อิทธิพลของการอบบ่มที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล ของโลหะเงินผสม 93.7Ag-6.0Cu-0.3Sn

สิริพร โรจนนันต์ [1] สุรศิษฐ์ โรจนนันต์ [2]
เกรียงไกร แสงอำนาจเดช [3] สุริยงค์ ช้างนิล [3] และ เอนก พานแววววาว [3]
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาอิทธิพลของการบบ่มที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะเงินผสม 93.7Ag-6.0Cu-0.3Sn ในการทดลองเริ่มจากหลอมเงินบริสุทธิ์ ทองแดงบริสุทธิ์ และดีบุกบริสุทธิ์ และหล่อเป็นชิ้นงาน นำไปรีดเย็น จากนั้นนำไปทำกรรมวิธีทางความร้อนโดยการอบละลายเฟสด้วยอุณหภูมิต่างๆ ระหว่าง 720-760 องศาเซลเซียส ตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่าง 260-320 องศาเซลเซียส ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล ผลการทดลองพบว่าโครงสร้างจุลภาคของงานหล่อ มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ของเฟสที่มีเงินเป็นส่วนผสมหลัก (Ag rich dendrite) และโครงสร้างยูเทคติก ความแข็งมีค่า 73 วิกเกอร์ ความแข็งและความต้านแรงดึงของชิ้นงานขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาในการอบละลายและเวลาในการบ่ม สรุปได้ว่าสภาวะการอบบ่มที่ทำให้ได้ความแข็งสูงสุด ความต้านแรงดึงสูงสุด และความสามารถในการยืดตัวสูงสุด ควรใช้อุณหภูมิการอบละลายเฟสที่ 740 องศาเซลเซียส แล้วตามด้วยการอบบ่มที่ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งความแข็งมีค่า 167 วิกเกอร์ ความต้านแรงดึงสูงสุดมีค่า 415 เมกกะปาสคาล และความสามารถในการยืดตัวมีค่า 9.2 เปอร์เซนต์

คำสำคัญ : การอบบ่ม / โลหะเงิน / การรีดเย็น / เงินสเตอร์ลิง

---

[1] *อาจารย์ สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ*

[2] *อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์*

[3] *นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์*

The Effect of Age Hardening on Microstructures and Mechanical Properties of 93.7Ag-6.0Cu-0.3Sn Alloy

Siriporn Rojananan [1], Surasit Rojananan [2],
Kraingkrai Sangaumnatdej [3], Suriyong Changnin [3], and Anake Panwawwow [3]
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Abstract

The objective of this work is to study the effect of aging hardening on microstructures and mechanical properties of 93.7Ag-6.0Cu-0.3Sn alloy. Alloy was prepared from high purity Ag, Cu and Sn by melting. Subsequently, samples were cold rolled. Age hardening was performed by solution treatment at temperatures in the range of 720-760 ^{o}C and aging at temperatures in the range of 260-320 ^{o}C. Mechanical properties and microstructures were investigated. The results showed that the hardness of the as-cast sample was 73 HV. The as-cast microstructure consisted of Ag rich dendrite and eutectic structure. The hardness and tensile strength of sample after aging depend on both the aging time and temperature. It could be concluded that hardness, tensile strength and elongation were maximized by solution treatment at 740 ^{o}C and subsequently aging at 300 ^{o}C, which exhibited the hardness of 167 HV, the tensile strength of 415 MPa, and the elongation of 9.2%.

Keywords : Age Hardening / Silver Alloy / Cold Rolling / Silver Sterling

[1] *Lecturer, Division of Materials Technology, School of Energy, Environment and Materials.*

[2] *Lecturer, Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering.*

[3] *Undergraduate Students, Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering.*

1. บทนำ

เงินบริสุทธิ์เป็นโลหะอ่อน มีความแข็งประมาณ 55 วิกเกอร์ สามารถรีดเป็นเส้นลวดได้ดี ตีแผ่เป็นแผ่นบางได้ง่าย มีความแข็งแรงต่ำ [1] จึงถูกนำไปใช้งานที่ไม่ต้องรับแรงมากนัก มีการนำไฟฟ้าที่ดีจึงนิยมนำไปใช้งานด้านไฟฟ้า เช่น ใช้ทำตัวนำไฟฟ้า (conductor) สวิทซ์ (switch) หน้าสัมผัสและฟิวส์ (contact and fuses) เป็นต้น และงานด้านอิเลกทรอนิกส์ เช่น Printed Circuit Boards (PCBs) ใช้ในงานชุบเคลือบผิวสำหรับทำอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น Fuse Caps นอกจากนี้ยังมีการใช้สำหรับชุบเคลือบผิวเพื่อตกแต่งเพิ่มความสวยงาม ทำเครื่องประดับ เนื่องจากโลหะเงินมีขีดจำกัดด้านความแข็งและความแข็งแรง จึงมีการพัฒนาสมบัติทางกลให้เหมาะสมกับการใช้งานมากขึ้น สำหรับการเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะเงินสามารถทำได้หลายวิธี [2] เช่นการเติมธาตุผสมเข้าไป ทำให้เกิดเป็นสารละลายของแข็ง (solid solution) การอบบ่ม (precipitation hardening) การรีดขึ้นรูปเย็น (cold working) เป็นต้น การเพิ่มความแข็งของโลหะเงินโดยการเติมทองแดงไม่เกิน 7.5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไป เรียกกันว่าเงินสเตอร์ลิง (Sterling Silver) [3] ทำให้เพิ่มความแข็งได้มีค่าความแข็งประมาณ 60-70 วิกเกอร์ [4] นิยมใช้ทำเครื่องประดับ

