

กลไกการแตกหักเนื่องจากอัตราความเครียดในเหล็กกล้าไร้สนิม 304



นายศุภฤกษ์ บุญเทียร

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

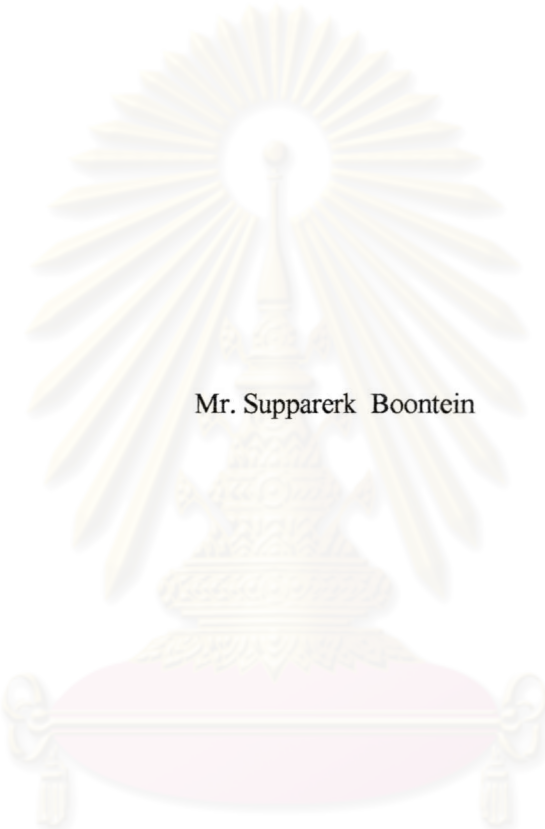
ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2673-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I21050545

STRAIN RATE DAMAGE MECHANISM OF 304 STAINLESS STEEL



Mr. Supparerk Boontein

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2673-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์

กลไกการแตกหักเนื่องจากอัตราความเครียดในเหล็กกล้าไร้สนิม 304

โดย

นายสุภฤกษ์ บุญเกียรติ

สาขาวิชา

นิวเคลียร์เทคโนโลยี


อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิศิษฐ ทวีปรัมย์พร

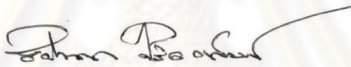
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

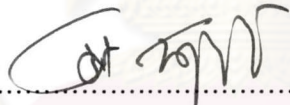
อาจารย์เดโช ทองอร่าม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

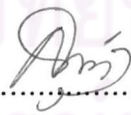
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิศิษฐ ทวีปรัมย์พร)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(อาจารย์เดโช ทองอร่าม)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

ศุภฤกษ์ บุญเกียรติ : กลไกการแตกหักเนื่องจากอัตราความเครียดในเหล็กกล้าไร้สนิม 304. (STRAIN RATE DAMAGE MECHANISM OF 304 STAINLESS STEEL) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. วิศิษฎ์ ทวีปรั้งยีพร, อ.ที่ปรึกษาร่วม : อ. เดโช ทองอร่าม, 84 หน้า. ISBN 974-17-2673-2

วัตถุประสงค์หลักของวิทยานิพนธ์คือ ศึกษากลไกการแตกหักจากผลของระดับอัตราความเครียดต่อการเกิดการแตกหักจากการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ระดับอัตราความเครียดช้า  $4.0 \times 10^{-7}$  ถึง  $1.0 \times 10^{-4}$  วินาที<sup>-1</sup> ในสภาวะจำลองที่ประกอบด้วยสารละลายผสมโซเดียมคลอไรด์ โซเดียมไทโอซัลเฟตและกรดซัลฟูริก ณ อุณหภูมิห้อง พบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างจุลภาคของแต่ละชิ้นงานภายหลังถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนว่า ขนาดและความหนาแน่นของรอยแตกสัมพันธ์กับค่าคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน และสามารถใช้อธิบายกลไกการแตกหักจากผลของอัตราความเครียดช้า ระดับอัตราความเครียดช้าที่วิกฤตจะทำให้ชิ้นงานมีความไวต่อการแตกหัก เนื่องจากอัตราความเครียดช้ามีผลต่ออัตราการแตกของฟิล์ม อัตราการสร้างฟิล์มขึ้นใหม่และอัตราการกัดกร่อนบริเวณรอยแตกของฟิล์ม ความเสียหายที่เกิดขึ้นเมื่อถูกอธิบายโดยใช้แบบจำลองความเสียหาย Strain-rate Damage Model ของ Gerber และ Garud พบว่าเป็นไปตามความสัมพันธ์  $D = \int_0^t A[\dot{\epsilon}]^p dt$  ผลการเข้าร่วมของสภาวะกัดกร่อนจากสารละลายที่ทำให้เกิดการแตกหักในชิ้นงานสามารถแสดงด้วยค่า  $p < 1$  ส่วนความเสียหายที่เกิดจากคุณสมบัติเชิงกลเพียงอย่างเดียวจะแสดงด้วยค่า  $p \sim 1$

