

อัตราการผลิตที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของ Ti-13Zr-nNb

Influence of Cooling Rate on Microstructures and Hardness of
Ti-13Zr-nNb Alloysสุวรรณ สวัสดิ์พีระ¹ สิริพร ไรจนันต์^{1*} สุรศิษฐ์ ไรจนันต์²¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถ. ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทร 0-2470-8695 โทรสาร 0-2470-8643 *อีเมล: siriporn.roj@kmutt.ac.th

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถ. ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทร 0-2470-9218 โทรสาร 0-2872-9080 อีเมล: surasit.roj@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

โลหะผสมไทเทเนียม ถูกใช้งานด้านการแพทย์อย่างกว้างขวาง สามารถปรับโครงสร้างและสมบัติทางกลได้ โดยการปรับส่วนผสมทางเคมีและการทำกรรมวิธีทางความร้อน วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการเย็นตัวที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของโลหะผสม Ti-13Zr-nNb (n= 5-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ในการทดลองเริ่มจากการเตรียมอินกอตที่มีส่วนผสมตามต้องการ ด้วยเตาอาร์คภายใต้บรรยากาศอาร์กอน จากนั้นนำชิ้นงานไปทำการอบในช่วงอุณหภูมิที่เป็นเฟสบีต้า แล้วทำให้เย็นตัวในตัวกลางต่าง ๆ กัน วิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ และวัดความแข็งจุลภาค ผลการทดลองพบว่าโครงสร้างที่ได้ที่อุณหภูมิห้องของโลหะผสม Ti-13Zr-nNb ทุกส่วนผสม ขึ้นกับอัตราการเย็นตัว

Abstract

Titanium alloys have been extensively used in medical application. Their structures and mechanical properties could be adjusted by composition and heat treatment. The purpose of this article is to study the influence of cooling rate on microstructures and hardness of Ti-13Zr-nNb (n=5-20) alloys. In the experiment, nominal compositions of ingots were prepared by the argon arc melter. After that, samples were solution treated at a beta temperature, subsequently, quenched in various media. Crystalline structures were characterized by X-ray diffraction technique. Microstructures and microhardness were investigated. The experimental results showed that microstructures and microhardness of Ti-13Zr-nNb depended on the cooling rates.

1. คำนำ

โลหะไทเทเนียมผสมแบ่งตามโครงสร้างได้ 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ กลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นเฟสแอลฟา (α -HCP) กลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นเฟสบีต้า (β -BCC) และกลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นเฟสแอลฟาและเฟสบีต้า ($\alpha+\beta$) มีการนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น งานทางด้านอากาศยาน ด้านกีฬา อุปกรณ์ยานยนต์ และวัสดุทางการแพทย์ที่ใช้ในร่างกายมนุษย์ เป็นต้น โลหะไทเทเนียมผสมในกลุ่มเฟสบีต้า กลุ่มเฟสแอลฟาและบีต้า มีสมบัติที่เหมาะสมในงานทางการแพทย์ เนื่องจากโลหะผสมในกลุ่มนี้สามารถปรับค่ามอดูลัสให้ต่ำได้ ความเข้ากันได้ทางชีวภาพสูง ความแข็งแรงสูง และความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุทางการแพทย์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ในกลุ่มที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม กลุ่มโลหะผสมโคบอลต์และโครเมียม

โลหะผสม Ti-6Al-4V กลุ่มเฟสแอลฟาและบีต้า ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์กันอย่างกว้างขวาง ถูกใช้กันมานานจนถึงปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม เมื่อไม่นานมานี้มีรายงานว่าธาตุวานาเดียม เกิดปฏิกิริยากับร่างกายมนุษย์ได้ เนื่องจากอ็อกไซด์ของวานาเดียมมีความเป็นพิษกับเนื้อเยื่อมนุษย์ [1] ดังนั้นจึงมีการวิจัยและพัฒนาโดยการเติมธาตุชนิดอื่น ๆ ทดแทน [2] ต้องเป็นธาตุที่ไม่เคยมีรายงานความเป็นพิษ เป็นธาตุกลุ่มที่เติมเข้าไปแล้ว มีความสามารถในการเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อมนุษย์ดี อีกทั้งยังทำให้ค่ามอดูลัสต่ำลง ได้แก่ ไนโอเบียม แทนทาลัม เซอร์โคเนียม และโมลิบดีนัม [3-4] จากการวิจัยของ Hon [5] รายงานว่าการเติมไนโอเบียมในปริมาณ 14-26 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าออสติคโมดูลัสของไทเทเนียมมีค่าลดลงต่ำสุดเหลือ 60 จิกกะปาสคัล เนื่องจากมีสัดส่วนของเฟสแอลฟาสูง การเติม Nb มากกว่านี้จะทำให้ค่ามอดูลัสสูงขึ้นอีกครั้ง ซึ่งจะมีค่าสูงสุดเมื่อเติม Nb 30-34 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หากเติม Nb ในปริมาณมากกว่า 34 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้เกิดเฟสโอเมกาได้ ซึ่งเป็นเฟสที่แข็งและเปราะ

