

การเปรียบเทียบวิธีการกระตุ้นด้วยความเครียดต่อการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างของอลูมิเนียมผสมกึ่งของแข็งเกรด A356

Comparison of Strain Induced Methods on the Microstructure Change of A356 Semi-Solid Aluminum Alloy

นุชจิรา วรรณสิทธิ์* และจรรยาพร แสนทวีสุข
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
*Email: nutchira.wannasit@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลของวิธีการกระตุ้นให้เกิดความเครียดโดยการรีดเย็น การอัด และการแปรรูปทางกลต่อการเกิดโครงสร้างเม็ดกลมของโลหะผสมอลูมิเนียมเกรด A356 นอกจากนี้ ยังศึกษาผลของรูปร่างเริ่มต้นของชิ้นงานต่อการเปลี่ยนโครงสร้างเกรนเป็นเกรนก่อนกลม ระหว่างชิ้นงานเริ่มต้นที่เป็นแท่งอลูมิเนียมหล่อขึ้นรูป และชิ้นงานเริ่มต้นที่เป็นแท่งเศษอลูมิเนียมอัดขึ้นรูป โดยเศษอลูมิเนียมได้มาจากการกลึงแท่งอลูมิเนียมผสมหล่อเกรด A356 จนทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรผ่านแรงทางกล และเป็นการกระตุ้นให้เกิดความเครียดสะสมในเศษอลูมิเนียมเหล่านั้น หลังจากนั้น นำเศษอลูมิเนียมจากการตัดด้วยแรงทางกลไปอัดให้เป็นชิ้นงานรูปทรงกระบอก โดยบรรจุเศษอลูมิเนียมเข้าไปในแม่พิมพ์โลหะและอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อกระตุ้นให้เกิดความเครียดมากขึ้นและเพิ่มความหนาแน่นของดิสโลเคชัน จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการเพิ่มความเครียดแล้วทั้ง 3 วิธี ไปอบหลอมละลายบางส่วนที่อุณหภูมิ 595 องศาเซลเซียส อบแช่เป็นเวลา 35 นาที และทำให้โลหะเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วในน้ำโดยอุณหภูมิและเวลาอบนี้เป็นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเปลี่ยนโครงสร้างของเกรนที่ถูกกระตุ้นความเครียดด้วยวิธีการรีด และเป็นค่าที่ได้มาจากการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MINITAB V.14 จากการประยุกต์ใช้เงื่อนไขในการอบนี้กับชิ้นงานที่ถูกกระตุ้นความเครียดด้วยวิธีการแบบอื่น พบว่า โครงสร้างเม็ดกลมสามารถพบได้ในทุกชิ้นงานและมีค่าปัจจัยรูปร่างใกล้เคียงกัน แต่วิธีการกระตุ้นด้วยความเครียดที่แตกต่างกันมีผลต่อขนาดเกรนเฉลี่ยถึงแม้จะใช้เงื่อนไขในการอบเดียวกัน โดยขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ถูกกระตุ้นความเครียด ด้วยวิธีการแปรรูปทางกลมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ถูกกระตุ้นความเครียดด้วยวิธีการอัดและวิธีการรีดตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลของรูปร่างเริ่มต้นของชิ้นงานต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง พบว่า ชิ้นงานเริ่มต้นที่เป็นแท่งเศษอลูมิเนียมอัดขึ้นรูป จะมีปริมาณสัดส่วนเฟสของเหลวมากกว่าชิ้นงานเริ่มต้นที่เป็นแท่งอลูมิเนียมหล่อขึ้นรูป และชิ้นงานเริ่มต้นที่เป็นแท่งเศษอลูมิเนียมอัดขึ้นรูปจะมีขนาดเฉลี่ยของเกรนก่อนกลมน้อยกว่าชิ้นงานเริ่มต้นที่เป็นแท่งอลูมิเนียมหล่อขึ้นรูป ดังนั้น รูปร่างเริ่มต้นของชิ้นงานมีผลต่อการเปลี่ยนโครงสร้างเกรนเป็นเกรนก่อนกลม

คำสำคัญ: เทคนิคการกระตุ้นด้วยการหลอมละลายและความเครียด โครงสร้างเม็ดกลม อลูมิเนียมผสมเกรด A356

Abstract

In this work, the effect of three strain induced processes, rolling, compression and machining, on the globular microstructure of A356 aluminum alloy were studied. In addition, the effect of initial shapes of the specimens, as cast solid sample and compressed chip sample, on the globular microstructure was also investigated. Chips were cut from A356 as cast ingot by lathe machining and the plastic deformation was produced through cutting. To form the compressed chip sample, the chips were put into the metal mold and compressed into a billet at ambient temperature which introduces more strain and dislocation densities. In the next step, all specimens were partially remelting at 595°C for 35 minutes and immediately quenched in water to maintain the semi-solid slurry at room temperature. This condition is the optimal heat treatment condition for the rolled strain induced method obtaining from the design of experiment analysis using the MINITAB V.14. The experimental results show that the globular structure with similar shape factor can be observed in all samples. However, the strain induced methods influence on the average

grain size even the same heating treatment condition was used. The compressed chip sample has lower average grain size than the compressed strain induced sample and the rolled strain induced sample, respectively. When the effect of initial shapes of the specimens was taken into account, it was found that the compressed chip sample has the highest liquid fraction comparing to the compressed bulk sample as well as the rolled bulk sample. The compressed chip sample also has the lowest average globular grain size. Therefore, the initial shapes of the specimens have apparent influence on the non-dendritic structure forming.

Keywords: Strain Induced Melt Activating (SIMA), Globular Microstructure, A356 Aluminum Alloy