นอกจากนี้ระดับค่า  $p$  ที่น้อยกว่า 1 ในการทดลองสัมพันธ์อย่างยิ่งกับปริมาณการเชื่อมต่อกันของโครเมียมคาร์ไบด์ที่ขอบเกรนเมื่อวัสดุผ่านการเซนซิไทเซชันที่ระดับต่างกัน กล่าวได้ว่าค่า  $p$  สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างจุลภาคของวัสดุจากการเซนซิไทเซชัน ซึ่งอาจนำมาใช้เป็นวิธีการทดสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุก่อนการใช้งานได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเทคโนโลยี  
สาขาวิชา วิศวกรรมเทคโนโลยี  
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนิสิต.....ศุภฤกษ์ บุญเกียรติ  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



##4370527321 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD : SLOW STRAIN RATE TENSILE TEST / DAMAGE MECHANISM / STRESS  
CORROSION CRACKING

SUPPARERK BOONTEIN : STRAIN RATE DAMAGE MECHANISM OF 304  
STAINLESS STEEL. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.DR. VISIT  
THAVEEPRUNGSRIPOORN, THESIS CO-ADVISOR : DECHO THONG-ARAM, 84  
pp. ISBN 974-17-2673-2

The objective of this research was to study the strain rate damage mechanism of 304 stainless steel by using the slow strain rate tensile test in a range of  $4.00 \times 10^{-7}$  to  $1.10 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$  in solutions containing either NaCl or  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{H}_2\text{SO}_4$  at ambient temperature. Investigation of specimens' surface using scanning electron microscope (SEM) revealed that crack size and density closely related to mechanical properties, and can be used to describe the damage caused by strain rate. At critical strain rate, specimens are highly embrittled as a result of interaction between the rupture film, the passivation of film, and corrosion rate at rupture area as

described by Gerber and Garud model, which  $D = \int_0^t A [\dot{\epsilon}]^p dt$ . Stress Corrosion Cracking

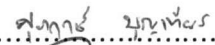
resulted from the interaction of an aggressive environment and strain rate showed p-value smaller than 1,  $p < 1$ , while specimens which failed mechanically show  $p \sim 1$ .

The p-value of lower than 1 demonstrates good correlation with the chromium-carbide linkage at grain boundaries at different level of sensitization. It can be concluded that the p-value can be used as an index to indicate the level of sensitization and may be adopted as a method for sensitization tool.

Department Nuclear Technology

Field of study Nuclear Technology

Academic year 2002

Student's signature..... 

Advisor's signature..... 

Co-advisor's signature..... 

## กิตติกรรมประกาศ

สำหรับความสำเร็จที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วิศิษฐ ทวีปรั้งยีพร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์เดโช ทองอร่าม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม เป็นอย่างสูงที่ให้ความรู้ ให้คำปรึกษา และคำแนะนำที่ดี เพื่อเป็นแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณอาจารย์ในภาควิชานิเวศวิทยาเทคโนโลยีทุกท่าน ที่ให้ความรู้และคำปรึกษาตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษาที่ภาควิชา ขอขอบคุณบริษัทไทยน็อคซ์ สติล จำกัด ที่กรุณาเอื้อเพื่อเหล็กกล้าไร้สนิม 304 เพื่อใช้ทดลองในงานวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความช่วยเหลือในการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน นอกจากนี้ งานวิจัยคงจะสำเร็จลุล่วงไปไม่ได้หากไม่ได้รับกำลังใจ แรงผลักดันและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งในทุกด้านจากเพื่อน พี่และน้องทุกท่านในภาควิชานิเวศวิทยาเทคโนโลยี จึงขอขอบคุณเพื่อน พี่และน้องทุกท่านไว้ ณ ที่นี้ด้วยความจริงใจ

