ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
248367

ผลของปริมาณทองแดงต่อความแข็งแรงจากการต้านทานการล้าของโลหะผสมไทเทเนียม-ทองแดงที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซี

นายพชร โพธนาพงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

b00253487

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
248367

ผลของปริมาณทองแดงต่อความแข็งและการต้านทานการสึกหรอของโลหะผสมไทเทเนียม-ทองแดงที่อบเผาผนึก

นายพชร ไพรพนาพงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5 1 7 0 3 9 5 9 2 1

EFFECTS OF COPPER CONTENT ON HARDNESS AND WEAR RESISTANCE OF SINTERED TITANIUM-COPPER ALLOY

Mr. Patchara Pripanapong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

พชร ไพรพนาพงศ์ : ผลของปริมาณทองแดงต่อความแข็งและการต้านทานการสึกหรอของโลหะผสมไทเทเนียม-ทองแดงที่อบเผาผนึก (EFFECTS OF COPPER CONTENT ON HARDNESS AND WEAR RESISTANCE OF SINTERED TITANIUM-COPPER ALLOY) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. ธาชาย เหลืองวรานันท์, 102 หน้า.

938367

ไทเทเนียมเป็นโลหะที่มีค่าความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงและมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเนื่องจากสามารถเกิดฟิล์มออกไซด์ได้เช่นเดียวกับอะลูมิเนียมและไม่เป็นอันตรายเมื่อนำมาใช้ในร่างกาย จึงสามารถนำมาผลิตเป็นวัสดุทางทันตกรรม เช่น ฟันปลอมได้ ไทเทเนียมบริสุทธิ์อาจมีความต้านทานการสึกหรอที่ยังไม่ดีนัก การนำทองแดงมาผสมกับไทเทเนียมจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติในด้านนี้ได้ โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณทองแดง แรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน อุณหภูมิและเวลาในการเผาผนึกต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์และคุณสมบัติทางกลอันได้แก่ ความแข็งและการต้านทานการสึกหรอ รวมทั้งศึกษาผลของการทำ Solution treatment ต่อคุณสมบัติทางกลดังกล่าว โดยโลหะผสมไทเทเนียมทองแดงที่ผลิตโดยกรรมวิธีทางผงโลหะที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยมี 5 ส่วนผสมได้แก่ 2, 4, 7, 10 และ15% ทองแดงโดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าการเพิ่มปริมาณทองแดงจะทำให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์หลังเผาผนึกมีแนวโน้มลดลงโดยเฉพาะการเพิ่มปริมาณทองแดงจาก 10 เป็น 15% ส่วนการเพิ่มแรงอัด อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาผนึกจะทำให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากการศึกษาพบว่าการใช้แรงอัดขึ้นรูป 254 MPa อุณหภูมิในการเผาผนึก 1100°C ใช้เวลา 4 ชม. ให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์และความแข็งในเกณฑ์สูง โดยโลหะผสม Ti-2Cu และ Ti-10Cu จะให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์และความแข็งสูงสุดที่ 96% และ 375 HV ตามลำดับซึ่งถูกเลือกมาทำ Solution treatment ต่อไป

หลังผ่านการทำ Solution treatment ที่ 1000°C เป็นเวลา 0.5ชม. พบว่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ 525 HV ในโลหะผสม Ti-10Cu ความต้านทานการสึกหรอซึ่งวัดจากมวลที่สูญหายไปหลังการทดสอบการสึกหรอ พบว่าโลหะผสม Ti-10Cu ซึ่งผ่านการเผาผนึกที่ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. มีมวลที่สูญหายไปต่ำที่สุดที่ 36.4 mg ซึ่งเทียบเท่ากับอัตราการสึกหรอจำเพาะเท่ากับ 1.01×10^{-13} $m^3/N\text{-}m$

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต....พชร ไพรพนาพงศ์.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....ธาชาย เหลืองวรานันท์.....

ปีการศึกษา.....2553.....

5170395921 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS : TITANIUM / COPPER / POWDER METALLURGY/ SOLUTION TREATMENT

PATCHARA PRIPANAPONG: EFFECTS OF COPPER CONTENT ON HARDNESS AND WEAR RESISTANCE OF SINTERED TITANIUM-COPPER ALLOY. THESIS ADVISOR: ASST.PROF. TACHAI LUANGVARANUNT, Ph.D., 102 pp.

938367

Titanium is a metal with high strength to weight ratio. It has a good corrosion resistance because of existence of oxide film similar to aluminum; therefore, it is safe to be used as artificial bones or artificial tooth. However, pure titanium may have insufficient wear resistance. Addition of copper to titanium will improve its wear property. This research studies effect of amount of added copper, compaction pressure, temperature and time during sintering to the relative density and mechanical properties of the alloys which are hardness and wear resistance. In addition, effect of solution treatment to the aforementioned properties will be studied. Titanium-copper alloys compositions to be investigated are 2, 4, 7, 10, 15wt.% copper. From the study, it was found that addition of copper reduces relative density of sintered materials, especially when copper is increased from 10 to 15wt.%. Increase of compaction pressure, temperature and time of sintering increases the relative density. The results show that a compaction pressure of 254 MPa, sintering at 1100°C for 4 hours will give high values of relative density and hardness. The Ti-2Cu and Ti-10Cu alloys have highest relative density and hardness of 96% and 376 HV, respectively. These alloys are chosen to be solution heat treated.

After solution treatment at 1000°C for 0.5 hour, it was found that hardness values are increased. Maximum hardness of 526 HV is obtained in Ti-10Cu alloy. Wear test by measuring loss shows that Ti-10Cu alloy sintered at 1100°C for 4 hours has lowest mass loss of 36.4 mg, which is equivalent to specific wear rate of 1.01×10^{-13} $m^3/N\text{-}m$.

Department: ...Metallurgical Engineering...Student's Signature: ...Patchara Pripanapong.

Field of Study:..Metallurgical Engineering.. .Advisor's Signature: ..Tachai Luangvt.....

Academic Year: .....2010.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความร่วมมือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธาชาย เหลืองวรานันท์ ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ อบรมสั่งสอน ให้คำปรึกษา และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการศึกษาและวิจัย รวมทั้งให้คำปรึกษาด้านจิตใจ รวมถึง รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไสว ด่านชัยวิจิตร และ ดร.ศิริพร ลาภเกียรติถาวร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้ รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมให้ความรู้ในงานด้านโลหะวิทยาต่าง ๆ อีกทั้งคำแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกด้านด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ และศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบตลอดมาจนเสร็จสิ้นงานวิจัยด้วยดี และขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนข้าพเจ้า

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและบุคคลอันเป็นที่เคารพรักที่คอยให้กำลังใจอีกทั้งการสนับสนุนในด้านการศึกษา และให้โอกาสที่ดีในชีวิตแก่ข้าพเจ้าด้วยดีตลอดมารวมทั้งเพื่อนในกลุ่มวิจัยที่เป็นกำลังใจให้กับข้าพเจ้า

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ..... ช
สารบัญตาราง..... ญ
สารบัญรูป..... ฎ
บทที่
1 บทนำ..... 1
1.1 ความสำคัญ..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 2
1.3 ขอบเขตการศึกษาในงานวิจัย..... 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าน่าจะได้รับ..... 3

2 ปริทรรศน์วรรณกรรม..... 4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย..... 4
2.1.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับโลหะไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียม..... 4
2.1.2 รายละเอียดของเฟสต่างๆของโลหะไทเทเนียมผสม..... 7
2.1.2.1 โลหะผสม α..... 7
2.1.2.2 โลหะผสม Near α..... 9
2.1.2.3 โลหะผสม α+ β..... 13
2.1.2.4 โลหะผสม β..... 15
2.1.3 กระบวนการเผาผนึก (Sintering)..... 17
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 19

หน้า

3 วิธีการทดลอง..... 43
3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 43
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..... 43
3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง..... 43
3.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง..... 44
3.2 ขั้นตอนการทดลอง..... 45
3.2.1 การเตรียมผงโลหะ..... 45
3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน..... 45
3.2.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลอง..... 46

4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล..... 49
4.1 ขนาดและรูปร่างของผงโลหะ..... 49
4.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์..... 50
4.3 ผลวิเคราะห์ X-ray diffraction..... 55
4.4 ผลวิเคราะห์ Differential Scanning Calorimeter (DSC)..... 57
4.5 โครงสร้างจุลภาค..... 59
4.6 ความแข็ง..... 74
4.7 ความต้านทานการสึกหรอ..... 81

5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 90
5.1 สรุปผลการทดลอง..... 90
5.1.1 ความหนาแน่นสัมพัทธ์..... 90
5.1.1.1 ผลของปริมาณทองแดงต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์..... 90
5.1.1.2 ผลของอุณหภูมิการเผาผนึกต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์..... 90
5.1.1.3 ผลของแรงอัดต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์..... 91
5.1.1.4 ผลของเวลาในการเผาผนึกต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์..... 91
5.1.2 ความแข็ง..... 91
5.1.2.1 ผลของปริมาณทองแดงต่อความแข็ง..... 91
5.1.2.2 ผลของอุณหภูมิการเผาผนึกต่อความแข็ง..... 91
5.1.2.3 ผลของแรงอัดต่อความแข็ง..... 92

หน้า

5.1.2.4 ผลของเวลาในการเผาผนึกต่อความแข็ง..... 92
5.1.2.5 ผลของการทำ Solution treatment ต่อความแข็ง..... 92
5.1.3 ความต้านทานการสึกหรอ..... 92
5.1.3.1 ผลของปริมาณทองแดงต่อความต้านทานการสึกหรอ..... 92
5.1.3.2 ผลของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน..... 93
5.1.3.3 ความต้านทานการสึกหรอหลังทำ Solution treatment..... 93
5.1.3.4 ปัจจัยอื่นๆต่อความต้านทานการสึกหรอ..... 93
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 93

รายการอ้างอิง..... 94

ภาคผนวก..... 96
ภาคผนวก ก..... 97
ภาคผนวก ข..... 101

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 102

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกลและทางกายรูปของโลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์..... 5
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของเฟส α, β และ $\alpha+\beta$ ของโลหะผสมไทเทเนียม..... 7
ตารางที่ 2.3 Solid solution strengthening และประสิทธิรูปของธาตุ β-stabilizing ที่เติมลงในโลหะผสม..... 13
ตารางที่ 2.4 ปริมาตรที่สูญเสีย, โครงสร้าง, ความแข็งและความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบ..... 30
ตารางที่ 2.5 ส่วนผสมของเฟสต่างๆ ที่ผ่านการอบอ่อนที่ 1023K เป็นเวลา 2206 ชม..... 41
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของผงโลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์แบบละเอียด..... 43
ตารางที่ 3.2 ปริมาณของผงต่างๆที่ต้องใช้ในแต่ละส่วนผสม.....45
ตารางที่ 3.3 ความหนาแน่นที่ได้จากการคำนวณหลังการเผาผนึก..... 47
ตารางที่ 4.6.1 ความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ เวลาและแรงอัดแตกต่างกัน..... 74

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ผลของธาตุผสมต่อแผนภูมิเฟสของโลหะผสมไทเทเนียม.....6
รูปที่ 2.2 แผนภูมิเฟสสามมิติสำหรับแบ่งประเภทของโลหะผสมไทเทเนียม.....6
รูปที่ 2.3 โครงสร้างจุลภาคของ CP titanium: (a) อบอ่อนที่อุณหภูมิ 700 °C
เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงให้เห็นเกรนแบบ equi-axed ของ α(X100);
(b) เย็นตัวอย่างรวดเร็วจาก β-phase field แสดงให้เห็นเข็มของ ά(X150);
(c) เย็นตัวในอากาศ แสดง widmanstatten ของ α(X100);
(d) near-α alloy IMI 685 เย็นตัวในอากาศ แสดงให้เห็นการจัดเรียง
ตัวแบบ basket weave ของ widmanstatten plates ของ α โดยมีเฟส
β ผสมอยู่เล็กน้อย..... 8
รูปที่ 2.4 (a) IMI 679 alloy เย็นตัวในอากาศจาก α+ β phase field เฟสสีขาว
คือ primary α และส่วนที่เหลือคือ widmanstatten ของเฟส α (X500);
(b) IMI 685 alloy เย็นตัวในน้ำมันจาก β phase field แสดง martensitic
ของเฟสά และเฟส β ที่เหลืออยู่ปริมาณเล็กน้อย (X75); (c) IMI 685 alloy
เย็นตัวในน้ำมันจาก β phase field และบ่มที่อุณหภูมิ 850 °C แสดงอนุภาคของ
เฟส $(Ti,Zr)_5Si_3$ (X30000) 11
รูปที่ 2.5 แผนภูมิเฟสของโลหะผสม Ti-Cu..... 12
รูปที่ 2.6 แผ่นของเฟส Ti_2Cu ซึ่งได้จากการบ่มโลหะผสม Ti-2.5Cu (IMI230)..... 12
รูปที่ 2.7 แผนผังแสดงโครงสร้างจุลภาคแบบต่างๆที่ได้รับหลังจากการทำ
double solution treatment ตามด้วยการเย็นตัวในน้ำ (WQ) หรือในอากาศ
(AC) แล้วทำการอบคืนตัว หรือ precipitation treatment..... 14
รูปที่ 2.8 Pseudo-binary β-isomorphus phase diagram แสดงขอบเขตของ metastable
β และ stable β ของโลหะผสมไทเทเนียม..... 16
รูปที่ 2.9 รูปร่างของอนุภาคทั้งสามในระหว่างการเผาผนึกแสดงการเคลื่อนที่ของอะตอม
ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดพันธะของอนุภาค..... 17
รูปที่ 2.10 โครงสร้างจุลภาคของโลหะหล่อ (a) CP Ti; (b) 1%Cu; (c) 2%Cu; (d) 5%Cu;
(e) 10%Cu; (f) Ti-6Al-4V..... 20
รูปที่ 2.11 Tensile strength, ความเค้นแรงดึง และ elongation ของโลหะที่นำมาทดสอบ..... 21
รูปที่ 2.12 Modulus of elasticity ของโลหะที่นำมาทดสอบ..... 21

หน้า

รูปที่ 2.13 รูปถ่าย SEM ของโลหะหล่อที่ผ่านการทดสอบแรงดึง Exterior view: (a) 1%Cu; (b) 5%Cu; (c) 10%Cu. Interior view: (d) 1%Cu; (e) 5%Cu; (f) 10%Cu..... 22
รูปที่ 2.14 Bulk hardness ของโลหะหล่อ..... 23
รูปที่ 2.15 ข้อมูลจาก Dilatometry ของชิ้นงาน Ti-5Si ที่แรงอัด 400 MPa อุณหภูมิเผาผนึก 1310-1350°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง..... 24
รูปที่ 2.16 รูปตัดขวางของชิ้นงาน Ti-5Si อุณหภูมิเผาผนึก 1350°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง..... 25
รูปที่ 2.17 ข้อมูลจาก Dilatometry ของโลหะผสม Ti-4Ni และ Ti-9Ni ที่แรงอัด 400 MPa อุณหภูมิเผาผนึก 1100-1340°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง..... 25
รูปที่ 2.18 ข้อมูลจาก Dilatometry ของโลหะผสม Ti-5Si ที่แรงอัด 200, 400 และ 600 MPa (green density 63.4%, 73.5% และ 79.9% ตามลำดับ) อุณหภูมิเผาผนึก 1350°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง..... 26
รูปที่ 2.19 รูปถ่ายพื้นผิวจากกล้อง SEM ของชิ้นงานทรงกระบอก อุณหภูมิเผาผนึก 1350°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง a) 200 และ b) 600 MPa..... 26
รูปที่ 2.20 แผนรูปกลไกการหดตัวและการขยายตัว..... 28
รูปที่ 2.21 ข้อมูลจาก Dilatometry ของชิ้นงาน Ti-7Ni ผลิตโดยกรรมวิธี HDH และ non-HDH..... 28
รูปที่ 2.22 เครื่องมือทดสอบความต้านทานการสึกหรอ..... 29
รูปที่ 2.23 ปริมาตรที่สูญเสียของชิ้นงาน..... 30
รูปที่ 2.24 แผนภูมิสมดุลเฟสของไทเทเนียมและทองแดง..... 31
รูปที่ 2.25 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 1 ชม.ในบรรยากาศไฮโดรเจน (a) A selected area diffraction (SAD), (b)รูปร่างของรูป (a), (c)Bright field image(BF)..... 32

หน้า

รูปที่ 2.26 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 12 ชม.ในบรรยากาศไฮโดรเจน (a) Bright field image (BF), (b) รูปขยายของรูป (a) ในบริเวณ I, (c)Dark field image(DF)ถ่ายบริเวณเดียวกับรูป (a)..... 33
รูปที่ 2.27 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 48 ชม.ในบรรยากาศไฮโดรเจน (a) Bright field image (BF), (b)Dark field image(DF)ในบริเวณเดียวกันกับรูป (a) , (c)รูปขยายของรูป (a) และSAD pattern..... 34
รูปที่ 2.28 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 48 ชม. ในสุญญากาศ..... 35
รูปที่ 2.29 ปริมาณไทเทเนียมบนเนื้อพื้นโลหะผสม Cu-3Ti ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 773K ณ เวลาต่างๆ ในบรรยากาศแก๊สไฮโดรเจนและสุญญากาศ..... 35
รูปที่ 2.30 ความแข็งของโลหะผสม Cu-3Ti ที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 773K เป็นเวลา 48 ชม. ในบรรยากาศแก๊สไฮโดรเจนและสุญญากาศ..... 36
รูปที่ 2.31 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของโลหะผสม Cu-3Ti ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 773K ในบรรยากาศแก๊สไฮโดรเจนหรือสุญญากาศที่เวลาต่างกัน (a) 1 ชม. (b) 3 ชม. (c) 12 ชม. (d) 48 ชม..... 37
รูปที่ 2.32 พื้นผิวรอยแตกของโลหะผสมที่ผ่านการบ่มแข็งในบรรยากาศแก๊สไฮโดรเจนกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (a)1 ชม. (b) 2 ชม..... 38
รูปที่ 2.33 วิธีการเตรียมชิ้นงานซึ่งใช้ในการทดลอง..... 39
รูปที่ 2.34 รูปถ่ายจาก SEM โดยใช้ Backscattered electron (BSE) (a) รูปกำลังขยายต่ำแสดงให้เห็นการแพร่ระหว่างธาตุทั้งสาม, (b)-(d) รูปขยายจากบริเวณต่างๆในรูป (a)..... 40
รูปที่ 2.35 รูปถ่ายจาก SEM โดยใช้ Backscattered electron (BSE) ของโลหะผสมที่ผ่านการอบอ่อนที่ 1023K เป็นเวลา 2206 ชม. (a) 13Co-18Cu-69Ti (A_2), (b) 17Co-19Cu-64Ti (A_3), (c) 16Co-53Cu-31Ti (A_5) โดยเฟส m คือ $Co_{10}Cu_{57}Ti_{33}$ (d) 5Co-76Cu-19Ti (A_7)..... 41
รูปที่ 2.36 แผนภูมิสมดุลสามเฟสของ Ti-Co-Cu ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1023K..... 42
รูปที่ 3.1 แม่พิมพ์ทรงกระบอก..... 43
รูปที่ 3.2 เครื่องอัดผงระบบไฮดรอลิก..... 44

หน้า

รูปที่ 3.3 เตาท่อ (Tube furnace)..... 44
รูปที่ 3.4 ชิ้นงานผงโลหะผสมไทเทเนียมและทองแดงที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น..... 46
รูปที่ 3.5 รูปแบบการให้ความร้อนของชิ้นงานในเตาท่อ..... 46
รูปที่ 4.1.1 ลักษณะของผงโลหะ (a) ผงไทเทเนียม (b) ผงทองแดง..... 49
รูปที่ 4.2.1 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานโลหะผสมหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C..... 50
รูปที่ 4.2.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานโลหะผสมหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C..... 51
รูปที่ 4.2.3 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานโลหะผสมหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C
เป็นเวลา 4 ชม..... 52
รูปที่ 4.2.4 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานโลหะผสมหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C
เป็นเวลา 4 ชม..... 53
รูปที่ 4.3.1 ผลวิเคราะห์ XRD ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และ
เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม..... 55
รูปที่ 4.3.2 ผลวิเคราะห์ XRD ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และ
เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 1 ชม..... 56
รูปที่ 4.3.3 ผลวิเคราะห์ XRD ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และ
เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม.แล้วผ่านการทำ Solution treatment
ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม..... 57
รูปที่ 4.4.1 ผลวิเคราะห์จากเครื่อง DSC ของผงโลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์..... 57
รูปที่ 4.4.2 ผลวิเคราะห์จากเครื่อง DSC ของผงโลหะผสม Ti-2Cu..... 58
รูปที่ 4.4.3 ผลวิเคราะห์จากเครื่อง DSC ของผงโลหะผสม Ti-10Cu..... 59
รูปที่ 4.5.1 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด
127 MPa และ เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม. (a)Ti-2Cu; (b) Ti-4Cu;
(c) Ti-7Cu; (d) Ti-10Cu; (e) Ti-15Cu..... 61
รูปที่ 4.5.2 ทองแดงซึ่งยังหลอมเหลวไม่หมดหลังการเผาผนึก (a) Ti-10Cu; (b) Ti-15Cu..... 61
รูปที่ 4.5.3 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด
254 MPa และ เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม. (a)Ti-2Cu; (b) Ti-4Cu;
(c) Ti-7Cu; (d) Ti-10Cu; (e) Ti-15Cu..... 62
รูปที่ 4.5.4 ทองแดงซึ่งยังหลอมเหลวไม่หมดหลังการเผาผนึกชิ้นงาน Ti-15Cu..... 62

หน้า

รูปที่ 4.5.5 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และ เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. (a)Ti-2Cu; (b) Ti-4Cu; (c) Ti-7Cu; (d) Ti-10Cu; (e) Ti-15Cu..... 63

รูปที่ 4.5.6 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และ เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 1 ชม. (a)Ti-2Cu; (b) Ti-4Cu; (c) Ti-7Cu; (d) Ti-10Cu; (e) Ti-15Cu.....64

รูปที่ 4.5.7 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และ เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 4 ชม. (a)Ti-2Cu; (b) Ti-7Cu; (c) Ti-15C..... 65

รูปที่ 4.5.8 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และ เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. (a)Ti-2Cu; (b) Ti-7Cu; (c) Ti-15Cu..... 65

รูปที่ 4.5.9 รูปถ่าย โครงสร้างจุลภาคจาก SEM ของ Ti-2Cu ที่ผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นวลา 1 ชม. (a) 1000X; (b) 2000X.....66

รูปที่ 4.5.10 รูปถ่าย โครงสร้างจุลภาคจาก SEM ของ Ti-10Cu ที่ผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นวลา 1 ชม. (a) 1000X; (b) 2000X..... 66

รูปที่ 4.5.11 รูปถ่าย โครงสร้างจุลภาคจาก SEM ของ Ti-15Cu ที่ผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นวลา 1 ชม. (a) 1000X; (b) 2000X..... 67

รูปที่ 4.5.12 รูปถ่ายโหมด Back-scatter จาก SEM (2000X) ของโลหะผสมที่ผ่านแรงอัด 254 MPa เผาผนึกที่ 1100°C เป็นวลา 4 ชม. (a) Ti-2Cu; (b) Ti-10Cu..... 67

รูปที่ 4.5.13 รูปถ่ายจาก SEM (2000X) ของ Ti-2Cu ที่ผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นวลา 4 ชม.บริเวณโครงสร้างยูเทคตอยด์ (a) BSE; (b) Mapping ที่ตำแหน่งเดียวกัน..... 68

รูปที่ 4.5.14 รูปถ่าย โครงสร้างจุลภาคจาก SEM ของโลหะผสมที่ผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 1 ชม. (250X) (a) Ti-2Cu; (b) Ti-10Cu; (c) Ti-15Cu..... 69

รูปที่ 4.5.15 รูปถ่าย โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสง ของโลหะผสม Ti-2Cu ที่ผ่านการทำ Solution treatment ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. (a) 100X; (b) 200X..... 70

หน้า

รูปที่ 4.5.16 รูปถ่าย โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสง ของโลหะผสม Ti-10Cu ที่ผ่านการทำ Solution treatment ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. (a) 100X; (b) 200X..... 71
รูปที่ 4.5.17 รูปถ่ายโหมด Back-scatter จาก SEM (2000X) ของโลหะผสมที่ผ่านแรงอัด 254 MPa เผาผนึกที่ 1100°C เป็นวลา 4 ชม. และทำ Solution treatment ที่ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. (a) Ti-2Cu; (b) Ti-10Cu..... 71
รูปที่ 4.5.18 รูปถ่ายจาก SEM ของ Ti-2Cu ที่ผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นวลา 4 ชม.และทำ Solution treatment ที่ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. (a) BSE; (b) Mapping ที่ตำแหน่งเดียวกัน..... 72
รูปที่ 4.5.19 รูปถ่ายจาก SEM ของ Ti-10Cu ที่ผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นวลา 4 ชม.และทำ Solution treatment ที่ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. (a) BSE; (b) Mapping ที่ตำแหน่งเดียวกัน..... 73
รูปที่ 4.6.1 ความแข็งของโลหะผสมผ่านแรงอัด 254 MPa เผาผนึกเป็นเวลา 1 ชม..... 75
รูปที่ 4.6.2 ความแข็งของโลหะผสมผ่านแรงอัด 254 MPa และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000 °C.... 76
รูปที่ 4.6.3 ความแข็งของโลหะผสมเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 1 ชม..... 76
รูปที่ 4.6.4 ความแข็งของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 4 ชม..... 77
รูปที่ 4.6.5 ความแข็งของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม..... 78
รูปที่ 4.6.6 ความแข็งที่บริเวณต่างๆของโลหะผสม Ti-2Cu ผ่านแรงอัด 254 MPa เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม..... 78
รูปที่ 4.6.7 ความแข็งของโลหะผสมซึ่งผลิตด้วยกรรมวิธีทางผงโลหะและงานหล่อ [M. Kikuchi et. al]..... 79
รูปที่ 4.6.8 ความแข็งของชิ้นงานในแต่ละเฟสหลังผ่านการทำ Solution treatment ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม..... 80
รูปที่ 4.7.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานที่ผ่านแรงอัด 254 MPa เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม..... 82
รูปที่ 4.7.2 รูปถ่าย SEM ของชิ้นงาน Pure Ti , Ti-2Cu และ Ti-10Cu ที่ผ่านการเผาผนึกที่ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม และผ่านการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ Pure Ti (a) 100X; (b) 1000X: Ti-2Cu (c) 100X; (d) 1000X: Ti-10Cu (e) 100X; (f) 1000X..... 83

หน้า

รูปที่ 4.7.3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานที่ผ่านแรงอัด 254 MPa เผาผนึก ที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม.....84

รูปที่ 4.7.4 รูปถ่าย SEM ของชิ้นงาน Ti-2Cu และ Ti-10Cu ที่ผ่านการเผาผนึกที่ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม และผ่านการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ Ti-2Cu (a) 100X; (b) 1000X: Ti-10Cu (c) 100X; (d) 1000X. 85

รูปที่ 4.7.5 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานที่ผ่านการทำ Solution treatment ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม..... 86

รูปที่ 4.7.6 รูปถ่าย SEM ของชิ้นงาน Ti-2Cu และ Ti-10Cu(1000X) ที่ผ่านการเผาผนึกที่ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม และทำ Solutiontreatment ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. และผ่านการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ Ti-2Cu (a) Smooth(b) Rough; Ti-10Cu (c) Smooth (d) Rough..... 87

รูปที่ 4.7.7 ค่า Mass loss หลังทดสอบความต้านทานการสึกหรอของโลหะผสม Ti-2Cu และ Ti-10Cu ที่ผ่านกระบวนการต่างๆ..... 88

รูปที่ ก.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน Pure Ti ที่กำลังขยาย 200 เท่า ขึ้นรูปด้วยแรงอัด 254 MPa และ เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม..... 97

รูปที่ ก.2 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ของชิ้นงานที่ขึ้นรูป ด้วยแรงอัด 254 MPa และ เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 8 ชม. (a)Ti-2Cu; (b) Ti-10Cu..... 97

รูปที่ ก.3 ภาพถ่ายเศษวัสดุจาก SEM ของชิ้นงานซึ่งผ่านแรงอัด 254 MPa เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม. หลังทดสอบการต้านทานการสึกหรอ (a) Pure-Ti; (b) Ti-2Cu; (c) Ti-10Cu..... 98

รูปที่ ก.4 ภาพถ่ายเศษวัสดุจาก SEM ของชิ้นงาน Pure Ti ซึ่งผ่านแรงอัด 254 MPa เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม. หลังทดสอบการต้านทานการสึกหรอ (a) 100X; (b) 500X..... 99

รูปที่ ก.5 ภาพถ่ายเศษวัสดุจาก SEM ของชิ้นงาน Ti-10Cu ซึ่งผ่านแรงอัด 254 MPa เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. หลังทดสอบการต้านทานการสึกหรอ (a) 100X; (b) 500X..... 99

รูปที่ ก.6 ภาพถ่ายเศษวัสดุจาก SEM ของชิ้นงาน Ti-10Cu ซึ่งผ่านแรงอัด 254 MPa และทำ Solution treatment ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 0.5 ชม. หลังทดสอบ การต้านทานการสึกหรอ (a) 100X; (b) 500X..... 100