

ผลของดีบุกต่อสมบัติทางกลของสปริงเงินสเตอร์ลิง



นางสาวสงวนลักษณ์ โฉ่ห้วนิชัยเจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1107-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF TIN ON MECHANICAL PROPERTIES OF STERLING SILVER
SPRING

Miss Sanguanlug Lovanichjaroen

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

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 2004


ISBN 974-53-1107-3

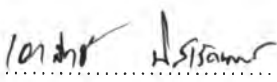
หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของดีบุกต่อสมบัติทางกลของสปริงเงินสเตอร์ลิง
โดย นางสาวสงวนลักษณ์ ไฉ่ห่านิชย์เจริญ
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร

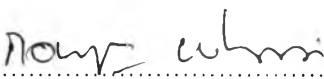
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิฐธร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)

สงวนลิขสิทธิ์ โล่ห์วานิชย์เจริญ : ผลของดีบุกต่อสมบัติทางกลของสปริงเงินสเตอร์ลิง.
(EFFECTS OF TIN ON MECHANICAL PROPERTIES OF STERLING SILVER SPRING)
อ.ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, 102 หน้า. ISBN 974-53-1107-3

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาผลของธาตุดีบุกในโลหะผสมเงิน 93.5%-ทองแดง-ดีบุก ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกลและสมบัติความเป็นสปริง เพื่อหาปริมาณธาตุดีบุกที่เหมาะสมในการหล่อลื่นสปริงที่ใช้ในเครื่องประดับ ธาตุดีบุกที่พบในโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในสภาพหล่อ จะเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างเนื้อพื้น (Silver-rich phase) สูงกว่าใน Second phase ที่อยู่บนโครงสร้างยูเทคติก ปริมาณดีบุกที่เติมเข้าไปมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ ความเค้นจุดคราก และความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโลหะผสมเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เติมดีบุกเกรด 93.5 หลังจากบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 260°C พบว่าสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิงที่เติมดีบุกจะสูงกว่าในเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เติมดีบุก เงินสเตอร์ลิงเกรด 93.5 ที่เติมดีบุก 0.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่บ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 260°C เวลา 120 นาที จะมีค่า σ_y/E สูงที่สุดถึง 22 MJm⁻³ เพราะฉะนั้นส่วนผสมนี้จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้ผลิตสปริง อย่างไรก็ตามในเงินสเตอร์ลิงที่ไม่เติมดีบุกอุณหภูมิบ่มที่เหมาะสมที่สุดคือ 350°C และเวลาบ่มเพิ่มความแข็งคือ 30 นาที

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ ลายมือชื่อนิสิต *สงวนสิทธิ์ โล่ห์วานิชย์เจริญ*
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร*
ปีการศึกษา 2547

4470574921 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: STERLING SILVER / MECHANICAL PROPERTIES / PRECIPITATION / SPRING

SANGUANLUG LOVANICHJAROEN : EFFECTS OF TIN ON MECHANICAL PROPERTIES OF STERLING SILVER SPRING. THESIS ADVISOR : EKASIT NISARATANAPORN, Ph.D., M.Eng., 102 pp. ISBN 974-53-1107-3

The objective of this research is to investigate the effects of tin in 93.5Ag-Cu-Sn alloys on their microstructures, mechanical properties and spring properties. This is ultimately to determine the suitable tin content of silver alloys for jewelry. The amount of tin in the matrix is higher than those in the second phase on eutectic structure of the cast alloy. Effect of tin on mechanical properties was increasing vickers hardness, yield and tensile strength when compared with sterling silver grade 93.5. After age hardened at 260°C, mechanical properties of the tin alloys was higher than those of sterling silver without tin. 93.5Ag-0.38Sn alloys, aged at 260°C for 120 min produced highest value of $\sigma^2/E=22 \text{ MJm}^{-3}$. Therefore, this composition is suitable for spring application. However, in sterling silver without tin, the optimum aging temperature was 350 °C and aging time was 30 min.

