

การศึกษาผลของอัตราส่วนภาระต่อการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า
ในบริเวณใกล้ขีดเริ่มความล้าของเหล็กกล้า JIS SCM 440

นายสมประสงค์ บริรักษ์กุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF THE EFFECT OF LOAD RATIO ON FATIGUE CRACK GROWTH
IN NEAR THRESHOLD REGIME OF JIS SCM 440 STEEL

Mr. Somprasong Boriguppakul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

500839

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาผลของอัตราส่วนภาระต่อการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจาก
ความล้าในบริเวณใกล้ขีดเริ่มความล้าของเหล็กกล้า JIS SCM 440

โดย

นายสมประสงค์ บริกัปปกุล

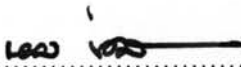
สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล


อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก่อกเกียรติ บุญชูกุล

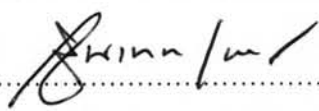
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก่อกเกียรติ บุญชูกุล)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ชินเทพ เพ็ญชาติ)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ธัญญารัตน์ สิงหนาท)

สมประสงค์ บริรักษ์ปกุล : การศึกษาผลของอัตราส่วนภาระต่อการเติบโตของรอยร้าว
เนื่องจากความล้าในบริเวณใกล้ขีดเริ่มความล้าของเหล็กกล้า JIS SCM 440 (A STUDY OF
THE EFFECT OF LOAD RATIO ON FATIGUE CRACK GROWTH IN NEAR
THRESHOLD REGIME OF JIS SCM 440 STEEL) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ก่อเกียรติ
บุญชูกุล, 143 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนภาระ (R) ต่อการเติบโตของรอยร้าว
เนื่องจากความล้าในบริเวณใกล้ขีดเริ่มความล้าของเหล็กกล้า JIS SCM 440 โดยการทดสอบหา
อัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าอยู่ภายใต้วิธีการของมาตรฐาน ASTM E647-05
โดยใช้ชิ้นเหล็กกล้าทดสอบที่ผลิตจากเหล็กกล้า JIS SCM 440 เลือกรูปแบบ CT-Specimen
ขนาดกว้าง 2 นิ้ว และหนา 1 นิ้ว ทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิห้องในสภาพสถานะ
แวดล้อมที่ไม่กัดกร่อน การทดสอบทั้งหมดใช้ภาระรูปไซน์ กำหนดความถี่ 10 Hz. สำหรับการ
ทดสอบเป็นแบบลด ΔK ใช้อัตราส่วนภาระ (R) เท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 โดยทำการ
ทดสอบเงื่อนไขละ 3 ชิ้น แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (da/dN) กับ ΔK ในรูป ล็อก-ล็อก สเกล

ผลจากการทดสอบที่อัตราส่วนภาระ (R) เท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 พบว่าอัตราการ
เติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า (da/dN) ให้ค่า ΔK ลดต่ำลงทุก ๆ การปรับลดภาระก่อนหน้า
และ ΔK ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ ΔK_{th} ในบริเวณใกล้ขีดเริ่มความล้า ผลจากการทดสอบให้ ΔK เฉลี่ย
ที่ 12.158, 9.640, 6.726 และ 4.073 $MPa\sqrt{m}$ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของอัตรา
การเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของเหล็กกล้า JIS SCM 440 ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนภาระ (R)
ด้วยเหตุนี้ที่อัตราส่วนภาระ (R) เพิ่มสูงขึ้นที่ ΔK ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ ΔK_{th} ในบริเวณใกล้ขีดเริ่มความล้า
มีแนวโน้มลดต่ำลง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล.....

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล.....

ปีการศึกษา2550.....

ลายมือชื่อนิสิต 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

4770598221 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD : LOAD RATIO / THRESHOLD REGIME / FATIGUE CRACK GROWTH RATE /

JIS SCM 440 STEEL

SOMPRASONG BORIGUPPAKUL : A STUDY OF THE EFFECT OF LOAD RATIO ON FATIGUE CRACK GROWTH IN NEAR THRESHOLD REGIME OF JIS SCM 440 STEEL. THESIS ADVISOR : KAUKERT BOONCHUKOSOL, Dr.Ing., 143 pp.

