

การเพิ่มความแข็งของทองคำ 18 กระรัต โดยการทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นระเบียบ

นาย วินัย รักษาพันธ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-979-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 192 32470

HARDENING OF 18 CARAT GOLD BY ORDERED HARDENING

Mister Winai Raksapan

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

Department of Metallurgical Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-333-979-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเพิ่มความแข็งของทองคำ 18 กระรัต โดยการทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นระเบียบ

โดย

นาย วินัย รักษาพันธ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

รองศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรชัย สมศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อาจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์)

ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรชัย สมศิริ)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร. ไสว ด้านชัยวิจิตร)

กรรมการ

วิทยุ รักษาพันธ์ : การเพิ่มความแข็งของทองคำ 18 กระรัต โดยการทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นระเบียบ.
(HARDENING OF 18 CARAT GOLD BY ORDERED HARDENING)

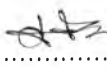
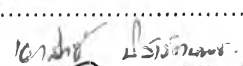
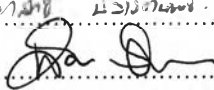
อ. ที่ปรึกษา : ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, อ. ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร. จัตรชัย สมศิริ , 97 หน้า.
ISBN 974-333-979-5.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนซึ่งได้แก่ การอบเป็นสสารละลายของแข็ง
เนื้อเดียว และการบ่มเพิ่มความแข็ง ของโลหะทองคำผสม 18 กระรัต (75 wt % Au) ระบบ ทองคำ – ทองแดง –
เงิน ที่มีปริมาณทองแดงตั้งแต่ 5 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ต่อค่าความแข็ง โครงสร้างจุลภาค และการเกิด
โครงสร้างที่เป็นระเบียบ ของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นโดยการรีดลดขนาดเป็นแผ่นบางให้มีความหนาลดลง 90
เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองพบว่า หลังจากบ่มเพิ่มความแข็ง ชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดง 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์
โดยน้ำหนัก มีความแข็งเพิ่มขึ้นจากกลไกการเพิ่มความแข็งโดยการทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นระเบียบ ซึ่งมี
อุณหภูมิบ่มที่ได้ความแข็งสูงสุดคือ 270 องศาเซลเซียส เมื่อปริมาณทองแดงในชิ้นงานเพิ่มขึ้นทำให้ความแข็ง
หลังบ่มมีค่าสูงขึ้น โดยความแข็งหลังบ่มที่สูงที่สุดของชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดง 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดย
น้ำหนัก มีค่า 237 283 และ 306 วิกเกอร์ เพิ่มขึ้นจากความแข็งหลังอบเป็นสสารละลายของแข็งเนื้อเดียว 92 123
และ 129 วิกเกอร์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณทองแดงในชิ้นงาน ทำให้อัตราการ
เพิ่มความแข็งจากการบ่มมีค่าสูงขึ้น จึงทำให้เวลาในการบ่มที่ได้ความแข็งสูงสุดมีค่าลดลง กล่าวคือมีค่า 100
60 และ 30 นาที สำหรับชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดง 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ส่วนกรณีชิ้นงานที่มีปริมาณทองแดง 5 wt.% ไม่พบโครงสร้างที่เป็นระเบียบ ความแข็งหลังบ่มเพิ่ม
ความแข็งมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิบ่ม 150 องศาเซลเซียส หลังจากบ่มนาน 30 นาที โดยมีค่า 137 วิกเกอร์ เพิ่มขึ้น
จากความแข็งหลังอบ 22 วิกเกอร์

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม 

C 818275 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS 18 CARAT GOLD / SOLUTION TREATMENT / AGE HARDENING / ORDERED HARDENING / ORDERED STRUCTURE

WINAI RAKSAPAN : HARDENING OF 18 CARAT GOLD BY ORDERED HARDENING.