ท้ายนี้สำหรับกำลังใจที่ได้รับอย่างแรงกล้า และแรงผลักดันที่ดียิ่ง ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ในทุกสิ่งที่ดีที่มอบแก่ข้าพเจ้าเสมอมา รวมถึงกำลังใจที่ได้รับจาก ลุง ป้าและพี่น้อง ขอขอบคุณพี่กิตติ บุญประคอง และพี่สุภาวดี จันทร์น้อย ที่ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่งตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้.....	4
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2. กลไกการแตกหักจากผลของความเค้นและการกัดกร่อน.....	7
2.1 การกัดกร่อนด้วยผลของความเค้น.....	7
2.2 การกัดกร่อนเนื่องจากผลของความเค้นที่บริเวณขอบเกรนในเหล็กกล้าไร้สนิม.....	10
2.3 ผลของสภาวะแวดล้อมที่ประกอบด้วยคลอไรด์ไอออนสารประกอบซัลเฟอร์และสารละลายไทโอซัลเฟต ที่มีผลต่อการเกิดการกัดกร่อนด้วยผลของความเค้นในเหล็กกล้าไร้สนิม 304.....	16
2.3.1 สภาวะที่ประกอบด้วยคลอไรด์ไอออน.....	16
2.3.2 สภาวะที่ประกอบด้วยองค์ประกอบซัลเฟอร์.....	17
2.3.3 สภาวะที่ประกอบด้วยคลอไรด์ไอออนและกรดโพสิไทโอนิก.....	18
2.4 กลไกการแตกหักจากผลของความเค้นและการกัดกร่อน.....	20
2.4.1 กลไกการเกิดการกัดกร่อนด้วยผลของความเค้น.....	20
2.4.2 ผลของอัตราความเครียดซ้ำต่อความไวของวัสดุในการเกิดการกัดกร่อนด้วยผลของความเค้น.....	25



## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3. เครื่องมือทดสอบแรงดึงอัตราความเครียดซ้ำ.....	28
3.1 เครื่องมือทดสอบแรงดึงอัตราความเครียดซ้ำหลายระดับ.....	28
3.2 ชุดเกี่ยวเปลี่ยนระดับอัตราความเครียดซ้ำ.....	31
3.3 อัตราการยืดออกและอัตราความเครียดซ้ำ.....	34
3.4 เซลล์ใส่สารเคมี.....	36
4. กระบวนการและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	40
4.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	40
4.2 การเตรียมชิ้นงาน.....	41
4.3 การทดสอบชิ้นงานด้วยเครื่องมือทดสอบแรงดึงอัตราความเครียดซ้ำ.....	43
5. ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	44
5.1 คำนำ.....	44
5.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องมือทดสอบแรงดึงอัตราความเครียดซ้ำ.....	44
5.3 ผลการตรวจสอบพื้นผิวชิ้นงานด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	50
5.3.1 ผลการตรวจสอบการเกิด pit และรอยแตกบริเวณผิวด้านข้างของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 304.....	51
5.3.2 ผลการตรวจสอบการเกิด pit และรอยแตกบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 304.....	60
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายที่เกิดขึ้นจากผลของ SCC กับอัตราความเครียดซ้ำในแบบจำลอง strain-rate damage model ของ Gerber และ Garud จาก power law relation.....	65
6. สรุปและอภิปรายผลการทดลอง.....	75
6.1 ลักษณะความเสียหายที่พบในชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 304.....	75
6.2 กลไกการแตกหักจากผลของอัตราความเครียดซ้ำต่อความเสียหายในชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 304 .....	75
6.3 Power Law Relations กับความไวของโครงสร้างเหล็กกล้าไร้สนิมต่อการเกิด SCC .....	77



สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
รายการอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก.....	82
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	84



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 แบบจำลองกลไกการแพร่ขยายของรอยแตกจากการเกิด Stress corrosion cracking .....	21
ตารางที่ 3.1 อัตราความเครียดซ้ำที่ได้จาก SSRT Machine ภายหลังเพิ่มเติม variation gear-box.....	35
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบที่สำคัญทางเคมีในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ใช้ในงานวิจัย.....	41
ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ทำการทดลองที่อัตรา ความเครียดซ้ำต่างกัน.....	47
ตารางที่ 5.2 ผลการเชื่อมต่อกันของปริมาณคาร์ไบด์ที่ขอบเกรน ในเหล็กกล้าไร้สนิม 304จากผลของระดับการเซนซิไทต์ต่างกัน.....	49
ตารางที่ 5.3 ค่า $p$ ที่ได้จากความชันกราฟระหว่างเวลาที่เหล็กกล้าไร้สนิม 304 เกิดความเสียหายและอัตราความเครียดซ้ำในแบบ log-scale.....	69
ตารางที่ 6.4 ค่า damage function ที่ได้จากความสัมพันธ์ power law relation ของเหล็กกล้าไร้สนิม 304.....	70