The objective of this thesis is to study the effect of the load ratio on fatigue crack growth in near threshold regime of the JIS SCM 440 steel. Fatigue crack growth rate tests on JIS SCM 440 steel specimens were conducted according to the ASTM E647-05 standard. The compact-tension(CT) specimen is 2 inch wide and 1 inch thick. Testings were conducted at room temperature with non-corrosive environment. Tests were conducted under sine waveform at the frequency 10 Hz. The ΔK -decreasing tests were conducted load ratios (R) of 0.1, 0.3, 0.5 and 0.7, using three specimens at each condition are showed relationship between as log-log scale graphs of (da/dN) vs. ΔK

The experimental results at various load ratios (R) of 0.1, 0.3, 0.5 and 0.7 show that fatigue crack growth rate (da/dN) yield a decreasing value of ΔK at each load down adjustment with the minimum value of ΔK at threshold regime (ΔK_{th}). Results of testing yields the average ΔK values of 12.158, 9.640, 6.726 and 4.073 $MPa\sqrt{m}$ respectively These results revealed that fatigue crack growth rate of JIS SCM 440 steel behavior is dependent on a load ratio (R). Thus, at increased load ratio (R), the minimum value of ΔK at threshold regime (ΔK_{th}) is decreased.

Department :Mechanical Engineering....

Student's signature : 

Field of study :Mechanical Engineering....

Advisor's signature : 

Academic year : ...2007.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นได้เนื่องจากผู้วิจัยได้ลงทะเบียนเรียนในรายวิชา 2103721 กลศาสตร์การแตกร้าว ซึ่งท่านอาจารย์ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล เป็นผู้สอนในรายวิชานี้และเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของผู้วิจัยในเวลาต่อมา ซึ่งรายวิชาดังกล่าวได้ให้มีการนำเสนอรายละเอียดในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาที่เรียนและเป็นส่วนหนึ่งของการเรียนการสอนทำให้ผู้วิจัยมีความรู้พื้นฐานและเป็นแนวทางอันก่อให้เกิดหัวข้อวิทยานิพนธ์เพื่อทำการศึกษาวิจัยในลำดับต่อมา

ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เศษะอำไพ และท่านอาจารย์ รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณิณี มณีรัตน์ ที่ได้สอบถามถึงรายละเอียดความคืบหน้าของการดำเนินการวิจัยและรายละเอียดของวิทยานิพนธ์เสมอมาด้วยความเป็นห่วงรวมถึงได้กรุณาตรวจแก้บทคัดย่อและได้ให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนท่านอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้ถ่ายทอดองค์ความรู้และคำแนะนำต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คุณ สมศักดิ์ ฉันทลักษณ์วงศ์ ประธานกรรมการบริษัท ไมโคร ปริซิ่ง จำกัด ที่ได้กรุณาช่วยเหลือลดภาระค่าใช้จ่ายทางด้านการผลิตและตกแต่งชิ้นเหล็กกล้าทดสอบด้วยเครื่องมือที่ทันสมัย ตลอดจนพี่ๆ ที่รับผิดชอบทางด้านการผลิตให้ชิ้นเหล็กกล้าทดสอบเป็นไปตามขนาดและมาตรฐานการทดสอบของชิ้นงานอย่างตั้งใจ

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่ให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยเสมอมาและคุณค่าที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบเป็นกตัญญูตราบูชาแต่บิดามารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้สนับสนุนทุกท่าน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ด

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	4
1.3 ปัญหาและขอบเขตของวิทยานิพนธ์	4
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการทำวิทยานิพนธ์โดยสรุป	5

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วิวัฒนาการด้านกลศาสตร์การแตกหัก	7
2.2 ลำดับชั้นของความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้า.....	8
2.3 ทิศทางของภาระกระทำต่อชิ้นวัสดุและลักษณะ พื้นฐานรอยร้าวที่เกิดขึ้น	9
2.4 พื้นฐานกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (LEFM)	11
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า และค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น.....	17
2.6 วิธีการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า.....	21

