การศึกษาผลของภาระเฉลี่ย และแอมปลิจูดภาระที่มีต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าว เนื่องจากความล้า สำหรับวัสดุ เอ.ไอ.เอส.ไอ. 4140

นาย จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2539
ISBN 974-633-340-2
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16796517

A STUDY OF THE EFFECT OF MEAN LOAD AND LOAD AMPLITUDE ON THE FATIGUE CRACK GROWTH RATE FOR THE AISI 4140 STEEL

Mr. Jirapong Kasivitamnuay

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Mechanical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
1996

ISBN 974-633-340-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาผลของภาระเฉลี่ย และแอมปลิจูดภาระที่มีต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าสำหรับวัสดุ เอ.ไอ.เอส.ไอ. 4140

โดย นาย จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย

ภาควิชา เครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ก่อเกียรติ บุญชูกุศล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. อิทธิพล ปานงาม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ก่อเกียรติ บุญชูกุศล)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ชินเทพ เพ็ญชาติ)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย : การศึกษาผลของภาระเฉลี่ย และแอมปลิจูดภาระที่มีต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า สำหรับวัสดุ เอ.ไอ.เอส.ไอ. 4140 (A STUDY OF THE EFFECT OF MEAN LOAD AND LOAD AMPLITUDE ON THE FATIGUE CRACK GROWTH RATE FOR THE AISI 4140 STEEL) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุศล, 129 หน้า. ISBN 974-633-340-2

วัสดุ เอ.ไอ.เอส.ไอ.4140 ได้ถูกนำมาทดสอบภายใต้ภาระเปลี่ยนแปลงแบบแอมปลิจูดคงที่ ณ สภาวะของภาระเฉลี่ย และแอมปลิจูดภาระต่าง ๆ ตามมาตราฐาน ASTM E 647-93 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า เพื่อวิเคราะห์เงื่อนไขของการจำลองสภาวะของภาระที่เกิดขึ้นจริงมายังสภาวะทดสอบที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบ และหาสมการอัตราการเติบโตของรอยร้าว

การทดสอบในช่วงค่าอัตราส่วนภาระตั้งแต่ 0.3 ถึง 0.8 พบว่าพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวไม่ขึ้นกับอัตราส่วนภาระ นอกจากนี้ที่อัตราส่วนภาระเดียวกันการทดสอบที่ค่าภาระสูงสุดตั้งแต่ 1.600 ตัน ถึง 4.000 ตัน พบว่าพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวไม่ขึ้นกับค่าภาระสูงสุด ดังนั้นจึงสามารถใช้อัตราส่วนภาระเป็นพารามิเตอร์ในการกำหนดสภาวะทดสอบที่สอดคล้องกับสภาวะของภาระที่เกิดขึ้นจริง มีความเหมาะสมกับขีดความสามารถของเครื่องทดสอบ และขนาดของชิ้นงานทดสอบได้

สมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าที่ได้จากการทดสอบคือ $da/dN = 5.32 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.06}$ มีค่าสัมประสิทธิ์ของการบ่งชี้เท่ากับ 0.97 สมการที่ได้นี้จะเป็นข้อมูลสำคัญในการคำนวณอายุความล้า และการออกแบบชิ้นส่วน นอกจากนี้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณอายุความล้าของเพลากลมที่รับภาระดัดแบบกระทำเป็นรอบได้ถูกเขียนขึ้นเพื่อแสดงการนำเอาสมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวที่ได้จากการทดสอบไปประยุกต์ใช้

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา เครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

C716176 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
KEY WORD: MEAN LOAD / LOAD AMPLITUDE / FATIGUE

JIRAPONG KASIVITAMNUAY : A STUDY OF THE EFFECT OF MEAN LOAD AND LOAD AMPLITUDE ON THE FATIGUE CRACK GROWTH RATE FOR THE AISI 4140 STEEL. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KAUKEART BOONCHUKOSOL,Ph.D. 129 pp.
ISBN 974-633-340-2

AISI 4140 steel was tested under constant amplitude cyclic loading at various conditions of mean load and load amplitude, based on ASTM E 647-93 standard. The objectives of this research are to study the fatigue crack growth behavior, to analyse the condition of load simulation from actual loading to testing condition and to find the fatigue crack growth rate equation.