บทนำ

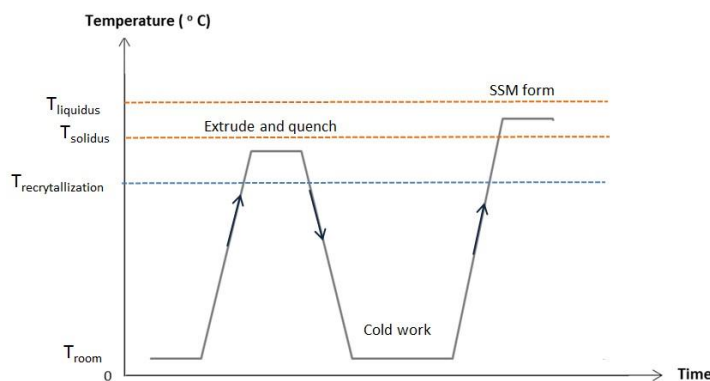
Semi- Solid Metal Processing (SSM) เป็นเทคนิคการขึ้นรูปโลหะแบบกึ่งของแข็งที่ถูกค้นพบโดยนายเดวิส สเปนเซอร์ ขณะศึกษาอยู่ระดับปริญญาเอก ภายใต้การให้คำปรึกษาของศาสตราจารย์แฟลมมิง ที่สถาบันเทคโนโลยีแมสซาชูเซตส์ (MIT) เมื่อปี 1971 [D.B.Spencer et al., 1972] ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคนิค SSM มาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์เพื่อเพิ่มศักยภาพในกระบวนการผลิต เนื่องจากกระบวนการแบบ SSM ทำให้ได้ชิ้นส่วนที่มีคุณภาพดีกว่าและใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการผลิตแบบเดิม เช่น การหล่อ (casting) หรือ การตีขึ้นรูป (forging) [H.V. Atkison, 2005; Z. Fan, 2002] กว่า 40 ปีที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการ SSM กับโลหะหลายประเภทโดยใช้กรรมวิธีที่แตกต่างกันโดยมีวัตถุประสงค์หลักคือเพื่อให้โครงสร้างจุลภาคของโลหะมีโครงสร้างแบบเกรนก่อนกลม [G. Hirt et al., 2006] และในงานวิจัยนี้อลูมิเนียมเกรด A356 เป็นวัสดุที่ผู้วิจัยให้ความสนใจในการศึกษา เนื่องจากมีการใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ และยังมีแนวโน้มการนำมาใช้งานเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย [A. Morita et al., 1998] โดยกระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบกึ่งของแข็งนี้สามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่มหลัก ๆ โดยยึดตามสถานะเริ่มต้นของโลหะ คือ กลุ่มที่สถานะเริ่มต้นเป็นของเหลว (Liquid routes) และ กลุ่มที่สถานะเริ่มต้นเป็นของแข็ง (Solid routes) [M.N. Mohammed et al., 2013] วิธีการผลิตเกรนก่อนกลมของกลุ่มที่สถานะของโลหะตั้งต้นเป็นของเหลวมีข้อเสียคือ มีสิ่งปนเปื้อนภายในเนื้อโลหะ เช่น สารประกอบออกไซด์ ฟองอากาศ และมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง เทคนิคการเตรียมโครงสร้างก่อนกลมของกลุ่มที่สถานะของโลหะตั้งต้นเป็นของแข็ง เช่น Strain-Induced and Melt-Activated Process (SIMA) จึงถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว [K.P. Young et al., 1982] โดยกระบวนการ SIMA เป็นวิธีการเตรียมโครงสร้างก่อนกลมที่ทำงานใช้เครื่องมืออุปกรณ์ไม่ซับซ้อน และราคาต้นทุนในการผลิตต่ำ โดยขั้นตอนการเตรียมโครงสร้างแบบ SIMA ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ นำแท่งบิลเลตที่มีโครงสร้างเดนไดรต์มาขึ้นรูปร้อน (warm extrude and quench) ที่อุณหภูมิเหนืออุณหภูมิตกผลึกใหม่ และนำมาขึ้นรูปเย็น (Cold work) เพื่อให้เกิดความเค้นภายในชิ้นงาน แล้วขั้นตอนสุดท้าย จึงนำมาให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิของแข็งเพื่อให้เกิดของผสมระหว่างของเหลวกับของแข็งก่อนกลมในปริมาณและขนาดที่เหมาะสม [M.N. Mohammed, et al., 2013] ดังแสดงในรูปที่ 1

สุรัช นุ่มสารพัดนึก [Numsarapatnuk, 2013] ได้พัฒนาเทคนิค SIMA เพื่อผลิตวัสดุโครงสร้างเกรนก่อนกลมสำหรับการหล่อขึ้นรูป thixoforming โดยนำอลูมิเนียมผสมมาร์ก 2024 ผ่านวิธีอบอ่อนเต็มที่ (full annealing) อัดขึ้นรูปเย็น (compression) และนำอบละลายบางส่วนที่อุณหภูมิของแข็งและทำให้โลหะกึ่งของแข็งเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วในน้ำอุณหภูมิห้อง ดังแสดงในรูปที่ 2 และพบว่าเทคนิค SIMA ที่ถูกพัฒนาขึ้นใหม่นี้สามารถผลิตโครงสร้างเกรนก่อนกลมได้และเทคนิคที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้ ทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลง และมีขั้นตอนการผลิตไม่ซับซ้อน

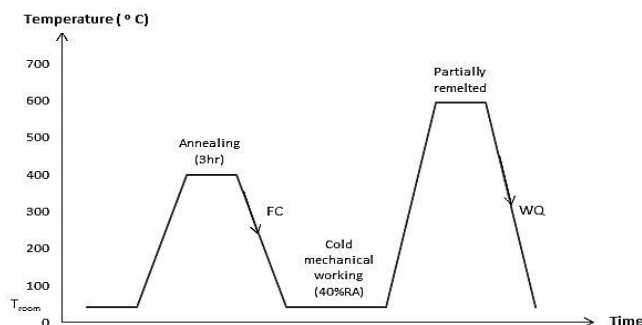
Vogel และคณะ [A. Vogel et al., 1979] ได้เสนอแนวคิดของการเกิดโครงสร้างเกรนก่อนกลมว่า เกิดจากกลไกการแตกหักของแขนของเดนไดรต์ ซึ่งทำให้เกิดเกรนแบบทวีคูณ ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยมีสมมุติฐานว่าเมื่อโลหะถูกแปรรูปเย็นจะทำให้เกิดการเสียรูปแบบถาวรและแขนของเดนไดรต์เกิดการบิด พลังงานตกค้างจะถูกเก็บไว้ในโครงสร้างผลึกที่บิดเบี้ยวนี้ในรูปแบบของความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบต่าง ๆ เช่น ความไม่สมบูรณ์แบบจุด ความไม่สมบูรณ์เชิงระนาบ และความไม่สมบูรณ์เชิงเส้นหรือดิสโลเคชัน เป็นต้น พลังงานตกค้างนี้จะเป็แรงกระตุ้นให้เกิดขบวนการฟื้นตัว และการเกิดเกรนใหม่ตามลำดับ เมื่อชิ้นงานโลหะได้รับความร้อนในระหว่างขบวนการฟื้นตัว โครงสร้างผลึกของโลหะจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เพื่อลดจำนวนจุดบกพร่องหรือความไม่สมบูรณ์ของผลึกลง ทำให้ความเค้นภายในและพลังงานตกค้างลดลง ถ้าอุณหภูมิ

ของชิ้นงานยังสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนอยู่ระหว่างอุณหภูมิเหนืออุณหภูมิการตกผลึกใหม่แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว พลังงานตกค้างส่วนที่เหลืออยู่ในโลหะจะเป็นแรงกระตุ้นให้เกิดขบวนการตกผลึกใหม่ เพื่อให้เกิดเกรนใหม่ที่ปราศจากความเครียด เมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิกึ่งของแข็ง จะเกิดฟิล์มของเหลวแทรกตัวตามขอบเกรนของเฟสของแข็ง และเกิดการหลอมละลายบางส่วนที่ขอบเกรนเพื่อลดความตึงผิวระหว่างเฟสของแข็งและของเหลว นำมาสู่การแตกหักของแกนเดนไดรต์ เกิดเป็นเกรนก่อนกลมแขวนลอยอยู่ในเฟสของเหลวยุคตก