บทที่ 3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
3.1 ผู้วิจัยที่นำแนวความคิดของ Irwin [4] ไปปรับใช้ในงานวิจัย เกี่ยวกับการทดสอบด้าน Fatigue threshold crack growth rate	29
3.2 การศึกษาบทความและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อ งานวิทยานิพนธ์	31
บทที่ 4 เครื่องมือทดสอบ ขนาดชิ้นเหล็กกล้าทดสอบ JIS SCM 440 และลำดับขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย	
4.1 เครื่องมือที่ใช้สำหรับทดสอบ	40
4.2 ชนิดวัสดุ ขนาด และรูปแบบของชิ้นเหล็กกล้าทดสอบ	42
4.3 สลักยึดชิ้นเหล็กกล้าทดสอบ	51
4.4 อุปกรณ์ช่วยในการเฝ้าติดตามหาการเติบโตของรอยร้าว	53
4.5 การทดสอบและเก็บข้อมูลเพื่อนำไปประมวลผล	54
บทที่ 5 ผลการทดสอบและการประมวลผลในรูปกราฟ	
5.1 ผลการทดสอบ ณ สภาวะการทดสอบที่อัตราส่วนภาระ ($R = 0.1$)	61
5.2 ผลการทดสอบ ณ สภาวะการทดสอบที่อัตราส่วนภาระ ($R = 0.3$)	64
5.3 ผลการทดสอบ ณ สภาวะการทดสอบที่อัตราส่วนภาระ ($R = 0.5$)	67
5.4 ผลการทดสอบ ณ สภาวะการทดสอบที่อัตราส่วนภาระ ($R = 0.7$)	70
บทที่ 6 การอภิปรายผลการวิจัย	
6.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดของความยาวรอยร้าวเฉลี่ย ภายใต้ภาระกระทำเป็นรอบ	74
6.2 การตรวจสอบผลของขนาดความยาวรอยร้าวต่อความกว้าง ของชิ้นเหล็กกล้าทดสอบภายใต้ค่าช่วง (a/W) ตามมาตรฐาน ASTM E647-05 [2] ยอมรับ	82

6.3	ผลของอัตราการเติบโตของรอบร้าวเนื่องจากความล้าที่ อัตราส่วนภาระเดียวกัน	84
6.4	การเปรียบเทียบผลการทดสอบที่อัตราส่วนภาระต่างกัน	92
บทที่ 7	ข้อสรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
7.1	ข้อสรุปงานวิจัย	95
7.2	ข้อเสนอแนะ	96
7.3	แนวทางการวิจัยที่ต่อเนื่อง	100
	รายการอ้างอิง	102
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า JIS SCM 440	107
	ภาคผนวก ข ข้อมูลจากการทดสอบและการประมวลผล	109
	ภาคผนวก ค มาตรฐานการทดสอบ ASTM E647-05 [2] สำหรับการทดสอบ	127
	ภาคผนวก ง การตรวจสอบความเป็นกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic fracture mechanics, LEFM) ของขนาดชิ้นเหล็กกล้าทดสอบ	136
	ภาคผนวก จ ศัพท์เทคนิค	140
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	143

