

การศึกษาอิทธิพลของความเร็วหมุนของโรลเลอร์ต่อคุณสมบัติของ
โลหะผสมจำรูป Ti-Ni-Cu ผลิตโดยวิธี Melt-Spinning
Rotation Speed Dependence of Properties of
Ti-Ni-Cu Shape Memory Alloys Fabricated by Melt-Spinning Technique

อนรรฆ ชันชะชวณะ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
91 ถนนพระยาอุทิศ เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
โทร 0-2470-9116 โทรสาร 0-2470-9111 E-mail: anak.kha@kmutt.ac.th

Anak Khantachawana

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology
Bangkok 10140 , Thailand

Tel: 0-2470-9116 Fax: 0-2470-9111 E-mail: anak.kha@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

เนื่องจากโลหะผสมจำรูปมีคุณสมบัติคืนรูปได้ในปริมาณสูง และแรงในการคืนรูปสูงมาก จึงได้กลายเป็นหนึ่งในวัสดุที่มีหน้าที่เฉพาะ (Function materials) ชนิดหนึ่งและได้ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในหลายสาขา โดยเฉพาะทางด้านของ MEMS หรือ Microactuator ซึ่งต้องการต้นกำเนิดแรงที่ให้แรงมาก มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว แต่มีขนาดเล็ก ทำให้การผลิตโลหะจำรูปที่มีขนาดเล็กมีความจำเป็นสูงซึ่งงานวิจัยนี้จึงได้นำเทคนิคการหลอมเหลวสปีนนิ่ง (Melt-spinning) มาใช้ในการผลิตชิ้นงานซึ่งเป็นโลหะผสม Ti-25Ni-25Cu(at%) และได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของความเร็วหมุนของโรลเลอร์ที่ใช้ผลิตชิ้นงานโดยเปลี่ยนความเร็วในช่วงระหว่าง 2500rpm ถึง 7500rpm แล้วอบที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อที่จะได้โครงสร้างจุลภาคที่ต่างกัน หลังจากการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เช่นอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส พฤติกรรมการเปลี่ยนรูป โครงสร้างจุลภาค ฯลฯ แล้ว ทำให้ทราบว่า ความเร็วหมุนของโรลเลอร์มีผลต่อโครงสร้างภายในและคุณสมบัติการเปลี่ยนเฟสอย่างเห็นได้ชัด เช่น กรณีที่ความเร็วหมุนของโรลเลอร์น้อยกว่า 2500 rpm โครงสร้างภายในของชิ้นงานที่ได้จะเป็นโครงสร้างผลึก แต่ถ้าความเร็วหมุนของโรลเลอร์มากกว่า 2500 rpm จะสามารถสร้างชิ้นงานที่มีโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึก (Amorphous) ได้ ซึ่งมีค่าความเค้นแตกหักสูงถึง 1.8GPa และเมื่อได้นำชิ้นงานที่ได้เข้ากระบวนการจำรูปโดยการอบที่อุณหภูมิ 873K เป็นเวลา 1ชม. ผลที่ได้คือชิ้นงานจะกลายเป็นโครงสร้างผลึกที่มีขนาดของเกรนที่ละเอียดถึงประมาณ 20-30nm ส่งผลให้ค่าความเค้นการลื่นไถลวิกฤติสูงขึ้น ซึ่งทำให้สามารถแสดงคุณสมบัติของโลหะจำรูปได้อย่างสมบูรณ์แบบ แต่เมื่อเพิ่ม

อุณหภูมิในการอบให้สูงขึ้นจนถึง 1073K แล้วจะได้คุณสมบัติของชิ้นงานใกล้เคียงกัน โดยคุณสมบัติจะไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วหมุนของโรลเลอร์ ซึ่งกรณีนี้สามารถอธิบายได้โดยลักษณะความอึดตัวของโครงสร้างภายในที่ได้จากการอบที่อุณหภูมิสูง

Abstract

Shape memory alloys (SMAs) are one of function materials which can generate a large recovery strain and force. Thus, their applications are so wide in any fields such as MEMS and microactuators. In order to fabricate a small specimen, the melt-spinning technique was used in the present study. Ti-25Ni-25Cu(at%) SMA ribbons were fabricated under the rotation speed varied from 2500 to 7500rpm. The heat-treatments were carried out in order to obtain different microstructures. The properties of the ribbons, i.e. transformation temperatures, deformation behavior and microstructures were investigated. The effect of rotation speed was clearly seen when the heat-treatment temperature is low. It was found that the as-spun ribbons formed crystalline structure when rotation speed was lower than 2500rpm. On the other hand, amorphous structure with fracture stress over 1.8GPa was formed in the as-spun ribbon with the rotation speed above 2500rpm. After heat-treatment at 873K for 1h, the crystallization was taken place and very fine grains around 20-30nm were confirmed uniformly. This results in a high critical

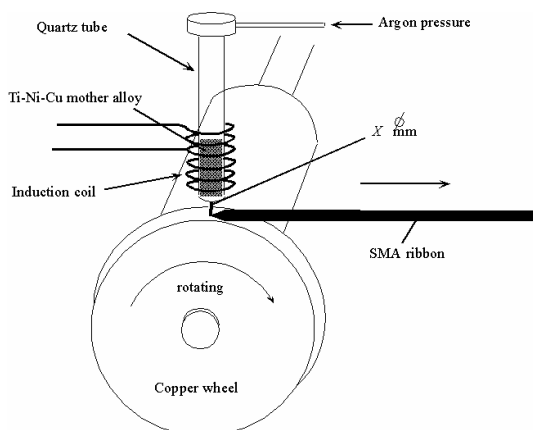
stress for slip and excellent shape memory characteristics. It is also found that the effect of rotation speed becomes very small after heat-treatment at 1073K due to the growth of grains and the saturation of microstructures.