THESIS ADVISOR : Dr. EKASIT NISARATANAPORN THESIS COADVISOR :


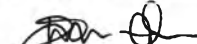
ASSOC.PROF. CHATCHAI SOMSIRI, Ph.D. 97 PP. ISBN 974-333-979-5

The effect of solution treatment and aging on microstructure, ordered structure formation and hardness of 18 carat gold (75 wt % Au) were investigated. The specimens, gold – copper – silver alloy contained 5 – 20 wt % copper, were cold rolled with the thickness reduction ratio of 90 %.

The experimental result indicated that the samples with 10, 15 and 20 wt.% copper were hardened by order hardening mechanism after aging treatment. The optimum aging temperature for maximum hardness was 270°C. An increase in copper content increased the as-aged hardness i.e. the maximum as-aged hardness values of the samples contained 10, 15 and 20 wt% copper were 273, 283 and 306 Vicker, an increase of 92, 123 and 129 Vicker, respectively when compared to the as-solution treated. Furthermore, the increase in copper content also increased the hardening rate, hence the time required to produce maximum hardness were reduced to 100, 60 and 30 minutes for the samples contained 10, 15 and 20 wt.% copper, respectively.

In case of the sample contained 5 wt.% copper, ordered structure was not substantiated. The maximum hardness of 137 Vicker, an increase of 22 Vicker from the as-solution treated hardness, was obtained by aging treatment at 150°C for 30 minutes.

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อผู้ขอรับ 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 101/2/01 น.ส.วิภาวรรณ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม 



กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำการวิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์, รองศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรชัย สมศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีตามเป้าหมาย

ขอขอบคุณ บริษัท เหล็กซิเมนต์ไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ และสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ และเจ้าหน้าที่ ที่ให้ความอนุเคราะห์และคำแนะนำ ด้านการวิเคราะห์และทดสอบตัวอย่างในการทำวิจัย

ขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ และเจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ ทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการปฏิบัติงานวิจัย และการประสานงาน รวมทั้งเพื่อน ๆ ที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

สุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู เป็นกำลังใจและส่งเสริมด้านการศึกษา เป็นอย่างดีตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	1
1.2 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2. วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 สมบัติทั่วไปของธาตุทองคำ ทองแดง และเงิน.....	3
2.2 แผนภูมิสมมูลเฟสของโลหะทองคำผสม.....	3
2.2.1 แผนภูมิสมมูลเฟสสองธาตุ.....	3
2.2.2 แผนภูมิสมมูลเฟสสามธาตุ.....	4
2.3 โครงสร้างที่เป็นระเบียบ.....	8
2.3.1 โครงสร้างผลึกของโครงสร้างที่เป็นระเบียบ.....	8
2.3.2 เทอร์โมไดนามิกส์ของโครงสร้างที่เป็นระเบียบ.....	9
2.3.3 การเปลี่ยนเฟสจากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ	13
2.3.4 ผลกระทบของโครงสร้างที่เป็นระเบียบต่อคุณสมบัติของโลหะผสม.....	18
2.4 การบ่มเพิ่มความแข็ง ในโลหะทองคำผสม.....	19
2.5 การตรวจวัด โครงสร้างที่เป็นระเบียบโดยอาศัยการกระเจิง.....	21
3. ระเบียบวิธีการทดลอง.....	26
3.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้และการเตรียม.....	26
3.2 เครื่องมือ / อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	27
3.2.1 เตาอบที่ใช้และการใส่ชิ้นงาน.....	27
3.2.2 เครื่องวัดอุณหภูมิและลวดวัดอุณหภูมิ.....	27
3.2.3 เครื่องวัดความแข็งระดับจุลภาค.....	27
3.2.4 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	28
3.2.5 เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD).....	28
3.3 ตัวแปรในการทดลอง.....	28