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 กราฟแสดงผลของอัตราความเครียดที่มีต่อการเกิด SCC ในอะลูมิเนียมแต่ละชนิด.....	2
รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงองค์ประกอบที่สำคัญในการเกิด Stress Corrosion Cracking .....	8
รูปที่ 2.2 Threshold Stress ของเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละชนิดใน 42% magnesium chloride.....	9
รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายแสดงการเกิด SCC ในวัสดุ ทองเหลือง และ เหล็กคาร์บอน.....	9
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง เวลา-อุณหภูมิ-การตกตะกอน ในเหล็กกล้าไร้สนิมออสติเนติก เกรด 316 (0.066%C).....	10
รูปที่ 2.5 ภาพแสดงการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ที่บริเวณขอบเกรน จากผลของการเซนซ์ซีไทเซชัน ทำให้เกิด IGSCC ในเหล็กกล้าไร้สนิม.....	11
รูปที่ 2.6 แสดงถึงการลดลงอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิบริเวณรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	12
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงปริมาณโครเมียมที่ลดลงบริเวณขอบเกรนเนื่องจากการเกิด $Cr_{23}C_6$ คาร์ไบด์ ในเหล็กกล้าไร้สนิม 304(0.039%C) หลังจากได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	13
รูปที่ 2.8 กราฟแสดงการเกิดเซนซ์ซีไทเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิม 18Cr-8Ni ที่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ในระดับต่างๆ กัน.....	14
รูปที่ 2.9 แสดงการเกิด SCC ในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ในสถานะของกรดโพลิไทโอนิก ซึ่งเกิดจากความเค้นที่ตกค้างจากการเชื่อมวัสดุ.....	14
รูปที่ 2.10 แสดงการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบบริเวณรอยเชื่อมในเหล็กกล้าไร้สนิม.....	15
รูปที่ 2.11 ผลของ SCC ที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนในเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสติเนติก.....	17
รูปที่ 2.12 การเกิด anodic dissolution ที่บริเวณส่วนปลายของรอยแตกที่ปราศจากฟิล์มปกคลุม.....	22
รูปที่ 2.13 กลไกการเกิด SCC ในบริเวณที่เกิด slip plane.....	23

สารบัญ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดรอยแตกกับ anodic dissolution current ที่บริเวณ straining electrode surfaces.....	24
รูปที่ 2.15 กราฟแสดงผลของ strain rate ที่มีต่อความไวของวัสดุในการเกิด SCC.....	25
รูปที่ 2.16 แสดงกระบวนการเกิด Stress corrosion cracking จากผลของ อัตราความเครียดซ้ำที่วัสดุได้รับ.....	26
รูปที่ 3.1 เครื่องดึงอัตราความเครียดซ้ำที่สามารถปรับระดับอัตรา ความเครียดซ้ำได้.....	29
รูปที่ 3.2 กราฟเปรียบเทียบค่าแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงที่อ่านได้ จาก LabVIEW ในรูปของความต่างศักย์ กับค่าแรงดึงที่อ่านได้จริง จาก SSRT machine.....	30
รูปที่ 3.3 กราฟเปรียบเทียบค่าแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของ gauge-length ในชิ้นงานที่อ่านได้จาก LabVIEW ในรูป ของความต่างศักย์ กับค่าแรงดึงที่อ่านได้จริงจาก SSRT machine.....	31
รูปที่ 3.4 ลักษณะการจัดวางของเฟืองขนาด 60 และ 26 ฟัน ภายใน variation gear-box.....	32
รูปที่ 3.5 แผนภาพการทำงานภายใน variation gear-box.....	33
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเปอร์เซ็นต์การยืดออกของเหล็กกล้า ไร้สนิมเกรด 304 จากผลของอัตราความเครียดซ้ำต่างกัน 4 ระดับ ที่ได้รับจาก SSRT machine.....	38
รูปที่ 3.7 Chemical Cell ที่ใช้ในการทดลอง.....	38
รูปที่ 3.8 ส่วนประกอบของ Chemical Cell .....	37
รูปที่ 4.1 ลักษณะ และขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่ใช้กับ SSRT machine ในการทดลอง.....	41
รูปที่ 4.2 เครื่องตัดชิ้นงาน Engraving Plotter ME-300.....	42
รูปที่ 4.3 เต้าอบอุณหภูมิสูงที่ใช้ในกระบวนการเซนซิไทเซชัน.....	42
รูปที่ 4.4 ชิ้นงานทดลองที่บรรจุอยู่ใน chemical cell ที่ต่อกับระบบหมุนเวียน สารละลาย.....	43
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดซ้ำและ UTS ของเหล็กกล้าไร้สนิม 304.....	45