Department..... Metallurgical Engineering..... Student's signature *Sanguanlug Lovanichjaroen*
 Field of study..... Metallurgical Engineering..... Advisor's signature *Ekasit Nisaratanaporn*
 Academic year..... 2004.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจาก อาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็น ต่างๆ ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชาคกร จารุพิสิฐธรร ที่ให้ความกรุณาเป็นประธานกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ ที่รับเป็นกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์นี้ด้วย

ขอขอบคุณ บริษัท โอลด์มูน จำกัด ในการให้ใช้สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการหล่อชิ้นงานโลหะเงิน ขอขอบคุณ คุณสรวินทร์ รัตนมหาสกุล ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ ต่าง ๆ ขอขอบคุณ คุณณัฐพล รัตนมาลี ที่ช่วยทดสอบแรงดึงให้ ขอขอบคุณ คุณสิริวรรณ ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำดี ๆ ที่เป็นประโยชน์ และขอขอบคุณท่านอาจารย์ เจ้าหน้าที่ และเพื่อน ๆ นิสิตปริญญาโทในภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.) ซึ่งให้การสนับสนุนทุนวิจัยจนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณบิดา มารดา ที่ให้กำลังใจและการสนับสนุนอย่างดียิ่งจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ปรีทรรศน์วรรณกรรม.....	6
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับโลหะเงิน.....	6
2.1.1 สมบัติทางกายภาพของเงินและโลหะที่ผสมในเงินสเตอร์ลิง.....	6
2.1.2 การเกิดคอปเปอร์ออกไซด์ที่ผิวโลหะผสมเงิน-ทองแดง.....	6
2.1.3 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน-ทองแดง.....	7
2.1.4 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบเงิน-ดีบุก.....	8
2.1.5 แผนภูมิสมดุลเฟสระบบทองแดง-ดีบุก.....	9
2.1.6 แผนภูมิสมดุล Liquidus line ระบบเงิน-ทองแดง-ดีบุก.....	10
2.1.7 สมบัติทางกลของโลหะเงิน-ทองแดง.....	11
2.2 กลไกการเพิ่มความแข็ง.....	12
2.3 สมบัติของสปริง.....	14
2.4 ค่าที่จะนำมาพิจารณาความเป็นสปริง.....	17

	หน้า
บทที่ 3	
ระเบียบวิธีการวิจัย.....	20
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	20
3.1.1 อุปกรณ์ในการทำแม่พิมพ์ยาง.....	20
3.1.2 อุปกรณ์ในการหล่อเทียนและติดต้น.....	20
3.1.3 อุปกรณ์ในการทำแม่พิมพ์ปูนหล่อและอบเผา.....	20
3.1.4 อุปกรณ์ในการหลอมและหล่อโลหะ.....	20
3.1.5 เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	21
3.2 วัตถุประสงค์.....	21
3.3 สารเคมี.....	21
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	22
3.5 ระเบียบและวิธีการตรวจสอบวิเคราะห์ผล.....	24
3.5.1 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุเงิน-ทองแดง ด้วยเครื่องมือ Atomic Absorption Spectroscopy (AAS).....	24
3.5.2 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุดีบุกด้วยเครื่องมือ ICP.....	25
3.5.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	25
3.5.4 การตรวจวัดค่าความแข็ง.....	26
3.5.5 การตรวจหาจุดหลอมเหลวจากเครื่อง DTA.....	26
3.5.6 การทดสอบแรงดึง.....	27
บทที่ 4	
รายงานผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	29
4.1 ผลส่วนผสมทางเคมี.....	29
4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	31
4.3 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกลในสภาพหล่อ.....	37
4.3.1 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์.....	37
4.3.2 ผลการทดสอบแรงดึง.....	38
4.4 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ภายหลังจากผ่านกระบวนการทาง ความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ.....	41

