

โครงสร้างจุลภาคและความแข็งของอะลูมิเนียมพรุนขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีโลหะผง โดยใช้เกลือเป็นวัสดุแทนที่รูพรุน

Microstructure and Hardness of Porous Aluminum Fabricated through Powder Metallurgy Route using NaCl as Space Holder

สุนิสำ คำสุข* โรสมาริน สุกษสม จันทรทา นาควชิรตระกูล การ์ณิฐา นรินนอ กปวีณา วิเชียรศิริติ กล่อมใจ
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

E-mail: sunisak@eng.buu.ac.th *

Sunisa Khamsuk* Rosemarin Sukhasem Chantra Nakvachitrakul Kanitha Narinnok Paweena Wichian
Keerati Komjai

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

E-mail: sunisak@eng.buu.ac.th *

บทคัดย่อ

อะลูมิเนียมพรุนถูกสร้างขึ้นด้วยกรรมวิธีขึ้นรูปโลหะผงโดยใช้เกลือเป็นสารสร้างรูพรุน ในการผลิตอะลูมิเนียมพรุนผงเกลือถูกผสมลงในผงอะลูมิเนียมในปริมาณ 10 – 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นนำผงอะลูมิเนียมผสมไปอัดขึ้นรูปที่ความดันคงที่ 400 เมกะปาสคาลและเผาหลอมรวมที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง โครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งของอะลูมิเนียมพรุนจะทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเครื่องทดสอบความแข็งตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าปริมาณของเกลือส่งผลต่อวิวัฒนาการของโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของอะลูมิเนียมพรุนเป็นอย่างมาก ปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเกลือ ในขณะที่ความแข็งลดลงเมื่อปริมาณเกลือเพิ่มขึ้น รูพรุนที่เกิดขึ้นมีรูปร่างคล้ายกับรูปร่างของเกลือและมีการกระจายตัวที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ในการศึกษาครั้งนี้สามารถผลิตอะลูมิเนียมพรุนที่มีความพรุนสูงถึง 61.54 %

คำหลัก อะลูมิเนียมพรุน, กรรมวิธีแทนที่รูพรุนและโครงสร้างจุลภาค

Abstract

Porous aluminums were fabricated by powder metallurgy using sodium choline (NaCl) as space holder agent. In order to produce porous aluminum, NaCl powders were mixed with aluminum powders at various amounts in the range of 10 – 60 %wt. Mixed powders were compacted at a constant pressure of 400 MPa and subsequently sintered at 650 °C for 1 hr. Microstructure and hardness of porous aluminum were characterized by scanning electron microscope and hardness tester, respectively. The results showed that the evolution of microstructure and hardness of porous aluminum were strongly affected by amount of NaCl. The porosities increased with increasing the contents of NaCl. Meanwhile the hardness decreased with increasing the amount of NaCl. Shape of pore looked like NaCl geometry and the distribution of pore was relatively homogenous. Porous aluminum with having high porosity of 61.54 % was successfully produced in this study.

Keywords: porous aluminum, space holder method and microstructure

1. บทนำ

อะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสมเป็นโลหะที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากเป็นอันดับ 2 รองจากเหล็ก เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ ได้แก่ มีน้ำหนักเบา ทนการกัดกร่อนได้ดี แข็งแรง เหนียวสูง จุดหลอมเหลวต่ำ ขึ้นรูปได้ง่าย ราคาถูกและสามารถนำมารีไซเคิลได้ [1] ในปัจจุบันมีการนำอะลูมิเนียมไปผลิต ชิ้นส่วนรถยนต์ วัสดุก่อสร้าง อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องใช้ในครัวเรือนและผลิตภัณฑ์อื่นๆ อีกหลายชนิด รวมทั้งถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ทดแทนชิ้นส่วนที่ทำด้วยเหล็กเพิ่มมากขึ้น เพื่อลดน้ำหนักของรถยนต์, โครงสร้างสิ่งก่อสร้างและผลิตภัณฑ์อื่นๆ จากสถิติที่ผ่านมาพบว่าการใช้อะลูมิเนียมมีแนวโน้มที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการขยายตัวทางเศรษฐกิจ [2, 3] รวมทั้งตอบสนองต่อนโยบายลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิง เพื่อลดปริมาณมลพิษทางอากาศ ถึงแม้ว่าอะลูมิเนียมจะมีคุณสมบัติที่ดีอย่างที่กล่าวมาข้างต้น โดยเฉพาะในด้านของราคาและน้ำหนัก แต่เนื่องด้วยสภาวะเศรษฐกิจมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก โดยเฉพาะราคาน้ำมันและราคาวัสดุที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [3] ซึ่งส่งผลให้ผู้ใช้จ่ายสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องหาวัสดุที่มีราคาถูกและช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในด้านอื่น เพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายของผู้บริโภค อะลูมิเนียมพูนเป็นอีกหนึ่งวัสดุที่สามารถตอบโจทย์ความต้องการข้างต้นได้ เนื่องจากอะลูมิเนียมพูนมีน้ำหนักเบาและใช้วัสดุในการผลิตที่น้อยเมื่อเทียบกับแท่งอะลูมิเนียมตัน ดังนั้นอะลูมิเนียมพูนจะช่วยลดต้นทุนวัตถุดิบและลดปริมาณการใช้น้ำมัน