นอกจากนี้ยังมีการเติมธาตุอื่นๆ เข้าในเงินสเตอร์ลิงในปริมาณเล็กน้อย เพื่อสามารถปรับปรุงสมบัติด้านอื่นๆ ให้เหมาะสมมากขึ้นในการใช้ทำเครื่องประดับ มีรายงานการวิจัยของเอกสิทธิ์และศิริรัตน์ [5] พบว่าการเติมซิลิกอนในปริมาณที่เหมาะสม สามารถปรับปรุงความแข็ง ความแข็งแรง ความเหนียว และความต้านการหมองได้ มีค่าระหว่าง 0.02-0.20 เปอร์เซ็นต์ หากเติมมากเกินกว่า 0.2 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้เกิดโครงสร้างตาข่าย (network) อย่าง แน่นหนาทำให้เปราะ ไม่เหมาะที่จะใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ การเติมอินเดียมในเงินสเตอร์ลิงจะทำให้ความแข็งและความต้านแรงดึงลดลง เนื่องจากอินเดียมดึงทองแดงออกจากเนื้อพื้นออกมาเกิดเฟสที่สองขึ้น อินเดียมมีส่วนช่วยเพิ่มความต้านการหมองร่วมกับธาตุอื่น การเติมธาตุดีบุกในปริมาณต่ำๆ ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ สามารถช่วยเพิ่มความแข็ง ความแข็งแรงให้กับเงินสเตอร์ลิงได้ โดยการอบบ่ม แต่สภาวะของกรรมวิธีอบบ่ม ถูกรายงานไว้แตกต่างกัน Bühner [6] พบว่า การอบละลายเฟสของเงินสเตอร์ลิง ใช้อุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียส และอบบ่มที่ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ให้ความแข็ง 140 HV หากใช้อุณหภูมิอบละลายเฟสต่ำกว่า 730 องศาเซลเซียส ไม่สามารถละลายเฟสที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมหลัก (Cu-rich phase) ได้หมด ทำให้หลังการอบบ่มแล้วไม่ได้ความแข็งสูงสุด ส่วนการอบบ่มละลายเฟสด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่าเกรนโตเกินไป ทำให้ได้สมบัติไม่ดีนัก

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัยเพื่อต้องการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มความแข็งความต้านแรงดึงสูงสุด ให้กับโลหะเงินสเตอร์ลิงผสมดีบุกโดยการอบบ่ม รวมทั้งศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมเงิน-ทองแดง-ดีบุก

2. วิธีดำเนินการทดลอง

โลหะเงินสเตอร์ลิงผสมดีบุกในการทดลอง ได้จากการหลอมโลหะเงินบริสุทธิ์ 99.95 เปอร์เซ็นต์ ผสมทองแดงบริสุทธิ์ 99.95 เปอร์เซ็นต์ และดีบุกบริสุทธิ์ 99.50 เปอร์เซ็นต์ ในเบ้าหลอมกราไฟต์บริสุทธิ์ หล่อชิ้นงานในแบบหล่อ โดยปล่อยให้โลหะแข็งตัวในแม่พิมพ์ จุ่มน้ำเย็น ล้างด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นรีดขึ้นรูป วัดความแข็งจุลภาคสเกลวิกเกอร์ ศึกษาโครงสร้างของงานหล่อและงานรีด จากนั้นทำกระบวนการอบบ่มซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นแรกเริ่มจากการอบละลายเฟส (solution treatment) โดยใช้อุณหภูมิแตกต่างกัน ได้แก่ 700 720 730 740 และ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 และ 60 นาที จุ่มน้ำเย็นทันทีเพื่อให้เกิดสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดของทองแดงและดีบุกในเงิน ศึกษาโครงสร้างจุลภาคหลังอบละลายเฟส ขั้นตอนที่สองนำชิ้นงานที่ได้ไปอบบ่ม (aging) ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ได้แก่ 260 280 300 และ 320 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นจุ่มน้ำเย็นทันที

การทดสอบความแข็งจุลภาค ทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็ง Future Tech รุ่น FM 7000e ใช้น้ำหนักกด 100 ก. เวลากด 15 วินาที ทดสอบแรงดึงใช้เครื่องทดสอบแรงดึง Instron 8801 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงธรรมดา Olympus BH2-UMA และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL 5800 ทำงานที่ 20 กิโลโวลต์ สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมผิวชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างเป็นสารละลายที่ประกอบด้วยกรดซัลฟูริก 4 มล. ผสมกับกรดโครมิก 7.5 ก. และน้ำกลั่น 100 มล. ใช้เวลา 15 วินาที รวมทั้งวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของอัลลอยและชิ้นงานหล่อเงินสเตอร์ลิง ด้วยเทคนิค ICP (Inductively Couple Plasma) และ EDS