สารบัญ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Elongation และอัตราการความเครียดซ้ำของเหล็กกล้าไร้สนิม 304.....	46
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Reduction in area และอัตราการความเครียดซ้ำของเหล็กกล้าไร้สนิม 304.....	46
รูปที่ 5.4 แสดงการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 กลุ่มที่ 1 ในชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเซนซ์ซีไทเซชัน อัตราความเครียด $4.0 \times 10^{-7}$ วินาที <sup>-1</sup> และชิ้นงานที่เซนซ์ซีไทเซชัน 1 ชั่วโมง อัตราความเครียด $3.9 \times 10^{-6}$ วินาที <sup>-1</sup> .....	48
รูปที่ 5.5 การเปลี่ยนแปลงขนาดและความหนาแน่นของรอยแตกในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 กลุ่มที่ 1 จากผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการความเครียดซ้ำในชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเซนซ์ซีไทเซชัน .....	51
รูปที่ 5.6 การเปลี่ยนแปลงขนาดและความหนาแน่นของรอยแตกในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 กลุ่มที่ 1 จากผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการความเครียดซ้ำในชิ้นงานที่ผ่านการเซนซ์ซีไทเซชัน 1 ชั่วโมง .....	51
รูปที่ 5.7 การเปลี่ยนแปลงขนาดและความหนาแน่นของรอยแตกในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 กลุ่มที่ 2 จากผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการความเครียดซ้ำในชิ้นงานที่ผ่านการเซนซ์ซีไทเซชัน 2 ชั่วโมง .....	52
รูปที่ 5.8 การเปลี่ยนแปลงขนาดและความหนาแน่นของรอยแตกในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 กลุ่มที่ 2 จากผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการความเครียดซ้ำในชิ้นงานที่ผ่านการเซนซ์ซีไทเซชัน 8 ชั่วโมง .....	52
รูปที่ 5.9 การเปลี่ยนแปลงขนาดและความหนาแน่นของรอยแตกในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 กลุ่มที่ 2 จากผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการความเครียดซ้ำในชิ้นงานที่ผ่านการเซนซ์ซีไทเซชัน 24 ชั่วโมง .....	53
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง crack-size และ strain-rate ที่เกิดขึ้นที่บริเวณด้านข้างของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 304 .....	54
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pit-density และ strain-rate ที่เกิดขึ้นที่บริเวณด้านข้างของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 304 .....	54
รูปที่ 5.12 การเกิดรอยแตกในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 จากผลของเวลาที่ใช้ในการเซนซ์ซีไทเซชันที่อัตราการความเครียดซ้ำ $1.10 \times 10^{-4}$ วินาที <sup>-1</sup> .....	56