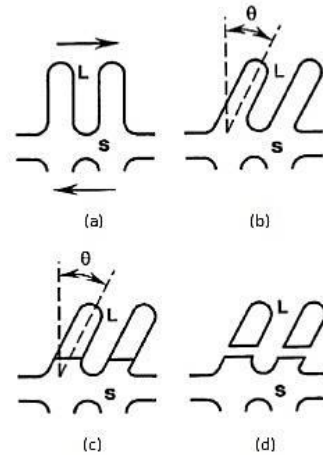
เทคนิค SIMA นี้ ได้มีรูปแบบวิธีการเพิ่มความเครียดขณะเย็นหรือการแปรรูปเย็นที่นิยมใช้กันอยู่อย่างแพร่หลาย คือรูปแบบการเพิ่มความเครียดโดยวิธีการรีด (rolling) [A. Mahdavi, 2008 ; M. Hajian Heidary, 2008; Yu Sirong, 2006] และรูปแบบการเพิ่มความเครียดโดยวิธีการอัด (Compression) [M. Hajian Heidary, 2008; Numsarapatnuk, 2013] แต่ข้อเสียของวิธีการทั้งสองนี้คือ สามารถทำได้เฉพาะชิ้นงานที่เป็นก้อน (Bulk) เท่านั้น ซึ่งผู้วิจัยพบว่าแรงเฉือนที่กระทำต่อเศษชิ้นงานอลูมิเนียมที่ได้จากงานตัดทางกล (Machining) ถือเป็นการเพิ่มความเครียดให้กับชิ้นงานในอีกรูปแบบ อีกทั้งเศษอลูมิเนียมยังสามารถหาได้ทั่วไป ดังนั้น ผู้วิจัยจึงประยุกต์ใช้เทคนิคที่ถูกพัฒนาขึ้นใหม่นี้เพื่อศึกษาผลของวิธีการกระตุ้นให้เกิดความเครียดในรูปแบบที่แตกต่างกันต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกรนจากเดนไดรต์ไปเป็นโครงสร้างเกรนเม็ดกลมนขนาดเกรนเฉลี่ยของเกรนเม็ดกลม และสัดส่วนเฟสของเหลว โดยกำหนดให้อุณหภูมิเวลาในการอบอ่อนเต็มที่ และค่าการแปรรูปของชิ้นงานมีค่าคงที่ สำหรับอุณหภูมิและเวลาในการอบละลายบางส่วนที่ใช้นั้น มาจากการทดลองขั้นต้นเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเปลี่ยนโครงสร้างเกรนที่ถูกกระตุ้นให้เกิดความเครียดด้วยวิธีการรีด ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการออกแบบและวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MINITAB V.14 อีกทั้งงานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาผลของรูปร่างเริ่มต้นของชิ้นงานที่มีต่อค่าปัจจัยรูปร่าง ขนาดเกรนเม็ดกลมเฉลี่ย และสัดส่วนเฟสของเหลว



รูปที่ 1 แผนผังแสดงขั้นตอนของกระบวนการขึ้นรูปแบบSIMA[ดัดแปลงจาก K.P. Young et al., 1982]



รูปที่ 2 แผนผังแสดงขั้นตอนของกระบวนการ SIMA ที่ถูกพัฒนาโดยสุรัช นุ่มสารพัดนึก
FC: เย็นตัวในเตา WQ :เย็นตัวในน้ำ [Numsarapatnuk, 2013]



รูปที่ 3 แบบจำลองการแตกหักของเดนไดรต์ด้วยแรงเฉือน (a) เดนไดรต์ที่ยังไม่เสียรูป (b) เมื่อเกิดแรงบิด (c) เกิดการจัดเรียงใหม่ของแลตทิซ ทำให้เกิดขอบเกรน (d) ขอบเกรนเกิดการเปื่อยด้วยน้ำโลหะ และทำให้แกนเดนไดรต์หลุดออกมา

[A. Vogel et al., 1979]

วิธีการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นอินก๊อทอลูมิเนียมผสม เกรด A356 ที่มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1

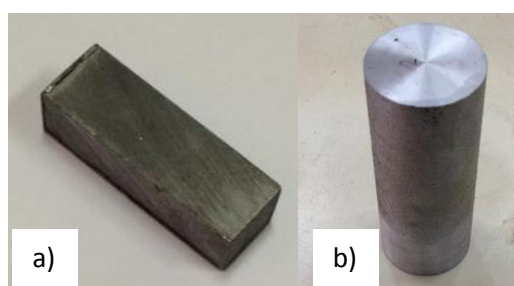
ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของอลูมิเนียมเกรด A356 ที่ใช้ในการทดลองเทียบกับมาตรฐาน ASTM[J. Gilbert Kaufman and Elwin L. Rooy, 2004]

	Composition, (%wt)										
	Si	Fe	Cu	Zn	Mg	Mn	Ni	Ti	Cr	Pb	Sn
ASTM (A356)	6.5-7.5	≤ 0.17	≤ 0.05	≤ 0.07	0.25 - 0.40	≤ 0.10	≤ 0.05	0.10-0.20	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05
As received material (A356)	7.09	0.106	0.018	0.0046	0.328	0.0038	0.0087	0.108	0.0006	0.0003	0.0006

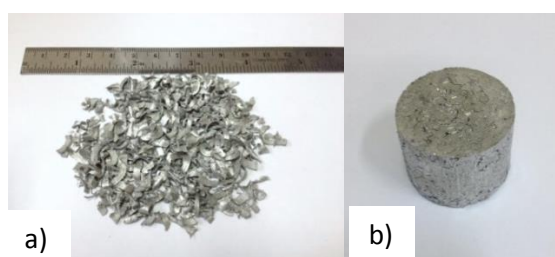
วิธีการกระตุ้นด้วยการหลอมละลายและความเครียด (SIMA) ในการทดลองนี้แบ่งชิ้นงานเริ่มต้นเป็น 3 รูปแบบ คือ แบบแรกนำอินก๊อทมาตัดแบ่งเป็นชิ้นงานขนาด 1x1x6 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4(a) รูปแบบที่สองนำอินก๊อทมาตัดแบ่งจากนั้นนำไปกลึงให้เป็นชิ้นงานรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 6 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4(b) นำชิ้นงานทั้งสองรูปแบบไปอบอ่อนเต็มที่ ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส นาน 5 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตา เพื่อปรับส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างให้สม่ำเสมอทั่วชิ้นงาน หลังจากนั้นนำชิ้นงานมากระตุ้นให้เกิดความเครียดสะสมและเพิ่มความหนาแน่นของดิสโลเคชันโดยแบ่งเป็นสองรูปแบบคือ ชิ้นงานที่เป็นแท่งสี่เหลี่ยมขนาด 1x1x6 เซนติเมตรนำมารีดเย็น (Rolling) เพื่อลดพื้นที่หน้าตัดลงจากเดิม โดยทำการรีดซ้ำประมาณ 5 ครั้ง ซึ่งแต่ละครั้งมีการลดลงของพื้นที่หน้าตัดลงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ รีดซ้ำจนกระทั่งสามารถลดพื้นที่หน้าตัดลงจากเดิม 50 เปอร์เซ็นต์ แล้วทำการตัดแบ่งชิ้นงานที่มีขนาด 0.5x0.5x3 เซนติเมตร ส่วนชิ้นงานทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร นำมาอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ที่อุณหภูมิห้องใช้แรงอัด 40 เมกกะปาสคาล ในอัตราการกด 2 มิลลิเมตรต่อนาที จนเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากเดิม 50 เปอร์เซ็นต์ สำหรับรูปแบบที่สามมีการเตรียมชิ้นงานโดยนำอินก๊อทมาตัดแบ่งให้ได้ชิ้นงานขนาด 3x7x7 เซนติเมตร แล้วนำไปอบอ่อนเต็มที่ ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส นาน 5 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตา จากนั้นนำชิ้นงานไปกลึงที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที เพื่อให้ได้เศษชิ้นงานอลูมิเนียมดังแสดงในรูปที่ 5(a) นำเศษอลูมิเนียมมาทำการคัดขนาดโดยการร่อนผ่านตะแกรงให้เศษอลูมิเนียมมีขนาดอยู่ในช่วง 1.7 ถึง 3.35 มิลลิเมตร ทำความสะอาดเศษอลูมิเนียม

โดยการล้างด้วยสารละลายอะซิโตน (Acetone) เพื่อล้างคราบน้ำมันจากการกลึง แล้วนำไปทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ในสารละลายของน้ำกับเอทิลแอลกอฮอล์ สัดส่วน 1:3 เพื่อทำความสะอาดเศษอลูมิเนียม เป่าลมจนแห้ง แล้วนำเศษอลูมิเนียมไปบรรจุเข้าไปในแม่พิมพ์โลหะและอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ที่อุณหภูมิห้อง ใช้แรงอัด 40 เมกะปาสคาล ในอัตราการกด 2 มิลลิเมตรต่อนาที โดยอัดจนปริมาตรลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ เพื่อกระตุ้นให้เกิดความเครียดมากขึ้นและเพิ่มความหนาแน่นของดิสโลเคชันทำให้ได้ชิ้นงานทรงกระบอกดังรูปที่ 5(b) นอกจากนั้นผู้วิจัยยังได้เตรียมชิ้นงานขนาด 1x1x6 เซนติเมตร ที่ผ่านการอบอ่อนเต็มที่ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส นาน 5 ชั่วโมง แต่ปราศจากการกระตุ้นให้เกิดความเครียด เพื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานชิ้นงานผ่านการกระตุ้นด้วยความเครียดทั้ง 3 รูปแบบดังที่กล่าวมาข้างต้น

จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการเพิ่มความเครียดทั้งสามรูปแบบและชิ้นงานที่ไม่ได้กระตุ้นให้เกิดความเครียด มาอบหลอมละลายบางส่วน โดยอุณหภูมิที่ใช้คือ 595 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการอบแช่คือ 35 นาที ซึ่งเป็นอุณหภูมิและเวลาที่ได้มาจากการทดลองขั้นต้นด้วยเทคนิค SIMA และเป็นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเปลี่ยนโครงสร้างของเกรนที่ถูกกระตุ้นความเครียดด้วยวิธีการรีด ที่ทำให้ค่าปัจจัยรูปร่างมีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุดโดยได้จากการออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในการเปลี่ยนโครงสร้างด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MINITAB V.14 ภายใต้ 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบหลอมละลายบางส่วน 3 ระดับ คือ 585 595 และ 605 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการอบหลอมละลายบางส่วน 3 ระดับ คือ 15 25 และ 35 นาที ผู้วิจัยได้ใช้รูปแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็ม 3^2 (3^2 full factorial design) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง โดยชิ้นงานแต่ละรูปแบบจะถูกอบเพื่อหลอมละลายบางส่วนในเตาอบชนิดเหนี่ยวนำไฟฟ้า Digicon รุ่น DD-6 220V/3A/50Hz และมีการควบคุมอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ตลอดเวลา หลังจากอบตามเวลาที่กำหนดเรียบร้อยแล้ว ชิ้นงานจะถูกนำมาเย็นตัวในน้ำอุณหภูมิห้องทันที ทำการทดลองชิ้นงานทั้งสามรูปแบบนี้ซ้ำเป็นจำนวน 3 ครั้งเพื่อยืนยันผลการทดลอง



รูปที่ 4 a) ชิ้นงานรูปแบบที่ 1 ถูกเตรียมเพื่อนำไปเพิ่มความเครียดด้วยวิธีการรีด b) ชิ้นงานรูปแบบที่ 2 ถูกเตรียมเพื่อนำไปเพิ่มความเครียดด้วยวิธีการอัด

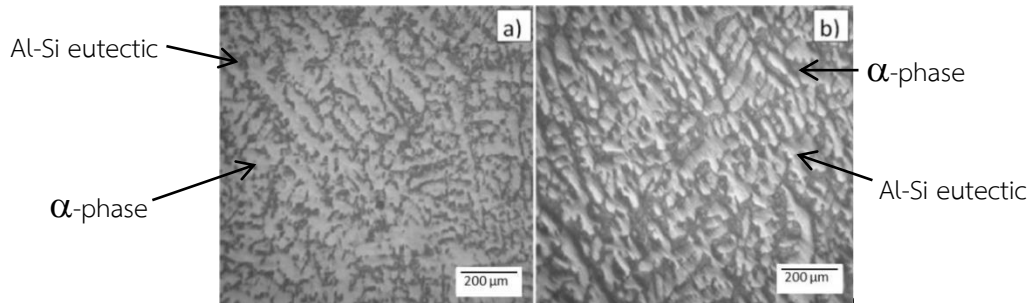


รูปที่ 5 a) เศษอลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลอง b) ชิ้นงานรูปแบบที่สาม เศษอลูมิเนียมจากงานกลึงและอัดเป็นทรงกระบอก

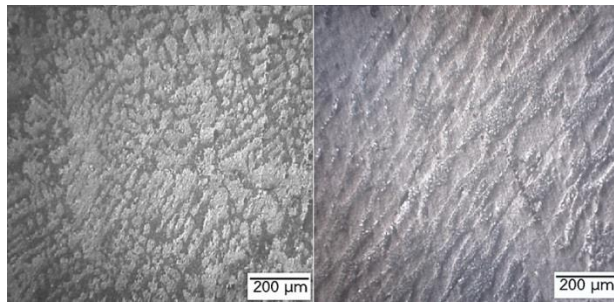
ผลการวิจัย

โครงสร้างจุลภาคของแท่งวัตถุบิลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย Primary dendrite α -phase และเฟส Al-Si eutectic ดังแสดงในรูปที่ 6(a) และเมื่อนำแท่งอินทออลูมิเนียมผสมไปอบอ่อนเต็มที่ ที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส นาน 5 ชั่วโมง เพื่อปรับโครงสร้างและส่วนผสมทางเคมีให้สม่ำเสมอ พบว่า เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นและสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 6(b) และเมื่อนำชิ้นงานก้อนสี่เหลี่ยมขนาด 1x1x6 เซนติเมตรปริมาตรให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง 50 เปอร์เซ็นต์รูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานแสดงให้เห็นว่าเกรนถูกยึดตัวให้ไหลไปตามทิศทางของแรงกดจากการรีดส่วน

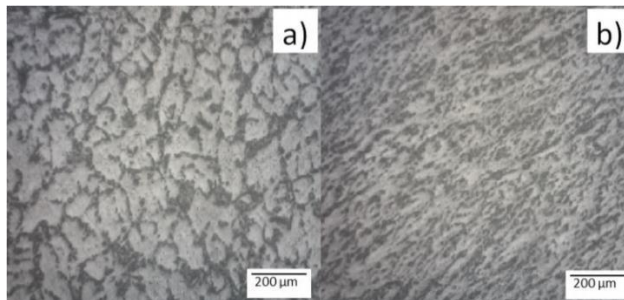
ชิ้นงานทรงกระบอก นำไปอัดเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง 50 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เห็นว่าเกรนถูกอัดตามแรงกระทำ สำหรับเศษอลูมิเนียมที่ได้จากการกลึงแล้วนำไปอัดนั้น โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานแสดงให้เห็นว่า เกรนถูกอัดตามแรงกระทำ เช่นเดียวกัน ซึ่งผลจากการเพิ่มความเครียดทั้งสามรูปแบบนี้ ส่งผลให้ความหนาแน่นของดิสโลเคชันเพิ่มขึ้น พลังงานความเครียดสะสมและความเค้นตกค้างเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 7 รูปที่ 8 และรูปที่ 9 ตามลำดับ



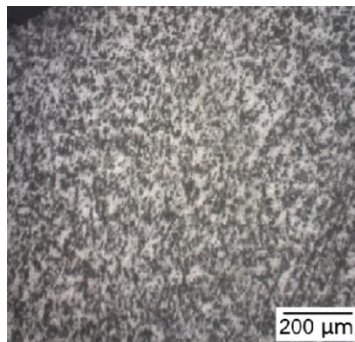
รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคอลูมิเนียม A356 a) แท่งวัตถุดิบ b) ผ่านกระบวนการอบอ่อนเต็มที่ ที่อุณหภูมิ 530 °C นาน 5 ชม.



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านรีดเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง 50% (a) ตัดตามขวาง (b) ตัดตามยาว



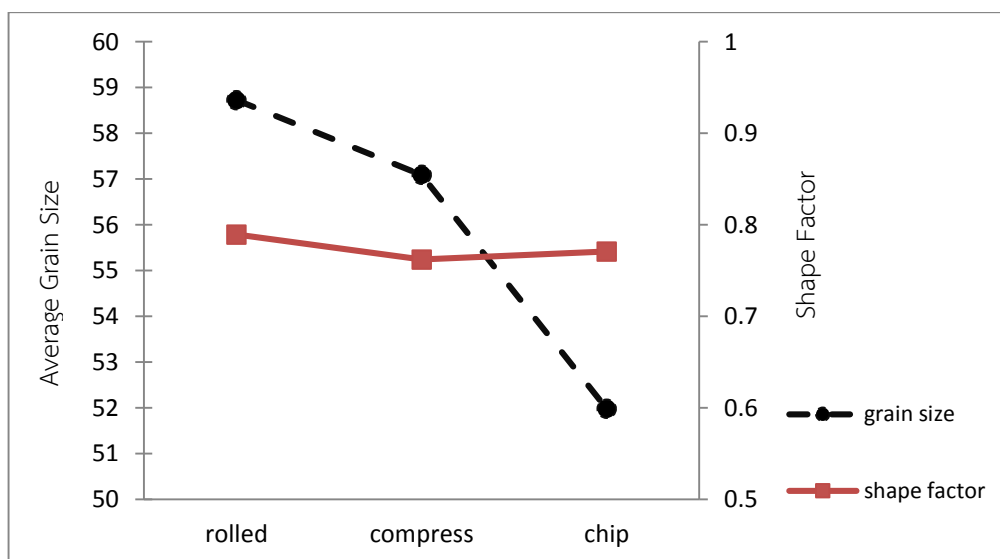
รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านอัดเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง 50% (a) ตัดตามขวาง (b) ตัดตามยาว



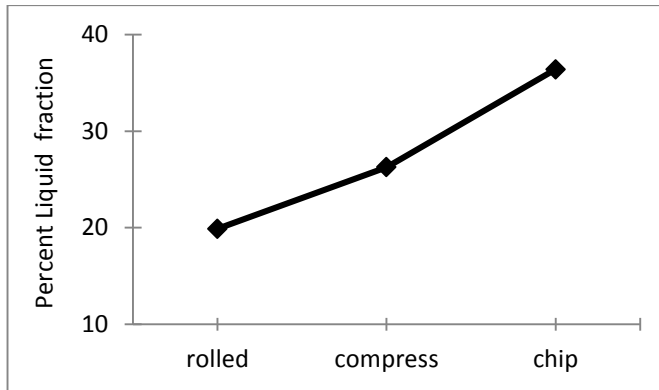
รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคของเศษชิ้นงานอลูมิเนียมที่ได้จากงานตัดทางกลและอัดเป็นชิ้นงานทรงกระบอก โดยอัดจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง 50%

เมื่อนำชิ้นงานที่กระตุ้นด้วยความเครียดทั้ง 3 รูปแบบไปอบละลายบางส่วนที่อุณหภูมิ 595 องศาเซลเซียส นาน 35 นาที โดยชิ้นงานทุกรูปแบบมีการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ผลจากการวัดค่าปัจจัยรูปร่างด้วย โปรแกรม Dewinter material Plus 4.0 พบว่า การกระตุ้นให้เกิดความเครียดโดยวิธีการรีดจะให้ค่าปัจจัยรูปร่างเฉลี่ยที่ดีที่สุด คือ 0.79 ส่วนค่าปัจจัยรูปร่างเฉลี่ยของการกระตุ้นให้เกิดความเครียดโดยวิธีการอัด และการกระตุ้นให้เกิดความเครียดโดยวิธีการแปรรูปทางกล คือ 0.76 และ 0.77 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าขนาดของเกรนเฉลี่ย พบว่า ชิ้นงานที่ถูกกระตุ้นให้เกิดความเครียดโดยวิธีการแปรรูปทางกลจะได้เกรนที่มีขนาดเกรนเฉลี่ยเล็กที่สุด คือ 51.98 ไมโครเมตร ส่วนขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ถูกกระตุ้นให้เกิดความเครียดโดยวิธีการรีดและวิธีการอัด คือ 58.73 และ 57.09 ไมโครเมตร ตามลำดับ และค่าสัดส่วนเฟสของเหลวเฉลี่ยของชิ้นงานที่ถูกกระตุ้นให้เกิดความเครียดด้วยวิธีการรีด มีค่าต่ำที่สุดคือ 19.90 เปอร์เซ็นต์ ค่าสัดส่วนเฟสของเหลวเฉลี่ยจากชิ้นงานที่ถูกกระตุ้นให้เกิดความเครียดด้วยวิธีการอัดและวิธีการแปรรูปทางกล คือ 26.26 และ 36.39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 10 และรูปที่ 11

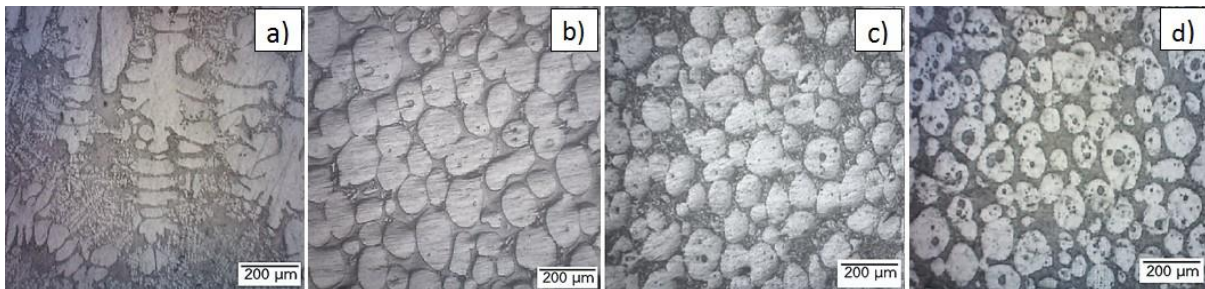
จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่กระตุ้นด้วยความเครียดทั้งสามรูปแบบ และชิ้นงานที่ไม่ได้รับการกระตุ้นให้เกิดความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 12 พบว่าชิ้นงานที่ไม่ได้รับการกระตุ้นให้เกิดความเครียด โครงสร้างยังคงเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ แต่มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 12 (a) ในขณะที่ชิ้นงานที่ได้รับการกระตุ้นให้เกิดความเครียดทั้งสามรูปแบบสามารถพบโครงสร้างก่อนกล α -phase แว่นลอยในเฟส Al-Si eutectic ได้ในทุกชิ้นงานที่ผ่านการกระตุ้นให้เกิดความเครียด แต่มีปริมาณและขนาดเกรนของก่อนกลแตกต่างกันตามเงื่อนไขของการกระตุ้นให้เกิดความเครียด เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของรูปร่างเริ่มต้นของชิ้นงานต่อการเปลี่ยนโครงสร้างเกรนเดนไดรต์เป็นเกรนก่อนกล ระหว่างชิ้นงานเริ่มต้นที่เป็นแท่งอลูมิเนียม และชิ้นงานเริ่มต้นที่เป็นแท่งเศษอลูมิเนียมอัดขึ้นรูป พบว่า ผลของรูปร่างเริ่มต้นของชิ้นงานที่มีต่อการเปลี่ยนโครงสร้างเกรนเป็นเกรนก่อนกล โดยโครงสร้างก่อนกลสามารถพบได้ในชิ้นงานทั้งที่มีรูปร่างเริ่มต้นเป็นก้อนหรือเศษ ดังแสดงในรูปที่ 12 แต่ปริมาณเฟส Al - Si eutectic ซึ่งเป็นเฟสที่แสดงถึงสัดส่วนของเหลวมีปริมาณเพิ่มขึ้นกว่าที่พบในชิ้นงานที่มีรูปร่างเริ่มต้นเป็นแท่งตัน โดยเฟสดังกล่าวจะพบมากในบริเวณขอบของเศษอลูมิเนียมที่ถูกอัดดังรูปที่ 13



รูปที่ 10 กราฟแสดงค่าปัจจัยรูปร่าง และขนาดของเกรน สำหรับการกระตุ้นด้วยความเครียดที่แตกต่างกันทั้งสามวิธี

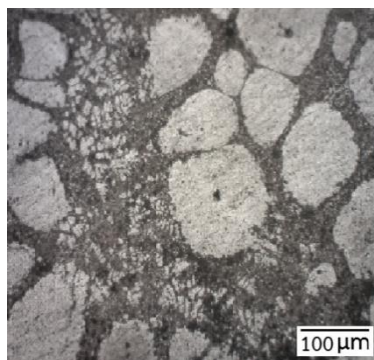


รูปที่ 11 กราฟแสดงสัดส่วนของเหลว สำหรับการกระตุ้นด้วยความเครียดที่แตกต่างกันทั้งสามวิธี



รูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการอบละลายบางส่วนที่อุณหภูมิ 595 องศาเซลเซียส นาน 35 นาที

- (a) ชิ้นงานที่ไม่ได้รับการกระตุ้นด้วยความเครียด (b) ชิ้นงานที่ผ่านการรีด (c) ชิ้นงานที่ผ่านการอัด
(d) ชิ้นงานขึ้นรูปจากการอัดเศษจากงานตัดทางกลเป็นชิ้นงานทรงกระบอก



รูปที่ 13 โครงสร้างจุลภาคแสดงส่วนที่เป็นขอบของเศษอลูมิเนียม หลังผ่านการอบละลายบางส่วนที่อุณหภูมิ 595 องศาเซลเซียส นาน 35 นาที ของชิ้นงานขึ้นรูปจากการอัดเศษจากงานตัดทางกลเป็นชิ้นงานทรงกระบอก