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1	สรุปรายละเอียดและผลการวิจัย	36
ตารางที่ 6.1	สรุปผลของขนาดความยาวรอยร้าวต่อความกว้างของชั้นเหล็กกล้า ทดสอบภายใต้ค่าช่วง (a/W) ที่อัตราส่วนภาระต่างๆ	82
ตารางที่ 6.2	ผลของอัตราส่วนภาระแตกต่างกันที่ ΔK ต่ำสุด ในบริเวณใกล้ขีดเริ่มความล้า	93
ตารางที่ ก.1	ตารางเทียบเกรดมาตรฐานเหล็กกล้าเทียบเคียง	107
ตารางที่ ก.2	คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า JIS SCM 440	108
ตารางที่ ก.3	องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้า JIS SCM 440	108
ตารางที่ ข.1.1	สภาวะการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า	110
ตารางที่ ข.1.2	ข้อมูลการสร้างรอยร้าวก่อนหน้าของชั้นเหล็กกล้าทดสอบ JIS SCM 440 ที่อัตราส่วนภาระ ($R = 0.1$)	111
ตารางที่ ข.1.3	ข้อมูลการสร้างรอยร้าวก่อนหน้าของชั้นเหล็กกล้าทดสอบ JIS SCM 440 ที่อัตราส่วนภาระ ($R = 0.3$)	112
ตารางที่ ข.1.4	ข้อมูลการสร้างรอยร้าวก่อนหน้าของชั้นเหล็กกล้าทดสอบ JIS SCM 440 ที่อัตราส่วนภาระ ($R = 0.5$)	113
ตารางที่ ข.1.5	ข้อมูลการสร้างรอยร้าวก่อนหน้าของชั้นเหล็กกล้าทดสอบ JIS SCM 440 ที่อัตราส่วนภาระ ($R = 0.7$)	114
ตารางที่ ข.2.1	ข้อมูลผลของการทดสอบชั้นเหล็กกล้าทดสอบที่ 1 ($R = 0.1$)	115
ตารางที่ ข.2.2	ข้อมูลผลของการทดสอบชั้นเหล็กกล้าทดสอบที่ 2 ($R = 0.1$)	116
ตารางที่ ข.2.3	ข้อมูลผลของการทดสอบชั้นเหล็กกล้าทดสอบที่ 3 ($R = 0.1$)	117
ตารางที่ ข.2.4	ข้อมูลผลของการทดสอบชั้นเหล็กกล้าทดสอบที่ 1 ($R = 0.3$)	118
ตารางที่ ข.2.5	ข้อมูลผลของการทดสอบชั้นเหล็กกล้าทดสอบที่ 2 ($R = 0.3$)	119
ตารางที่ ข.2.6	ข้อมูลผลของการทดสอบชั้นเหล็กกล้าทดสอบที่ 3 ($R = 0.3$)	120
ตารางที่ ข.2.7	ข้อมูลผลของการทดสอบชั้นเหล็กกล้าทดสอบที่ 1 ($R = 0.5$)	121
ตารางที่ ข.2.8	ข้อมูลผลของการทดสอบชั้นเหล็กกล้าทดสอบที่ 2 ($R = 0.5$)	122
ตารางที่ ข.2.9	ข้อมูลผลของการทดสอบชั้นเหล็กกล้าทดสอบที่ 3 ($R = 0.5$)	123

ตารางที่ ข.2.10	ข้อมูลผลของการทดสอบชิ้นเหล็กกล้าทดสอบที่ 1 ($R = 0.7$)	124
ตารางที่ ข.2.11	ข้อมูลผลของการทดสอบชิ้นเหล็กกล้าทดสอบที่ 2 ($R = 0.7$)	125
ตารางที่ ข.2.12	ข้อมูลผลของการทดสอบชิ้นเหล็กกล้าทดสอบที่ 3 ($R = 0.7$)	126
ตารางที่ ง.1	สรุปผลของขนาดความยาวรอยร้าวต่อความกว้างของชิ้นเหล็กกล้า ทดสอบ (a/W) ในรูปที่สัมพันธ์กับชิ้นเหล็กกล้าทดสอบ CT-Specimen	138