ในปี ค.ศ. 1992 บริษัท Smith & N ได้ผลิต Ti-13Zr-13Nb ซึ่งจัดเป็นไทเทเนียมเฟสปีต้าผสมสูง สามารถนำไปใช้งานด้านสัลยกรรมกระดูก [6] สิ่งหนึ่งที่สำคัญในการนำโลหะผสมไทเทเนียมเฟสปีต้าไปใช้งาน คือการพัฒนากระบวนการผลิตโดยใช้สภาวะที่เหมาะสม เพื่อให้ได้โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลตามต้องการ จึงจำเป็นต้องหาเทคนิคและกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการผลิต จากเอกสารงานวิจัยที่ผ่านมา มีข้อมูลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ แต่ไม่พบว่ามีงานวิจัยเกี่ยวกับอัตราการเย็นตัวหลังการอบของไทเทเนียมผสม Ti-Zr-Nb ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อที่จะศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงของโลหะไทเทเนียมผสม Ti-13Zr-nNb โดยที่ปริมาณธาตุผสม Nb มีค่าตั้งแต่ 5-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการอบที่อุณหภูมิปีต้า แล้วทำให้เย็นด้วยอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกัน ในการทดลองนี้ใช้ทำให้เย็นในสารตัวกลาง 3 ชนิด ได้แก่ เย็นตัวในน้ำ เย็นตัวในอากาศ และปล่อยให้เย็นตัวในเตา เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของอัตราการเย็นตัวที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรง เพื่อนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในกระบวนการอื่นต่อไป เช่น การอบบ่ม การขึ้นรูปเพื่อใช้งานทางด้านวัสดุทางการแพทย์ เป็นต้น

2. วิธีทดลอง

เตรียมอินกอตของโลหะผสมที่มีส่วนผสมของ Ti-13Zr-nNb (โดยที่ $n = 5, 10, 15$ และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ที่เหลือเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไทเทเนียม เริ่มจากการชั่งน้ำหนักของธาตุบริสุทธิ์ของแต่ละธาตุให้ได้น้ำหนักตามต้องการ ในการทดลองใช้น้ำหนักรวมของวัตถุดิบคงที่ 30 กรัมทุกส่วนผสม หลอมโดยใช้เตาอาร์คสูญญากาศภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอน ในการหลอมได้พลิกกลับขึ้นงานหลอม เพื่อหลอมซ้ำประมาณ 3-4 ครั้ง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในเบ้าหลอมทองแดงที่มีน้ำหล่อเย็น (Water-Cooled Copper Crucible) ด้วยเวลาเท่ากันก่อนนำออกจากเบ้า เพื่อควบคุมอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานให้เท่ากัน

หลังจากนั้นนำอินกอตไปทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีโดยใช้เทคนิค Energy Dispersive Spectrometer (EDS) และวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอินกอต โดยใช้เทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD) นำอินกอตที่ได้จากการหลอมมาทำการอบละลายเฟส (Solution treat) ที่อุณหภูมิอบในช่วงที่โครงสร้างเป็นเฟสปีต้า ในการทดลองนี้ใช้ 820 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 5 ชั่วโมง ทำให้เย็นตัวในตัวกลางต่างๆ ได้แก่ น้ำ อากาศ และเย็นตัวในเตา ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงธรรมดา โดยนำชิ้นงานมาขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทราย และขัดมันผงขัดอลูมิเนียมขนาด 1 และ 0.5 ไมครอนตามลำดับ กรดที่ใช้กัดผิวงานประกอบด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) เข้มข้น 40% ปริมาณ 3 มิลลิกรัม + กรดไนตริก (HNO_3) เข้มข้น 65% ปริมาณ 5 มิลลิกรัม + น้ำกลั่นปริมาณ 92 มิลลิกรัม ทดสอบความแข็งโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบจุลภาค โดยใช้เครื่องวัดความแข็งผลติโดยบริษัท Shimadzu รุ่น HVM-2000 ใช้แรงกด 300 กรัม กดค้างไว้เป็นเวลา 15 วินาที

3. ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS พบว่าส่วนผสมของอินกอตที่ได้ มีค่าแตกต่างไปจากส่วนผสมเริ่มต้นทุกส่วนผสม ดังแสดงผลในตารางที่ 1 การที่ส่วนผสมมีปริมาณธาตุแตกต่างจากเริ่มต้น พบได้โดยทั่วไปจากการหลอมโลหะด้วยระบบการอาร์ค มีการสูญเสียธาตุบางธาตุในปริมาณที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังอาจเนื่องมาจากเทคนิคการหลอม จำนวนครั้งในการพลิกคว่ำชิ้นงานแล้วหลอมซ้ำ เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดี ในการทดลองได้หลอมซ้ำกลับขึ้นงานไปมา 3-4 ครั้ง อาจไม่เพียงพอที่จะทำให้ส่วนผสมเข้ากันอย่างสม่ำเสมอ ควรหลอมซ้ำเพิ่มขึ้นอีก อย่างไรก็ตาม ในที่นี้ยังคงเรียกชื่อของโลหะผสม โดยใช้ส่วนผสมเริ่มต้นตลอดการทดลอง