4.4.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก สภาพอบให้เป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวกันที่ 750°C.....	41
4.4.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก หลังผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 260 °C.....	42
4.4.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก หลังผ่านการบ่มเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 350 °C.....	45
4.5 ผลการตรวจสอบสีผิวหลังอบให้ความร้อน.....	47
4.6 ผลทดสอบแรงดึงภายหลังจากผ่านกระบวนการบ่มเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน.....	52
4.6.1 ผลทดสอบแรงดึง (Tensile test) ภายหลังจากทำกระบวนการบ่มเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 260°C เวลา 120 นาที.....	54
4.6.2 ผลทดสอบแรงดึง (Tensile test) ภายหลังจากทำกระบวนการบ่มเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 350°C เวลา 30 นาที.....	55
4.7 การพิจารณาหาส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับทำสปริง.....	56
4.8 ผลการตรวจสอบช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว.....	60
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	62
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	62
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	63
รายการอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก ก.....	67

ภาคผนวก ข.....	74
ภาคผนวก ค.....	83
ภาคผนวก ง.....	86
ภาคผนวก จ.....	89
ภาคผนวก ฉ.....	93
ภาคผนวก ช.....	97
ภาคผนวก ซ.....	99
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	102

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพของเงินและโลหะที่ผสมในเงินสเตอร์ลิง.....	6
2.2 การเปรียบเทียบค่า σ^2/E สำหรับวัสดุที่เหมาะสมและไม่เหมาะสมสำหรับทำสปริง.....	16
3.1 ส่วนผสมของเงินสเตอร์ลิงที่ใช้ในการทดลอง.....	23
4.1 ส่วนผสมทางเคมีของเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ก่อนและหลังการหล่อ.....	29
4.2 ส่วนผสมทางเคมีของเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ก่อนหล่อ หลังการหล่อและที่สูญเสียระหว่างทำการหล่อ.....	30
4.3 ปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935- ทองแดง-ดีบุก ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด(SEM).....	31
4.4 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์เฉลี่ยเปรียบเทียบกับปริมาณส่วนผสมทางเคมีของ เงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะผสมสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก.....	37
4.5 ผลการทดสอบแรงดึงของเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก	38
4.6 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์หลังจากอบให้เป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวกันที่ 750°C และบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 260 °C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที.....	44
4.7 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์หลังจากอบให้เป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวกันที่ 750°C และบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 350 °C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที.....	45
4.8 ปริมาณธาตุผสมในชั้นสารประกอบของเงินสเตอร์ลิง 925 และเงินสเตอร์ลิง 935- ทองแดง-ดีบุก ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด(SEM).....	50
4.9 ผลการทดสอบแรงดึงของเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก.....	52
4.10 ค่า σ^2/E ของโลหะผสมที่ส่วนผสมต่าง ๆ ในสภาพหล่อ.....	56

ตาราง	หน้า
4.11 ค่า σ^2/E ของโลหะผสมที่ส่วนผสมต่าง ๆ ที่อบเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 260 °C เวลา 120 นาที.....	57
4.12 ค่า σ^2/E ของโลหะผสมที่ส่วนผสมต่าง ๆ ที่อบเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 350 °C เวลา 30 นาที.....	57
4.13 ผลการทดสอบช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว.....	60
ข1 ปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM).....	74
ค1 ความแข็งแบบวิกเกอร์(Vickers Hardness;HV) และความยาวเส้นทแยงมุม 2 ด้าน (d1และ d2) ของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก.....	83
ค2 ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength; UTS) ความเค้นจุดคราก (Yield Strength; σ_y), ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus; E) และค่า %Elongation.....	85
ง1 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์หลังจากการอบให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 750 °C และบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่ 260 °C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที.....	86
ง2 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์หลังจากการอบให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 750 °C และบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่ 350 °C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที.....	86
ง3 ความเค้นจุดคราก(Yield Strength; σ_y) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength, UTS) ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus)และ %Elongation ภายหลังจากบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอน ที่อุณหภูมิ 260 °C เป็นเวลา 120 นาที.....	87
ง4 ความเค้นจุดคราก(Yield Strength; σ_y) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength, UTS) ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus)และ %Elongation ภายหลังจากบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอน ที่อุณหภูมิ 350 °C เป็นเวลา 30 นาที.	88
จ1 น้ำหนัก(กรัม) ของชิ้นงานก่อนและหลังอบที่ 750°C เวลา 15, 30, 45, 60 นาที.....	90
จ2 น้ำหนัก(กรัม) ของชิ้นงานหลังจากผ่าครึ่งก่อนและหลังอบที่ 750°C เวลา 15, 30, 45, 60 นาที.....	90

