ผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อพฤติกรรมการคลายความเค้น ของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ที่อุณหภูมิสูง

นายวีระ ควรเลี้ยง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548

ISBN : 974-53-2757-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 25195748

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON STRESS RELAXATION BEHAVIOR OF INCONEL X-750 AT ELEVATED TEMPERATURES

Mr. Weera Khuanlieng

A Thesis Submitted in Partial Fullfillment for the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical Engineering
Department of Metallurgical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic year 2005

ISBN : 974-53-2757-3

481997

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อพฤติกรรมการคลายความเค้นของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ที่อุณหภูมิสูง
โดย	นายวีระ ควรเลี้ยง
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. ปัญญวัชร์ วังยาว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชาคร จารุพิสิฐธร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ดร. ปัญญวัชร์ วังยาว)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร)

วีระ ควรเลี้ยง : ผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อพฤติกรรมการคลายความเค้นของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ที่อุณหภูมิสูง (EFFECT OF HEAT TREATMENT ON STRESS RELAXATION BEHAVIOR OF INCONEL X-750 AT ELEVATED TEMPERATURES.) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ,อ.ที่ปรึกษาร่วม: ดร. ปัญญวัชร์ วังยาว,99 หน้า ISBN 974-53-2757-3

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาผลของกรรมวิธีทางความร้อนต่อพฤติกรรมการคลายความเค้นของอิน - โคเนล เอ็กซ์ 750 ที่อุณหภูมิสูง โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในสภาพที่ได้รับ (As-received) ประกอบด้วยเนื้อพื้นออสเทนไนต์หรือแกมมา (γ) คาร์ไบด์ MC และแกมมาไพรม (γ') ภายหลังการอบละลาย (Solution heat treatment) ที่อุณหภูมิ 885 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าแกมมาไพรมละลายเข้าไปในเนื้อพื้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเกรนออสเทนไนต์มีขนาดเท่าเดิม เมื่อนำมาบ่มแข็ง (Age hardening) ช่วงอุณหภูมิ 680 – 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเกรนออสเทนไนต์ไม่เปลี่ยนแปลง มีตะกอนของแกมมาไพรมใหม่กระจายทั่วเนื้อพื้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 10 - 33 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิบ่มแข็ง 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง พบว่าแกมมาไพรมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 12 นาโนเมตร และตัวอย่างมีค่าความแข็งและความต้านแรงดึงสูงที่สุด

ผลการทดสอบการคลายความเค้นของสลักเกลียวที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส และ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ชั่วโมง พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมเพิ่มขึ้น ส่งผลลดความแข็ง และความต้านแรงดึงสูงสุด แต่เพิ่มการยืดตัวและการคลายความเค้นของสลักเกลียว นอกจากนี้พบว่าที่อุณหภูมิบ่มแข็ง 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง สามารถต้านทานการคลายความเค้นที่อุณหภูมิทดสอบ 650 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 2,000 ชั่วโมง ได้ดีที่สุด และอุณหภูมิบ่มแข็งที่ 680 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง สามารถต้านทานการคลายความเค้นที่อุณหภูมิทดสอบ 760 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 2,000 ชั่วโมง ได้ดีที่สุด

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2548.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4670507021 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD : HEAT TREATMENT / STRESS RELAXATION / BOLT / INCONEL X-750 / MECHANICAL PROPERTIES / MICROSTRUCTURE

WEERA KHUANLIENG : EFFECT OF HEAT TREATMENT ON STRESS RELAXATION BEHAVIOR OF INCONEL X-750 AT ELEVATED TEMPERATURES. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. GOBBOON LOTHONGKUM, DR.ING. THESIS CO-ADVISOR : PANYAWAT WANGYAO, Ph.D., 99 pp. ISBN 974-53-2757-3

This work studied the effect of heat treatment conditions on stress relaxation behavior of Inconel X-750 at elevated temperatures. The original microstructure from the as-received state consisted of austenite or gamma (γ) matrix, MC carbide and initial gamma prime (γ'). After solution heat treatment at 885 °C for 24 h, it was found that the initial gamma prime dissolved in the matrix and the average diameter of austenite grain was nearly the same. By aging at temperature in ranges of 680 – 760 °C for 20 h, the average diameter of austenite grain was not changed and the average diameter of gamma prime precipitated in matrix was in ranges of 10 – 33 nanometer. After aging at 700 °C for 20 h, average diameter of gamma prime was 12 nanometer. At this aging, the sample had the highest hardness and tensile strength.

