผลกระทบจากความร้อนต่อความแข็งแรงล้าของเหล็ก เกรด เอไอเอสไอ 4340” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2545, หน้า 489-493

[3] Annual Book of ASTM Standards, “Metals Test Methods and Analytical Procedures”, Vol. 03.01, American Society for Testing and Materials, Easton, 1998.

[4] AWS Committee. “AWS D14.3-94 Specification for Welding Earthmoving and Construction Equipment”. Miami, American Welding Society, 1994.

[5] AWS Committee, “AWS D14.5-96 Specification for Welding of Rotating Elements of Equipment”, Miami, American Welding Society, 1996.

[6] Bailey. N. “Weldability of Ferritic Steel”, Abington, Cambridge, Abington Publishing, 1994.

[7] Bathgy. A. “Influence of HAZ microstructure and stress concentration on fatigue strength of welded structural steel”, Mater Lett 5-6 Dec, Elsevier Science B.V., Amsterdam. Neth, Vol. 21, 1994, pp. 415-423.

[8] Hertzberg. RW. “Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials”, 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.

[9] Khan, AS., Paul, TK. A New Model for Fatigue Crack Propagation in 4340 Steel. International Journal of Plasticity, 1994; Volume 10, No. 8: pp. 957-972

[10] Lassen. T. “The effect of Welding Process on The Fatigue”, Welding Journal, Vol. 69, No.2, 1990, pp.75s-81s.

[11] Metal Handbook, Vol. 1, 10th edition, ASM, 1990, pp. 603-613.

[12] Radaj, D. Heat Effect of Welding. Springer-Verlay, New York, 1992

[13] Rolfe. ST., Brasom, JM. “Fracture and Fatigue Control in Structure Application of Fracture Mechanics”, Englewood Cliff – wood, New Jersey, Prentice-Hall, 1977.

[14] Juvinall. RC. Marshek, KM., “Fundamental of Machine Component Design”, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000

[15] WTIA Technical Note 1. “The Weldability of Steels”, Welding Technology Institute of Australia, NSW, 1982.

[16] Welding Handbook. “Material and Application Part 2”, 8th Edition, Miami, American Welding Society, 1997.

[17] Zaczek. Z. Cwiek. J. “Prediction of HAZ Hardness in Weld of Quenched and Tempered HSLA Steels”, Welding Journal, Vol. 72, No. 4, 1993, pp. 37s-40s.