ตาราง	หน้า
จ3 ค่าความแข็ง(HV)หลังอบที่ 750°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วให้เย็นตัวในอากาศ.....	91
ข1 ตารางวัสดุที่เหมาะสมสำหรับทำสปริง.....	100

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับปริมาณของธาตุชนิดต่างๆในโลหะเงินผสม.....	2
2.1 ชั้นออกไซด์ในโลหะผสมเงิน-ทองแดง หลังอบที่ 750 °C ในสภาวะบรรยากาศ.....	7
2.2 แผนภูมิสมมูลเฟสระบบเงิน-ทองแดง.....	8
2.3 แผนภูมิสมมูลเฟสระบบเงิน-ดีบุก.....	9
2.4 แผนภูมิสมมูลเฟสระบบทองแดง-ดีบุก.....	10
2.5 แผนภูมิสมมูล Liquidus line ระบบเงิน-ทองแดง-ดีบุก.....	11
2.6 สมบัติทางกลของโลหะเงิน-ทองแดง.....	12
2.7 กลไกและโครงสร้างการเย็นตัวของการอบชุบแบบตกตะกอน.....	13
2.8 กราฟความเค้น-ความเครียดของโลหะ.....	15
2.9 อนุวัสดุซึ่งอยู่ภายใต้การกระทำของความเค้น σ_x	17
2.10 รูปคาน cantilever.....	18
3.1 ภาพชิ้นงานทดสอบแรงดึง.....	27
4.1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ในสภาพหล่อ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM).....	32
4.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ในสภาพหล่อถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 100 เท่าหลังการ etch.....	36
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุก ในสภาพหล่อกับชุดโลหะผสม.....	39
4.4 ผลของธาตุทองแดงและดีบุกในโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุกในสภาพหล่อที่มีต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความเค้นจุดคราก มอดูลัสยืดหยุ่นและ%Elongation... ..	40
4.5 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดของเงินสเตอร์ลิง Ag-	

ภาพประกอบ	หน้า
5.74%Cu-0.50%Sn ยังไม่etch กำลังขยาย 3500 เท่า.....	42
4.6 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 และโลหะเงินสเตอร์ลิง 935-ทองแดง-ดีบุกในสภาพอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่ 750°C เวลา 1 ชม. ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกำลังขยาย 100 เท่า หลัง etch (50%NH ₄ OH+25%H ₂ O ₂ +25%H ₂ O).....	43
4.7 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์หลังจากบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 260 °C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที.....	44
4.8 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์หลังจากบ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 350 °C ที่เวลา 0, 7, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที.....	46
4.9 โครงสร้างจุลภาคของเงินสเตอร์ลิง Ag-5.78%Cu-0.43%Sn ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดยังไม่ etch ในสภาพอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียว ที่ 750 °C เวลา 1 ชม. และภายหลังบ่มเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิ 260 °C เวลา 120 นาที กำลังขยาย 3500 เท่า.....	46
4.10 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน 93.5%-ทองแดง-ดีบุก ในสภาพอบเป็นสารละลายของแข็งเนื้อเดียวที่ 750°C เวลา 1 ชม. และภายหลังบ่มเพิ่มความแข็ง ที่อุณหภูมิ 260°C เวลา 120 นาที ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 100 เท่า หลัง etch (50%NH ₄ OH+25%H ₂ O ₂ +25%H ₂ O).....	47
4.11 ลักษณะสีผิวของชิ้นงานหลังอบที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	48
4.12 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 750 °C เวลา 1 ชม. ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กำลังขยาย 200 เท่า ยังไม่ etch.....	49
4.13 กราฟผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย EDX ของอนุภาคสารประกอบของโลหะเงินสเตอร์ลิง.....	50
4.14 ลักษณะสีผิวของชิ้นงานที่ผ่าคั้งหลังอบที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 1 ชม.....	51
4.15 ค่าความเค้นจุดครากของชิ้นงานในสภาพหล่อ ,Aging ที่ 260 °C เวลา 120 นาที และ Aging ที่ 350 °C เวลา 30 นาที ของชิ้นงานทุกส่วนผสม.....	53
4.16 ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานในสภาพหล่อ ,Aging ที่ 260 °C เวลา 120 นาที	