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS

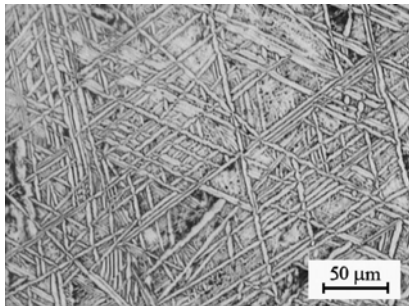
ส่วนผสมของโลหะผสมที่ต้องการ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)		
	Ti	Zr	Nb
Ti-13Zr-5Nb	83.6	12.2	4.2
Ti-13Zr-10Nb	78.2	12.7	9.1
Ti-13Zr-15Nb	72.8	12.7	14.5
Ti-13Zr-20Nb	68.6	13.8	17.6

3.1 โครงสร้างจุลภาคของงานหล่อ

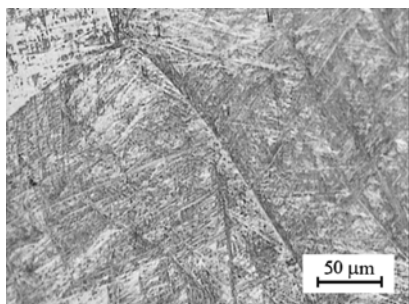
ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอินกอต ที่ได้จากการหลอมด้วยระบบอาร์ค แล้วปล่อยให้เย็นตัวในเบ้าหลอมทองแดงที่มีน้ำหล่อเย็น โดยตัดชิ้นงานอินกอตตามแนวดิ่ง เพื่อศึกษาโครงสร้างบริเวณหน้าตัดจากแนวล่างที่สัมผัสเบ้าทองแดง ถึงบริเวณผิวบนที่สัมผัสกับบรรยากาศของอินกอต Ti-13Zr-5Nb, Ti-13Zr-10Nb, Ti-13Zr-15Nb และ Ti-13Zr-20Nb พบว่ามีโครงสร้างไม่ค่อยสม่ำเสมอ ตลอดหน้าตัดชิ้นงาน มีสาเหตุมาจากอัตราการเย็นตัวบริเวณที่อินกอตสัมผัสเบ้าหลอมมีการเย็นเร็ว เนื่องจากมีน้ำหล่อเย็นใต้เบ้าหลอม ส่วนบริเวณที่ห่างจากส่วนที่สัมผัสเบ้าจึงเย็นตัวช้ากว่า รวมทั้งอาจเป็นผลจากส่วนผสมเข้ากันไม่ดีก็ได้ จึงได้เลือกถ่ายรูปเฉพาะบริเวณกลางชิ้นงานทั้งหมด แสดงในรูปที่ 1 (ก)-(ง) ตามลำดับ

พบว่าโครงสร้างของอินกอต Ti-13Zr-5Nb มีเฟสปีต้าที่เห็นเป็นสีดำ และเฟสแอลฟาที่เห็นเป็นสีขาวมีลักษณะเป็นรูปคล้ายเข็มหรือขนนก (Acicular Shape) เรียงสานไขว้กันเหมือนตะกร้าสาน ที่นิยมเรียกกันว่า Basket Weave มีลักษณะโครงสร้างเป็น Widmanstätten ซึ่งเกิดขึ้นได้ทั่วไปในไทเทเนียมผสมกลุ่มแอลฟา ซึ่งเกิดจากอัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว จากอุณหภูมิบริเวณที่เป็นเฟสปีต้า ส่วนโครงสร้างจุลภาคของอินกอต Ti-13Zr-10Nb และ Ti-13Zr-15Nb พบว่าเฟสแอลฟามีลักษณะเป็นเส้นที่ละเอียดมากขึ้น ดังรูปที่ 1 (ข)-(ค) ตามลำดับ โครงสร้างจุลภาคของอินกอต Ti-13Zr-20Nb มีเฟสแอลฟาชัดเจนยิ่งขึ้น เห็นได้ชัด พบเกรนของเฟสปีต้ามากขึ้น

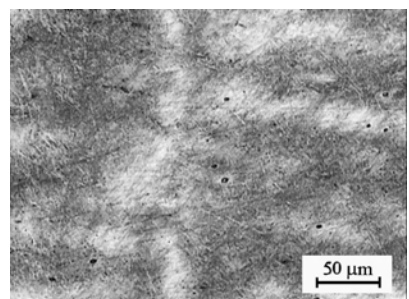
เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมไทเทเนียมกลุ่มนี้ แล้ว จะเห็นว่าปริมาณธาตุไนโอเบียม มีผลต่อปริมาณและขนาดของ เฟสแอลฟา อย่างเห็นได้ชัดจากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงธรรมดา กล่าวคือปริมาณธาตุไนโอเบียมเพิ่มขึ้น ทำให้ขนาดของเฟสแอลฟามีลักษณะเป็นรูปเข็มละเอียดขึ้น รวมทั้งปริมาณเฟสบีต้าเพิ่มขึ้น