After stress relaxation test at 650 °C and 760 °C for 500, 1,000, 1,500 and 2,000 h, the results showed that increasing average diameter of gamma prime had a significant influence on decreasing of hardness and tensile strength but increasing of ductility and stress relaxation. By aging at 700 °C for 20 h, the sample performed the highest resistance to stress relaxation at 650 °C for 2,000 h. By aging at 680 °C for 20 h, the highest stress relaxation resistance was obtained for testing at 760 °C, 2,000 h.

Department...Metallurgical Engineering... Student 'signature.....Weera Khuanlieng.....

Field of study...Metallurgical Engineering... Advisor 's signature.....Gobboon Lothongkum.....

Acadamic year...2005.....Coadvisor 's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือของ รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร. ปัญญวัชร์ วังยาว อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งท่านทั้งสองได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในงานวิจัยด้วยดีมาตลอด ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชาคร จารุพิสิฐธร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ขอขอบคุณบริษัทไอเกิ้ลไฮเท็มโปรดักท์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ชิ้นงานสำหรับใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ขอขอบพระคุณคุณวีระศักดิ์ และคุณปวีณา หอมกระจาย วิศวกรการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่เอื้อเฟื้อและช่วยเหลือสำหรับเครื่องมือทดสอบ และสถานที่ทำวิจัย ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ ความช่วยเหลือจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และเนื่องจากทุนวิจัยได้รับการสนับสนุนบางส่วนจาก สกว. ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่กราบขอบพระคุณบิดา มารดา น้องสาว และเพื่อน ๆ ซึ่งให้การสนับสนุนและให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฏ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของการศึกษา 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

