บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของปริมาณทองแดง แรงอัดที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงาน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาผนึกต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์และคุณสมบัติทางกลอันได้แก่ ความแข็งและการต้านทานการสึกหรอ รวมทั้งศึกษาผลของการทำ Solution treatment ต่อคุณสมบัติทางกลดังกล่าว ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อย่อยๆได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ความหนาแน่นสัมพัทธ์

5.1.1.1 ผลของปริมาณทองแดงต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์

สำหรับการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C การลดลงของความหนาแน่นสัมพัทธ์เมื่อเพิ่มปริมาณทองแดงเกิดจากการหดตัวของผงทองแดงในระหว่างการแพร่ทำให้บริเวณรอบข้างเกิดเป็นรูพรุนขึ้นมา ซึ่งการเพิ่มปริมาณทองแดงจะทำให้รูพรุนเพิ่มขึ้น

สำหรับการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C การลดลงของความหนาแน่นสัมพัทธ์เมื่อเพิ่มปริมาณทองแดงเกิดจากแก๊สไฮโดรเจนที่ถูกปล่อยออกมาจากผงไทเทเนียมละลายเข้าไปในเฟสของเหลวของทองแดงในระหว่างเผาผนึกทำให้ช่วงที่เย็นตัวในบริเวณที่มีแก๊สถูกกักอยู่จะเกิดเป็นรูพรุนขึ้นมา ซึ่งการเพิ่มปริมาณทองแดงจะทำให้รูพรุนเพิ่มขึ้น และเมื่อศึกษาจากรูปโครงสร้างจุลภาคจะพบว่าการเพิ่มปริมาณทองแดงจะทำให้ปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น

5.1.1.2 ผลของอุณหภูมิการเผาผนึกต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์

การเพิ่มอุณหภูมิการเผาผนึกจาก 1000°C เป็น 1100°C จะทำให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงขึ้นเนื่องจากที่อุณหภูมิ 1100°C ทองแดงเกิดการหลอมเหลวทำให้การแพร่ของทองแดงอยู่ในสถานะของเหลวซึ่งการแพร่จะเป็นไปได้ดีกว่าการแพร่ในสถานะของแข็ง (Solid state diffusion) การแพร่ที่ดีกว่าทำให้เกิดเฟสของเหลวได้มากกว่าในระหว่างการเผาผนึก ซึ่งเฟสของเหลวจะเข้าไปแทนที่รูพรุนทำให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงขึ้น

5.1.1.3 ผลของแรงอัดต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์

แรงอัดจะส่งผลต่อค่าความหนาแน่นหลังขึ้นรูปเย็น (Green density) การเพิ่มแรงอัดจาก 127 เป็น 254 MPa จะทำให้ความหนาแน่นหลังขึ้นรูปเย็นเพิ่มขึ้นและทำให้ผงโลหะอยู่ชิดติดกันมากขึ้น (เกิดการแพร่ได้ง่ายกว่า) ดังนั้นหลังการเผาผนึกชิ้นงานที่ใช้แรงอัดสูงกว่าจึงมีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงกว่าและเมื่อศึกษาจากโครงสร้างจุลภาคจะพบว่าแรงอัดที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณรูพรุนลดลง

5.1.1.4 ผลของเวลาในการเผาผนึกต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์

เวลาในการเผาผนึกที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงขึ้นยกเว้นในบางเงื่อนไขการเผาผนึก การเพิ่มเวลาทำให้การแพร่ระหว่างไทเทเนียมและทองแดงในระหว่างการเผาผนึกเป็นไปได้สมบูรณ์ขึ้น เกิดเฟสของเหลวได้มากกว่าทำให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นและเมื่อศึกษาจากรูปโครงสร้างจุลภาคพบว่าโครงสร้างยูเทคตอยด์มีความสมบูรณ์ขึ้น

5.1.2 ความแข็ง

5.1.2.1 ผลของปริมาณทองแดงต่อความแข็ง

การผสมทองแดงในไทเทเนียมบริสุทธิ์จะทำให้ไทเทเนียมมีความแข็งเพิ่มขึ้นจากผลของ Solid solution strengthening ซึ่งอะตอมของทองแดงจะเข้าไปแทนที่อะตอมของไทเทเนียม (อะตอมของแดงมีขนาดใกล้เคียงกับอะตอมของไทเทเนียม) ในโครงสร้างผลึก นอกจากนั้นไทเทเนียมยังสามารถเกิดสารประกอบกับทองแดงเป็น Ti_2Cu ซึ่งมีแรงยึดเหนี่ยวกับเฟสพื้น (โครงสร้างยูเทคตอยด์) ดังนั้นการเพิ่มปริมาณทองแดงจะทำให้ความแข็งของโลหะผสมเพิ่มขึ้นในทุกๆเงื่อนไขการเผาผนึก

5.1.2.2 ผลของอุณหภูมิการเผาผนึกต่อความแข็ง

การเพิ่มอุณหภูมิการเผาผนึกจาก 1000°C เป็น 1100°C จะช่วยขจัดปัญหาการหลอมเหลวไม่หมดของทองแดงในส่วนผสมที่มีทองแดงมาก ได้แก่ Ti-10Cu และ Ti-15Cu ซึ่งทองแดงดังกล่าวจะสามารถไปทำปฏิกิริยากับไทเทเนียมและเกิดเป็นสารประกอบได้เพิ่มขึ้น