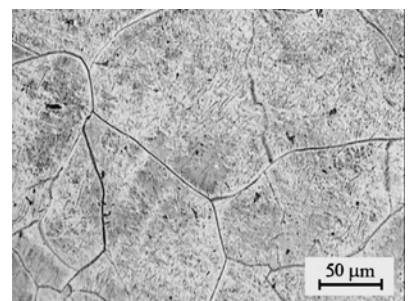
(น) Ti-13Zr-5Nb



(ข) Ti-13Zr-10Nb



(ค) Ti-13Zr-15Nb

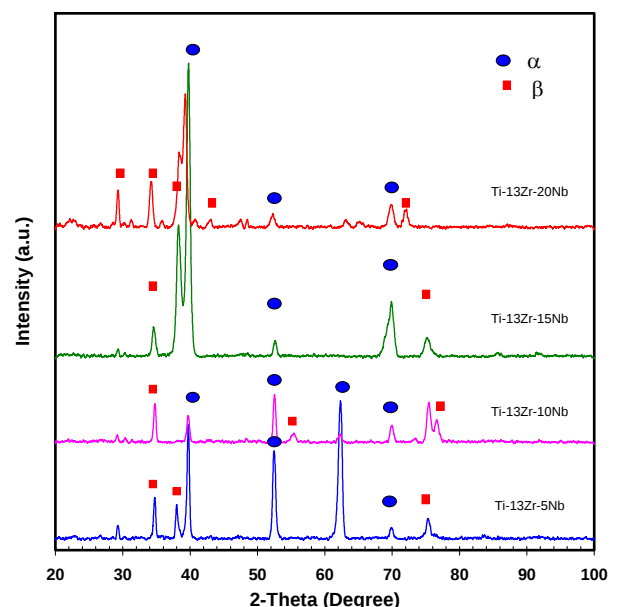


(ง) Ti-13Zr-20Nb

รูปที่ 1 โครงสร้างจุลภาคของอินกอต Ti-13Zr-nNb เมื่อ (n = 5, 10, 15, 20)

3.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของชิ้นงานในสภาพหล่อ

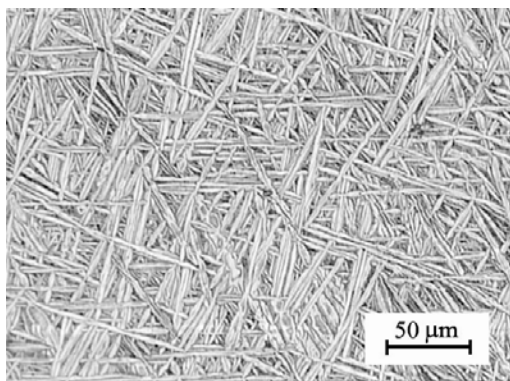
ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของชิ้นงานในสภาพหล่อ ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เรย์ของชิ้นงาน Ti-13Zr-nNb เมื่อ n = 5-20 แสดงในรูปที่ 2 พบว่าโครงสร้างผลึกของชิ้นงานทั้งหมด มีโครงสร้างผลึกเป็น HCP และ BCC เฟสแอลฟาของโลหะไทเทเนียมมีโครงสร้างผลึกเป็น HCP ส่วนเฟสบีต้ามีโครงสร้างผลึกเป็น BCC [7] ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Collings [5, 8] ทั้งนี้เนื่องจากว่าธาตุไนโอเบียมเป็นธาตุผสม ที่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับเฟสบีต้า การเติม Nb ในไทเทเนียมบริสุทธิ์ ต้องมากกว่า 36 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำให้เกิดเป็นเฟสบีต้าทั้งหมดที่อุณหภูมิห้อง ส่วนธาตุเซอร์โคเนียม จัดเป็นธาตุที่เป็นกลางต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันว่าโครงสร้างงานหล่อที่ได้ทั้งหมดเป็นเฟสผสมของเฟส HCP และ BCC



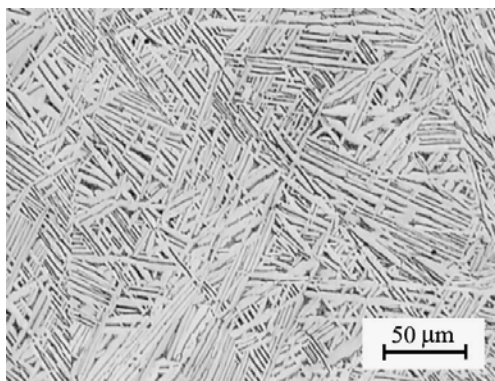
รูปที่ 2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนโลหะผสม Ti-13Zr-nNb หลังการหล่อ