## สารบัญ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 5.13 การเกิดรอยแตกในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 จากผลของเวลาที่ใช้ ในการเซนซิไทเซชันที่อัตราความเครียดซ้ำ $4.2 \times 10^{-5}$ วินาที <sup>-1</sup> .....	56
รูปที่ 5.14 การเกิดรอยแตกในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 จากผลของเวลาที่ใช้ ในการเซนซิไทเซชันที่อัตราความเครียดซ้ำ $3.9 \times 10^{-6}$ วินาที <sup>-1</sup> .....	57
รูปที่ 5.15 การเกิดรอยแตกในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 จากผลของเวลาที่ใช้ ในการเซนซิไทเซชันที่อัตราความเครียดซ้ำ $4.0 \times 10^{-7}$ วินาที <sup>-1</sup> .....	57
รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเซนซิไทเซชัน ปริมาณของ โครเมียมคาร์ไบด์และระดับความถี่ของการเกิดโครเมียม คาร์ไบด์ที่ขอบเกรน.....	58
รูปที่ 5.17 ลักษณะของ pit ที่เกิดขึ้นจากผลของอัตราความเครียดซ้ำและ การกัดกร่อนของสารละลายที่วิกฤตในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการเซนซิไทด์ 8 ชั่วโมง และได้รับอัตราความเครียดซ้ำ $3.89 \times 10^{-6}$ วินาที <sup>-1</sup> .....	58
รูปที่ 5.18 ลักษณะของ pit ในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการเซนซิไทด์ 2 ชั่วโมง ที่อัตราความเครียดซ้ำ $5.2 \times 10^{-8}$ วินาที <sup>-1</sup> ที่ปราศจากการแพร่ของรอยแตก เนื่องจากได้รับอัตราความเครียดซ้ำ และการกัดกร่อนที่ไม่เหมาะสม.....	59
รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดซ้ำที่เปลี่ยนไปกับการเกิด SCC บริเวณภาคตัดขวางของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ไม่ผ่านการเซนซิไทเซชัน.....	60
รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดซ้ำที่เปลี่ยนไปกับการเกิด SCC บริเวณภาคตัดขวางของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการเซนซิไทเซชัน 1 ชั่วโมง.....	60
รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดซ้ำที่เปลี่ยนไปกับการเกิด SCC บริเวณภาคตัดขวางของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการเซนซิไทเซชัน 2 ชั่วโมง.....	61
รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดซ้ำที่เปลี่ยนไปกับการเกิด SCC บริเวณภาคตัดขวางของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการเซนซิไทเซชัน 8 ชั่วโมง.....	61

สารบัญ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดที่เปลี่ยนไปกับการเกิด SCC บริเวณภาคตัดขวางของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการเซนซิไทเซชัน 24 ชั่วโมง.....	62
รูปที่ 5.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % Pit-area และ strain-rate ของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 .....	63
รูปที่ 5.25 การเกิด IGSCC บริเวณภาคตัดขวางของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการเซนซิไทเซชัน 8 ชั่วโมง อัตราความเครียด $3.89 \times 10^{-6}$ วินาที <sup>-1</sup> และการเกิด Ductile failure ในภาคตัดขวางของวัสดุที่ผ่านการเซนซิไทเซชัน 1 ชั่วโมง อัตราความเครียด $3.89 \times 10^{-6}$ วินาที <sup>-1</sup> .....	64
รูปที่ 5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง crack -deep และ strain-rate ของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 .....	64
รูปที่ 5.27 แสดงความสัมพันธ์ของ UTS ที่มีต่อทั้งขนาดและความลึกของรอยแตกของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 .....	65
รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายที่เกิดขึ้นจากผลของ SCC กับอัตราความเครียดในแบบจำลอง strain rate damage model ของ Gerber และ Garud.....	66
รูปที่ 5.29 กราฟระหว่างช่วงเวลาที่เกิดความเสียหายและอัตราความเครียดของ alloy 600 ที่อุณหภูมิ 680 °F.....	67
รูปที่ 5.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ทำให้วัสดุเกิดความเสียหายแบบ SCC และอัตราความเครียดที่ได้จากการทดลองในเหล็กกล้าไร้สนิม 304.....	68
รูปที่ 5.31 รูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นในชิ้นงานทดลองเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่มีระดับการเซนซิไทเซชันต่างกันจากผลของอัตราความเครียด และ environment assists cracking.....	69
รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า p กับเวลาที่ใช้ในการเซนซิไทเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 .....	70
รูปที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า damage function และระดับการเซนซิไทเซชันในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 .....	71
รูปที่ 5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า crack-length และระดับการเซนซิไทเซชันในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 .....	71



สารบัญ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 5.35 ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่าง damage function และ crack-length กับค่า p ในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 .....	72
รูปที่ 5.36 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 โดยใช้เทคนิค SSRT ที่ระดับอัตราความเครียด $1.75 \times 10^{-6}$ วินาที <sup>-1</sup> ในสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต.....	73
รูปที่ 5.37 เปรียบเทียบค่า p-value กับเปอร์เซ็นต์การเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์ ที่บริเวณขอบเกรน ในการทำนายโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไป ของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 จากกระบวนการเซนซ์ซีไทเซชัน.....	73



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย