AMM025

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

อิทธิพลของกรรมวิธีทางความร้อนที่มีผลต่อสมบัติทางกลของ Ti -15Mo-4Sn The Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties of Ti -15Mo-4Sn Alloy

สิริพร โรจนนั้นต์^{1*} สุรศิษฐ์ โรจนนั้นต์ ² วัชรา แก้วสระแสน ² นายสุรพงศ์ นิลแสงศรี ² นายอรรถพงศ์ เมฆา ² ¹ สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

โทร 0-2470-8695 โทรสาร 0-2470-8643 ^{*}อีเมล์: <u>siriporn.roj@kmutt.ac.th</u>

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140 โทร 0-2470-9218 โทรสาร 0-2872-9080 อีเมล์ <u>surasit.roj@kmutt.ac.th</u>

10-9210 111011 0-2012-9000 2100 Sulasit.10[@Kinc

* Corresponding author

บทคัดย่อ

เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า กรรมวิธีทางความร้อนสามารถปรับ โครงสร้างและสมบัติทางกลของโลหะได้ ดังนั้นบทความนี้จึงมี วัตถุประสงค์ในการนำเสนอเกี่ยวกับ อิทธิพลของอุณหภูมิของกรรมวิธี ทางความร้อนที่มีผลต่อสมบัติทางกลของโลหะไทเทเนียมผสม สำหรับ ใช้ทำวัสดุทางการแพทย์ ในการทดลองได้หลอมและหล่อชิ้นงานที่มี ส่วนผสมของ Ti-15Mo-4Sn แล้วนำไปรีดเย็นก่อนทำกรรมวิธีทางความ ร้อน ใช้อุณหภูมิอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียส แล้วจุ่ม น้ำเย็น จากนั้นนำชิ้นงานไปอบบ่มที่อุณหภูมิต่าง ๆ ผลการทดลอง สรุปว่าการอบบ่มชิ้นงานที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โครงสร้างประกอบด้วยเฟสบีต้าและอัลฟา ได้ค่าความแข็งมีค่า 289 วิกเกอร์ ความต้านแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยมีค่า 840 เมกกะปาสคัล สามารถยึดตัวได้ 10 เปอร์เซ็นต์

Abstract

It is well known that the heat treatment can improve the microstructures and mechanical properties of metals. The aim of this article is to present about the effect of heat treatment temperatures on microstructures and mechanical properties of titanium alloys. The ingots of Ti-15Mo-4Sn alloy were prepared and cold rolled. After that, samples were solution-treated at 820°C for an hour and water quenched, subsequently, aged at various temperatures. The experimental results could be concluded that the microstructures of aged samples at 600°C for an hour reviewed the mixture of beta- and alpha-phases with microhardness of 289 Vickers, tensile strength of 840 MPa, and 10 percent of elongation.

1. คำนำ

ไทเทเนียมบริสุทธิ์มีน้ำหนักเบา มีความหนาแน่น 4.51 กรัมต่อลูก บาศ์เซนติเมตร มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง ทนการกัดกร่อน มีความ เข้ากันได้ทางชีวภาพสูง จึงถูกนำไปใช้ทำวัสดุทางการแพทย์มานาน ้แล้ว อย่างไรก็ตามความแข็งแรงของไทเทเนียมบริสุทธิ์ไม่สูงมาก ้ความสามารถในการขึ้นรูปไม่ดีนักเนื่องจากมีโครงสร้างผลึกเป็น HCP จึงทำให้มีขีดจำกัดในการใช้งาน การปรับปรุงสมบัติทางกลและสมบัติ ้อื่นๆ สามารถทำได้โดยการเติมธาตุผสม (Alloying element) เพื่อปรับ โครงสร้างผลึกและโครงสร้างจุลภาค รวมทั้งการทำกรรมวิธีทางความ ้ร้อน ธาตุโมลิบดีนัมเป็นธาตุผสมที่เพิ่มเสถียรภาพให้เกิดเฟสบีต้า การเติมโมลิบดินัมในปริมาณที่มากกว่า 10 stabilizer) (Beta เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก จะทำให้เกิดโครงสร้างผลึกเป็น BCC ที่ ้อุณหภูมิห้อง และช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปที่อุณภูมิห้องได้ดี ขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยการทำกรรมวิธีทาง ความร้อน [1]