3.5 โครงสร้างจุลภาคหลังการอบละลายเฟสแล้วทำให้เย็นตัว

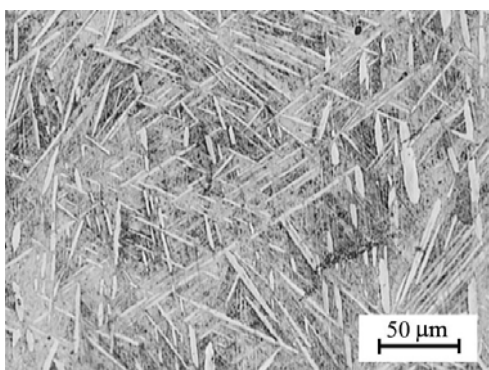
หลังจากนำอินกอตของโลหะผสมไทเทเนียม Ti-13Zr-5Nb มาทำการอบละลายเฟสที่ 820 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในเตา ในอากาศ และในน้ำ โครงสร้างจุลภาคแสดงในรูปที่ 3 (ก)-(ค) ตามลำดับ พบว่าโครงสร้างของชิ้นงานหลังเย็นตัวในเตา โครงสร้างมีลักษณะเป็น Widmanstätten คล้ายกับที่พบในอินกอต เฟสแอลฟามีลักษณะเป็นแผ่นขนาดค่อนข้างใหญ่ เมื่อเทียบกับโครงสร้างของชิ้นงานที่เย็นในอากาศและในน้ำ เนื่องจากการเย็นตัวในเตาชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวช้ากว่าในอากาศและในน้ำ ดังนั้นโครงสร้างของชิ้นงานหลังเย็นตัวในอากาศและในน้ำ จึงละเอียดมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเห็น ลักษณะของเฟสของแอลฟาที่เป็นสีขาว) มีขนาดเล็กและปริมาณลดลง ส่วนปริมาณของเฟสบีต้ามีเพิ่มขึ้น



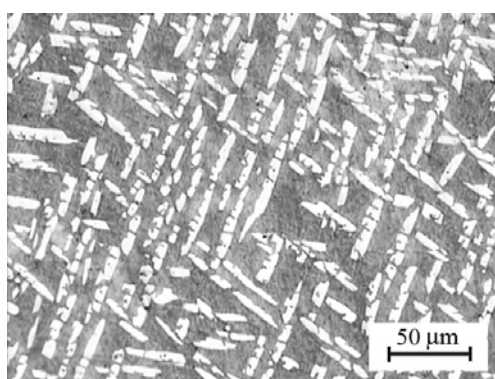
(ก) เย็นตัวในเตา



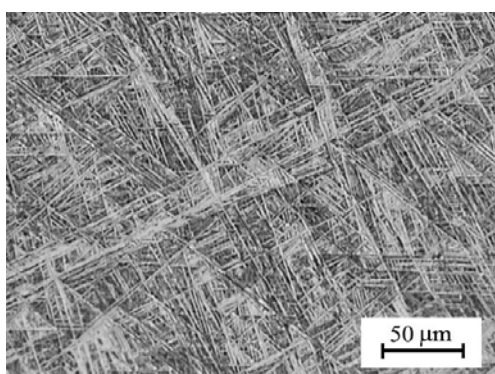
(ง) เย็นตัวในเตา



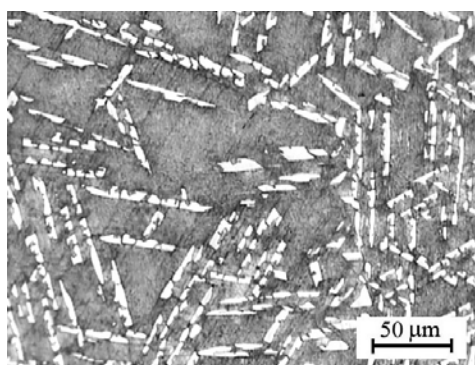
(ข) เย็นตัวในอากาศ



(ช) เย็นตัวในอากาศ



(ค) เย็นตัวในน้ำ



(ค) เย็นตัวในน้ำ

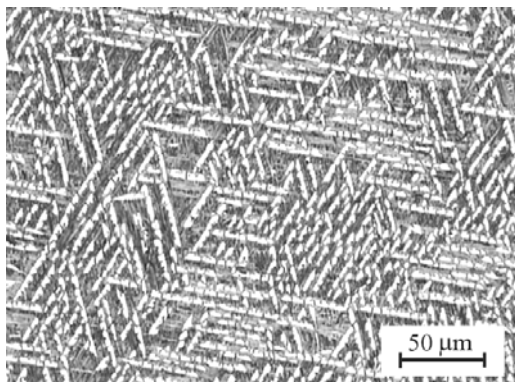
รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคของอินกอต Ti-13Zr-5Nb ที่ผ่านการอบละลายเฟส แล้วเย็นตัวในตัวอย่างที่ต่างกัน

รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคของอินกอต Ti-13Zr-10Nb ที่ผ่านการอบละลายเฟส แล้วเย็นตัวในตัวอย่างที่ต่างกัน