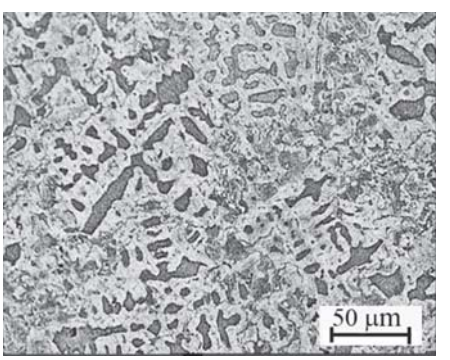
3. ผลการทดลองและการอภิปราย

3.1 ลักษณะทั่วไปของชิ้นงานและผลการวิเคราะห์ส่วนผสม

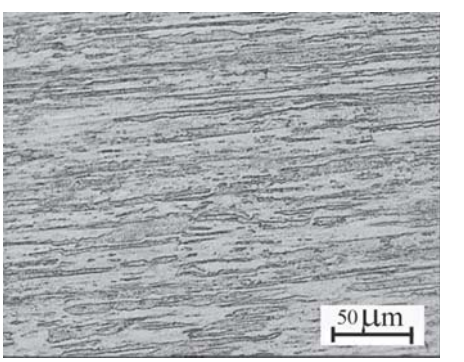
ลักษณะโลหะเงินสเตอร์ลิงผสมดีบุกที่ได้จากการหล่อ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม. ยาว 50 มม. จากนั้นนำไปรีดขึ้นรูปเย็นประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี ของชิ้นงานหลังผ่านการรีดขึ้นรูปทดสอบด้วยเทคนิค ICP จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (ศวอ.) พบว่าประกอบด้วยเงิน 93.67 เปอร์เซ็นต์ ทองแดง 6.02 เปอร์เซ็นต์ และดีบุก 0.31 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าปริมาณของทองแดงและดีบุกต่ำกว่าส่วนผสมที่ต้องการคือ 93.1Ag-6.5Cu-0.4Sn เล็กน้อย เนื่องจากมีการสูญหายในกระบวนการหลอม ในการทดลองนี้จะเรียกว่าเงินสเตอร์ลิงผสมดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์

3.2 โครงสร้างจุลภาคและความแข็งของชิ้นงานหล่อและรีด

โครงสร้างจุลภาคของโลหะเงินสเตอร์ลิงผสมดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์ที่ได้จากการหล่อ มีลักษณะเป็นโครงสร้างเดนไดร์ตที่ประกอบด้วยเฟสที่มีเงินเป็นส่วนผสมหลักและโครงสร้างยูเทคติก อยู่ในช่องว่างระหว่างเดนไดร์ต (interdendritic dendrite) ดังแสดงในรูปที่ 1 ผลการวัดความแข็งจุลภาคสเกลวิกเกอร์ ของชิ้นงานหล่อมีค่าเฉลี่ย 72 วิกเกอร์ รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็น มีโครงสร้างเป็นลักษณะยาวรี ตามแนวรีด ผลการวัดความแข็งจุลภาคสเกลวิกเกอร์ของชิ้นงานรีด มีค่าเฉลี่ย 160 วิกเกอร์



รูปที่ 1 โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการหล่อ



รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการรีด

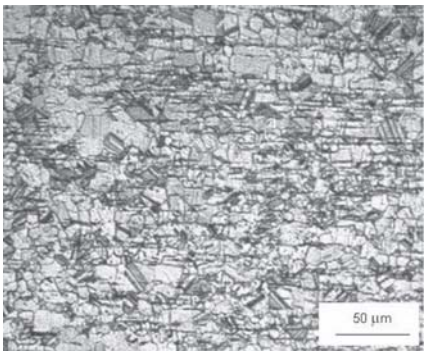
3.3 โครงสร้างจุลภาคและความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายเฟส

โลหะเงินสเตอร์ลิงผสมดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์ที่ผ่านการรีดเย็น หลังการอบละลายเฟส ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ได้แก่ 720 730 740 และ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ตามด้วยการจุ่มน้ำเย็นทันที เพื่อให้เกิดสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดของทองแดงและดีบุกในโครงสร้างพื้นของเงิน แสดงในรูปที่ 3 (ก)-(ง) เนื่องจากโครงสร้างของชิ้นงานที่อบละลายเฟสที่ 700 องศาเซลเซียส มีลักษณะคล้ายกับชิ้นงานที่อบละลายเฟสที่ 720 องศาเซลเซียส จึงไม่ได้แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค นอกจากนั้นแล้วยังพบว่าการอบละลายเฟสโดยใช้อุณหภูมิดังกล่าวในเวลา 30 นาที ไม่สามารถละลายเฟสได้หมด โครงสร้างยังคงมีลักษณะเกรนยาวรีของงานรีดคงอยู่ จึงไม่ได้แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในที่นี้เช่นกัน ดังนั้นผลการทดลองส่วนที่เหลือ จึงเลือกใช้เวลาในการอบละลายเฟสทั้งหมดเป็นเวลา 60 นาที

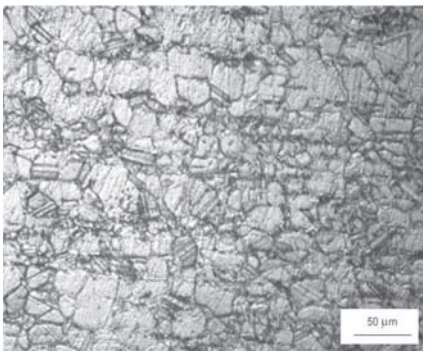
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่ได้หลังการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 700 และ 720 องศาเซลเซียส 60 นาที พบว่าโครงสร้างมีลักษณะเป็น Equiaxed Grains ขนาดเล็ก บางเกรนมีเส้นทวินอยู่ภายในซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่า Twinned Grains ที่เกิดจากการอบกระจายโดยทั่วไป นอกจากนี้ยังพบว่าเกรนยังคงมีลักษณะยาวรีตามทิศทางของแนวรีดคงเหลืออยู่ เป็นหลักฐานให้เห็นว่าอุณหภูมิการอบละลายเฟสที่ 700 และ 720 องศาเซลเซียส ไม่สามารถละลายเฟสทั้งหมดได้สมบูรณ์ ทำนองเดียวกันโครงสร้างหลังการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็น Equiaxed Grains ขนาดใหญ่กว่าโครงสร้างหลังการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส เล็กน้อย มี Twinned Grains กระจายโดยทั่วไป และยังคงพบเกรนที่เกิดมีลักษณะของเกรนยาวรี ตามทิศทางแนวการรีด แสดงให้เห็นว่าการอบละลายเฟสด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 730 องศาเซลเซียส ในเวลา 60 นาที นั้นไม่สามารถละลายเฟสได้หมด (ซึ่งจะแสดงผลการศึกษาด้วยกล้อง SEM ในส่วนต่อไป) ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Reti A.M. [1] ได้รายงานว่าทองแดงละลายไม่หมดในการอบละลายเฟสของเงินสเตอร์ลิงที่อุณหภูมิ 726 องศาเซลเซียส