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	สภาพความเสียหายของ Liberty ship ที่เกิดรอยร้าวในโครงสร้างจนนำไปสู่ความเสียหาย	7
รูปที่ 2.2	ลักษณะพื้นฐานของภาระกระทำ (mode of loading) ที่ทำให้เกิดความรุนแรงต่อรอยร้าวในลักษณะต่างกัน	9
รูปที่ 2.3	ระบบพิกัดและสนามความเค้นที่ปลายรอยร้าวใน 2 มิติ	12
รูปที่ 2.4	ตัวประกอบเรขาคณิต (Geometry factor) ที่อยู่ในรูป แบบ $f\left(\frac{a}{W}\right)$ ที่สัมพันธ์กับลักษณะของชิ้นงานทดสอบ	15
รูปที่ 2.5	ก) ลักษณะทั่วไปของกราฟเส้นโค้งอัตราการเติบโตรอยร้าวเนื่องจาก ความล้าที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวใน 3 ช่วง ข) กราฟ log-log scale แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติบโต รอยร้าวเนื่องจากความล้ากับพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น	18
รูปที่ 2.6	ชิ้นงานทดสอบแบบ Compact-tension (CT) ใช้มาตรฐาน ASTM E647-05[2] สำหรับใช้ดำเนินการทดสอบ	22
รูปที่ 2.7	ขนาดมาตรฐานของรอยบากกล	23
รูปที่ 2.8	เส้นทางการเบี่ยงเบนของการเติบโตรอยร้าวจากแนวระนาบสมมาตร	27
รูปที่ 4.1	เครื่องทดสอบ Hydraulic servo testing machine พร้อมส่วนควบคุม	41
รูปที่ 4.2	อุปกรณ์การยึดจับ grip device ขนาดใช้งานจริง 26.20 มม.	42
รูปที่ 4.3	ขนาด grip device มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ	43
รูปที่ 4.4	ก) ขนาดของชิ้นเหล็กกล้าทดสอบแบบ Compact-tension,CT ระบุตามมาตรฐาน ASTM E647-05[2] ข) ขนาดของชิ้นเหล็กกล้าทดสอบจริงที่คำนวณได้เพื่อนำไปผลิต จำนวน 15 ชิ้นงานทดสอบ แบบ Compact-tension (CT) โดยเลือกใช้เหล็กกล้า JIS SCM 440	45

รูปที่ 4.5	แท่งเหล็กกล้าชนิดเพลากลม JIS SCM 440 ขณะเตรียมแบ่งย่อย	46
รูปที่ 4.6	เหล็กกล้า JIS SCM 440 ถูกตัดเป็นท่อนให้มีขนาดความยาว 65 มม.	46
รูปที่ 4.7	กระบวนการตกแต่งให้ได้ขนาดตามที่กำหนดไว้	47
รูปที่ 4.8	การตรวจวัดขนาดของชิ้นเหล็กกล้าที่ทำการเผื่อไว้ สำหรับการตกแต่งชิ้นงานและตรวจขนาดรูเจาะร้อยสลัก	47
รูปที่ 4.9	ทิศทางการจัดวางเพื่อทำการจับยึดตรึงชิ้นเหล็กกล้าทดสอบบน แท่นสนามแม่เหล็กและสร้างรอยบากกลบนเครื่อง EDM	48
รูปที่ 4.10	ก) ทิศทางการเจียรในแนวตั้งฉากกับทิศทาง ที่จะนำไปสร้างรอยร้าวบนชิ้นเหล็กกล้าทดสอบ JIS SCM 440 ข) การตรวจดูทิศทางของการเจียรชัดผิวด้วยกล้อง ไมโครสโคป (Lumagny) กำลังขยายต่ำ 50 เท่า (50x)	49
รูปที่ 4.11	การตรวจสอบขนาดชิ้นเหล็กกล้าทดสอบในขั้นตอนสุดท้าย ก) ตรวจสอบขนาดความกว้าง 63.75 mm. ข) ตรวจสอบขนาดความหนา 25.40 mm.	50
รูปที่ 4.12	ก) ส่วนของสลักยึดชิ้นเหล็กกล้าทดสอบที่ ผ่านการกลึงให้ได้ขนาด 12.75 มม. ข) การทดลองสอดใส่สลักหลังการผลิต	52
รูปที่ 4.13	กล้องไมโครสโคป กำลังขยาย 50 เท่า (50x)	53
รูปที่ 4.14	การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ช่วยในการเฝ้าติดตามหา การเติบโตของรอยร้าวที่ติดตั้งเข้าฐานเหล็กในระดับ ความสูงของการเติบโตรอยร้าว	54
รูปที่ 4.15	ไมโครมิเตอร์เฮด (Micrometer head) ของ Mitutoyo รุ่น 148-801 (MHS3) ความละเอียดในการอ่านค่าที่ 0.01 mm.	57