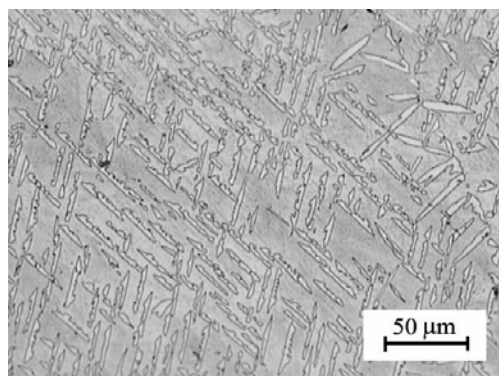
เมื่อเพิ่มปริมาณไนโอเบียมขึ้นเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่าโครงสร้างของชิ้นงาน Ti-13Zr-10Nb หลังอบละลายเฟสที่ 820 องศาเซลเซียส แล้วปล่อยให้เย็นตัวในเตา ในอากาศ และในน้ำ แสดงในรูปที่ 4 (ก)-(ค) ตามลำดับ จะเห็นว่าโครงสร้างของชิ้นงานที่เย็นตัวช้า ๆ ในเตายังคงมีลักษณะเป็น Widmanstätten คล้ายกันกับโครงสร้างของ Ti-13Zr-5Nb ที่เย็นตัวในเตา แต่เมื่อชิ้นงานเย็นตัวในอากาศและในน้ำซึ่งมีอัตราการเย็นตัวเพิ่มขึ้น พบว่าโครงสร้างของแอลฟา (สีขาว) มีปริมาณลดลง ปริมาณเฟสบีตา (โครงสร้างพื้น) มีเพิ่มขึ้น แสดงว่าอัตราการเย็นตัวมีผลต่อปริมาณของเฟส

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Ti-13Zr-15Nb หลังอบละลายเฟสที่ 820 องศาเซลเซียส แล้วปล่อยให้เย็นตัวในเตา ในอากาศ และในน้ำ แสดงในรูปที่ 5 (ก)-(ค) ตามลำดับ พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ปล่อยให้เย็นตัวในเตา มีโครงสร้างลักษณะ Widmanstätten ปริมาณและขนาดลดลงอย่างมาก ต้องใช้กล้องกำลังขยายสูงขึ้นจึงจะเห็นได้ชัดขึ้น เมื่อชิ้นงานเย็นตัวในอากาศและในน้ำลักษณะของเฟสแอลฟาส่วนที่เป็นสีขาวเป็นแผ่นไม่ต่อเนื่อง โครงสร้างของเฟสบีตา มีปริมาณมากขึ้น แสดงว่าปริมาณของไนโอเบียม 15 เปอร์เซ็นต์ มีมากพอที่จะทำให้เห็นว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้ชัดเจนขึ้น กว่าที่เติมไนโอเบียมเพียง 10 เปอร์เซ็นต์

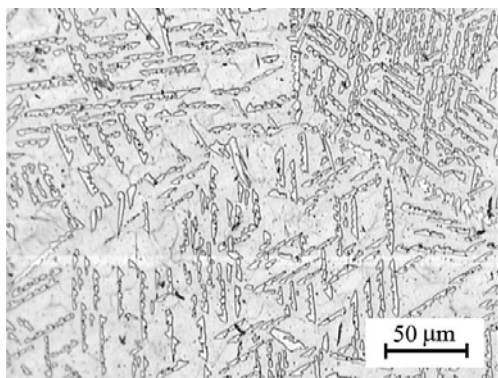
โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Ti-13Zr-20Nb หลังอบละลายเฟส แล้วปล่อยให้เย็นตัวในเตา ในอากาศ และในน้ำ แสดงในรูปที่ 6 (ก)-(ค) ตามลำดับ พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ปล่อยให้เย็นตัวในเตา ไม่มีโครงสร้างลักษณะของ Widmanstätten อย่างที่พบในโครงสร้างของชิ้นงานที่มีส่วนผสมของไนโอเบียม 5-15 เปอร์เซ็นต์ โครงสร้างเป็นเฟสปี้ด้ามากขึ้น และเมื่อชิ้นงานเย็นตัวในอากาศและในน้ำ โครงสร้างจุลภาคส่วนใหญ่เป็นเฟสปี้ด้า แสดงว่าการเติมไนโอเบียมปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ช่วยให้เกิดเฟสปี้ด้าได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ยังคงมีเฟสแอลฟากระจายในโครงสร้าง



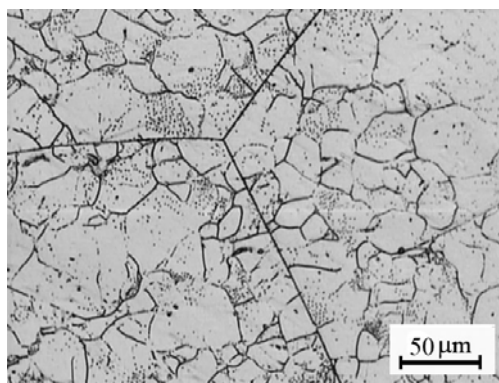
(ก) เย็นตัวในเตา



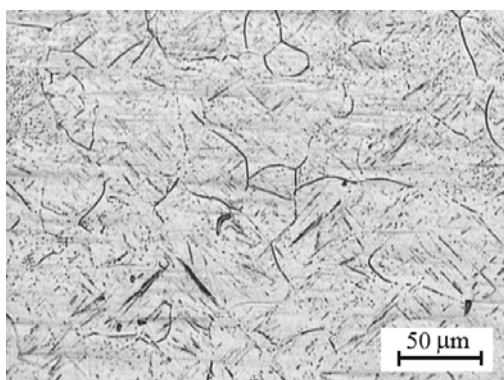
(ก) เย็นตัวในเตา



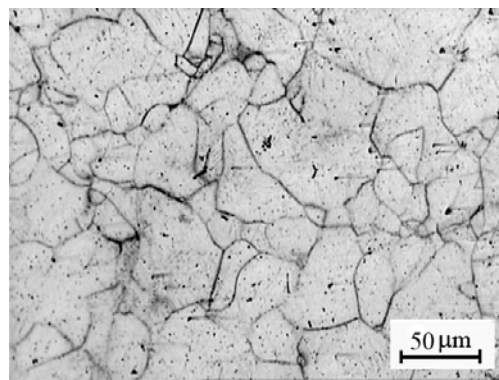
(ข) เย็นตัวในอากาศ



(ข) เย็นตัวในอากาศ



(ค) เย็นตัวในน้ำ



(ค) เย็นตัวในน้ำ

รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคของอินกอต Ti-13Zr-15Nb ที่ผ่านการอบละลายเฟส แล้วเย็นตัวในตัวอย่างที่ต่างกัน

รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของอินกอต Ti-13Zr-20Nb ที่ผ่านการอบละลายเฟส แล้วเย็นตัวในตัวอย่างที่ต่างกัน

3.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงของอินกอตและชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายในสารตัวกลางต่าง ๆ

ผลการวัดความแข็งแรงของอินกอต ที่เป็นงานหล่อของโลหะผสม Ti-13Zr-nNb เมื่อ $n = 5-20$ โดยวัดความแข็งแรงชิ้นงานละ 10 จุด บริเวณกลางชิ้นงานทั้งหมด พบว่าความแข็งแรงเฉลี่ยของ Ti-13Zr-5Nb มีค่า 245 วิกเกอร์ ความแข็งแรงเฉลี่ยของอินกอตมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 258, 273 และ 321 วิกเกอร์ เมื่อปริมาณไนโอเบียม เพิ่มขึ้นเป็น 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปริมาณไนโอเบียมมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงของงานหล่อ

ผลการวัดความแข็งแรงของชิ้นงาน ทุกส่วนผสมหลังการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในเตา ในอากาศ และในน้ำ แสดงในตารางที่ 2 พบว่าความแข็งแรงของชิ้นงาน Ti-13Zr-5Nb เมื่อผ่านการเย็นตัวในเตามีค่าสูงสุดวัดได้ 289 วิกเกอร์ แต่เมื่อชิ้นงานเย็นตัวในอากาศและเย็นในน้ำ ความแข็งแรงของชิ้นงานมีค่าลดลงเป็น 276 และ 248 วิกเกอร์ตามลำดับ จะเห็นได้ชัดเลยว่า ความแข็งแรงของชิ้นงานที่วัดได้ขึ้นกับอัตราการเย็นตัวของชิ้นงาน ซึ่งผลของความแข็งแรงนี้สอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคที่ได้กล่าวไปแล้ว โดยทั่วไปการเย็นตัวในน้ำมีอัตราการเย็นตัวสูงสุดเมื่อเทียบกับการเย็นตัวในอากาศและเตา ตามลำดับ การเย็นตัวสูงขึ้นทำให้เกิดเฟสบีต้ามากขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปความแข็งแรงของไทเทเนียมเฟสแอลฟาที่มีโครงสร้างผลึกเป็น HCP และมีความแข็งแรงสูงกว่าไทเทเนียมเฟสบีต้า จึงส่งผลให้ความแข็งแรงให้ลดลง ทำนองเดียวกัน ค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน Ti-13Zr-10Nb, Ti-13Zr-15Nb และ Ti-13Zr-20Nb เมื่อผ่านการเย็นตัวในเตาให้ความแข็งแรงของชิ้นงานสูงสุดทุกส่วนผสม แต่เมื่อเย็นตัวในอากาศและเย็นในน้ำ ความแข็งแรงมีค่าต่ำลงมีผลมาจากปริมาณเฟสบีต้าที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จึงไม่ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณเฟสด้วย Image Analyzer

ตารางที่ 2 ความแข็งแรงของอินกอต Ti-13Zr-nNb เมื่อ (n= 5, 10, 15, 20) หลังการทำให้เย็นตัวในตัวกลางต่าง ๆ

