พฤติกรรมและกลไกการล้าของเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง

โดย

นายสมิกษ์ ชัยนา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
พ.ศ. 2551

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

พฤติกรรมและกลไกการล้าของเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง

Fatigue Behavior and Mechanism of Carbonitrided AISI 1015 Steel

โดย

นายสมิกษ์ ชัยนา

Samix Chaiyana

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ. 2551

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นายสมิกษ์ ชัยนา

เรื่อง

พฤติกรรมและกลไกการล้าของเหล็ก AISI 1015 ที่ชุบแข็งด้วยวิธีคาโบไนตรายดิง

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 28 มีนาคม พ.ศ. 2551

ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์ _____

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทวัส ศตสุข)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ _____

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาวสวน กาญจโนมัย)

กรรมการวิทยานิพนธ์ _____

(อาจารย์ ดร.มนต์ชัย พฤกษ์วิไลเลิศ)

กรรมการวิทยานิพนธ์ _____

(อาจารย์ ดร.สมคักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

คณบดี _____

(รองศาสตราจารย์ ดร.อุรุยา วีสกุล)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

บทคัดย่อ

จากการศึกษาพฤติกรรมการล้าของเหล็กคาร์บอนที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง และวิเคราะห์พื้นผิวการแตกหักเพื่ออธิบายการเกิดการขยายตัวของรอยร้าวและกลไกการแตกหัก พบว่าบริเวณผิวของชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงจะเกิดชั้นคาโบไนตราย ซึ่งส่งผลให้มีความแข็งที่ผิวสูง โดยความแข็งลดลงเมื่อระยะความลึกจากผิวเพิ่มขึ้นโดยค่าความแข็งจะคงที่ที่ระยะลึกประมาณ 1 มม. เหล็ก AISI 1015 ภายใต้การทดสอบแรงดึง จะแสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติก (พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบเหนียว) ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงขนาดของเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงจะถูกจำกัดด้วยชั้นคาโบไนตราย จึงทำให้มีการเปลี่ยนเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติกเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย (พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบเปราะ) อายุการล้าของชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง จะสูงกว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านกระ บวนการคาโบไนตรายดิง โดยขีดจำกัดการล้าของชิ้นทดสอบที่ผ่านและไม่ผ่านการชุบแข็งคาโบไนตรายดิงเป็น 340 MPa และ 300 MPa ตามลำดับ การแตกหักจากการล้าของเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านกระบวนการคาโบไนตรายดิงประกอบด้วย (ก) การแตกหักตามขอบเกรนในชั้นคาโบไนตรายดิง (ข) การขยายตัวของรอยร้าวเข้าไปภายในเนื้อของวัสดุหลัก ด้วยการร่วมตัวระหว่างรอยร้าวและช่องว่าง (crack-void interaction) และ (ค) ความเสียหายสุดท้ายในลักษณะหลุมสมมาตร (equiaxed dimple) ซึ่งเกิดการรวมกันของช่องว่างภายใน (coalesced void) บริเวณอนุภาคแข็ง

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Abstract

Fatigue behavior and mechanisms of AISI 1015 steel with and without carbonitriding have been studied. The results showed that the carbonitride phases formed around the surface of carbonitrided specimen, and decreased with the increasing depth from surface. The hardness was high at the surface, decreased with the increasing depth from surface, and became stable at approximately 1 mm depth. Under monotonic loading, significant plastic deformation could be observed for AISI 1015 steel (ductile behavior), while only marginal plastic deformation was observed (brittle behavior) for carbonitrided AISI 1015 steel. Fatigue resistance of carbonitrided AISI 1015 steel was better than that of AISI 1015 steel, i.e. the fatigue lives were higher for about an order of magnitude and the fatigue limit was 40 MPa higher. Typical fatigue failure for ductile material was observed on the fracture surface of AISI 1015 steel, while a combination of fracture mode, (a) intergranular fracture with secondary cracks in case material, and (b) ductile fracture with elongated dimples and equiaxed dimples in the core material, were observed on fracture surface of carbonitrided AISI 1015 steel.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

กิตติกรรมประกาศ

จากการที่ผลงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงลงด้วยดี ผู้วิจัยใคร่ขอกรอบขอบพระคุณ รองศาตราจารย์ ดร.ชาวสวน กาญจโนมัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สสะเวลาให้คำแนะนำและสอนสิ่งต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ทั้งในส่วนของงานวิจัยและการนำไปใช้ในชีวิตประจำวัน รวมถึงความสะดวกในการทำงานวิจัยที่มีเครื่องมือเครื่องใช้ครบถ้วน