บทที่	หน้า
3.3.1 ตัวแปรที่จะวัดผล.....	28
3.3.2 ตัวแปรที่ต้องการศึกษา.....	28
3.3.3 ตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่.....	29
3.4 ระเบียบวิธีการทดสอบ / ตรวจวัด ตัวแปรที่จะวัดผล.....	29
3.4.1 การทดสอบความแข็งระดับจุลภาค.....	29
3.4.2 การตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค.....	30
3.4.3 การตรวจสอบโครงสร้างที่เป็นระเบียบด้วยเครื่อง XRD.....	30
3.5 ขั้นตอนการทดลอง.....	30
4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	32
4.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของการขึ้นรูปเย็น.....	32
4.1.1 ความแข็งระดับจุลภาค.....	32
4.1.2 โครงสร้างจุลภาค.....	33
4.1.3 อภิปรายผลการทดลอง.....	36
4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว.....	36
4.2.1 ความแข็งระดับจุลภาค.....	36
4.2.2 โครงสร้างจุลภาค.....	37
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ชนิดของโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD.....	40
4.2.4 อภิปรายผลการทดลอง.....	40
4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของการบ่มเพิ่มความแข็งในโลหะผสมทองคำ.....	42
4.3.1 ความแข็งระดับจุลภาค.....	42
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ชนิดของโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD.....	46
4.3.3 โครงสร้างจุลภาค.....	56
4.3.4 อภิปรายผลการทดลอง.....	76
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	82
รายการอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก.....	84
ภาคผนวก ก การกระเจิงของโครงสร้างที่เป็นระเบียบ.....	84
ภาคผนวก ข การใช้เทคนิค ANOVA วิเคราะห์ผลของการบิดเบี้ยวของโครงสร้างต่อ ความแข็งของชิ้นงาน.....	90
ภาคผนวก ค เปรียบเทียบรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงานกับรูปแบบการกระเจิงอ้างอิง	93
ภาคผนวก ง ผลการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวของชิ้นงานที่เมผ่านการขึ้นรูปเย็น	96
ประวัติผู้เขียน.....	98

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงความบริสุทธิ์ของโลหะ ทองคำ , ทองแดง และ เงินบริสุทธิ์ที่ใช้.....	27
3.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของแท่งทองคำผสม 18 กระรัตที่เตรียมสำหรับการทดลอง.....	27
3.3 แสดงช่วงอุณหภูมิเดาอบที่สามารถควบคุมได้สำหรับอุณหภูมิที่ต้องการต่าง ๆ.....	28
3.4 แสดงรายละเอียดการกัด (Etch) ด้วยสารละลายต่าง ๆ.....	30
4.1 แสดงปริมาณการลดขนาดและความแข็งในสภาพต่างๆ ของชิ้นงานทองคำผสม.....	36
4.2 แสดงมุมที่เกิดการกระเจิงพื้นฐานในระนาบต่างๆ ของชิ้นงานหลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว	40
4.3 แสดงรายละเอียดของรูปที่ 4.27 ถึง 4.41 ซึ่งแสดงโครงสร้างจุลภาคที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ แบบแสงโดยการแสดงภาพแบบ DIC ของชิ้นงานต่าง ๆ ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็ง กัด (Etch) ด้วยสารละลาย 10%KCN + 10%(NH ₄) ₂ S ₂ O ₃ อัตราส่วน 1:1	59
4.4 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานที่บ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 100 นาที.....	78