กรรมวิธีทางความร้อนของโลหะไทเทเนียมกลุ่มบีด้า Ti-13V-11Cr-3AI โดยการอบละลายเฟส แล้วจุ่มน้ำเย็น จากนั้นอบบ่ม (Aging) ที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส ทำให้ความด้านทานแรงดึงสูงสุดมีค่าสูง ถึง 1300 เมกกะปาสคัล ความแข็งแรงนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิด สารละลายของแข็ง (Solid solution) ของเฟสบีต้า และการเกิดอนุภาค จากการอบบ่มของเฟสอัลฟ่ากระจายตัวในโครงสร้างพื้นของบีต้า [2] ไทเทเนียมผสม Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn (Beta III) สามารถเพิ่มความ แข็งได้โดยการอบละลายเฟสที่ 750-775 องศาเซลเซียส แล้วจุ่มน้ำเย็น ตามด้วยการอบบ่มที่ 475 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อสร้าง อนุภาคอัลฟ่าในบีต้า ทำให้ความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีค่า 1400 เมกกะปาสคัล

จากงานวิจัยของ Banerjee และ Naik [3] รายงานว่าไทเทเนียม ีผสม Ti-15Mo อบละลายเฟสที่ 800 องศาเซลเซียส แล้วทำให้เย็นอย่าง รวดเร็ว (Quench) พบว่าเกิดเฟสโอเมกาขนาด 2-5 นาโนเมตร เรียกว่า Athermal @ กระจายในโครงสร้างพื้นบีต้า ทำให้มีค่าความต้านแรงดึง ต่ำประมาณ 650 เมกกะปาสคัล ยึดตัวได้ 40 เปอร์เซนต์ หลังการนำไป อบบ่มที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พบว่าเกิดเฟส โอเมก้าเรียก Aged ϖ กระจายในโครงสร้างพื้นบีต้า โครงสร้างแบบนี้ ให้ค่าความต้านแรงดึงสูง ประมาณ 1200 เมกกะปาสคัล แต่ยืดตัวได้ต่ำ เพียง 5 เปอร์เซนต์ เท่านั้น แต่ถ้าหากนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 600 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที พบว่าจะเกิดอนุภาคของเฟสอัลฟ่าใน โครงสร้างพื้นบีต้า ทำให้ค่าความต้านแรงดึงสูงขึ้นถึง 1300 เมกกะปาส ้คัล และยืดตัวได้มากขึ้นเป็น 8 เปอร์เซนต์ E. Sukedai [4] ได้ศึกษา การเกิดเฟสโอเมก้า ในโลหะผสม Ti-20Mo และ Ti-20Mo-5Zr โดยใช้ เทคนิค High Resolution Electron Microscope (HREM) พบว่าเฟส โอเมก้า เป็นเฟส Metastable มีระบบผลึกเป็น HCP มีขนาดเล็ก ประมาณ 10 นาโนเมตร เกิดในทิศทาง <111>

การเกิดเฟสโอเมก้าจากการบ่ม (Aged ω) มักส่งผลไม่ดีต่อสมบัติ ทางกลซึ่งต้องหลีกเลี่ยง สำหรับไทเทเนียมผสมกลุ่มที่มีโครงสร้างเฟส บีด้า Ti-15Mo (IMI205) สามารถเติมธาตุผสม เช่น อะลูมิเนียม เซอร์โครเนียม และ ดีบุก เพื่อช่วยยับยั้งการเกิดเฟสโอเมก้า ในระหว่าง การบ่มได้ โดยการเร่งให้เกิดนิวเคลียสของเฟสอัลฟ่าเพิ่มขึ้น [5] จากที่ กล่าวมาทั้งหมดนี้ จะเห็นได้ว่าการทำกรรมวิธีทางความร้อน โดยการ อบบ่มไทเทเนียมผสม สามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างและเพิ่มความ แข็งแรงได้ จากงานวิจัยที่ผ่านยังไม่มีข้อมูลการอบบ่มไทเทเนียมผสม Ti-15Mo-4Sn ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาอิทธิพลของ อุณหภูมิของกรรมวิธีทางความร้อน ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของโลหะ ไทเทเนียมผสมสำหรับใช้ทำวัสดุทางการแพทย์