นอกจากนี้ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่อนุเคราะห์อุปกรณ์ต่าง ๆ และสถานที่ที่ใช้สำหรับทำงานวิจัยให้ลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ให้ข้อคิดและคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ ทั้งในส่วนของงานวิจัยและความรู้ทั่วไป

สุดท้ายทางผู้วิจัยขอขอบคุณพระคุณผู้มีส่วนช่วยอื่น ๆ ที่ทำให้งานวิจัยครั้งนี้ก้าวหน้าและประสบความสำเร็จได้ด้วยดี อันได้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้ให้กำลังใจในการศึกษาและเป็นที่ปรึกษาที่ดี เพื่อน พี่และน้องในภาควิชาที่คอบช่วยเหลือในการทำงานและสร้างบรรยากาศการทำงานที่ดี ขอบคุณพนักงานรักษาความปลอดภัยประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่คอยอำนวยความสะดวกในการใช้งานที่ตึกวิจัย หากมีท่านใดที่ทางผู้วิจัยไม่ได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้ ทางผู้วิจัยต้องกราบขออภัยเป็นอย่างสูง

สมิกษ์ ชัยนา

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ. 2551

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

สารบาญ

หน้า

บทคัดย่อ ..... (2)
Abstract ..... (3)
กิตติกรรมประกาศ ..... (4)
สารบาญ ..... (5)
สารบาญตาราง ..... (8)
สารบาญภาพประกอบ ..... (9)
คำอธิบายสัญลักษณ์ ..... (12)

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3

2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 10

2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน 10
2.2 กระบวนการอบชุบคาโบไนตรายดิง 22
2.3 การล้าของวัสดุ 25

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

สารบาญต่อ

บทที่			หน้า
3	ระเบียบวิธีวิจัย		43
	3.1	การศึกษาองค์ประกอบ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกล	43
	3.2	การศึกษาความเค้นคงค้าง	45
	3.3	การศึกษาอายุการล้า	50
	3.4	การศึกษากลไกความเสียหายจากการล้า	52
4	ผลและการวิเคราะห์		54
	4.1	องค์ประกอบ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกล	54
	4.2	ความเค้นคงค้าง	62
	4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและอายุการล้า	63
	4.4	ผลกระทบของความเค้นคงค้างต่อความต้านทานการล้า	64
	4.5	กลไกการล้า	67
5	สรุปผลการวิจัย		73
	5.1	สรุปผลการวิจัย	73
	5.2	แนวทางวิจัยในอนาคต	74
	5.3	ข้อคิดเห็นและเสนอแนะ	74
	5.4	ประโยชน์จากงานวิจัย	75

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

สารบาญต่อ

บทที่ หน้า

บรรณานุกรม ..... (76)

ประวัติการศึกษา..... (80)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

สารบาญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การแบ่งประเภทของเหล็กและเหล็กกล้า	11
2.2	ประเภทของเหล็กและเหล็กกล้าบางชนิด	12
2.3	สรุปประเภทเหล็กและเหล็กกล้าตามข้อกำหนดของ AISI และ SAE	14
2.4	เปรียบเทียบอุณหภูมิอบชุบและคุณสมบัติที่สำคัญของการชุบแข็งแบบก๊าซประเภทต่าง ๆ	23
4.1	องค์ประกอบของเหล็ก AISI 1015 และเหล็ก AISI 1015 ที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง (wt%)	56
4.2	สมบัติเชิงกลของเหล็ก AISI 1015 ที่ผ่านและไม่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง	69
4.3	ความเค้นที่ใช้ทดสอบ ความเค้นคงค้างและความเค้นรวมของชิ้นทดสอบ AISI 1015 ที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงระหว่างการทดสอบการล้า	67