1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีการนำเอาโลหะผสมจำรูป (SMA) มาใช้กันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นทางด้านอุตสาหกรรม ด้านการแพทย์ และโดยเฉพาะทางด้านระบบไมโครไฟฟ้ากลศาสตร์ (MEMS) [1-4] เนื่องจากโลหะผสมจำรูปเป็นวัสดุที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานกลได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง โดยอาศัยกลไกการเปลี่ยนเฟสของโลหะที่เรียกว่า การเปลี่ยนเฟสมาร์เทนไซต์ และเนื่องจากวัสดุนี้เป็นตัวต้นกำเนิดในตัว จึงสามารถนำมาตัดแปลงออกแบบอุปกรณ์ต่างๆให้มีขนาดเล็กกระทัดรัดได้ ในบรรดาโลหะผสมจำรูปที่ใช้ในปัจจุบันนี้จะเห็นได้ว่าโลหะผสม Ti-Ni จะเป็นที่ยอมรับมากที่สุดเนื่องจากมีแรงคืนรูปและปริมาณการคืนรูป (Shape recovery strain) สูง และมีคุณสมบัติที่คงทน [5-6] นอกจากนี้การเติมธาตุที่สามลงไปโลหะผสมจำรูป Ti-Ni ก็จะได้คุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ในบรรดาธาตุที่สามที่เติมลงไปนั้นCuเป็นธาตุที่มีคุณสมบัติที่น่าสนใจมาก กล่าวคือ เมื่อเติมCuเข้าไปแทนที่ Ni ใน Ti-Ni แล้ว

1. จะสามารถแก้ไขปัญหาคความอ่อนไหวของอุณหภูมิเปลี่ยนเฟสต่อส่วนผสมของโลหะได้ ทำให้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้ง่ายขึ้น
2. สามารถลดช่วงกว้างของการเปลี่ยนเฟส (Transformation hysteresis) ให้เล็กลงได้มากทำให้การสูญเสียความร้อนและการระบายความร้อนทำได้ดีขึ้น เป็นการเพิ่มอัตราการตอบสนองของไมโครแมชชีน และ
3. สามารถลดต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตเนื่องจาก Cu มีราคาถูก [7-8]

อย่างไรก็ตามปัญหาสำคัญที่พบในการผลิตโลหะผสมจำรูป Ti-Ni-Cu นั้นก็คือการขึ้นรูปที่ทำได้ยาก เนื่องจากเมื่อเติมCuเข้าไปเกิน 10at%แล้วจะทำให้วัสดุมีคุณสมบัติประาะ วิธีการขึ้นรูปทั่วไปในปัจจุบันนี้ เช่น การรีดแผ่น มีความสามารถรีดชิ้นงานได้ความหนาจำกัดประมาณ 100 μ m หรือต่ำกว่าขึ้นอยู่กับส่วนผสมของโลหะผสม



รูปที่ 1 รูปจำลองแสดงการทำงานของเครื่อง melt-spinning machine

งานวิจัยในครั้งนี้จึงได้นำวิธีหลอมเหลวสปีนนิ่งมาผลิตชิ้นงาน ซึ่งวิธีนี้สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความหนาประมาณ 15 μ m ได้โดยไม่มีปัญหาเกี่ยวกับส่วนผสมของโลหะและ สามารถผลิตชิ้นงานได้ปริมาณมากในเวลาอันสั้น เป็นกรรมวิธีการผลิตที่ง่ายและประหยัด นอกจากนี้โลหะผสมจำรูปที่ไดยังมีตะกอนเฟสที่ไม่สมดุล (Nonequilibrium precipitate) [9] เกิดขึ้นในโครงสร้างด้วยซึ่งไม่สามารถสร้างได้ด้วยวิธีทั่วไป ส่งผลทำให้ได้ชิ้นงานคุณสมบัติที่ดี เช่น มีความเค้นลื่นไถลวิกฤติ (Critical stress for slip) และ ปริมาณการคืนรูป (Recovery strain) สูงกว่าชิ้นงานทั่วไป

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือการศึกษาอิทธิพลของความเร็วหมุนของโรลเลอร์ ซึ่งเป็นแพแเตอร์ที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตที่มีต่อคุณสมบัติทางกล คุณสมบัติการจำรูปและโครงสร้างภายในของชิ้นงาน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการผลิตโลหะผสมจำรูปที่มีประสิทธิภาพสูง

2. ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในการหลอมอินกอตคือ 99.9%Ti 99.99%Ni และ 99.99%Cu โลหะผสม Ti-25Ni-25Cu(at%) ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เตาหลอมแบบอาร์คในบรรยากาศอาร์กอน การหลอมโลหะทำในเตาทั้งหมด 6 ครั้งโดยมีการกลับด้านของอินกอตก่อนทุกครั้งที่จะหลอมเพื่อให้ส่วนผสมของโลหะเข้ากันดี หลังจากหลอมอินกอตแล้ว ก็นำอินกอตที่ได้ไปทำการอบการโฮโมจิไนส์ ที่อุณหภูมิ 1173K เป็นเวลา 10 ชม. ในบรรยากาศอาร์กอนตามด้วยชุบน้ำ เมื่อเสร็จกระบวนการนี้แล้วนำอินกอตที่ได้มาตัดเป็นชิ้นเล็กๆโดยใช้เครื่องตัดลวดสปาร์ก สำหรับการหลอมเหลวสปีนนิ่งทำได้โดยใช้เครื่องหลอมเหลวสปีนนิ่งชนิดโรลเลอร์เดี่ยว รูปจำลองแสดงการทำงานของเครื่องนี้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 1 อินกอตที่เตรียมไว้จะถูกนำใส่ลงในหลอดแก้วทนไฟซึ่งจะรูไว้ด้านล่าง โดยรูมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4mm หลังจากนั้นได้ทำการดูดสูญญากาศของระบบถึง 3×10^{-6} Torr แล้วปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าไปเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน จากนั้นจึงทำการหลอมชิ้นงานในหลอดแก้วด้วย อินดักชันคอยล์ เมื่ออินกอตกลายเป็นของเหลวก็จะถูกฉีดออกมาจากหลอดแก้วด้วยก๊าซอาร์กอนแรงดัน 0.18MPa โดยนำโลหะจะออกมาปะทะกับโรลเลอร์ทองแดงที่หมุนด้วยความเร็วสูง โดยความเร็วหมุนของโรลเลอร์ได้ถูกเปลี่ยนอยู่ในช่วงระหว่าง 1000rpm ถึง ลักษณะรูปร่างเป็นริบบิ้น ความกว้างประมาณ 1mm และความหนาประมาณ 15-30 μ m

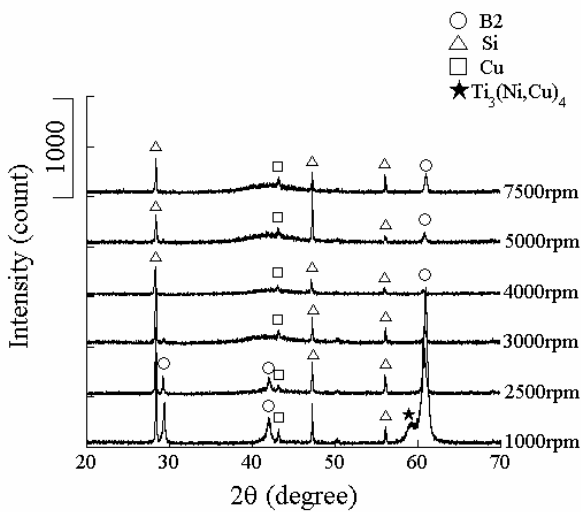
ชิ้นงานที่ได้จะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิต่างๆ ช่วงระหว่าง 773K ถึง 1073K เป็นเวลา 1 ชม. เพื่อทดลองศึกษาคุณสมบัติดังต่อไปนี้ ตรวจสอบอุณหภูมิเปลี่ยนเฟสโดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) โดยอัตราการเร่งและลดอุณหภูมิอยู่ที่ 10K/min พิจารณาวิเคราะห์เฟสต่างๆในโครงสร้างภายในโดยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) สำหรับคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติจำรูปถูกทดสอบโดยดึงที่อุณหภูมิต่างๆและทดสอบเทอร์มอลไซเคิลที่โหลดคงที่ (Thermal cycling test under constant stresses) ตรวจสอบโครงสร้างภายในโดยใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบทรานสมิSSION (Transmission Electron Microscope; TEM)



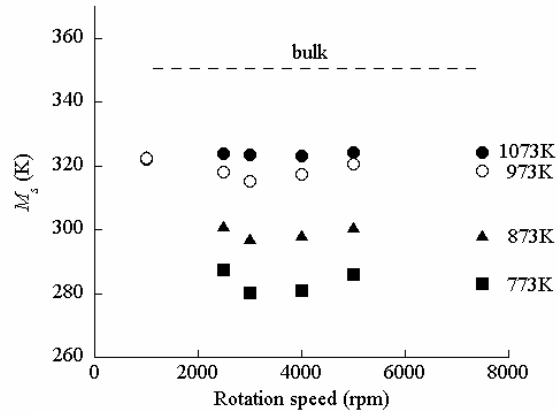
รูปที่ 2 รูปถ่ายแสดงตัวอย่างชิ้นงาน SMA ริปบิ้น ที่ผลิตด้วยความเร็วหมุนโรลเลอร์ 4000rpm

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

เพื่อเป็นการแสดงลักษณะริปบิ้นโลหะผสมจำรูปที่ผลิตได้ รูปที่ 2 แสดงรูปถ่ายของชิ้นงานที่ผลิตด้วยความเร็วหมุนของโรลเลอร์เท่ากับ 4000rpm รูปที่ 3 แสดง XRD profile ของริปบิ้นที่ผลิตด้วยความเร็วหมุนของโรลเลอร์ต่างๆกันคือ 1000, 2500, 3000, 5000 และ 7500rpm ตามลำดับ การทดลองทำที่ 373K ในที่นี้ peak จากทองแดงและซิลิคอนมาจากแท่นทองแดงสำหรับติดชิ้นงาน และจากชิ้นงานมาตรฐานตามลำดับ ที่อุณหภูมิทดสอบ 373K นั้นชิ้นงานจะอยู่ในสภาวะเฟสที่เรียกว่า parent phase หรือโครงสร้างลูกบาศก์ที่เรียกว่า B2 จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าเมื่อความเร็วหมุนของโรลเลอร์มีค่าต่ำคือ 1000 และ 2500rpm นั้น peak ของโครงสร้าง B2 ที่ได้แสดงถึงการมีโครงสร้างผลึก (crystalline) ทั้งหมดและในขณะที่ความเร็วหมุนของโรลเลอร์มีค่าสูงกว่า 2500rpm นั้นจะสังเกตว่า peak ของโครงสร้าง B2 ที่ได้จะมีลักษณะเล็กมากและมีฐานที่แผ่ขยายออกไปกว้างมากนั้นแสดงถึงการเป็นโลหะที่ไม่มีโครงสร้างผลึกหรือที่เรียกว่า amorphous เพราะฉะนั้นการเปลี่ยนความเร็วหมุนของโรลเลอร์ จึงมีผลโดยตรงต่อโครงสร้างของชิ้นงาน สาเหตุที่มีความแตกต่าง สามารถอธิบายได้โดยความเร็วในการลดอุณหภูมิที่ต่างกัน เมื่อความเร็วหมุนของโรลเลอร์มีค่าต่ำ ปริมาณของน้ำโลหะที่สัมผัสกับผิวของโรลเลอร์ในหนึ่งหน่วยเวลาจะมีค่าสูงมากขึ้นทำให้อัตราเร็วในการลดอุณหภูมิต่างๆ เนื้อโลหะ



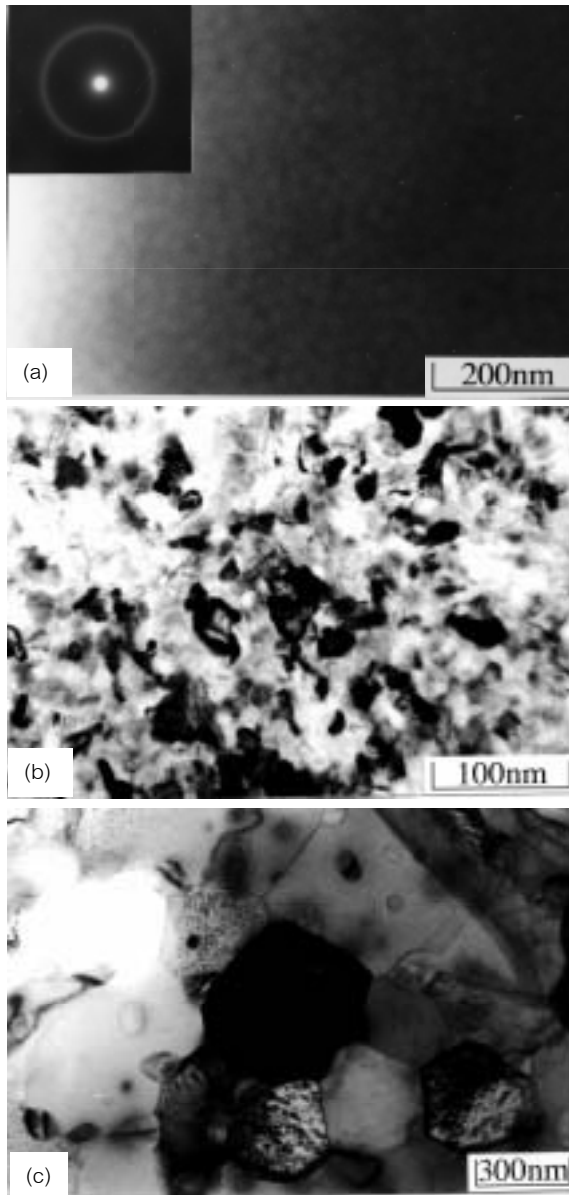
รูปที่ 3 XRD profile ของ SMA ริปบิ้นที่ผลิตด้วยความเร็วหมุนโรลเลอร์ต่างๆกัน โดยไม่ได้ผ่านการอบ



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ M_y กับความเร็วหมุนของโรลเลอร์ที่อุณหภูมิอบต่างๆ

ที่ถูกผสมกันเป็นของเหลวจึงมีเวลาเพียงพอในการสร้างโครงสร้างผลึกในระหว่างกระบวนการแข็งตัว ในขณะที่เดียวกันถ้าความเร็วหมุนของโรลเลอร์มีค่าสูงเกินระดับหนึ่ง อัตราเร็วในการลดอุณหภูมิจะมีค่ามากขึ้น จนไม่มีเวลาเพียงพอในการสร้างโครงสร้างผลึกในระหว่างกระบวนการแข็งตัว จึงเกิดเป็น amorphous และเมื่อนำ amorphous ที่ได้มาดึงที่อุณหภูมิห้องทำให้ทราบว่ามีค่าความเค้นคราก (Yield Stress) และความเค้นแตกหัก (Fracture stress) เท่ากับ 1.35GPa และ 1.8GPa ตามลำดับแสดงให้เห็นว่ามีความแข็งแรงสูงมาก

หลังจากที่ได้ทราบว่าชิ้นงานที่ผลิตได้นั้นมีสองประเภท เพื่อเป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติของโลหะผสมจำรูปจึงนำชิ้นงานที่ได้มาอบที่อุณหภูมิ 773K ถึง 1073K เป็นเวลา 1 ชม. ก่อนอื่นก็ได้ศึกษาถึงความสามารถในการเปลี่ยนเฟสมาร์เทนไซต์ โดยพิจารณาอุณหภูมิเริ่มต้นการเปลี่ยนเฟสหรือที่เรียกว่าอุณหภูมิ M_s รูปที่ 4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ M_s กับความเร็วหมุนของโรลเลอร์ที่อุณหภูมิอบต่างๆ และเพื่อเป็นการเปรียบเทียบ ค่า M_s ของอินกอตก่อนที่จะนำมาทำ ริปบิ้นโลหะผสมจำรูปได้ถูกแสดงไว้ด้วยเส้นประด้วย จากกราฟ จะเห็นได้ว่าไม่จำเป็นที่ริปบิ้นโลหะผสมจำรูปที่อุณหภูมิใดก็ตาม ค่าอุณหภูมิ M_s ที่ได้จะน้อยกว่าค่าของอินกอตเสมอ และยังสามารทราบได้อีกว่าค่าอุณหภูมิ M_s มีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบในทุกๆความเร็วหมุนของโรลเลอร์ จากผลการทดลองนี้ทำให้สามารถวิจารณ์ผลได้ว่า ในกระบวนการผลิตชิ้นงานโดยวิธีนี้ อัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะขณะกลายเป็นของแข็งนั้นมีค่าสูงมาก ดังนั้นเวลาสำหรับการขยายตัวของนิวเคลียสเมื่อเกิดเกรนนั้นจะมีค่าสั้นมาก มีผลทำให้ต้องมีการผลิตนิวเคลียสของเกรนจำนวนมากต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เกรนที่ได้จากกระบวนการนี้จึงมีลักษณะเล็กมาก เมื่อเทียบกับวิธีโดยทั่วไป เมื่อเกรนมีขนาดเล็กแล้ว ผลต่อเนื่องที่ตามมาคือการเคลื่อนที่ของแนวรียนท์ของมาร์เทนไซต์ (propagation of martensite variant) นั้นทำได้ยากขึ้น อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสจึงมีค่าลดลง ซึ่งหมายความว่า การเปลี่ยนเฟสมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นได้ยากกว่าอินกอตธรรมดา และสำหรับกรณีที่เพิ่มอุณหภูมิในการอบนั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเช่นเดียวกัน การเปลี่ยนเฟสมาร์เทนไซต์จะเกิดขึ้นได้ง่ายขึ้นโดยสังเกตจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ M_s และผลอีกอย่างที่เราทราบจากกราฟนี้ คือ อิทธิพลของความเร็วหมุนของโรลเลอร์ที่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิ M_s จะสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อ



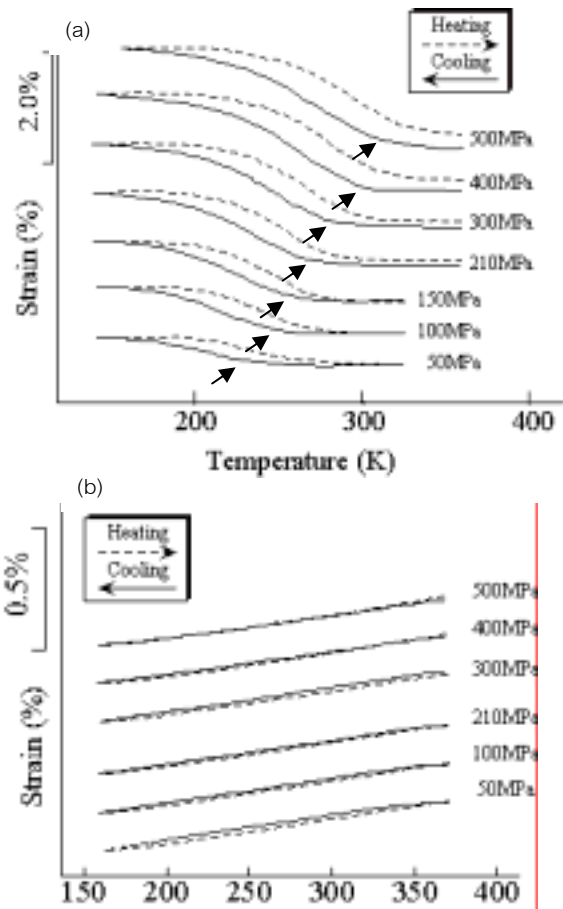
รูปที่ 5 รูปถ่ายไมโครกราฟ (Bright-field image) ของ SMAริบบิ้น ผลิตด้วยความเร็วหมุนของโรลเลอร์ที่ 3000rpm โดย (a) ไม่ได้ผ่านการอบ, (b) อบที่ 873K และ (c) 1073K

อุณหภูมิอบมีค่าต่ำ เช่นเมื่ออุณหภูมิของริบบิ้นอบที่ 773K จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่าอุณหภูมิ M_s มีค่ามากที่สุดที่ความเร็วหมุนของโรลเลอร์ 1000rpm (M_s ซ้อนกันกับผลการอบที่ 973K จึงไม่เห็นในกราฟ) และลดลงอย่างมากเมื่อความเร็วหมุนของโรลเลอร์เพิ่มขึ้นเป็น 3000rpm ถึง 4000rpm และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนของโรลเลอร์มากขึ้นอีก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ถ้ามองแนวโน้มจากอุณหภูมิ M_s แล้วอัตราเร็วในการลดอุณหภูมิหรือแข็งตัวของกระบวนการหลอมเหลวสปินนิ่งนั้น ควรจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ความเร็วหมุนของโรลเลอร์ประมาณ 4000rpm

ต่อไป เพื่อเป็นการดูอิทธิพลของอุณหภูมิอบที่มีต่อโครงสร้างภายในของริบบิ้นโลหะผสมจำรูป ได้เลือกชิ้นงานที่ผลิตด้วยความเร็วหมุนของโรลเลอร์ที่ 3000rpm มาเป็นตัวอย่างและอบที่อุณหภูมิต่างๆ มาสำรวจโครงสร้างโดยใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน รูปที่ 5(a), (b) และ (c) แสดงรูปถ่ายไมโครกราฟของริบบิ้นโลหะผสมจำรูปที่

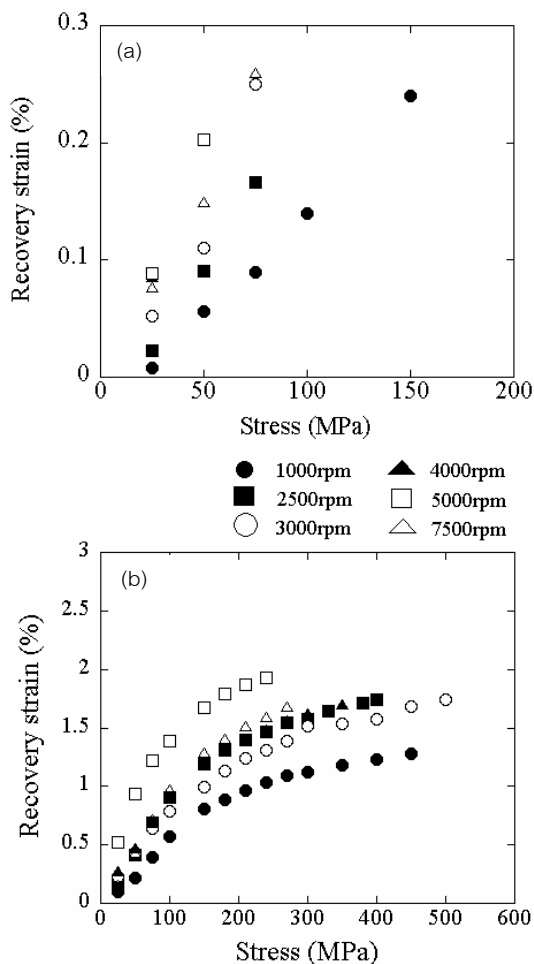
ไม่ได้ผ่านการอบ, อบที่ 873K และ 1073K ตามลำดับ จากรูป (a) เมื่อดูแล้วพบว่าโครงสร้างไม่ได้เป็นโครงสร้างผลึก และเมื่อดูจากวงแหวนฮาโล (Halo-ring) ใน diffraction pattern แล้วทราบได้ว่าโครงสร้างเป็น amorphous ตรงกับผลสรุปที่ได้จาก XRD และเมื่ออบที่ 873K แล้วจะเห็นจากภาพ (b) ว่าเกิดการเกิดผลึก (Crystallization) ขึ้น และขนาดของเกรนที่ได้มีขนาดเล็กมากประมาณ 30nm ซึ่งนี่คือเหตุผลที่ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมาก และการเปลี่ยนเฟสมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นได้ยากทำให้อุณหภูมิ M_s มีค่าต่ำ ในขณะที่เดียวกันสำหรับชิ้นงานที่อบที่อุณหภูมิสูงกว่าคือ 1073K ดังแสดงในรูป (c) จะสังเกตว่ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นอย่างมากคือมีการเติบโตของเกรนมีขนาดมากกว่า 300nm และมีการเกิดตะกอนของสารประกอบด้วยการเติบโตของเกรนนี้ทำให้ค่าความหนาแน่นของ ขอบเกรน (Grain boundary) ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่นั้นลดลงมีผลให้การเกิดการเปลี่ยนเฟสมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นได้ง่ายขึ้น มีผลทำให้อุณหภูมิ M_s มีค่าสูงขึ้น เพราะฉะนั้นจากการทดลองนี้ก็ทำให้ทราบว่าถ้าสภาวะเบื้องต้นของชิ้นงานเป็น amorphous แล้วจะทำให้เกิดเกรนที่มีความเล็กถึงนาโนสเกล เป็นผลทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมาก และสามารถดึงเอาสมรรถนะของโลหะผสมจำรูปออกมาใช้ได้อย่างเต็มที่โดยไม่มีปัญหาเรื่องการเปลี่ยนรูปถาวร

ในการศึกษาคุณสมบัติจำรูปของริบบิ้นโลหะผสมจำรูป ทำได้โดยการให้โหลดคงที่กับชิ้นงาน แล้วศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานขณะเพิ่มอุณหภูมิและลดอุณหภูมิเป็นไซเคิล หรือที่เรียกว่า การ



รูปที่ 6 Strain-temperature curves ของ SMA ริบบิ้นที่ผลิตด้วยความเร็วหมุนของโรลเลอร์ (a) 1000rpm และ (b) 2500rpm โดยที่ไม่ได้ทำการอบตามลำดับ

ทดสอบเทอร์มอลไซเคิลนั่นเอง ตัวอย่างของผลการทดลองที่ได้รับจะแสดงไว้ในรูปที่ 6 ซึ่งแสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการคืนรูปและอุณหภูมิของชิ้นงานที่ผลิตด้วยความเร็วหมุนของโรลเลอร์ (a) 1000rpm และ (b) 2500rpm โดยที่ไม่ได้ทำการอบ เส้นเติมในกราฟแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดลวดอุณหภูมิ เส้นประแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดเพิ่มอุณหภูมิ กรณีความเร็วหมุนของโรลเลอร์เท่ากับ 1000rpm นั้น จะสังเกตเห็นการเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสจากออสเทนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์ขณะที่มีการลดอุณหภูมิ โดยการเปลี่ยนโครงสร้างจาก B2 ไปยัง B19 ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปจากการเปลี่ยนเฟสและเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ จะสามารถเห็นการคืนตัวหรือปรากฏการณ์จำรูปได้โดยสังเกตจากเส้นประ ที่นำสังเกตจากรูปนี้ก็คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนเฟสมาร์เทนไซต์ M_s นั้นจะมีค่าสูงขึ้นแปรผันตามโหลดที่ได้รับ โดยมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น แนวโน้มนี้เป็นไปตามความสัมพันธ์ของ Clausius-Clapeyron ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามาร์เทนไซต์จะถูกทำให้เสถียรได้โดยให้แรงภายนอกซึ่งจะทำให้ทิศทาง (Variant) ของมาร์เทนไซต์นั้นเคลื่อนตัวได้ง่าย สำหรับปริมาณการคืนรูปจะแสดงได้โดยระยะหดกลับของชิ้นงานเมื่อให้ความร้อน ซึ่งถูกแสดงด้วย



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของปริมาณการคืนรูปกับโหลดที่ให้แก่ของ SMA ริปบินที่ผลิตด้วยความเร็วหมุนของโรลเลอร์ต่างๆกันโดยถูกอบที่อุณหภูมิ (a) 873K และ (b) 973K

เส้นประ ปริมาณการคืนรูปจะมีค่ามากขึ้นเช่นเดียวกันเมื่อเพิ่มโหลดที่กระทำ จากรูป ค่าปริมาณการคืนรูปมากที่สุดที่ได้จากริปบินโลหะผสมจำรูปที่ 1000rpm นี้อยู่ที่ประมาณ 2% ซึ่งมีค่าน้อยเนื่องจากชิ้นงานนี้ไม่ได้ผ่านการอบความร้อน ทำให้มีโครงสร้างภายในละเอียดมาก ส่งผลให้แวร์เรเนียนท์ของมาร์เทนไซต์นั้นเคลื่อนตัวได้ยาก แต่ข้อดีคือการเปลี่ยนรูปพลาสติกสามารถเกิดได้ยากเช่นเดียวกัน ทำให้สามารถคืนรูปสู่รูปเดิมได้เกือบหมดโดยไม่มีการเปลี่ยนรูปถาวร ทั้งๆที่โหลดที่ได้รับมีค่ามากถึง 500MPa กรณีของชิ้นงานที่ผลิตด้วยความเร็วหมุนของโรลเลอร์เท่ากับ 2500rpm ดังแสดงในรูป 6(b) นั้น จะสังเกตได้ว่าไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงเฟสเกิดขึ้นในชิ้นงานนี้ ไม่ว่าจะลดหรือเพิ่มอุณหภูมิที่โหลดใดๆ ผลการทดลองนี้สามารถอธิบายได้จากการที่ชิ้นงานนี้มีโครงสร้างที่ไม่ใช่ผลึก แต่เป็น amorphous ซึ่งไม่ใช่โครงสร้างที่สามารถเกิดการเปลี่ยนเฟสมาร์เทนไซต์ได้

เมื่อทำการอบชิ้นงานแล้ว ได้นำชิ้นงานมาทดสอบคุณสมบัติแบบเดียวกันและนำปริมาณการคืนรูปที่ได้มาเปรียบเทียบกับศึกษาอิทธิพลของความเร็วหมุนของโรลเลอร์ จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8

รูปที่ 7 (a) และ (b) แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณการคืนรูปกับโหลดที่ให้แก่ของริปบินโลหะผสมจำรูปที่ผลิตด้วยความเร็วหมุนของโรลเลอร์ต่างๆกันโดยถูกอบที่อุณหภูมิ 873K และ 973K ตามลำดับ โปรดสังเกตสเกลของปริมาณการคืนรูปด้วยว่าที่ 973K มีค่าเป็นสิบเท่าของที่ 873K ชิ้นงานที่อบด้วยอุณหภูมิ 873K นั้นจะมีโครงสร้างที่เล็กมากรวมกับการเกิดตะกอนที่เล็กจนทำให้ขอบเกรนไม่แข็งแรง เกิดจุดรวมความเค้นได้ง่ายมีคุณสมบัติแข็งและเปราะ แวร์เรเนียนท์ของมาร์เทนไซต์ก็เคลื่อนตัวได้ยากดังเห็นได้โดยค่าปริมาณการคืนรูปเพียง 0.3% ที่ 150MPa จึงไม่สามารถมองเห็นแนวโน้มและอิทธิพลของความเร็วหมุนของโรลเลอร์ได้ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิมอบไปที่ 973K ซึ่งทำให้เกรนสามารถเติบโตได้ในขนาดหนึ่ง ที่อุณหภูมิอบนี้สามารถมองเห็นความแตกต่างของแต่ละความเร็วหมุนของโรลเลอร์ได้ กล่าวคือที่ความเร็วหมุนของโรลเลอร์ต่ำมีแนวโน้มที่จะได้ค่าปริมาณการคืนตัวสูงสุดต่ำกว่าที่ความเร็วหมุนของโรลเลอร์สูง แต่ความเร็วหมุนของโรลเลอร์ที่แสดงปริมาณการคืนตัวสูงสุดที่ได้ที่อุณหภูมิมอบนี้คือ 5000rpm จากผลการทดลองนี้ทำให้สามารถตั้งสมมุติฐานว่า อัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะในกระบวนการหลอมเหลวสปีนนิ่งนั้นไม่จำเป็นต้องแปรผันตามความเร็วหมุนของโรลเลอร์เสมอไป แต่จะมีค่าสูงสุดอยู่ซึ่งในที่นี้จะเป็น 5000rpm สามารถอธิบายจากความแตกต่างของระยะเวลาสัมผัสของโรลเลอร์และน้ำโลหะต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของน้ำโลหะขณะผลิตชิ้นงาน

กรณีเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมอบขึ้นไปอีกจนถึง 1073K จะไม่สามารถเห็นความแตกต่างของปริมาณการคืนรูปต่อความเร็วหมุนของโรลเลอร์ได้ ค่าปริมาณการคืนรูปสูงสุดอยู่ที่ 2.2% สามารถอธิบายผลการทดลองนี้ได้ว่า เมื่ออบที่ 1073K นั้นเป็นการอบแบบกระบวนการสารละลายของแข็ง (Solution-treatment) ทำให้เกรนในโครงสร้างเติบโตเต็มที่และเกิดการแพร่เข้าสู่สมดุลในโครงสร้างได้ง่ายทำให้โครงสร้างอิมิตัว จึงได้คุณสมบัติที่เหมือนกันโดยไม่เกี่ยวข้องจะถูกผลิตด้วยความเร็วหมุนของโรลเลอร์ใดก็ตาม

4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองศึกษาอิทธิพลของความเร็วหมุนของโรลเลอร์ต่อคุณสมบัติของโลหะผสมจำรูปในกระบวนการ melt-spinning ทำให้ได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

1. ชิ้นงานที่ผลิตด้วยความเร็วหมุนของโรลเลอร์ต่ำกว่า 2500rpm จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นผลึก ในขณะที่ชิ้นงานที่ผลิตด้วยความเร็วหมุนของโรลเลอร์ตั้งแต่ 3000rpm ขึ้นไปจะมีลักษณะโครงสร้างเป็น amorphous
2. amorphous ที่ได้มีความแข็งแรงสูงโดยมีค่าความเค้นแตกหักที่ 1.8GPa
3. อิทธิพลของความเร็วหมุนของโรลเลอร์จะสามารถเห็นได้ชัดเมื่ออุณหภูมิอบมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิอบกระบวนการสารละลายของแข็ง โดยการเปรียบเทียบปริมาณการคืนรูป
4. อัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วหมุนของโรลเลอร์เพิ่มขึ้นถึง 5000rpm
5. รีบิ้นโลหะผสมจำรูปที่ผลิตด้วยวิธีหลอมเหลวสปีนนิ่ง (melt-spinning) นี้มีค่าความเค้นลื่นไถลวิกฤตสูงทำให้สามารถคืนรูปสู่รูปเดิมได้เกือบ 100% ภายใต้โหลดสูงถึง 500MPa
6. โครงสร้างภายในของรีบิ้นโลหะผสมจำรูปที่เริ่มจากโครงสร้าง amorphous แล้วอบด้วยอุณหภูมิ 873K จะเกิดกระบวนการสร้างผลึกขึ้นและเกรนที่ได้จะมีขนาดเล็กมากถึง 30nm ซึ่งเป็นสาเหตุของความแข็งแรงของชิ้นงาน และเมื่ออบที่อุณหภูมิ 1073K เกรนก็จะเติบโตขึ้นจนมีขนาดประมาณ 300nm ทำให้ปริมาณการเปลี่ยนรูปจากการเปลี่ยนเฟสมีค่ามากขึ้น
7. เมื่อทำการอบกระบวนการสารละลายของแข็งหรืออบที่อุณหภูมิ 1073K จะไม่สามารถเห็นความแตกต่างของปริมาณการคืนรูปได้ ไม่ว่าจะเป็นรีบิ้นที่ผลิตด้วยความเร็วหมุนของโรลเลอร์เท่าไรก็ตาม

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ Mr. Hiroyuki Tonami นักศึกษาปริญญาโทUniversity of Tsukuba, Japan ที่ช่วยในการเก็บข้อมูลที่สำคัญ และ Prof. Shuichi Miyazaki อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ University of Tsukuba, Japan ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือการทดลองและวัสดุอุปกรณ์ในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Miyazaki and A. Ishida, "Martensitic transformation and Shape Memory Behavior in TiNi-base Thin Films", Materials Science and Engineering, 1999, A 273-275, pp.106-133.
- [2] A. Ishida, M. Sato and S. Miyazaki, "Mechanical Properties of Ti-Ni Shape Memory Thin Films Formed by Sputtering", Materials Science and Engineering, 1999, A 273-275, pp.754-757.
- [3] M. Kohl, D.M. Allen, T.T. Chen, S. Miyazaki and M. Schworer, "Anisotropy in Microdevices Produced by Micromachining of Cold-rolled NiTi Sheets", Materials Science and Engineering, 1999, A270, pp.145-150.
- [4] S. Miyazaki, M. Hirano and V.H. No, "Dynamic Characteristics of Diaphragm Microactuators Utilizing Sputter-deposited TiNi Shape Memory Alloy Thin Films", Materials Science Forum, 2002, 394-395, pp.467-474.
- [5] T. Matsunaga, S. Kajiwara, K. Ogawa, T. Kikuchi and S. Miyazaki, "Effect of Ti-content on Nanometric Substructure and Shape Memory Property in Sputter-deposited Ti-rich Thin Films", Shape Memory Materials, Materials Science Forum, 2000, 327-328, pp.175-178.
- [6] T. Matsunaga, S. Kajiwara, K. Ogawa, T. Kikuchi and S. Miyazaki, "High Strength TiNi-based Shape Memory Thin Films", Materials Science and Engineering, 1999, A 273-275, pp.745-748.
- [7] T. Matsunaga, S. Kajiwara, K. Ogawa, T. Kikuchi and S. Miyazaki, "Internal Structures and Shape Memory Properties of Sputter-deposited Thin Films of Ti-Ni-Cu Alloy", Acta Materialia, 2001, 49, pp.1921-1928.
- [8]A. Khantachawana and S. Miyazaki, "Effect of Heat treatment on the Properties of Ti-25Ni-25Cu(at%) SMA Melt-spun Ribbons", Materials Science Forum, 2002, 394-395, pp.495-498.
- [9]A. Khantachawana, K. Yamazaki and S. Miyazaki, "Deformation Behavior and Microstructures of Ti-50at%Ni and Ti-40Ni-10Cu(at%) SMA Melt-Spun Ribbons", Proc. of the 4th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM4), The Japan Institute of Metals, 2001, pp.1537-1540.