From the experiment under conditions of load ratio range from 0.3 to 0.8 show that the crack growth behavior is independent of load ratio. Moreover, at the same load ratio, tests at different value of maximum load range from 1.600 tons to 4.000 tons show that crack growth behavior is independent of maximum load. Thus load ratio can be used as a parameter for setting the testing condition which the result can be applied to any component under actual loading. Additionally testing condition can be specified to give suitable for the capacity of testing machine and specimen size.

Fatigue crack growth rate equation, obtained from the experiment, is expressed by $da/dN = 5.32 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.06}$ and has the coefficient of determination equals to 0.97. This equation is an important data for calculating the fatigue life and designing any component. Computer program for calculating the fatigue life of a circular shaft under cyclic bending moment was also written to present the application of crack growth rate equation.

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา เครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของบุคคลหลายท่านดังนี้ ผศ.ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุศล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นในแง่มุมต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยมาโดยตลอด รศ.ดร. อิทธิพล ปานงาม และอาจารย์ชินเทพ เพ็ญชาติ ที่ได้ให้โอกาสผู้วิจัยร่วมงานกับสถาบันพานิชยนาวีทำให้ภาระเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายของการทำวิจัยลดลงอย่างมาก รวมทั้งยังได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ด้วยเช่นกัน ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณบริษัทโบอิ้ง คอมเมอร์เชียล จำกัด ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนวิจัย ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากทั้งสำหรับตัวผู้วิจัยเอง และงานวิจัยต่อ ๆ ไป นอกจากนี้ต้องขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ปริทรรศน์ พันธุบรรยงค์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ถ่ายทอดประสบการณ์ ให้ความอนุเคราะห์ และช่วยสืบค้นเอกสารทางวิชาการต่าง ๆ มา ณ ที่นี้ด้วย

ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ไพบูลย์ ศรีภคากร ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการจัดเตรียมและการใช้งานเครื่องมือวัดต่าง ๆ นางสาวปิยมณี โกมลวิชญ์ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับความรู้ทางโลหะวิทยา อำนวยความสะดวกในการติดต่อกับบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมโลหะการ และช่วยสืบค้นเอกสารทางวิชาการต่าง ๆ นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณ คุณเฉิน ลี่ซิน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค และคุณศิริรัตน์ สมพันธุ์ ที่ให้ความช่วยเหลือจัดเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ผู้วิจัยต้องการอย่างเต็มใจยิ่ง

ผู้วิจัยขอขอบคุณพี่ยุทธนา เจริญวงศ์ และพี่ภาณุ ประทุมนพรัตน์ ที่ช่วยถ่ายทอดประสบการณ์เกี่ยวกับการใช้งานเครื่องทดสอบ และความรู้ด้านกลศาสตร์การแตกหักบางส่วนให้กับผู้วิจัย ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปอย่างรวดเร็ว

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนผู้วิจัยทั้งในด้านค่าใช้จ่าย และกำลังใจมาโดยตลอด ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญตาราง ..... ช
สารบัญภาพ ..... ญ
รายการสัญญลักษณ์ ..... ฑ

บทที่

1. บทนำ 1
2. กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น 6
3. การประยุกต์แนวทางของกลศาสตร์การแตกหักกับปัญหาความล้า 20
4. วิธีดำเนินการวิจัย 32
5. ผลการทดสอบ 44
6. การอภิปรายผลการวิจัย 57
7. ข้อสรุป และข้อเสนอแนะ 78

รายการอ้างอิง 82
ภาคผนวก 85
ประวัติผู้เขียน 129

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 แสดงลักษณะของภาระทดสอบของงานวิจัยนี้ 42
4.2 แสดงสภาวะทดสอบที่ทำการศึกษา 43
6.1 แสดงความยาวรอยร้าวในตำแหน่งสุดท้ายของการสร้างรอยร้าวก่อนหน้า และความยาวรอยร้าว ณ ตำแหน่งเริ่มต้นการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวในชิ้นงานทดสอบชิ้นที่ 1 และ 2 ณ สภาวะทดสอบคือ 1.200 ± 0.400 ตัน 60
6.2 แสดงภาระสูงสุด และขนาดของบริเวณเสียรูปแบบพลาสติกที่จุด A .. 61
6.3 แสดงอัตราส่วนของระยะทางระหว่างตำแหน่งสุดท้ายของการสร้างรอยร้าวก่อนหน้า และตำแหน่งแรกของการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวกับขนาดของบริเวณเสียรูปแบบพลาสติก 61
6.4 แสดงผลของแรงกดที่เกิดจาก plastic wake (closure force) 62
ก.1 แสดงส่วนประกอบของวัสดุ AISI 4140 86
ก.2 แสดงสมบัติทางกลของวัสดุ AISI 4140 87
ข.1 ข้อมูลการทดสอบที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.3 และสภาวะของภาระเท่ากับ 1.040±0.560 ตัน 88
ข.2 ข้อมูลการทดสอบที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.3 และสภาวะของภาระเท่ากับ 2.166±1.167 ตัน 90
ข.3 ข้อมูลการทดสอบที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 และสภาวะของภาระเท่ากับ 1.200±0.400 ตัน 91
ข.4 ข้อมูลการทดสอบที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 และสภาวะของภาระเท่ากับ 1.500±0.500 ตัน 93
ข.5 ข้อมูลการทดสอบที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 และสภาวะของภาระเท่ากับ 2.000±0.667 ตัน 97
ข.6 ข้อมูลการทดสอบที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 และสภาวะของภาระเท่ากับ 2.500±0.833 ตัน 99
ข.7 ข้อมูลการทดสอบที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 และสภาวะของภาระเท่ากับ 3.000±1.000 ตัน 101

ข.8 ข้อมูลการทดสอบที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.7 และสภาวะของภาระเท่ากับ 1.360±0.240 ตัน 103
ข.9 ข้อมูลการทดสอบที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.7 และสภาวะของภาระเท่ากับ 2.000±0.353 ตัน 105
ข.10 ข้อมูลการทดสอบที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.7 และสภาวะของภาระเท่ากับ 2.833±0.500 ตัน 107
ข.11 ข้อมูลการทดสอบที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.8 และสภาวะของภาระเท่ากับ 1.440±0.160 ตัน 110
ข.12 ข้อมูลการทดสอบที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.8 และสภาวะของภาระเท่ากับ 3.000±0.333 ตัน 112

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

1.1 แสดงภาระเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับเพลาส่งกำลังที่สภาวะสถานะคงตัว 2
2.1 แสดงรูปแบบของภาระที่กระทำต่อรอยร้าว 7
2.2 แสดงระบบพิกัด และสนามความเค้นในบริเวณใกล้ ๆ กับปลายรอยร้าว 8
2.3 แสดงการกระจายความเค้นที่ได้จากการพิจารณาเทอมแรกของสมการที่ 2.1และที่ได้จากการพิจารณาทุก ๆ เทอม 9
2.4ก แสดงแผ่นแบนขนาดใหญ่ที่มีรอยร้าวขนาด 2a และรับความเค้นระยะไกลๆ เท่ากับ σ บน z-coordinate 11
2.4ข แสดงภาพขยายบริเวณปลายรอยร้าว และการกำหนดระบบโคออร์ดิเนตใหม่ โดยให้จุดกำเนิดอยู่ที่ปลายรอยร้าว 11
2.5 แสดงชิ้นงานทดสอบที่นิยมใช้ในการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า 14
2.6 แสดงรูปร่างของบริเวณเสียรูปแบบพลาสติกที่คำนวณด้วยวิธีต่าง ๆ 15
2.7 แสดงการกระจายความเค้น และขนาดของบริเวณเสียรูปแบบพลาสติก 16
2.8 แสดงหลักการซ้อนทับของ Rice เพื่อหาสนามความเค้นบริเวณรอยร้าว 18
2.9 แสดงมิติของชิ้นงานที่ใช้ในการตรวจสอบเงื่อนไขในการประยุกต์ใช้งานกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น 19
3.1 แสดงเส้นโค้งการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า 23
3.2 แสดงลักษณะทั่วไปของเส้นโค้งอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้า 24
3.3 แสดงความหมายทางกายภาพของอายุความล้าซึ่งคำนวณจากความสัมพันธ์ที่เขียนอยู่ในรูปสมการที่ (3.20ข) 27
3.4 แสดงการคำนวณพื้นที่ใต้เส้นกราฟโดยใช้กฎของซิมป์สัน 28
3.5 แสดงมิติของชิ้นงานทดสอบแบบ CT ตามมาตราฐาน ASTM E647-93 30
3.6 แสดงรายละเอียดของรอยบาก 31
4.1ก แสดงการวางตัวของชิ้นงานทดสอบในปัญหาที่ตั้งขึ้น 33
4.1ข แสดงการวางตัวของชิ้นงานทดสอบในทิศทาง L-R 33
4.2 แสดงมิติของชิ้นงานทดสอบแบบ CT ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ 34