ซึ่ง Ti_2Cu ซึ่งมีแรงยึดเหนี่ยวกับเฟสพื้นที่เกิดเพิ่มจะทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากทองแดงที่เกิดปฏิกิริยาไม่หมดมีปริมาณไม่มากนักค่าความแข็งจึงเพิ่มเพียงเล็กน้อย

5.1.2.3 ผลของแรงอัดต่อความแข็ง

เมื่อศึกษาจากรูปโครงสร้างจุลภาคพบว่าแรงอัดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณรูพรุนลดลงและทำให้ผงโลหะอัดตัวกันแน่นซึ่งจะทำให้การแพร่ระหว่างเผาผนึกเป็นไปได้ดีขึ้น โครงสร้างยูเทคตอยด์เกิดได้มากขึ้น เป็นผลให้ความแข็งสูงขึ้น

5.1.2.4 ผลของเวลาในการเผาผนึกต่อความแข็ง

การเพิ่มเวลาในการเผาผนึกจาก 0.5 ชม. เป็น 1 ชม. ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในโลหะผสม Ti-10Cu และ Ti-15Cu เนื่องจากปริมาณทองแดงในโลหะผสมมีมากจึงจำเป็นต้องใช้เวลาในการแพร่ในระหว่างเผาผนึกนานกว่าโลหะผสมที่มีปริมาณทองแดงต่ำเพื่อที่จะทำให้เกิดโครงสร้างยูเทคตอยด์ได้ทั้งหมด

5.1.2.5 ผลของการทำ Solution treatment ต่อความแข็ง

หลังจากทำ Solution treatment ทองแดงที่เกิดเป็นสารประกอบกับไทเทเนียมจะละลายกลับเข้าไปในเนื้อพื้นไทเทเนียม จากรูปโครงสร้างจุลภาคจะพบโครงสร้างแบบเข็มของ α เกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วซึ่งมีความแข็งสูงกว่าพื้น α ในโครงสร้างยูเทคตอยด์และเฟส β ซึ่งมีความแข็งสูงกว่าโครงสร้างแบบเข็มดังนั้นความแข็งโดยรวมจึงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงานหลังเผาผนึกที่ส่วนผสมเดียวกัน

5.1.3 ความต้านทานการสึกหรอ

5.1.3.1 ผลของปริมาณทองแดงต่อความต้านทานการสึกหรอ

ปริมาณทองแดงที่เพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 10% โดยน้ำหนักจะทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลโดยตรงต่อกลไกการสึกหรอแบบ Oxidative-Abrasive wear ซึ่งทำให้มวลที่สูญหายหลังทดสอบลดลง แต่ปริมาณทองแดงจะไม่มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

5.1.3.2 ผลของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่มากจะก่อให้เกิดความเสียหายบนพื้นผิวหลังทดสอบมาก แต่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณทองแดงและมวลที่สูญหายของชิ้นงานหลังการทดสอบ

5.1.3.3 ความต้านทานการสึกหรอหลังทำ Solution treatment

หลังผ่านการทำ Solution treatment ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับหลังเผาผนึกที่ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. แต่มวลที่สูญหายหลังทดสอบกลับเพิ่มขึ้นทั้งสองส่วนผสม เนื่องจาก การมีอยู่ร่วมกันของเฟส α-Ti และ Ti_2Cu หลังเผาผนึกทำให้ค่า plastic deformation resistance ดีกว่าเมื่อเทียบกับการอยู่ร่วมกันของเฟส α-Ti และ β-Ti หลังทำ Solution treatment

5.1.3.4 ปัจจัยอื่นๆต่อความต้านทานการสึกหรอ

ปริมาณรูพรุนและโครงสร้างยูเทคตอยด์อาจส่งผลต่อความต้านทานการสึกหรอ จากการที่โลหะผสม Ti-2Cu และ Ti-10Cu ที่ผ่านการเผาผนึกที่ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม. และที่ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. มีความแข็งใกล้เคียงกันที่ส่วนผสมเดียวกันแม้เผาผนึกที่เงื่อนไขต่างกัน แต่กลับพบว่าชิ้นงานเผาผนึกที่ 1100°C เป็นเวลา 4 ชม. มีมวลที่สูญเสียหลังทดสอบน้อยกว่า อาจเกิดจากปริมาณรูพรุนที่น้อยกว่าและความสมบูรณ์ของโครงสร้างยูเทคตอยด์ที่มากกว่า ซึ่งโครงสร้างยูเทคตอยด์จะช่วยป้องกันการเกิด plastic deformation ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ความต้านทานการสึกหรอลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

โลหะผสมไทเทเนียมและทองแดงสามารถปรับปรุงค่าความแข็งได้อีกโดยการนำมาพัฒนาใช้ร่วมกับกระบวนการบ่มแข็ง (Aging) ซึ่งจะทำให้เกิดการตกผลึกขนาดเล็กของ Ti_2Cu และความแข็งที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความต้านทานการสึกหรอของโลหะผสมชนิดนี้เพิ่มขึ้นอีก