ภาพประกอบ

หน้า

และ Aging ที่ 350 °C เวลา 30 นาที ของชิ้นงานทุกส่วนผสม.....	53
4.17 ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของชิ้นงานในสภาพหล่อ ,Aging ที่ 260 °C เวลา 120 นาที และ Aging ที่ 350 °C เวลา 30 นาที ของชิ้นงานทุกส่วนผสม.....	54
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า σ^2/E กับชุดโลหะผสมทั้ง 8 ชุด.....	58
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทองแดงและดีบุกกับช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว.....	60
4.20 แผนภูมิสมมูล Liquidus line ระหว่างเงิน-ทองแดง-ดีบุก.....	61
ข1 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะเงินสเตอร์ลิง ด้วย EDX.....	75
ข2 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของ โลหะผสมเงิน 93.5%-ทองแดง ด้วย EDX.....	76
ข3 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของ โลหะผสมเงิน 93.5%-ทองแดง ที่มี ดีบุก 0.31 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วย EDX.....	77
ข4 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะผสมเงิน 93.5%-ทองแดง ที่มี ดีบุก 0.43 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วย EDX.....	78
ข5 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะผสมเงิน 93.5%-ทองแดง ที่มี ดีบุก 0.54 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วย EDX.....	79
ข6 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะผสมเงิน 93.5%-ทองแดง ที่มี ดีบุก 0.43 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักหลังอบเป็นเนื้อเดียวที่ 750 °C ด้วย EDX.....	80
ข7 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะผสมเงิน 93.5%-ทองแดง ที่มี ดีบุก 0.43 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักหลังบ่มเพิ่มความแข็งที่ 260 °C เวลา 120 นาที ด้วย EDX.....	81
ข8 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในโครงสร้างของโลหะผสมเงิน 93.5%-ทองแดง ที่มี ดีบุก 0.43 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักหลังบ่มเพิ่มความแข็งที่ 350 °C เวลา 30 นาที ด้วย EDX.....	82
จ1 ลักษณะสีผิวของชิ้นงานหลังอบที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 1 ชม.....	89
จ2 ลักษณะสีผิวของชิ้นงานที่ผ่าครึ่งหลังอบที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 1 ชม.....	89
จ3 ตำแหน่งที่ใช้วัดความแข็ง 1-10 ตำแหน่ง.....	91

ภาพประกอบ	หน้า
จ4 ขอบของชิ้นงานหลังอบที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 1 ชม. ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ แบบแสงที่กำลังขยาย 200 เท่า.....	92
ข1 ผลการตรวจสอบจุดหลอมเหลวของโลหะเงินสเตอร์ลิง Ag-7.35%Cu.....	97
ข2 ผลการตรวจสอบจุดหลอมเหลวของโลหะเงินสเตอร์ลิง Ag-5.98%Cu-0.31%Sn.....	97
ข3 ผลการตรวจสอบจุดหลอมเหลวของโลหะเงินสเตอร์ลิง Ag-5.78%Cu-0.43%Sn.....	98
ข4 ผลการตรวจสอบจุดหลอมเหลวของโลหะผสมเงิน Ag-5.68%Cu-0.54%Sn.....	98
ข1 leaf spring ภายใต้ภาระ.....	99