2. วิธีการทดลอง

การทดลองเริ่มจากศึกษาโครงสร้างจุลภาค วัดความแข็งของ ้ชิ้นงานเริ่มต้นของ Ti-15Mo-4Sn ที่ได้จากการหล่อ แล้วนำชิ้นงานไป รีดเย็น 80 เปอร์เข็นต์ ได้ขนาดความหนา 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำ ชิ้นงานไปทำกรรมวิธีทางความร้อน โดยการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจุ่มน้ำเย็นทันที จากนั้นนำ ชิ้นงานไปทำการอบบ่มที่อุณหภูมิคงที่ ช่วงตั้งแต่ 300 ถึง 600 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อมานำชิ้นงานทดสอบไปศึกษา โครงสร้างจุลภาค วัดความแข็งจุลภาค และทดสอบแรงดึง การวัดความ แข็งของชิ้นงาน ใช้สเกลในการวัดเป็นความแข็งจุลภาค โดยใช้เครื่องวัด ้ความแข็งที่ผลิตจากบริษัท Future-Tech Corp รุ่น FM 700E ใช้แรงกด 500 กรัม เวลาในการกดแช่ 15 วินาที การทดสอบแรงดึงไม่ได้ใช้ ชิ้นงานตามมาตรฐานเนื่องจากขีดจำกัดของชิ้นงาน จึงได้เตรียมเป็น แผ่นยาว 60 มิลลิเมตร กว้าง 4 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร โดย ชิ้นงานทั้งหมดถูกทำกรรมวิธีทางความร้อน โดยการอบละลายเฟสและ ์ตามด้วยการอบบ่ม จากนั้นนำไปทำการทดสอบแรงดึง โดยใช้เครื่อง

ทดสอบแรงดึงที่ผลิตจากบริษัท LLORD รุ่น LR50K ความเร็วในการดึง 3 มิลลิเมตรต่อนาที กรดที่ใช้ในการกัดชิ้นงาน เพื่อศึกษาโครงสร้าง ประกอบด้วยกรดไฮโดรฟลูออลิค (HF) เข้มขัน 40 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ 3 มิลลิลิตร กรดไนตริก (HNO₃) เข้มขัน 65 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ 5 มิลลิลิตรน้ำกลั่น 92 มิลลิลิตร การศึกษาโครงสร้างผลึกใช้เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ยี่ห้อ BRUKER รุ่น D8 Discover รังสีที่ได้นั้น ได้มาจากแหล่งกำเนิดชนิด CuK_α ความยาวคลื่นที่ใช้อยู่ที่ 1.5406 อังสตรอม ใช้ค่าความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิ แอมป์ เก็บข้อมูลทุก 0.02 องศา การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ใช้ กล้องจุลทรรศน์แสงธรรมดา และกล้องจุลทรรศน์แสงอิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด JEOL รุ่น JSM-5800 ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าอยู่ที่ 20 kV และใช้ ความกว้างของลำแสงอิเล็กตรอนอยู่ที่ 44.0 ไมครอน

3. ผลการทดลอง

3.1 โครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคของอินกอต Ti–15Mo–4Sn หลังจากการหล่อ พบว่าโครงสร้างมีลักษณะของเดนไดรด์ ซึ่งเป็นโครงสร้างทั่วไปของงาน หล่อ สำหรับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน Ti–15Mo–4Sn หลังการรีด แสดงผลในรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างที่ได้มีลักษณะเป็นริ้วตามแนว รีด ไม่พบว่ามีเดนไดรต์เหลืออีก

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน Ti–15Mo–4Sn หลังการอบละลาย เฟสที่อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง แล้วจุ่มน้ำเย็นทันที นำไป ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 2 จะเห็นว่าโครงสร้างมี ลักษณะเป็น Equiaxed Grain ของเฟสบีต้า มีการกระจายตัวสม่ำเสมอ ทั้งชิ้นงาน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [6] หลังจากอบที่อุณหภูมิ สูงกว่าเฟสบีต้า (T_β) แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว จะทำให้เกิดผลึก ใหม่ (Recrystallization) ของเฟสบีต้ากึ่งเสถียรภาพที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรีด





รวมบทความวิชาการ เล่มที่ 2 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22

โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหลังการอบบ่มของ Ti–15Mo–4Sn ที่ อุณหภูมิ 300, 450, 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 3 (ก)-(ฉ) ตามลำดับ เนื่องจากโครงสร้าหลังอบบ่มที่อุณหภูมิ 300, 350 และ 400 องศาเซลเซียส ได้โครงสร้างที่คล้ายกัน ไม่เห็นการ เปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน จึงเลือกแสดงรูปเพียงรูปเดียวในรูปที่ 3(ก) ส่วน ชิ้นงานหลังอบที่ 450 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างมือนุภาคเม็ดเล็ก ตามขอบเกรนและกระจายตัวบริเวณโครงสร้างพื้นของบีต้า ปริมาณ ของอนุภาคเม็ดกลมนี้เพิ่มขึ้น ทั้งในเกรนและขอบเกรนเมื่อให้อุณหภูมิ การอบบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 500 องศาเซลเซียส อนุภาคเหล่านี้มีขนาดเล็ก เกินกว่าที่จะวิเคราะห์เฟส ได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM

โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหลังการอบบ่มของ Ti–15Mo–4Sn ที่ผ่าน การอบบ่มที่อุณหภูมิ 550 และ 600 องศาเซลเซียส พบว่าเกิด โครงสร้างผสมกันระหว่างเฟสอัลฟาและเฟสบีต้า ขนาดเกรนของบีต้ามี ขนาดประมาณ 20-30 ไมครอน โครงสร้างที่เป็นเส้นเล็กที่พุ่งออกจาก ขอบเกรนและในเกรน ที่มีลักษณะคล้ายเข็ม เรียกโครงสร้างนี้ว่าเป็น เฟสอัลฟา ซึ่งมีผลทำให้ชิ้นงานอ่อนลง [7] พบว่าทิศทางของเฟสอัลฟา ที่เกิดจากการอบบ่มด้วยอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ค่อนข้างมี ทิศทางตามแนวรีดเดิม ซึ่งแตกต่างจากชิ้นงานที่อบบ่มด้วยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่เฟลอัลฟากระจายแบบสุ่มในเกรนบีต้า ไม่ค่อย สม่ำเสมอนัก เป็นสิ่งที่ต้องศึกษาต่อไป



(ก) อบบ่มที่ 300 องศาเซลเซียส



(ข) อบบ่มที่ 450 องศาเซลเซียส



(ค) อบบ่มที่ 500 องศาเซลเซียส



(ง) อบบ่มที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส



(จ) อบบ่มที่ 600 องศาเซลเซียส

รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคของ Ti-15Mo-4Sn หลังผ่านการอบ บ่มที่อุณหภูมิต่าง ๆ

3.2 โครงสร้างผลึก

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก ด้วยเทคนิค X-ray diffraction ของชิ้นงาน Ti-15Mo-4Sn ที่ผ่านการหล่อและ ผ่านการอบบ่มที่ อุณหภูมิ 450 และ 600 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า โครงสร้างงานหล่อ และชิ้นงานที่ผ่านการอบบ่มที่ 450 องศาเซลเซียส เป็น BCC ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการอบบ่มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างผลึกผสมกันระหว่างเป็น BCC และ HCP



รูปที่ 4 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ Ti–15Mo–4Sn หล่อและหลัง ผ่านการอบบ่มที่ 450 และ 600 องศาเซลเซียส

3.3 ผลการวัดความแข็ง

ความแข็งจุลภาคของอินกอตที่ได้จากงานหล่อพบว่ามีค่าเฉลี่ย 289 วิกเกอร์ หลังจากนำไปรีดแปรรูปเป็นเส้นลวดมีหน้าตัดสี่เหลี่ยม จัตุรัส มีขนาดความกว้าง 2 มิลลิเมตร คำนวณปริมาณการแปรรูปได้ 80 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีค่าความแข็งเฉลี่ย 300 วิกเกอร์

หลังจากนั้น นำชิ้นงานที่รีดเย็นไปทำกรรมวิธีทางความร้อน โดย การอบบ่ม โดยขั้นแรกนำไปอบละลายเฟส ที่อุณหภูมิ 820 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จุ่มน้ำเย็นทันที วัดความแข็งเฉลี่ยได้ 263 วิกเกอร์ สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการอบบ่มที่อุณหภูมิ 300 350 400 450 500 550 และ 600 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งเฉลี่ยดังรูปที่ 5 จะ เห็นว่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าสูงสุดหลังการอบบ่มที่ 450 องศาเซลเซียส การบ่มที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความแข็งลดลง