รูปที่ (ต่อ) หน้า

4.3 แสดงท่อนเหล็กก่อนนำไปทำการแปรรูป 34
4.4 แสดงลักษณะของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการกลึงไสได้รูปทรงที่ต้องการ และเจาะรูเรียบร้อยแล้ว 35
4.5 แสดงการจัดวางชิ้นงานบนเครื่อง wire cut 35
4.6 แสดงภาพขยาย 200 เท่าที่ปลายรอยบาก 35
4.7ก แสดงลักษณะการจัดวางชิ้นงานบนแท่นเจีย 36
4.7ข แสดงชิ้นงานที่เสร็จเรียบร้อยแล้ว 36
4.8ก แสดงส่วนควบคุมหลัก(main controller) 37
4.8ข แสดงภาพขยายบริเวณปุ่มปรับตั้งสภาวะทดสอบ และหน้าปัดแสดงผล 37
4.9 แสดงชุดไฮดรอลิค 37
4.10ก แสดง actuator และ grip device 38
4.10ข แสดงภาพขยายบริเวณ grip device 38
4.11 แสดงระบบคอมพิวเตอร์สำหรับการควบคุมแบบอัตโนมัติ 38
4.12 แสดงกล้องไมโครสโคป 39
4.13 แสดงอุปกรณ์ช่วยเหลือ 39
4.14 แสดงลักษณะการจัดวางชิ้นงานทดสอบบนแท่นเลื่อนของกล้องไมโครสโคป 41
4.15 แสดงสเกลเวอร์เนียบนกล้องไมโครสโคป และไดอัลเกจ 41
5.1 กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ AISI4140 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.3 และภาระสูงสุดเท่ากับ 1.600 ตัน(1.040±0.560 ตัน) 45
5.2 กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ AISI4140 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.3 และภาระสูงสุดเท่ากับ 3.333 ตัน(2.166±1.167 ตัน) 46
5.3 กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ AISI4140 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 และภาระสูงสุดเท่ากับ 1.600 ตัน(1.200±0.400 ตัน) 47
5.4 กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ AISI4140 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 และภาระ

รูปที่ (ต่อ) หน้า

5.5 กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ AISI4140 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 และภาระสูงสุดเท่ากับ 2.667 ตัน(2.000±0.6670 ตัน) 49
5.6 กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ AISI4140 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 และภาระสูงสุดเท่ากับ 3.333 ตัน(2.500±0.833 ตัน) 50
5.7 กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ AISI4140 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 และภาระสูงสุดเท่ากับ 4.000 ตัน(3.000±1.000 ตัน) 51
5.8 กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ AISI4140 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.7 และภาระสูงสุดเท่ากับ 1.600 ตัน(1.360±0.240 ตัน) 52
5.9 กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ AISI4140 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.7 และภาระสูงสุดเท่ากับ 2.353 ตัน(2.000±0.353 ตัน) 53
5.10 กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ AISI4140 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.7 และภาระสูงสุดเท่ากับ 3.333 ตัน(2.833±0.500 ตัน) 54
5.11 กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ AISI4140 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.8 และภาระสูงสุดเท่ากับ 1.600 ตัน(1.440±0.160 ตัน) 55
5.12 กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ AISI4140 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.8 และภาระสูงสุดเท่ากับ 3.333 ตัน(3.000±0.333 ตัน) 56
6.1 กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ AISI4140 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 และภาระสูงสุดเท่ากับ 1.600 ตัน(1.200±0.400 ตัน) 58
6.2 แสดงบริเวณเสียรูปแบบพลาสติกที่จุดสิ้นสุดการสร้างรอยร้าวก่อนหน้า ... 59
6.3 แสดง plastic wake ที่เกิดขึ้นล้อมรอบรอยร้าว 59
6.4 แสดงความหมายของจุด A,B และระยะที่ใช้สำหรับคำนวณเพื่อเปรียบเทียบผลของบริเวณเสียรูปแบบพลาสติก 60