2 ปริทรรศน์วรรณกรรม 3

2.1 โลหะผสมนิกเกิล 3

2.2 สมบัติของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 8

2.2.1 เกรดตามมาตรฐานนานาชาติ 8

2.2.2 ส่วนผสมทางเคมี 8

2.2.3 สมบัติทางกายภาพทั่วไป 8

2.2.4 สมบัติเชิงกล 10

2.2.5 กรรมวิธีทางความร้อน 12

2.3 การทดสอบการคลายความเค้นของสลักเกลียว 13

2.3.1 ขนาดของสลักเกลียว 13

2.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ 13

2.3.3 การหาค่าการคลายความเค้น 14

2.3.4 จำนวนสลักเกลียวที่ใช้ทดสอบ 14

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 14

3 วิธีดำเนินการวิจัย 19

3.1 อุปกรณ์ให้ความร้อน 19

3.2 เครื่องมือเตรียมผิวชิ้นงาน 19

หน้า

3.3 เครื่องมือวิเคราะห์ 19
3.4 วัตถุดิบ 19
3.5 สารเคมี 19
3.6 ขั้นตอนการทดลอง 20
4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล 23
4.1 โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ในสภาพที่ได้รับ 23
4.1.1 ส่วนผสมทางเคมี 23
4.1.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค 24
4.1.3 ความแข็งของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ในสภาพที่ได้รับ 28
4.1.4 ความต้านแรงดึงของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ในสภาพที่ได้รับ 28
4.2 ผลการอบละลายตามด้วยการบ่มแข็ง 29
4.2.1 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ปล่อยเย็นตัว ในอากาศ 29
4.2.2 ความแข็งของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) 32
4.2.3 ความต้านแรงดึงของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) 32
4.2.4 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) ตามด้วย การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 680 (20), 700 (20), 720 (20), 740 (20) และ 760 (20) ปล่อยเย็นตัวในอากาศ 33
4.2.5 ความแข็งของสลักเกลียวหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่างกัน 38
4.2.6 ความต้านแรงดึงของสลักเกลียวหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่างกัน 38
4.3 ผลทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 และ 760 องศาเซลเซียส 40
4.3.1 โครงสร้างจุลภาคหลังทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ชั่วโมง 41
4.3.2 โครงสร้างจุลภาคหลังทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ชั่วโมง 49
4.3.3 การคลายความเค้น 57
4.3.4 ความแข็งของสลักเกลียวหลังผ่านการทดสอบการคลายความเค้น 58
4.3.5 ความต้านแรงดึงของสลักเกลียวหลังผ่านการทดสอบการคลายความเค้น 60
5 สรุปผลการทดลอง 62

หน้า

รายการอ้างอิง 63
ภาคผนวก 65
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 99

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 เกรดตามมาตรฐานนานาชาติ [7] 9
ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 [7] 9
ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพทั่วไปของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 [7] 10
ตารางที่ 2.4 สมบัติเชิงกลของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 บางเกรด [7] 11
ตารางที่ 2.5 มาตรฐานกรรมวิธีทางความร้อนต่าง ๆ [7] 12
ตารางที่ 2.6 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของชิ้นงานทดสอบ [8] 15
ตารางที่ 2.7 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของชิ้นงานทดสอบ [9] 16
ตารางที 4.1 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ 23
ตารางที่ 4.2 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ตามมาตรฐาน AMS 5667 [6] 23
ตารางที่ 4.3 สมบัติเชิงกลของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ในสภาพที่ได้รับ 28
ตารางที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 885 (24) 32
ตารางที่ 4.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมในสลักเกลียวหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่างกัน 36
ตารางที่ 4.6 ความแข็งของสลักเกลียวหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่างกัน 38
ตารางที่ 4.7 สมบัติเชิงกลของสลักเกลียวหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่างกัน 38
ตารางที่ 4.8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมในสลักเกลียว หลังผ่านการทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส 43
ตารางที่ 4.9 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมในสลักเกลียว หลังผ่านการทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส 51

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างจุลภาคทั่วไปของโลหะผสมนิกเกิลแบบใช้แรงขึ้นรูป (Wrought alloys) [1] 5
รูปที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ [7] 12
รูปที่ 2.3 รูปแบบของสลักเกลียวกับปลอกสวมที่ใช้ทดสอบ [4] 13
รูปที่ 2.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 1,090 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง [8] 15
รูปที่ 2.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง [9]
(a) ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด
(b) ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 16
รูปที่ 2.6 โครงสร้างแกมมาไพรมของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 704 องศาเซลเซียส (a และ b) อุณหภูมิ 725 องศาเซลเซียส (c และ d) และอุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส (e และ f) เป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง และ 4,000 ชั่วโมง ตามลำดับ ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [9] 17
รูปที่ 2.7 ความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิและเวลาบ่มแข็งต่างกัน [9] 18
รูปที่ 3.1 กราฟความเค้น-ความเครียด เพื่อหาการคลายความเค้นของสลักเกลียว [12] 22
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ในสภาพที่ได้รับ ขนาดเกรน ASTM, G11 ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง 24
รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ในสภาพที่ได้รับ ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด 25
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณบริเวณเนื้อพื้นออสเทนไนต์ ด้วยเทคนิคอีดีเอส โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด 25
รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณที่ก้อนอนุภาค MC ในรูปที่ 4.1 ด้วยเทคนิคอีดีเอส โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด 26
รูปที่ 4.5 โครงสร้างแกมมาไพรมของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ในสภาพที่ได้รับ ที่กำลังขยาย 25,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 27
รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณบริเวณเนื้อพื้นออสเทนไนต์กับอนุภาคแกมมาไพรม ด้วยเทคนิคอีดีเอส โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 27
รูปที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนบริเวณแกมมาไพรมกับเนื้อพื้นของอินโคเนล เอ็กซ์ 750 ในสภาพที่ได้รับ ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 28