รูปที่ 5 ความแข็งของ Ti–15Mo–4Sn หลังการบ่มแข็ง

3.4 ผลการทดสอบแรงดึง

จากการทดลองที่นำชิ้นงาน Ti-15Mo-4Sn หลังผ่านการรีดด้วย ปริมาณการรีด 80 เปอร์เซ็นต์มาทดสอบแรงดึง มีรูปร่างหน้าตัด ขนาด กว้าง 2 มิลลิเมตร ยาว 4 มิลลิเมตร ตัดเป็นท่อนยาว 60 มิลลิเมตร นำไปทำกรรมวิธีทางความร้อนโดยการอบละลายเฟส และอบบ่ม ทั้งนี้ เนื่องจากไม่สามารถเตรียมชิ้นงานให้มีขนาดมาตรฐานของการทดสอบ แรงดึงได้ เนื่องจากข้อจำกัดในการขึ้นรูปชิ้นงาน ผลการทดสอบแรงดึง ที่คำนวณ หาค่าเฉลี่ยของความต้านทานแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดตัว แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่อบ 450-500 องศาเซลเซียส มีค่าสูงสุดแต่การยืดตัวมีค่าต่ำมาก ทำให้ค่า ความต้านแรงดึงที่จุดครากกับค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีค่า ใกล้เคียงกัน เป็นที่น่าสังเกตว่าชิ้นงานหลังอบบ่มที่ 550 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมี่ค่าสูงกว่าค่าความต้านแรงดึงที่จุดคราก มากกว่าของชิ้นงานที่อบบ่มที่อุณหภูมิอื่น แสดงให้เห็นถึงการเกิด Work hardening ที่แตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากโครงสร้างจุลภาคของ ชิ้นงานหลังอบที่ 550 องศาเซลเซียส มีลักษณะที่เป็นทิศทาง ต้อง ศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

ความต้านทาน เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการ ความต้านทาน แรงดึงที่จดคราก แรงดึงสูงสุด การยืดตัว ดาเบ่ม (เมกกะปาสคัล) (เมกกะปาสคัล) (องศาเซลเซียส) 941 930 300 6.4 350 985 970 6.8 400 1030 1020 3.1 450 1070 1070 0.3 500 1100 1085 3.1 550 970 870 8.3 600 840 810 10.0

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกลของชิ้นงาน Ti-15Mo-4Sn หลังการอบบ่ม

3.5 ลักษณะผิวแตกหักของชิ้นงาน

การตรวจสอบลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน Ti-15Mo-4Sn หลัง ผ่านการทดสอบแรงดึง โดยนำชิ้นงานที่ขาดออกจากกันมาตรวจสอบ ลักษณะของผิวที่ขาดของชิ้นงาน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด ผลการศึกษาผิวแตกของชิ้นงานที่อบบ่มด้วยอุณหภูมิ 350, 450 และ 600 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 6 (ก)-(ฉ) พบว่าผิว การแตกหักชิ้นงาน Ti-15Mo-4Sn หลังการอบบ่มด้วยอุณหภูมิ 300-350 องศาเซลเซียส มีลักษณะเดียวกันเป็นการแตกแบบเหนียว จึง แสดงเพียงรูปเดียว ในรูป (ก) ลักษณะผิวการแตกหักที่ได้เป็นรอยบุ๋ม (Dimple) ซึ่งเกิดจากกลไกของ Microvoid coalescence การเกิด นิวเคลียสของรอยแตกขนาดเล็ก (Microvoid nucleation) เริ่มเกิดที่ บริเวณรอยต่อระหว่างโครงสร้างพื้นและขอบเกรน อนุภาค อินคลูชัน หรือสิ่งบกพร่องต่าง ๆ เมื่อชิ้นงานรับแรงจากภายนอก จึงทำให้รอย แตกขยายตัวใหญ่ขึ้นจนกระทั่งชิ้นงานแตก หลังการอบบ่มชิ้นงานที่ อุณหภูมิ 400 450 และ 500 องศาเซลเซียส พบว่าการแตกหักเกิดจาก กลไก Clevage mechanism มีลักษณะการแตกหักแบบเปราะ ผิวการ แตกหักมีการยืดตัวน้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกันกับผลการทดสอบแรงดึง

รวมบทความวิชาการ เล่มที่ 2 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22

ที่ให้ค่าการยึดตัวต่ำ ผิวการแตกหักชิ้นงานหลังการอบบ่มด้วยอุณหภูมิ 550 และ 600 องศาเซลเซียส มีลักษณะการแตกแบบเหนียว สังเกตุว่า ขนาดเกรนมีขนาดใหญ่กว่าของชิ้นงานอื่น แสดงว่าจุดเริ่มเกิดนิวเคลียส ของ Microvoid ลดลง



(ก) หลังการอบบ่มด้วยอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส 3000x



(ง) หลังการอบบ่มด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



(จ) หลังการอบบ่มด้วยอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส



(ข) หลังการอบบ่มด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



(ฉ) หลังการอบบ่มด้วยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซีย



(ค) หลังการอบบ่มด้วยอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

รูปที่ 11 ผิวการแตกหักของชิ้นงาน Ti-15Mo-4Sn หลังการอบบ่มด้วยอุณหภูมิ รวมบทความวิชาการ เล่มที่ 2 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22

4. วิเคราะห์ผลการทดลอง

สมบัติทางกลของโลหะไทเทเนียมผสมกลุ่มบีด้า สามารถ เปลี่ยนแปลงได้ขึ้นกับพารามิเตอร์ในกระบวนการผลิต ที่ต้องควบคุม โครงสร้างให้เป็นไปตามความต้องการ การอบบ่มโลหะไทเทเนียมกลุ่ม บีด้า ขึ้นกับการสลายตัวของเฟสกึ่งเสถียรภาพของเฟสบีด้า ระดับความ แข็งแรงที่ได้รับ ขึ้นกับปริมาณของการตกตะกอนของเฟสอัลฟาที่มี ลักษณะเป็นแผ่น เรียกกันว่า α-Platelets เนื่องจากบริเวณรอยต่อของ เฟสอัลฟาและเฟสบีต้า เป็นแบบ Incoherent ดังนั้นเฟสอัลฟา จึง เกิดขึ้นที่บริเวณขอบเกรนและในเกรนของเฟสบีต้า ทำให้เกิดเส้นบาง ๆ ของเฟสอัลฟา

จากผลการทดลอง พบว่าชิ้นงานหลังการอบบ่มที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส ความแข็งและความต้านแรงดึงไม่สูงมากนัก เนื่องมาจากการอบบ่มที่อุณหภูมิดังกล่าวยังไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิด อนุภาคเล็กกระจายตัวในโครงสร้างพื้นของบีต้า ซึ่งอนุภาคดังกล่าวจะ สามารถทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน จึงส่งผลให้ค่า ความแข็งและความแข็งแรงไม่สูงมาก และจากการตรวจสอบโครงสร้าง จุลภาคหลักการทดสอบแรงดึงจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีลักษณะการแตกหักแบบเหนียว

จากชิ้นงานที่อบบ่มด้วยอุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส พบว่า โครงสร้างเป็นบีต้า เห็นได้ชัดว่ามีอนุภาคกระจายตัวในโครงสร้างพื้น และขอบเกรนมากขึ้น จากสิ่งที่เกิดขึ้นนี้สามารถพิจารณาได้ว่าการให้ ความร้อนที่อุณหภูมิระดับดังกล่าว สามารถทำให้เกิดอนุภาคที่สามารถ ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันได้ดี ซึ่งค่าความแข็งและความ แข็งแรงจะสูงมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าผลการทดสอบวัดค่าความ แข็งและความแข็งแรงจะสูง แต่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวกลับลดลง เนื่องจากอาจเกิดเฟสโอเมกา ที่มีขนาดเล็กซึ่งไม่สามารถเห็นได้ด้วย กล้อง SEM จึงส่งผลให้ ชิ้นงานเปราะ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่าน มา [5] สำหรับการวิเคราะห์ชนิดของอนุภาคที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่อบบ่ม การจะทราบว่าอนุภาคขนาดที่เกิดขึ้นนั้นเป็นอะไร ต้องทำการ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ TEM แต่เนื่องจากการเตรียมชิ้นงานบาง ทำได้ยาก ในการทดลองไม่สามารถเตรียมชิ้นงานให้มีขนาดบางได้ จึง ไม่อาจหาได้ว่าอนุภาคคืออะไร แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Banergee และ Naik [3] รายงานว่าการอบบ่ม Ti-15Mo ที่อุณหภูมิ 300 องศา เซลเซียส จะเกิดเฟสโอเมก้าทำให้ชิ้นงานแข็ง และเปราะ