โครงสร้างจุลภาคหลังการอบละลายเฟสด้วยอุณหภูมิ 740 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็น Equiaxed Grains ที่ขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างหลังการอบด้วยอุณหภูมิ 720 และ 730 องศาเซลเซียส ลักษณะเกรนยาวรีที่เกิดจากการรีดไม่มีหลงเหลืออีก แสดงว่าอุณหภูมินี้สามารถอบละลายเฟสได้หมด สำหรับการอบละลายเฟสที่ 760 องศาเซลเซียส ทำให้โครงสร้างมีรูปร่างเป็น Equiaxed Grains ขนาดใหญ่ เนื่องจากระหว่างการอบละลายเฟส เกรนพยายามลดพลังงานที่รอยต่อเกรน ขอบเกรน และพลังงานที่ผิว (surface energy) ของชิ้นงานลง ทำให้เกิดผลึกใหม่ขึ้น จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิอบละลายเฟสสูงขึ้น ทำให้เฟสละลายในโครงสร้างพื้นได้มากขึ้น เกรนโตขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [1] พบว่าการอบละลายเฟสด้วยอุณหภูมิ 765 องศาเซลเซียส ทำให้ทองแดงละลายได้สมบูรณ์แต่เกรนโตมาก ซึ่งจะส่งผลเสียต่อความแข็งหลังการอบบ่ม

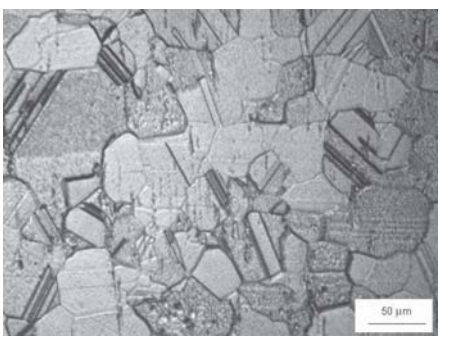
จากแผนภาพสมดุลระบบสองธาตุของเงินและทองแดง [8] พบว่าที่อุณหภูมิ 780 องศาเซลเซียส อะตอมของทองแดงสามารถละลายในโครงสร้างผลึกเงินได้สูงสุด 8.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเงินสเตอร์ลิงมีทองแดงผสมไม่เกิน 7.5 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส ทองแดงจึงสามารถละลายได้หมด แต่การอบบ่มโดยใช้อุณหภูมิสูง ทำให้ควบคุมการโตของเกรนได้ยาก ทำให้สูญเสียความแข็งหลังการอบบ่ม



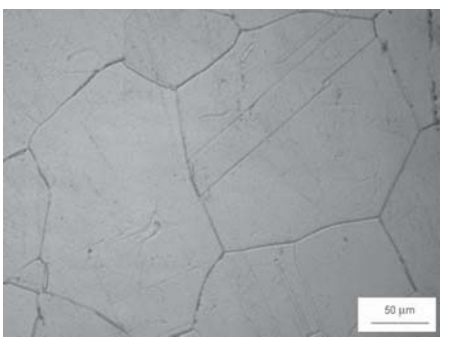
(ก) 720 องศาเซลเซียส



(ข) 730 องศาเซลเซียส

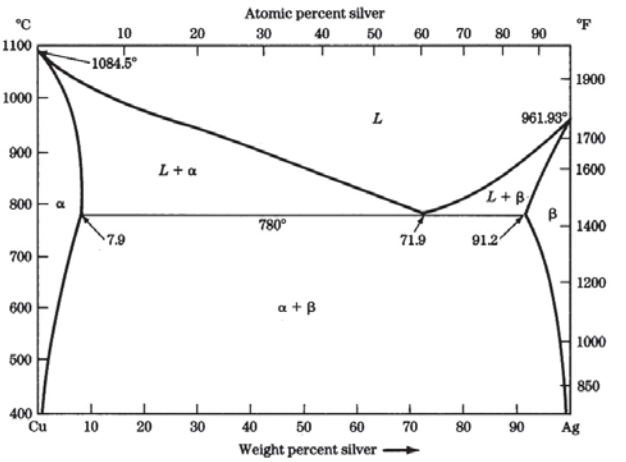


(ค) 740 องศาเซลเซียส



(ง) 760 องศาเซลเซียส

รูปที่ 3 โครงสร้างเงินสเตอร์ลิงผสมดีบุกหลังอบละลายเฟสที่อุณหภูมิต่างๆ

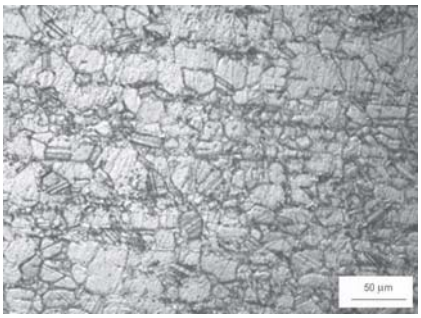


รูปที่ 4 แผนภาพสมดุลระบบสองธาตุของเงินและทองแดง [8]