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

1) การเตรียมวัตถุดิบโครงสร้างเกรนก่อนกลบของอลูมิเนียมเกรดผสม A356 ด้วยกระบวนการ SIMA โดยพิจารณาจากปัจจัยรูปร่าง พบว่า การกระตุ้นด้วยความเครียด ด้วยวิธีที่แตกต่างกันสามวิธีคือ การรีด การอัด และแรงทางกล ที่มาจากการตัดชิ้นงานทางกลแล้วนำไปอัด โดยใช้ค่าเงื่อนไขในการอบหลอมละลายบางส่วนเดียวกัน ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเปลี่ยนโครงสร้างของเกรนที่ถูกกระตุ้นด้วยวิธีการรีด พบว่า การกระตุ้นด้วยความเครียดทั้งสามรูปแบบ สามารถเปลี่ยนโครงสร้างเดนไดรต์เป็นเกรนก่อนกลบได้ โดยโครงสร้างก่อนกลบของ α -phase ล้อมรอบด้วยเฟส Al-Si eutectic สามารถพบได้ในชิ้นงานทุกชิ้น แม้จะผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยความเครียดด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า

เงื่อนไขที่เหมาะสมในการอบละลายบางส่วนที่พบในวิธีการกระตุ้นด้วยความเครียดด้วยวิธีการหนึ่ง สามารถนำไปใช้กับการกระตุ้นความเครียดด้วยวิธีการอื่นๆได้

2) ปัจจัยด้านการกระตุ้นด้วยความเครียดในวิธีการที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อขนาดของเกรนก่อนกลม โดยยังมีการกระตุ้นให้เกิดพลังงานความเครียดสะสม และความเค้นตกค้างมาก ยิ่งส่งผลให้เกรนของ α -phase มีขนาดเล็กลงจากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณการเสียรูปอย่างถาวรของชิ้นงานสูงขึ้น เกรนจะถูกยืดออกและแขนเดนไดรท์จะถูกตัดโค้งตามแรงกระทำ พลังงานความเครียดตกค้างจะถูกสะสมไว้ในแขนเดนไดรท์จำนวนมาก ในรูปของดิสโลเคชันซึ่งพลังงานนี้จะถูกปลดปล่อยโดยดิสโลเคชันเหล่านั้นจะจัดเรียงตัวใหม่ในรูปของการเกิดขอบเกรนมุมสูงผ่านกระบวนการตกผลึกใหม่ เมื่อชิ้นงานถูกทำให้ร้อนขึ้นอีกครั้ง พลังงานอิสระของขอบเกรนมุมสูงมีค่ามากกว่าพลังงานดึงดูดระหว่างเฟสของแข็งและของเหลวสองเท่า ดังนั้น บริเวณขอบเกรนมุมสูงซึ่งมีพลังงานสะสมสูงจะถูกละลายออกไปอย่างรวดเร็วเกิดเป็นฟิล์มของเหลวล้อมรอบตัวเกรน และเกิดการหลอมละลายบริเวณแขนของเดนไดรท์ และเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นเกรนก่อนกลม ดังแสดงในรูปที่ 3 ยิ่งปริมาณการเสียรูปมากขึ้นจะส่งผลให้มีปริมาณระนาบเลื่อนและจำนวนขอบเกรนมากขึ้นด้วย เมื่อปริมาณระนาบเลื่อนและจำนวนขอบเกรนเพิ่มสูงขึ้นย่อมนำไปสู่สัดส่วนการแตกหักไปเป็นเกรนย่อย ๆ มากขึ้น [A. Vogel et al., 1979; E. Parshizfard, 2011; H. Arami, 2009; Y. Sirong, 2006; Z. Fan, 2002] จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ถูกกระตุ้นด้วยวิธีการที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 7 ถึงรูปที่ 9 พบว่า วิธีการกระตุ้นให้เกิดความเครียดโดยการแปรรูปทางกลมีการบิดเบี้ยวของเดนไดรท์มากที่สุด เนื่องมาจากแรงกระทำเนื่องจากการกลึง และได้รับแรงอัดในทิศทางเดียวที่กระทำอย่างต่อเนื่องในการอัดเพื่อลดปริมาตรของชิ้นงานลง 50 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณการเสียรูปที่สูงกว่านำไปสู่ปริมาณการตกผลึกใหม่ที่มากขึ้น จึงส่งผลให้เกิดเกรนตกผลึกใหม่จำนวนมากกว่าชิ้นงานที่มีปริมาณการเสียรูปต่ำกว่า หรืออาจกล่าวได้ว่า ชิ้นงานเศษอลูมิเนียมอัดขึ้นรูปนี้มีความเครียดสะสมและความเค้นตกค้างมากกว่าการกระตุ้นด้วยวิธีการรีดหรือวิธีการอัด ส่งผลให้ขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ถูกกระตุ้นให้เกิดความเครียดด้วยการแปรรูปทางกลจึงมีค่าต่ำที่สุดคือ 51.98 ไมโครเมตร ในขณะที่วิธีการกระตุ้นให้เกิดความเครียดด้วยวิธีการรีด มีปริมาณการเสียรูปของเดนไดรท์ต่ำที่สุด เนื่องจาก การรีดซ้ำประมาณ 5 ครั้ง แต่ละครั้งมีการลดลงของพื้นที่หน้าตัดลงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ และทำการรีดซ้ำจนกระทั่งสามารถลดพื้นที่หน้าตัดลงจากเดิม 50 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่วิธีการกระตุ้นให้เกิดความเครียดโดยวิธีการอัดและการแปรรูปทางกลใส่แรงกระทำบนชิ้นงานอย่างต่อเนื่อง ช่วยยับยั้งกระบวนการคลายตัวของชิ้นงาน (Relaxation) ส่งผลให้พลังงานความเครียดตกค้างถูกสะสมไว้ในแขนเดนไดรท์จำนวนมาก ทำให้ค่าขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ถูกกระตุ้นให้เกิดความเครียดด้วยวิธีการอัดมีค่าขนาดเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 57.09 ไมโครเมตร สูงกว่าค่าขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ถูกกระตุ้นให้เกิดความเครียดด้วยวิธีการรีดซึ่งมีค่าเท่ากับ 58.73 ไมโครเมตร เมื่อเกรนมีขนาดเล็กและสม่ำเสมอจะส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงและแข็งเพิ่มขึ้น เพราะมีพื้นที่ขอบเกรนโดยรวมสูงขึ้นช่วยยับยั้งการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันได้มากขึ้น [William D. Callister, Jr., 2003]