โครงสร้างของชิ้นงานที่อบบ่มที่อุณหภูมิ 550-600 องศาเซลเซียส พบว่าเป็นเฟสบีต้ากับเฟสอัลฟา ซึ่งทำให้ค่าความแข็งและความ แข็งแรงมีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดของเฟสอัลฟา มีขนาดใหญ่ เกิน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wag และคณะ [3, 8] ได้ศึกษาการ พัฒนาโครงสร้างจุลภาคและการเพิ่มความแข็งแรงในโลหะไทเทเนียม เฟสบีตาที่มีส่วนผสมของ TNZT (Ti-34Nb-9Zr-8Ta), TMZF (Ti-13Mo-7Zr-3Fe) และ Ti-15Mo โดยการอบบ่มที่อุณหภูมิ 600 องศา เซลเซียส ผลที่ได้คือ ทุกส่วนผสมมีเกรนเฟสอัลฟาผสมกับเฟสบีต้า ชิ้นงาน TMZF มีความแข็งเพิ่มขึ้น ส่วนชิ้นงาน TNZT และ Ti-15Mo มี ความแข็งลดลง

5. สรุปผลการทดลอง

- การทำกรรมวิธีทางความร้อนมีผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางกล ของ Ti-15Mo-4Sn พบว่าการอบบ่ม Ti-15Mo-4Sn ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยมีค่า 840 เมกกะปาสคัล การยึดตัวมีค่า 10 เปอร์เซ็นต์ โครงสร้าง ประกอบด้วยเฟสบีต้าเป็นโครงสร้างพื้นและมีอนุภาคอัลฟ่าขนาด เล็กกระจายทั่ว
- การอบบ่มที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส พบว่าให้ความแข็งเฉลี่ย สูงสุดมีค่า 443 วิกเกอร์ ความต้านทานแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยมีค่า 1,070 เมกกะปาสคัล แต่การยึดตัวมีค่าต่ำมาก

6. เอกสารอ้างอิง

- Smith, W.F., 1999, Principles of Materials Science and Engineering, 3rd edition, McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
- Polmear, I. J., 2006, Light Alloys from Traditional Alloys to Nanocrystals, Fourth Edition, Elsevier, Butterworth-Heinemann Publications, London, pp. 299-365.
- Banerjee, S, Naik U M., 1996, Plastic Instability in an Omega Formaing Ti-15Mo Alloy, Acta. Mater., Vol. 44, No. 9, pp. 3667-3677.
- Sukedai E. Kitanot, Y. and Ohnishi A., 1997, Investigation of Initial Structures of Aged ω-Phase Crystals in fl-Titanium Alloys Using High Resolution Electron Microscopy, Micron, Vol. 28, No. 4, pp. 269-277.
- Komatsu, S., Ikeda, M., Sugimoto, T., Kamei, K., Maesaki, O. and Kojima, M., 1996, "Aging behavior of Ti-15Mo-5Zr and Ti-15Mo-5Zr-3Al alloy up to 573 K", Materials Science and Engineering A, No. 213, pp. 61-65.
- Weiss, I. and Semiatin, S.L., 1998, "Thermomechanical processing of beta titanium alloys-an overview", Materials Science and Engineering A, No. 243, pp. 46-65.
- 7. Lütjering, G., and Williams, J.C., 2003, Titanium, Springer, Germany.

รวมบทความวิชาการ เล่มที่ 2 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22

 Nag S., Banerjee R., Fraser H.L., 2005.Microstructural evolution and strengthening mechanisms in Ti–Nb–Zr–Ta, Ti–Mo–Zr–Fe and Ti–15Mo biocompatible alloys, Materials Science and Engineering, vol.C25, pp. 357-362.