โลหะผสม	ความแข็งแรง (วิกเกอร์)			
	งานหล่อ	เย็นในน้ำ	เย็นในอากาศ	เย็นในเตา
Ti-13Zr- 5Nb	245	248	276	289
Ti-13Zr-10Nb	258	303	329	392
Ti-13Zr-15Nb	273	353	373	406
Ti-13Zr-20Nb	321	464	468	480

4. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

โลหะผสมไทเทเนียม Ti-13Zr-nNb เมื่อ (n= 5, 10, 15, 20) หลังการทำการรวมวิธีทางความร้อน ด้วยอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกัน พบว่าลักษณะโครงสร้างและความแข็งแรงของชิ้นงานที่วัดได้ มีค่าแตกต่างกันเนื่องจากโลหะผสม Ti-nZr เมื่อ n=2-12 เป็นไทเทเนียมเฟสแอลฟา โครงสร้างผลึกเป็น HCP [8, 9] การเติม Nb ซึ่งเป็นธาตุที่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้บีต้า จากผลการทดลองได้เติมไนโอเบียมสูงสุด 20 เปอร์เซ็นต์ ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงให้โครงสร้างเป็นเฟสบีต้าทั้งหมดที่อุณหภูมิห้องได้ จากแผนภาพสมดุลของระบบสองธาตุของ Ti-Nb พบว่าที่ส่วนผสมของ Ti-20Nb เมื่อปล่อยให้เย็นตัวช้า ๆ จะได้โครงสร้างเป็นแอลฟาและบีต้า หากเติมไนโอเบียมปริมาณสูงขึ้น อีกจนใกล้ส่วนผสมของเฟสบีต้า โครงสร้างหลังการเย็นตัวที่มีอัตราการเย็นตัวสูง เป็นไปได้ที่จะได้โครงสร้างเป็นบีต้าที่เสถียรภาพ (Metastable β) หรือ บีต้าที่เสถียรภาพ (Stable β) ที่อุณหภูมิห้อง

5. สรุปผลการทดลอง

5.1 อัตราการเย็นตัวของโลหะผสม Ti-13Zr-nNb (n = 5-20) หลังอบที่อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียส มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรง โครงสร้างที่ได้เป็นเฟสผสมของแอลฟาและบีต้าทั้งหมด เมื่ออัตราการเย็นตัวสูงขึ้นทำให้ความแข็งแรงลดลง เนื่องจากปริมาณของเฟสบีต้าเพิ่มมากขึ้น ไม่มีส่วนผสมใดเกิดเป็นเฟสบีต้าทั้งหมดที่อุณหภูมิห้อง

5.2 ปริมาณธาตุไนโอเบียมที่เติมใน Ti-13Zr-nNb มีผลทำให้ความแข็งแรงของงานหล่อสูงขึ้นเมื่อเติมปริมาณสูงขึ้น และมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค เมื่อเติมไนโอเบียมปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ เกิดเป็นโครงสร้าง Basket Weave ซึ่งเป็นเฟสผสมของแอลฟาและบีต้า เมื่อเติมไนโอเบียมปริมาณสูงขึ้น ทำให้เกิดเฟสบีต้ามากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ทนวิชัย มจร. และทุนอุดหนุนงานวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติปี 2549-2550 ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- Polmear I. J., 1989, Light Alloys Metallurgy of the Light Metals, 2nd edition, Edward Arnold, London, pp. 243-244.
- Banerjee S, and Naik U. M., 1996, Plastic instability in an omega forming Ti-15Mo alloy, Acta. Mater., Vol. 44, No. 9, pp. 3667-3677.
- Davidson J.A., Mishra, A.K. Kovasc, P., Poggie, R.A. 1994, New surface hardened, low-modulus, corrosion-resistant Ti-13Nb-13Zr alloy for total hip arthroplasty, Bio-Medical Materials and Engineering 4, pp. 231- 243.
- Niinomi M., 1998, Mechanical properties of biomedical titanium alloys, Materials Science and Engineering A 243, 231-236.
- Hon Y.H., Wang J.Y., Pan Y.-N., 2003, Composition/Phase Structure and Properties of Titanium-Niobium Alloys, Materials Transaction, Vol. 44, pp. 23842390.
- Vassel A., Fylon D, Combers Y.,(eds), 1993, Beta titanium alloys, Editions de la Revue de Metallurgie, No. d series 8.
- Porter. D. A. Easterling. K.E., 1992, Chapman and Hall, London, p. 369.
- Collings, E.W., 1994, Materials Properties Handbook: Titanium Alloys, ASM, Materials Park, USA, p. 1.
- S. Rojananan, 2007, Influence of Zr content on mechanical properties of Ti alloys for biomedical applications, in International Conference on Mining, Materials, and Petroleum Engineering: The Frontiers of Technology (ICFT), on May 10-12, 2007, Phuket Graceland Resort & Spa, Phuket, Thailand.