3) เมื่อพิจารณาด้านปัจจัยรูปร่างของชิ้นงานเริ่มต้น พบว่า รูปร่างเริ่มต้นของชิ้นงานส่งผลต่อขนาดเฉลี่ยของเกรนก่อนกลม และปริมาณสัดส่วนของเฟส Al – Si eutectic เมื่อใช้เงื่อนไขเดียวกันในการอบหลอมละลายบางส่วน ชิ้นงานที่มีรูปร่างเริ่มต้นเป็นแท่งตันถึงแม้ว่าจะถูกกระตุ้นให้เกิดความเครียดด้วยวิธีการต่างกันจะมีค่าสัดส่วนเฟสของเหลวเฉลี่ยอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการทำ Thixocasting คือ มีค่าอยู่ในช่วง 15 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ [H.V. Atkinson, 2004; S. Chayong, 2005 อ้างอิงจาก สุรัชย์, 2011] แต่ค่าสัดส่วนเฟสของเหลวเฉลี่ยของชิ้นงานที่มีรูปร่างเริ่มต้นเป็นเศษอัดขึ้นรูปจะมีค่าสูงกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ดังแสดงในรูปที่ 11 และจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคจะพบสัดส่วนของเฟส Al-Si eutectic มากบริเวณขอบของเศษอลูมิเนียมอัดขึ้นรูป เนื่องจากชิ้นงานที่มีรูปร่างเริ่มต้นเป็นเศษอลูมิเนียมอัดขึ้นรูป จะมีช่องว่างระหว่างเศษที่อัดขึ้นรูป ทำให้การถ่ายเทความร้อนภายในชิ้นงานกระจายตัวได้เร็วกว่าชิ้นงานที่มีรูปร่างเริ่มต้นเป็นแท่งตัน ส่งผลให้เกิดการหลอมละลายของขอบเกรนได้เร็วขึ้น และเกิดการไหลของเฟส Al-Si eutectic ไปตามบริเวณขอบของเศษอลูมิเนียม จึงเป็นผลให้บริเวณขอบของเศษอลูมิเนียมนี้มีเฟส Al-Si eutectic จำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 13 [S. Kou, 1996; K. Kamiuto, 2000; B. Krittacom, 2009 อ้างอิงจาก ปรีชา ชันติโกมลและคณะ] ดังนั้น เงื่อนไขที่เหมาะสมในอบหลอมละลายบางส่วนที่พบในวิธีการกระตุ้นความเครียดของชิ้นงานที่เป็นแท่งตัน ไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมในการขึ้นรูปกึ่งของแข็งของชิ้นงานที่เป็นเศษอัดขึ้นรูป จำเป็นต้องมีการควบคุมปัจจัยในการอบหลอมละลายบางส่วน เช่น ปริมาณเวลาในการอบหลอมละลายบางส่วน ลดอุณหภูมิในการอบหลอมละลายบางส่วน ปรับความหนาของชิ้นงานเศษอัดขึ้นรูป และควบคุมขนาดของ

เศษอลูมิเนียม เป็นต้น เพื่อให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมโครงสร้างเกรนก่อนกลบของชิ้นงานที่มีรูปร่างเริ่มต้นเป็นแท่งเศษอลูมิเนียมอัดขึ้นรูป

4) เทคนิค SIMA ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อผลิตวัตถุดิบโครงสร้างก่อนกลบ และมีวิธีการกระตุ้นให้เกิดความเครียดภายในชิ้นงานได้หลายรูปแบบ ซึ่งนอกจากวิธีการรีดและวิธีการอัดแล้ว แรงเฉือนและแรงอัดที่กระทำต่อเศษอลูมิเนียมถือเป็นอีกหนึ่งรูปแบบของการกระตุ้นให้เกิดความเครียด ซึ่งหากสามารถนำเศษอลูมิเนียมเหล่านี้มาทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นเกรนก่อนกลบได้โดยไม่ต้องไปผ่านกระบวนการหลอมใหม่ จะทำให้ต้นทุนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมลดลง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย และขอขอบคุณ คุณเจษฎาชนันท์และบริษัทเคอีเอ็มซี อลูมินัม (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนวัสดุสำหรับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- ปรีชาขันตีโกมล, การฉนวนหุ้มชาติ,ไมตรีพลสงครามและ อมรทัศน์จั่วแจ่มใส. (2557). การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบฉนวนความร้อนสำหรับ แก๊สร้อนไหลโดยใช้วัสดุพูนเซลล์ลูลาร์เปิดแผ่นประกบ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน. นครราชสีมา.
- สุรัชย์ นุ่มสารพัฒน์ และ สุอังคนา ลี. (2554). โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมผสมรีดเย็น 2024 กิ่งของแข็งจากขบวนการ SIMA. การประชุมวิชาการรายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม.ชลบุรี, 20-21 ตุลาคม 2554 หน้า 256.
- A. Mahdavi, M. Bigdeli, M. HajianHeidary and F. Khomamizadeh.(2008). **Solid State Phenomena**, vol. 141-143, pp 367-372.
- A. Morita, in: A.K. Bhasin, J.J. Moore, K.P.Young, S. Midson (Eds.).(1998). **Proceedings of the 6th International Conference on Aluminum Alloys**, Toyohashi, Japan.
- D.B. Spencer, R. Mehrabian, and M.C. Flemings.(1972). "Rheological behavior of Sn-15 wt% Pb in the crystallization range," **Metallurgical Transaction**, vol. 3, no.7, pp. 1925-1932.
- E. Parshizfard, S.G. Shabestari.(2011)."An Investigation on the Microstructural Evolution and Mechanical Properties of A380 Aluminum Alloy During SIMA Process". **Journal of Alloys and Compounds**, vol. 509. Pp 9654-9658.
- G. Hirt, W. Bleck, A. Bühring-Polaczek, H. Shimahara, W. Püttgen, and C. Afrath.(2006). "Semi solid casting and forging of steel," **Diffusion and Defect Data B**, vol. 116-117, pp. 34-43.
- H. Arami, R. Khalifehzadeh, H. Keyvan, F. Khomamizadeh.(2009). **Journal of Alloys and Compounds**, vol. 468.
- H.V. Atkinson.(2005). "Modelling the semisolid processing of metallic alloys," **Progress in Materials Science**, vol. 50, no. 3, pp. 341-412.
- J. Gilbert Kaufman and Elwin L. Rooy.(2004). **Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes and Applications**. pp 10.
- K.P. Young, C.P. Kyonka, and J.A. Courtois.(1982). "Fine grained metal composition," US Patent No.4, 415, 374.
- M. HajianHeidary, M. Bigdeli, A. Mahdavi and F. Khomamizadeh.(2008). **Solid State Phenomena**, vol. 141-143, pp 391-396.
- M.N. Mohammed, et al. (2013). **Scientific World Journal**, vol. 2013.
- S. Kou. (1996). **Transport Phenomena and Materials Processing**. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- S. Numsarapatnuk, S.Chayong, Songklanakarin.(2013). **Journal of Science and Technology**, vol. 35, no.5.
- Wang Zhen-yu et al. (2010). **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, vol. 20, s744-s748.

William D. Callister, Jr. (2003). **Materials Science and Engineering An Introduction (6th Edition)**. USA: John Wiley & Sons, Inc.

Yu Sirong, Li Dongcheng and N.Kim.(2006). **Materials Science and Engineering A**, vol. 420, pp 165-170.

Z. Fan.(2002). “Semisolid metal processing,” **International Materials Reviews**, vol. 47, no. 2, pp.49-86.