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงแผนภูมิสมมูลเฟสสองธาตุ ของระบบ Ag – Au.....	4
2.2 แสดงแผนภูมิสมมูลเฟสสองธาตุ ของระบบ Cu-Ag.....	4
2.3 แสดงแผนภูมิสมมูลเฟสสองธาตุ ของระบบ Au-Cu.....	5
2.4 แสดง แผนภูมิสมมูลเฟสสามธาตุ Au-Cu-Ag ในรูป 3 มิติ.....	5
2.5 แผนภูมิสมมูลเฟสสามธาตุ แสดงเส้น Liquidus ของระบบ Au-Cu-Ag	6
2.6 แผนภูมิสมมูลเฟสสามธาตุ ระบบ Au-Cu-Ag แสดงเส้นแบ่งบริเวณที่เป็น สารละลายเฟสเดียว กับบริเวณที่มีสองเฟส ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	7
2.7 แผนภูมิสมมูลเฟสสามธาตุ ระบบ Au-Cu-Ag ที่อุณหภูมิ 300 °C แสดงเส้นแบ่งบริเวณที่เป็น สารละลายเฟสเดียว, บริเวณที่มีสองเฟส และบริเวณที่เกิดโครงสร้างที่เป็นระเบียบชนิดต่างๆ	7
2.8 แสดงแผนภูมิสมมูลเฟสของระบบ Au-Cu-Ag ที่ส่วนผสม 18, 14 และ 10 อะตอม.....	8
2.9 แสดงเซลล์หนึ่งหน่วยของ (A)โครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ และ (B) โครงสร้างที่เป็นระเบียบ AuCu ₃	10
2.10 แสดงเซลล์หนึ่งหน่วยของโครงสร้างที่เป็นระเบียบ AuCu ชนิดต่าง ๆ.....	10
2.11 ภาพแสดงสารละลายของแข็ง (A) แบบเป็นระเบียบ (Ordering); (B) แบบเกาะกลุ่ม (Clustering)	12
2.12 แสดงสารละลายแบบของแข็ง (A) แบบสุ่ม (Random) และ (B) แบบมีระเบียบช่วงสั้น.....	13
2.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงของระดับความเป็นระเบียบช่วงยาว (L) และช่วงสั้น (s) ตามอุณหภูมิสำหรับ โครงสร้างที่เป็นระเบียบ (A) CuZn , (B) AuCu ₃	15
2.14 แสดงขั้นตอนการขยายตัวของโดเมนของโครงสร้างที่เป็นระเบียบ และการเกิด APB.....	16
2.15 แสดงการขยายขอบเขตของ APD.....	16
2.16 แสดง APB ของโครงสร้างที่เป็นระเบียบ AlFe (A) ภาพถ่ายจาก TEM; (B) ภาพ Schematic..	17
2.17 แสดง Metastable APD ในโครงสร้างที่เป็นระเบียบ AuCu ₃	17
2.18 แสดง Metastable APD ในโครงสร้างที่เป็นระเบียบ AuCu I.....	18
2.19 แสดงผลของการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบต่อความต้านทานทางไฟฟ้า.....	19
2.20 แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ในระหว่างการบ่มที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของโลหะผสมทองคำ 18 อะตอม 16 อะตอม และ 14 อะตอม ที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนัก Cu:Ag เป็น 65 : 35.....	21
2.21 แสดงหลักการทำงานของวิธี Debye-Scherrer Powder Method.....	23
2.22 แสดง Powder Pattern ของ (A) โครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ (B) โครงสร้างที่เป็นระเบียบ.....	24
2.23 แสดงหลักการทำงานของ X-ray Diffractometer.....	24
2.24 แสดงตัวอย่าง XRD Pattern ของโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ (Solution Treated) และ โครงสร้างที่เป็นระเบียบที่มีระดับความเป็นระเบียบต่าง ๆ กันตามเวลาในการบ่ม.....	25
2.25 แสดง SAED Reflection Pattern ของโครงสร้างที่เป็นระเบียบ.....	25