รูปที่ (ต่อ) หน้า

6.5 แสดงผลของแรงกดที่เกิดจาก Plastic wake 62
6.6 กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ AISI4140 ณ สภาวะทดสอบ อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.3 และภาระสูงสุดเท่ากับ 3.333 ตัน(2.166±1.167 ตัน) 64
6.7 แสดงผลของความแตกต่างของความยาวรอยร้าวที่ผิวทั้งสองต่อความเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมการเติบโตของรอยร้าวโดยรวมในบริเวณใกล้ขีดเริ่ม 65
6.8 กราฟแสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าที่ผิวทั้งสองข้าง และอัตราการเติบโตเฉลี่ย สำหรับวัสดุ AISI 4140 ที่สภาวะของภาระเท่ากับ 2.166 ± 1.167 ตัน 66
6.9 แสดงขั้นตอนในการใช้พารามิเตอร์ไร้หน่วยอัตราส่วนภาระในการจำลองสภาวะของภาระที่เกิดขึ้นจริงในชิ้นส่วนโครงสร้างมายังสภาวะของภาระที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบ 67
6.10 กราฟแสดงผลของภาระสูงสุดที่มีต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ AISI 4140 ที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.3 68
6.11 กราฟแสดงผลของภาระสูงสุดที่มีต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ AISI 4140 ที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.5 69
6.12 กราฟแสดงผลของภาระสูงสุดที่มีต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ AISI 4140 ที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.7 70
6.13 กราฟแสดงผลของภาระสูงสุดที่มีต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ AISI 4140 ที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.8 71
6.14 กราฟแสดงผลของอัตราส่วนภาระที่มีต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ AISI 4140 ที่ภาระสูงสุดเท่ากับ 1.600 ตัน .. 73
6.15 กราฟแสดงผลของอัตราส่วนภาระที่มีต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุ AISI 4140 ที่ภาระสูงสุดเท่ากับ 3.333 ตัน .. 74
6.16 กราฟแสดงจุดข้อมูลที่ได้จากทุก ๆ สภาวะทดสอบ 75
6.17 แสดงเส้นขอบเขตบน และล่างของจุดข้อมูลอัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าสำหรับวัสดุ AISI 4140 76

รายการสัญญลักษณ์

A	อัตราส่วนแอมปลิจูด
a	ความยาวรอยร้าว, mm
	ระยะทางจากรูเจาะบนชิ้นงานทดสอบถึงปลายรอยร้าว, mm
B	ความหนาของชิ้นงานทดสอบ, mm
da/dN	อัตราการเติบโตของรอยร้าว, mm/cycle
F	ตัวประกอบเรขาคณิต
f	ตัวประกอบเรขาคณิต
K	ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น, MPa$\sqrt{m}$
K_c	ค่าความเข้มของความเค้นวิกฤติ, MPa$\sqrt{m}$
K_{Ic}	ค่าความต้านทานการแตกหักในสถานะความเค้นแบบความเครียดระนาบ, MPa$\sqrt{m}$
N	อายุความล้า, cycle
P	ภาระที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบ, Newton
R	อัตราส่วนภาระ
	อัตราส่วนความเค้น
	อัตราส่วนตัวประกอบความเข้มของความเค้น
r	ระยะทางในแนวรัศมี, mm
	อัตราส่วนร่วมของลำดับเรขาคณิต
r_c	ขนาดของบริเวณเสียรูปแบบพลาสติกภายใต้ภาระกระทำเป็นรอบ, mm
r_p	ขนาดของบริเวณเสียรูปแบบพลาสติกภายใต้ภาระสถิตย์, mm
W	ระยะทางจากรูเจาะบนชิ้นงานทดสอบถึงขอบด้านตรงข้าม mm
Z	ฟังก์ชันความเค้นเชิงซ้อน
$\overline{Z}$	อินทิกรัลอันดับที่หนึ่งของ Z
$\overline{\overline{Z}}$	อินทิกรัลอันดับที่สองของ Z

อักษรกรีก

σ_y	ความต้านแรงดึงคราก, MPa
σ_m	ความเค้นเฉลี่ย, MPa
σ_a	แอมปลิจูดความเค้น, MPa
θ	มุมที่วัดจากแกนนอนไปในทิศทวนเข็มนาฬิกา, deg
Φ	ฟังก์ชันความเค้นของ Westergaard

Δ พิสัย

ตัวห้อย

max สูงสุด
min ต่ำสุด
avg ค่าเฉลี่ย