หน้า

รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ขนาดเกรน ASTM, G11 ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง 29
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด 30
รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณที่ก้อนคาร์ไบด์ MC (Ti-rich) ในรูปที่ 4.9 ด้วยเทคนิคอีดีเอส โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด 30
รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณที่ก้อนคาร์ไบด์ MC (Nb-rich) ในรูปที่ 4.9 ด้วยเทคนิคอีดีเอส โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด 31
รูปที่ 4.12 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 32
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ต่างกัน ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง 34
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 700 (20) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด 35
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 700 (20) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด 35
รูปที่ 4.16 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ต่างกัน ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 37
รูปที่ 4.17 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมกับอุณหภูมิการบ่มแข็ง 40
รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ขนาดเกรน ASTM, G11 ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง 41
รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2,000 ชั่วโมง ขนาดเกรน ASTM, G11 ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง 42

หน้า

รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ขนาดเกรน ASTM, G11 ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง 42
รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2,000 ชั่วโมง ขนาดเกรน ASTM, G11 ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง 43
รูปที่ 4.22 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 44
รูปที่ 4.23 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 44
รูปที่ 4.24 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,500 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 45
รูปที่ 4.25 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2,000 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 45
รูปที่ 4.26 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 46

หน้า

รูปที่ 4.27 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 46

รูปที่ 4.28 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,500 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 47

รูปที่ 4.29 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2,000 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 47

รูปที่ 4.30 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมหลังทดสอบการความเค้นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาต่าง ๆ 48

รูปที่ 4.31 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ขนาดเกรน ASTM, G11 ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง 49

รูปที่ 4.32 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2,000 ชั่วโมง ขนาดเกรน ASTM, G11 ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง 50

รูปที่ 4.33 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ขนาดเกรน ASTM, G11 ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง 50

รูปที่ 4.34 โครงสร้างจุลภาคของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2,000 ชั่วโมง ขนาดเกรน ASTM, G11 ที่กำลังขยาย 200 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง 51

หน้า

รูปที่ 4.35 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตาม ด้วยการบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 52

รูปที่ 4.36 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตาม ด้วยการบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 52

รูปที่ 4.37 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตาม ด้วยการบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,500 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 53

รูปที่ 4.38 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตาม ด้วยการบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2,000 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 53

รูปที่ 4.39 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตาม ด้วยการบ่มแข็ง 680 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 500 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 54

รูปที่ 4.40 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตาม ด้วยการบ่มแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 54

รูปที่ 4.41 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตาม ด้วยการบ่มแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1,500 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 55

หน้า

รูปที่ 4.42 โครงสร้างแกมมาไพรมของสลักเกลียวหลังผ่านการอบละลาย 885 (24) ตามด้วยการบ่มแข็ง 760 (20) และทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2,000 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 55
รูปที่ 4.43 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแกมมาไพรมหลังทดสอบการคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส ระยะเวลาต่าง ๆ 56
รูปที่ 4.44 การคลายความเค้นสลักเกลียวที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ระยะเวลาต่าง ๆ 57
รูปที่ 4.45 การคลายความเค้นสลักเกลียวที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส ระยะเวลาต่าง ๆ 57
รูปที่ 4.46 ความแข็งของสลักเกลียวหลังทดสอบการคลายความเค้น ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส 59
รูปที่ 4.47 ความแข็งของสลักเกลียวหลังทดสอบการคลายความเค้น ที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส 59
รูปที่ 4.48 ความต้านแรงดึงสูงสุดของสลักเกลียวหลังทดสอบการคลายความเค้น ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส 60
รูปที่ 4.49 ความต้านแรงดึงสูงสุดของสลักเกลียวหลังทดสอบการคลายความเค้น ที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส 60