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 แสดงลักษณะเตาอบและการใส่ชิ้นงาน.....	27
3.2 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทดลอง.....	31
4.1 กราฟแสดงผลของการลดขนาดโดยการขึ้นรูปเย็นต่อความแข็งของชิ้นงาน.....	33
4.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag ในสภาพหลังหล่อ (As cast).....	34
4.3 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag ในสภาพหลังขึ้นรูปเย็น 44.55 %	34
4.4 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag ในสภาพหลังขึ้นรูปเย็น 69.82 %	35
4.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag ในสภาพหลังขึ้นรูปเย็น 91.82 %	35
4.6 กราฟเปรียบเทียบความแข็งในสภาพหลังหล่อ, หลังขึ้นรูปเย็น และหลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว ที่ปริมาณทองแดงต่าง ๆ	37
4.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag; (A) ชิ้นงานหลังขึ้นรูปเย็น 91.82 เปอร์เซ็นต์; (B) ชิ้นงานหลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่ 800 °C นาน 60 นาที	38
4.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag; (A) ชิ้นงานหลังขึ้นรูปเย็น 91.70 เปอร์เซ็นต์; (B) ชิ้นงานหลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่ 800 °C นาน 60 นาที	38
4.9 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag; (A) ชิ้นงานหลังขึ้นรูปเย็น 91.53 เปอร์เซ็นต์;(B) ชิ้นงานหลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่ 800 °C นาน 60 นาที	39
4.10 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag; (A) ชิ้นงานหลังขึ้นรูปเย็น 92.0 เปอร์เซ็นต์;(B) ชิ้นงานหลังอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่ 800 °C นาน 60 นาที...	39
4.11 แสดงรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงานที่ผ่านการอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว...	41
4.12 แสดงกราฟป้อนเพิ่มความแข็งของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag.....	42
4.13 แสดงกราฟป้อนเพิ่มความแข็งของชิ้นงาน 750Au-150Cu-200Ag	43
4.14 แสดงกราฟป้อนเพิ่มความแข็งของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag.....	44
4.15 แสดงกราฟป้อนเพิ่มความแข็งของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag.....	45
4.16 แสดงรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag ที่ผ่านการป้อนเพิ่มความแข็งที่ 270 °C	49
4.16 แสดงรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag ที่ผ่านการป้อนเพิ่มความแข็ง นาน 100 นาทีที่อุณหภูมิต่าง ๆ	50
4.18 แสดงรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag ที่ผ่านการป้อนเพิ่มความแข็งที่ 270 °C	51
4.19 แสดงรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag ที่ผ่านการป้อนเพิ่มความแข็งจนความแข็งเริ่มคงที่ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	52
4.20 แสดงรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag ที่ผ่านการป้อนเพิ่มความแข็งที่ 270 °C	53

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 แสดงรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงนาน 100 นาทีที่อุณหภูมิต่าง ๆ	54
4.22 แสดงรูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซ์ของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงนาน 100 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	55
4.23 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag ในสภาพหลังอบ.....	57
4.24 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag หลังการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 200 °C นาน 10 นาที.....	57
4.25 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวดของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag หลังการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 200 °C นาน 10 นาที.....	58
4.26 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงของเกรนที่พบแถบที่เกิดจากการบิดเบี้ยวของโครงสร้างเปรียบเทียบกับเกรนที่ไม่พบแถบการบิดเบี้ยวของโครงสร้างในชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag	58
4.27 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 150 °C	61
4.28 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 200 °C	62
4.29 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 270 °C	63
4.30 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 300 °C	64
4.31 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-100Cu-150Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 350 °C	65
4.32 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 200 °C	66
4.33 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 270 °C	67
4.34 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 300 °C	68
4.35 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-150Cu-100Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 350 °C	69
4.36 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 150 °C	70
4.37 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 200 °C	71
4.38 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 270 °C	72
4.39 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 300 °C	73
4.40 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-200Cu-050Ag ที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่ 350 °C	74
4.41 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 750Au-050Cu-200Ag ที่ผ่านการอบและผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงนาน 100 นาที.....	75
4.42 แสดงระดับความเป็นระเบียบที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิต่าง ๆ	77
4.43 แสดงความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 100 นาที....	78
4.44 กราฟแสดงผลของปริมาณทองแดงต่อความแข็งแรงในสภาวะต่าง ๆ.....	80