รูปที่ 5.9	กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของเหล็กกล้า ทดสอบ JIS SCM 440 (ชั้นเหล็กกล้าทดสอบที่ 3) ณ สภาวะการทดสอบที่อัตราส่วนภาระ ($R = 0.5$)	69
รูปที่ 5.10	กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของเหล็กกล้า ทดสอบ JIS SCM 440 (ชั้นเหล็กกล้าทดสอบที่ 1) ณ สภาวะการทดสอบที่อัตราส่วนภาระ ($R = 0.7$)	70
รูปที่ 5.11	กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของเหล็กกล้า ทดสอบ JIS SCM 440 (ชั้นเหล็กกล้าทดสอบที่ 2) ณ สภาวะการทดสอบที่อัตราส่วนภาระ ($R = 0.7$)	71
รูปที่ 5.12	กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของเหล็กกล้า ทดสอบ JIS SCM 440 (ชั้นเหล็กกล้าทดสอบที่ 3) ณ สภาวะการทดสอบที่อัตราส่วนภาระ ($R = 0.7$)	72
รูปที่ 6.1	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของขนาดความยาวรอยร้าวเฉลี่ยเติบโต ภายใต้ภาระกระทำเป็นรอบที่อัตราส่วนภาระ ($R = 0.1$)	74
รูปที่ 6.2	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของขนาดความยาวรอยร้าวเฉลี่ยเติบโต ภายใต้ภาระกระทำเป็นรอบที่อัตราส่วนภาระ ($R = 0.3$)	76
รูปที่ 6.3	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของขนาดความยาวรอยร้าวเฉลี่ยเติบโต ภายใต้ภาระกระทำเป็นรอบที่อัตราส่วนภาระ ($R = 0.5$)	78
รูปที่ 6.4	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของขนาดความยาวรอยร้าวเฉลี่ยเติบโต ภายใต้ภาระกระทำเป็นรอบที่อัตราส่วนภาระ ($R = 0.7$)	80
รูปที่ 6.5	กราฟแสดงการเปรียบเทียบอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า ของเหล็กกล้าทดสอบ JIS SCM 440 (ชั้นเหล็กกล้าทดสอบจำนวน 3 ชั้น) ณ สภาวะการทดสอบที่อัตราส่วนภาระ ($R = 0.1$)	84
รูปที่ 6.6	กราฟแสดงการเปรียบเทียบอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า ของเหล็กกล้าทดสอบ JIS SCM 440 (ชั้นเหล็กกล้าทดสอบจำนวน 3 ชั้น) ณ สภาวะการทดสอบที่อัตราส่วนภาระ ($R = 0.3$)	86

รูปที่ 6.7	กราฟแสดงการเปรียบเทียบอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของเหล็กกล้าทดสอบ JIS SCM 440 (ชั้นเหล็กกล้าทดสอบจำนวน 3 ชั้น) ณ สภาวะการทดสอบที่อัตราส่วนภาระ ($R = 0.5$)	88
รูปที่ 6.8	กราฟแสดงการเปรียบเทียบอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของเหล็กกล้าทดสอบ JIS SCM 440 (ชั้นเหล็กกล้าทดสอบจำนวน 3 ชั้น) ณ สภาวะการทดสอบที่อัตราส่วนภาระ ($R = 0.7$)	90
รูปที่ 6.9	กราฟแสดงการเปรียบเทียบอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของเหล็กกล้าทดสอบ JIS SCM 440 ณ สภาวะการทดสอบที่อัตราส่วนภาระต่างกัน $R = 0.1, 0.3, 0.5$ และ 0.7	92
รูปที่ 6.10	กราฟแสดงค่าต่ำสุดของ ($\Delta K = \Delta K_{th}$) ในบริเวณใกล้ขีดเริ่มความล้าลดลงเมื่ออัตราส่วนภาระ (R) เพิ่มขึ้น	94
รูปที่ 7.1	การผลิตและตกแต่งขีดผิวกระทำในคราวเดียวกันทั้งหมด ก) ทิศทางการวางชั้นเหล็กกล้าทดสอบเพื่อขีดผิวกระทำในคราวเดียวกัน ข) ทิศทางการเจียรขีดผิวในทิศทางตั้งฉากกับรอยบากทางกล	98
รูปที่ ค.1	ชิ้นงานทดสอบแบบ Compact-tension(CT) ระบุตามมาตรฐาน ASTM E647-05[2] สำหรับใช้ในการทดสอบ	128
รูปที่ ค.2	ขนาดมาตรฐานของรอยบากกล	129
รูปที่ ค.3	การลดลงของภาระไหลดของการทดสอบแบบลด (K-decreasing) ในลักษณะการลดลงแบบ Shedding step	133
รูปที่ ค.4	เส้นทางการเบี่ยงเบนของการเติบโตรอยร้าว โดยเส้นทางการเติบโตรอยร้าวล่าเคลื่อนจากแนวระนาบสมมาตร	134