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

สารบาญภาพประกอบ

ภาพที่ หน้า

2.1 แผนภูมิสมดุลของเหล็กกับคาร์บอนในลักษณะที่ง่ายต่อการศึกษาเบื้องต้น... 16
2.2 แผนภูมิสมดุลของเหล็กกับคาร์บอนที่ปฏิกิริยาเปริเต็คติค 18
2.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กกล้า 0.2% ขณะเย็นตัว ๆ 20
2.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กกล้า 1% ขณะเย็นตัว ๆ 21
2.5 ชนิดของภาระแบบสเปกตรัม 26
2.6 การเกิดสลิป (slip) จากภาระภายนอกกระทำ 27
2.7 การเกิดสลิปในชิ้นทดสอบของนิกเกิล..... 28
2.8 การเกิดสลิปเนื่องจากการขยายตัวของ pure polycrystalline nickel..... 29
2.9 รอยร้าวเล็ก ๆ บนพื้นผิวจากการล้า 30
2.10 แผนภาพการขยายตัวของรอยร้าว 31
2.11 ผิวความเสียหายจากการล้าใน aluminum-lithium alloy ML377 31
2.12 ตัวอย่างผิวหน้าความเสียหายจากการล้าของสกรูสี่เหลี่ยม..... 33
2.13 ตัวอย่างผิวความเสียหายจากการล้าของสกรูที่นั่งจักรยานเสือภูเขา..... 33
2.14 ความเสียหายจากการล้าของ bearing ใน compressor..... 35
2.15 แสดง torsion fatigue ของเพลาขนาด 25 มม..... 35
2.16 เป็นภาพขยายแสดง torsion fatigue ของเพลาขนาด 25 มม 35
2.17 ทิศทางการเกิดรอยร้าว..... 36
2.18 ผิวการแตกหักจากการล้าของเหล็ก SAE 0030และเหล็กรีดร้อน SAE 1020.. 37
2.19 แผนภาพการขยายตัวของรอยร้าวในชิ้นทดสอบ..... 37
2.20 การแตกหักจากการล้าสำหรับภาระแบบตามแนวแกนและดัด..... 38
2.21 การล้าที่เกิดจาก axial load และ bending load..... 39
2.22 รูปแบบของ S-N curves..... 40

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

สารบาญภาพประกอบต่อ

ภาพที่ หน้า

3.1 ชิ้นทดสอบสมบัติทางกลและการล้า 43
3.2 รูปแบบการทำ electrolytic polishing 46
3.3 รูปแบบการกระเจิงของแสง 47
3.4 ทิศทางของความเค้นและความเครียดบนระนาบ 3 มิติ 48
3.5 ทิศทางการตกกระทบและสะท้อนของรังสี X-ray บนชิ้นทดสอบ 49
3.6 เครื่อง servo hydraulic fatigue machine 52
4.1 รูปแบบของ X-ray diffraction 57
4.2 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นทดสอบ 58
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและระยะห่างจากผิวของเหล็ก AISI 1015 ที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง 59
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะยืดตัวของชิ้นทดสอบ 61
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นคงค้างและระยะห่างจากผิวของเหล็ก AISI 1015 ที่ชุบแข็งคาโบไนตรายดิง 62
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของความเค้นและอายุการล้า 63
4.7 ภาพเขียนของเหล็ก AISI 1015 ที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงที่ไม่มีและมีภาระกระทำ 64
4.8 ภาพเขียนแสดงผลรวมความเค้น (superposed stress) ระหว่างความเค้นคงค้างและความเค้นที่ใช้ทดสอบของเหล็ก AISI 1015 ที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง 66
4.9 ภาพถ่ายของรอยร้าวเล็ก ๆ เกิดขึ้นที่ระยะต่ำกว่าผิวประมาณ 400 m m สำหรับชิ้นทดสอบการล้าที่ความเค้น 420 MPa จนถึง 80% ของอายุการล้า .. 68
4.10 ภาพถ่ายผิวการแตกหักของเหล็ก AISI 1015 ที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงหลังจากทดสอบการล้าที่ช่วงความเค้นเท่ากับ 420 MPa 70

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

สารบาญภาพประกอบต่อ

ภาพที่ หน้า

4.11 ภาพเขียนแสดงกระบวนการล้าของเหล็ก AISI 1015 ที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง (เมื่อภาระอยู่ในแนวแกนตั้ง) 71
4.12 ภาพถ่ายผิวการแตกหักของเหล็ก AISI 1015 ที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิงหลังจากทดสอบการดึง 72

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

คำอธิบายสัญลักษณ์

A_0	=	พื้นที่หน้าตัดบนระยะวัด (gage length)
F	=	แรงที่กระทำบนชิ้นทดสอบ
l	=	ความยาวของระยะวัด (gage length)
n	=	จำนวนรอบการล้า
N_f	=	การล้ารอบสุดท้าย
t	=	ความหนาผิวแข็ง (effective case depth)
w	=	ความกว้างของระยะวัด (gage length)
x	=	ระยะยืดจนขาดของชิ้นทดสอบ
s	=	ความเค้น
s_a	=	แอมพลิจูดความเค้น
s_y	=	ความเค้นคราก (yield stress)
s_u	=	ความเค้นดึงสูงสุด (ultimate tensile strength)
e	=	ความเครียด

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com