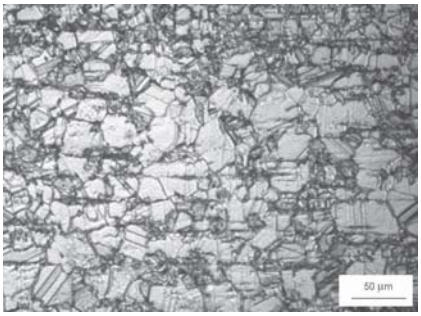
3.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการอบบ่ม

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 720 และ 730 องศาเซลเซียส 60 นาที แล้วตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ได้แก่ 260 280 300 และ 320 องศาเซลเซียส 60 นาที มีโครงสร้างลักษณะคล้ายกัน จึงเลือกแสดงเฉพาะรูปโครงสร้างของชิ้นงานที่ได้จากการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียส แล้วตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในรูปที่ 5 ก)-ง) จะเห็นได้ชัดเจนว่าโครงสร้างหลังการอบบ่มทุกอุณหภูมิ มีลักษณะคล้ายโครงสร้างหลังการอบละลายเฟส (ดังแสดงแล้วในรูปที่ 3) กล่าวคือเกรนมีขนาดเล็ก มีเส้นทวินภายในเกรน และมีลักษณะของโครงสร้างงานรีดเหลืออยู่

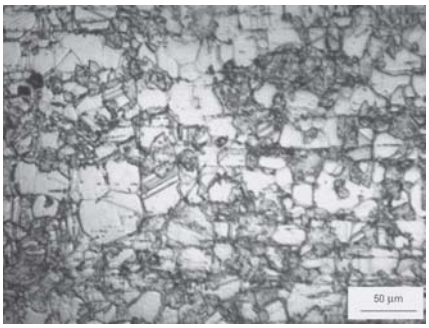
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ที่ได้จากการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 740 องศาเซลเซียส 60 นาที แล้วตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิ 260 280 300 และ 320 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 6 โครงสร้างมีลักษณะเป็น Equiaxed Grains มีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างบริเวณรอยต่อเกรน อาจเกิดเฟสของอนุภาค (precipitate) บางชนิดขึ้น ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีจะกล่าวในหัวข้อต่อไป โครงสร้างของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายเฟสด้วยอุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส และตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิ 260 280 300 และ 320 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 7 พบว่าเกรนมีขนาดใหญ่กว่าโครงสร้างที่อบละลายเฟสที่ 740 องศาเซลเซียส



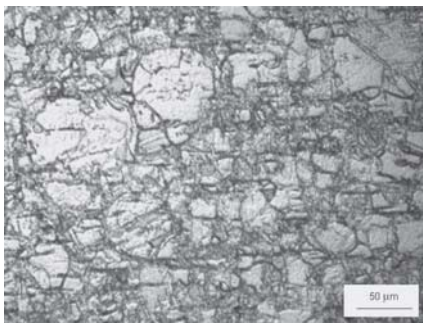
(ก) อบบ่ม 260 องศาเซลเซียส



(ข) อบบ่ม 280 องศาเซลเซียส

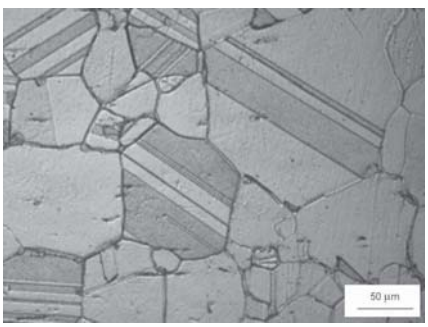


(ค) อบบ่ม 300 องศาเซลเซียส

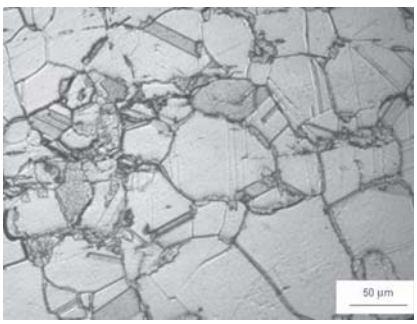


(ง) อบบ่ม 320 องศาเซลเซียส

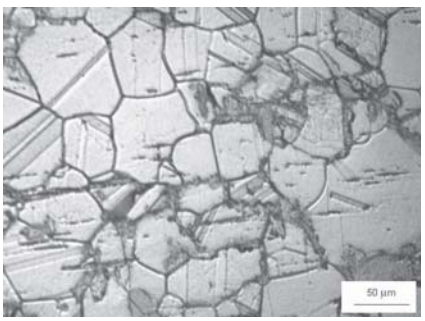
รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคหลังอบละลายเฟสที่ 730 องศาเซลเซียส และอบบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ



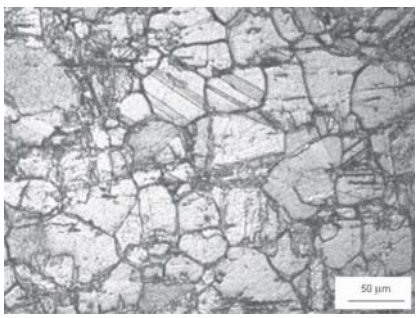
(ก) อบบ่ม 260 องศาเซลเซียส



(ข) อบบ่ม 280 องศาเซลเซียส

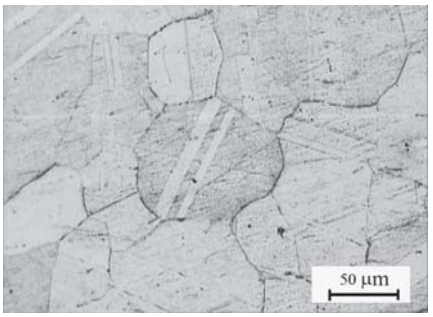


(ค) อบบ่ม 300 องศาเซลเซียส

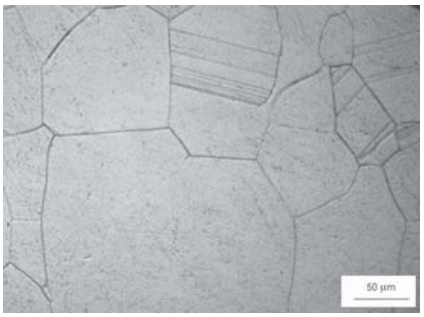


(ง) อบบ่ม 320 องศาเซลเซียส

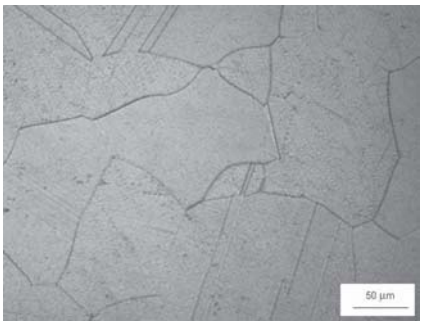
รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคหลังอบละลายเฟสที่ 740 องศาเซลเซียส และอบบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ



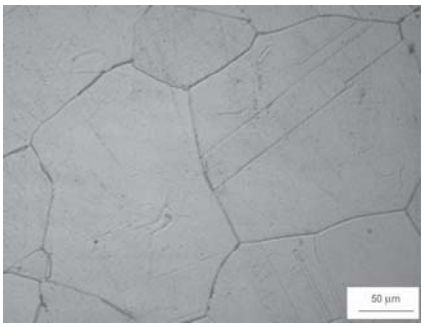
(ก) อบบ่ม 260 องศาเซลเซียส



(ข) อบบ่ม 280 องศาเซลเซียส



(ค) อบบ่ม 300 องศาเซลเซียส

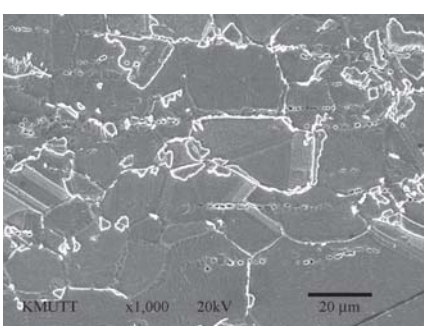


(ง) อบบ่ม 320 องศาเซลเซียส

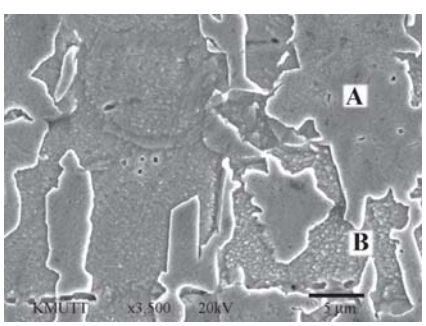
รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคหลังอบละลายเฟสที่ 760 องศาเซลเซียส และอบบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ

3.5 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลกตรอนแบบส่องกราด (SEM)

โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้อง SEM ของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายเฟส ด้วยอุณหภูมิ 720 และ 730 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิ 260 280 300 และ 320 องศาเซลเซียส โครงสร้างมีลักษณะคล้ายๆ กัน จึงเลือกแสดงเฉพาะชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียส ตามด้วยการอบบ่มที่ 300 องศาเซลเซียส ด้วยกำลังขยายต่างกันดังแสดงในรูปที่ 8 (ก)-(ข) ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีโดยเทคนิค EDS หาค่าเฉลี่ยจาก 3 จุด ในบริเวณที่เห็นเป็นพื้นเรียบ (บริเวณ A) และที่เป็นจุดลาย (บริเวณ B) ในรูปที่ 8 (ข) บริเวณ A มีส่วนผสมเฉลี่ยประกอบด้วย 94.5Ag-6.1Cu-0.4Sn ส่วนบริเวณ B ประกอบด้วย 94.1Ag-5.3Cu-0.6Sn แสดงว่าการกระจายตัวของทองแดงและดีบุกแตกต่างกันในโครงสร้าง



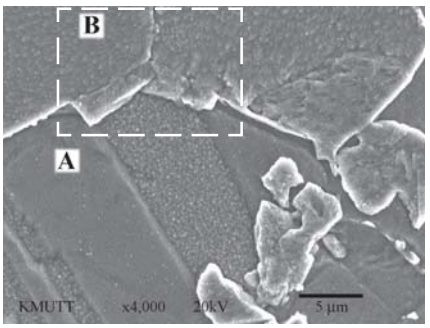
(ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า



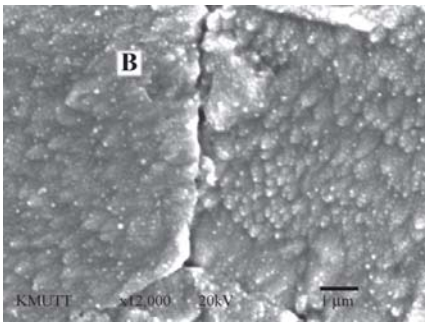
(ข) กำลังขยาย 3,500 เท่า

รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคหลังอบละลายเฟส 730 องศาเซลเซียส และอบบ่มที่ 300 องศาเซลเซียส

รูปที่ 9 (ก)-(ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้อง SEM ของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายเฟส ที่อุณหภูมิ 740 องศาเซลเซียส และตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ด้วยกำลังขยาย 4,000 เท่า และ 12,000 เท่า ตามลำดับ รูปที่ 9 (ข) แสดงภาพขยายของโครงสร้างจุลภาคบริเวณ B ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีโดยเทคนิค EDS หาค่าเฉลี่ยจาก 3 จุด ในบริเวณ A ที่เห็นเป็นพื้นเรียบ และบริเวณ B ที่เห็นเป็นจุดลายขาว ผลการวิเคราะห์ธาตุในบริเวณ A ประกอบด้วยธาตุเฉลี่ยของ 94.7Ag-4.5Cu-0.8Sn บริเวณ B ประกอบด้วยธาตุเฉลี่ยของ 93.7Ag-5.1Cu-1.2Sn แสดงให้เห็นว่าปริมาณธาตุในแต่ละบริเวณมีค่าแตกต่างกัน บริเวณ B ประกอบด้วยธาตุทองแดงและดีบุกสูงกว่าบริเวณ A ซึ่งสันนิฐานว่าอาจมีการตกตะกอนเกิดอนุภาคขนาดเล็กเกิดขึ้น ซึ่งเป็นไปตามหลักการของการเพิ่มความแข็งโดยการอบบ่ม แต่เนื่องจากอนุภาคที่เกิดมีขนาดเล็ก ทำให้ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยกล้อง SEM อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์โครงสร้างอาจต้องศึกษาโดยการใช้กล้อง TEM หรือใช้เทคนิค XRD ต่อไป เพื่อเป็นการยืนยันว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นเป็นอนุภาคอะไร



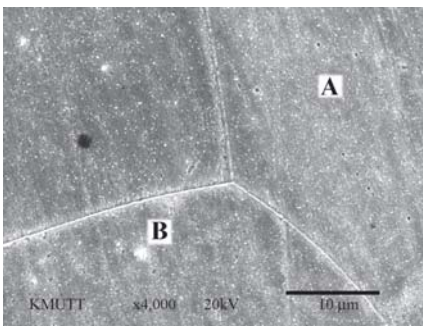
(ก) กำลังขยาย 4,000 เท่า



(ข) กำลังขยาย 12,000 เท่า

รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคหลังอบละลายเฟสที่ 740 องศาเซลเซียสและอบบ่มที่ 300 องศาเซลเซียส

รูปที่ 10 แสดงโครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้อง SEM หลังผ่านการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส ตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีโดยเทคนิค EDS พบว่าบริเวณ A ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นประกอบด้วยธาตุ 93.8Ag-5.8Cu-0.4Sn ส่วนบริเวณ B ที่เห็นเป็นเม็ดกลมสีขาวในรูปประกอบด้วยธาตุ 93.4Ag-5.5Cu-1.28Sn แสดงให้เห็นว่าปริมาณธาตุในแต่ละบริเวณมีค่าแตกต่างกัน ทำนองเดียวกันดังคำบรรยายที่ผ่านมา เนื่องจากอนุภาคที่จุด B มีขนาดเล็ก ผลการวิเคราะห์ส่วนผสม จึงมีผลมาจากโครงสร้างพื้นได้ จึงไม่สามารถเขียนเป็นสูตรทางเคมีของสารประกอบได้ ต้องศึกษาด้วยกล้อง TEM ต่อไป

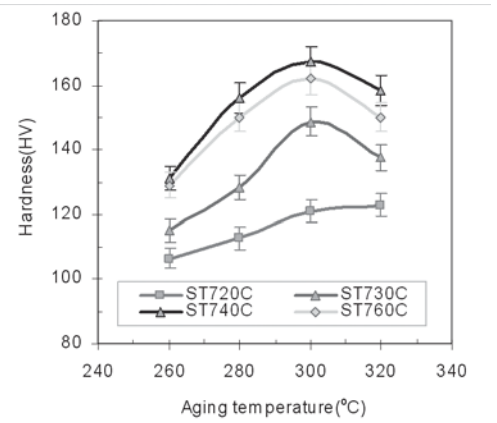


รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคหลังอบละลายเฟสที่ 760 องศาเซลเซียสและอบบ่มที่ 300 องศาเซลเซียส

3.6 ความแข็งจุลภาคของชิ้นงานหลังอบบ่ม

ความแข็งจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิต่างๆ ช่วง 720-760 องศาเซลเซียส แล้วตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิ 260 280 300 และ 320 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที แสดงในรูปที่ 11 ผลการวัดความแข็งพบว่า การอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส แล้วตามด้วยการอบบ่ม ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 106 วิกเกอร์ เป็น 113 118 และ 123 วิกเกอร์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบละลายเฟสจะทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองเห็นได้ว่าการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 740 องศาเซลเซียส แล้วตามด้วยการอบบ่มที่ 300 องศาเซลเซียส ให้ความแข็งสูงสุดมีค่า 167 วิกเกอร์ จากหลักการโดยทั่วไปของการเพิ่มความแข็งโดยการอบบ่ม ความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดอนุภาคขนาดเล็ก [8, 9] กระจายทั่วในโครงสร้างทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน

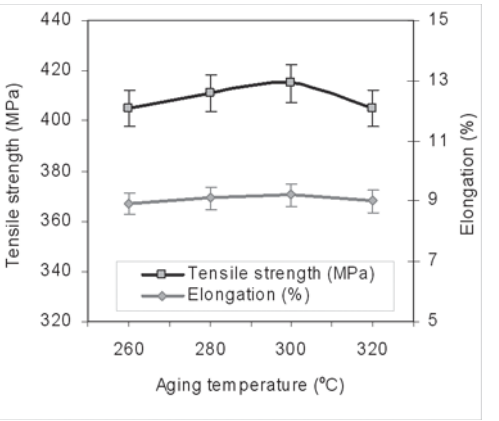
เมื่ออบบ่มชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 320 องศาเซลเซียส กลับทำให้ความแข็งลดลงเหลือ 158 วิกเกอร์ ซึ่งตามหลักการแล้วเป็นเพราะอนุภาคที่เกิดมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ความคล้ายเชิงโครงสร้าง (coherency) ของอนุภาคกับโครงสร้างพื้นลดลง ทำให้สูญเสียความสามารถในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน สำหรับการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส ทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ จึงส่งผลให้ความแข็งหลังการอบบ่มลดลง



รูปที่ 11 ความแข็งของชิ้นงานหลังอบละลายเฟสที่ 720-760 องศาเซลเซียส แล้วตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิ 260-320 องศาเซลเซียส

3.7 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานหลังอบบ่ม

รูปที่ 12 แสดงผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 740 องศาเซลเซียส แล้วตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิ 260 280 300 และ 320 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าความต้านแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่ผ่านการอบบ่มที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสให้ค่าสูงสุด มีค่าเฉลี่ย 415 เมกกะปาสคาล ความสามารถในการยืดตัวมีค่าเฉลี่ย 9.2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบบ่มขึ้นเป็น 320 องศาเซลเซียส ความต้านแรงดึงสูงสุดมีค่าลดลง ผลการทดลองมีแนวโน้มสอดคล้องกับความแข็ง



รูปที่ 12 ความต้านแรงดึงของชิ้นงานหลังอบละลายเฟสที่ 740 องศาเซลเซียส แล้วตามด้วยการอบบ่มที่ 260-320 องศาเซลเซียส

5. สรุปผลการทดลอง

1. การเพิ่มความแข็งโดยการอบบ่มของเงินสเตอร์ลิงผสมดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์ ควรใช้อุณหภูมิในการอบละลายเฟส 740 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที แล้วตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ให้ความแข็งสูงสุดมีค่า 167 วิกเกอร์

2. การใช้อุณหภูมิอบละลายเฟสของเงินสเตอร์ลิงผสมดีบุก 0.3 เปอร์เซ็นต์ ต่ำกว่า 720 องศาเซลเซียส ไม่สามารถละลายเฟส Cu-rich ได้หมด ทำให้ไม่ได้ความแข็งสูงหลังอบบ่ม ในทางตรงกันข้าม การอบละลายเฟสด้วยอุณหภูมิสูงกว่า 760 องศาเซลเซียส ทำให้เกรนโตเกินไป ทำให้สูญเสียความแข็งสุดท้ายหลังการอบบ่ม

3. ความต้านแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายเฟส 740 องศาเซลเซียสตามด้วยการอบบ่มที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีค่าสูงสุด 415 เมกกะปาสคาล ความสามารถในการยืดตัว 9.2 เปอร์เซ็นต์

6. เอกสารอ้างอิง

1. Reti, A.M., 1997, *Proceedings of the 11th Santa Fe Symposium on Jewellery Manufacturing Technology,* p. 339.

2. George, E.D., 1988, *Mechanical Metallurgy SI Metric Edition,* McGraw-Hill, pp. 184-240.

3. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2515, *กระทรวงอุตสาหกรรม. มอก. 21-2515 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเครื่องเงิน,* กระทรวงอุตสาหกรรม.

4. Aldo, R., 1997, "Understanding Sterling Silver", *The Proceeding of Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing and Technology,* pp. 339-356.

5. เอกสิทธิ์ นิสารัตนาพร และศิริรัตน์ นิสารัตนาพร, 2547, *อิทธิพลของธาตุผสมในโลหะเงินสเตอร์ลิงผสม, ศาสตร์และศิลป์ในการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับด้วยงานวิจัย,* สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, หน้า 51-67.

6. Bühner, J. F, 2003, An Update on Hardening of Sterling Sliver Alloys by Heat Treatment, *The Proceeding of the 17th Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing and Technology,* pp. 29-47.

7. Chin, G.Y., 1973, *Metallographic Principles; Edited by M.B. Bever, Metal Handbook, 8th ed.,* American Society for Metals, Metal Park, Ohio, pp. 229-232.

8. Smith, W. F., 1990, *Principles of Materials Science and Engineering,* 2nd ed. McGraw-Hill Publishing Company, Singapore, p. 460.

9. Callister, W. D., Jr., 2003, *Materials Science and Engineering an Introduction,* John Wiley & Sons Inc., Singapore Inc, pp. 372-377, p. 261.