คำอธิบายสัญลักษณ์

a	ความยาวรอยร้าว, mm . (ระยะจากกึ่งกลางรูเจาะรอยสลักบนชิ้นเหล็กกล้าทดสอบถึงปลายของรอยร้าว)
a_{avg}	ความยาวรอยร้าวเฉลี่ย, mm . (ระยะรอยร้าวเฉลี่ยทั้งสองด้านของชิ้นเหล็กกล้าทดสอบ)
a_n	ความยาวรอยบากกล, mm . (ระยะจากกึ่งกลางรูเจาะรอยสลักบนชิ้นเหล็กกล้าถึงปลายรอยบากกล)
Δa	ผลต่างความยาวรอยร้าว, mm .
B	ความหนาของชิ้นเหล็กกล้าทดสอบ, mm .
$\frac{da}{dN}$	อัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า, $mm./cycle$
F	ตัวประกอบเรขาคณิต (Geometry factor)
h	ระยะห่างของรอยบากทางกลในแนวระนาบสมมาตร, mm .
K	ตัวประกอบความเข้มของความเค้น, $MPa\sqrt{m}$
ΔK	พิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น, $MPa\sqrt{m}$
ΔK_{th}	พิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น ในบริเวณใกล้ขีดเริ่มความล้า, $MPa\sqrt{m}$
K_C	ตัวประกอบความเข้มของความเค้นวิกฤต, $MPa\sqrt{m}$
K_{Ic}	ตัวประกอบความต้านทานการแตกหักในสภาวะความเครียดระนาบ, $MPa\sqrt{m}$
N	รอบภาระกระทำ (อายุความล้า), $cycle$
P	ภาระกระทำต่อชิ้นเหล็กกล้าทดสอบ, kg .
P_{max}	ภาระสูงสุดที่กระทำต่อชิ้นเหล็กกล้าทดสอบ, kg .
P_{min}	ภาระต่ำสุดที่กระทำต่อชิ้นเหล็กกล้าทดสอบ, kg .
ΔP	ผลต่างภาระที่กระทำต่อชิ้นเหล็กกล้าทดสอบ, kg .
R	อัตราส่วนภาระ อัตราส่วนความเค้น อัตราส่วนตัวประกอบความเข้มของความเค้น (ทั้งนี้พิจารณาเทอมของ $R = \frac{P_{min}}{P_{max}} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{K_{min}}{K_{max}}$)

- r ระยะทางในแนวรัศมี, mm .
- r_c ระยะทางในแนวรัศมี ณ บริเวณเสี้ยวรูปแบบพลาสติกภายใต้ของภาระกระทำเป็นรอบ, mm .
- r_p ขนาดของบริเวณเสี้ยวรูปแบบพลาสติกภายใต้ภาระสถิตย์, mm .
- W ระยะจากกึ่งกลางรูเจาะร้อยสลักบนชิ้นเหล็กกล้าทดสอบถึงด้านตรงข้าม, mm .
- σ_{ys} ความเค้นต้านแรงดึงคราก, MPa
- θ มุมที่วัดจากแกนนอนไปในทิศทวนเข็มนาฬิกา, deg .