อะลูมิเนียมพูนจัดเป็นวัสดุวิศวกรรมสมัยใหม่ที่โครงสร้างภายในมีความพรุนสูง ทำให้มีน้ำหนักเบาระบายความร้อน ดูดซับเสียงและพลังงานได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับโลหะตันที่มีปริมาตรเท่ากัน [4,5] จากการศึกษาเชิงสถิติในช่วง 40 ปีที่ผ่านมา พบว่ามีการนำอะลูมิเนียมพูนมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ รถไฟ ได้นำอะลูมิเนียมพูนมาผลิตเป็นชิ้นส่วนหลากหลายชนิด เช่น แบตเตอรี่ ตัวกรองและลูกปืนหล่อเลี้ยงอัตโนมัติ [6] ซึ่งส่งผลให้รถยนต์และรถไฟมีความเร็วและน้ำหนักเบาขึ้นทำให้การใช้น้ำมัน

เชื้อเพลิงลดลง ลดมลพิษทางอากาศและทางเสียง นอกจากนี้ยังพบว่า อุตสาหกรรมต่างๆ เริ่มหันมาให้ความสนใจวัสดุกลุ่มนี้มากขึ้นและมีแนวโน้มที่จะถูกนำไปใช้ในงานอื่น ๆ เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย [7]

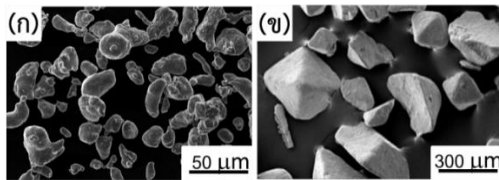
โลหะพูน สามารถผลิตได้หลายวิธี เช่น การตกตะกอนของไอ (Vapor deposition), การหล่อขึ้นรูปโดยอาศัยสารสร้างรูพูน (Casting around space holder), การสร้างฟองอากาศโดยตรง (Direct foaming of metals), การขึ้นรูปโลหะผงโดยใช้วัสดุแทนที่พูน หรือ การอัดขึ้นรูปโดยใช้วัสดุแทนที่พูน และ อื่นๆ ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน ในปัจจุบันพบว่าการผลิตขึ้นรูปโดยใช้วัสดุแทนที่พูนเป็นกรรมวิธีที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในการผลิตโลหะพูนมากเป็นอันดับต้นๆ เนื่องจากเป็นกรรมวิธีที่ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการผลิตและใช้ต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ รวมทั้งสามารถประยุกต์ใช้ได้กับหลากหลายวัสดุ และสามารถสร้างโลหะพูนที่มีความพรุนสูง [8-14]

เนื่องจากกรรมวิธีการผลิตนี้เพิ่งถูกพัฒนาขึ้น ทำให้การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของโลหะพูนที่ได้จากการผลิตนี้ยังคงมีจำนวนจำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงของอะลูมิเนียมพูนขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีโลหะผงโดยใช้เกลือเป็นวัสดุแทนที่พูน

2. การดำเนินงานวิจัย

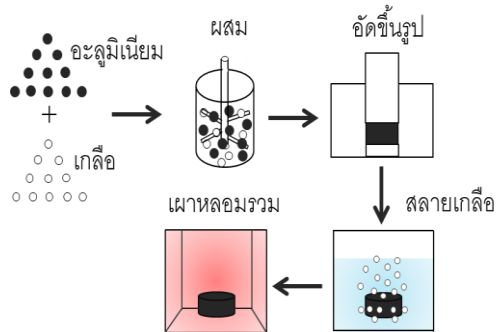
วัสดุที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้มี 2 ชนิด คือ ผงอะลูมิเนียมและผงเกลือ ซึ่งรายละเอียดของวัสดุแต่ละชนิดมีดังนี้

ผงอะลูมิเนียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ผลิตโดย บริษัท ขั้วบอน จำกัด เป็นผงที่มีความบริสุทธิ์ 99.9 % และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 44 ไมโครเมตร อนุภาคของผงอะลูมิเนียมที่ซื้อมาเพื่อการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้มีรูปร่างค่อนข้างอิสระดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) ส่วนผงเกลือที่ใช้เป็นสารรูพูนในครั้งนี้ผลิตโดยบริษัท อุตสาหกรรมเกลือบริสุทธิ์ จำกัด เกลือที่ซื้อมาจะถูกนำไปบดและคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อนเบอร์ 60 (ขนาดเทียบเท่ากับ 250 ไมโครเมตร) อนุภาคเกลือที่ผ่านการบดมีรูปร่างเป็นสามเหลี่ยมคล้ายกับปิรามิดและมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 46 ถึง 250 ไมโครเมตรดังแสดงในรูปที่ 1 (ข)



รูปที่ 1 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope (SEM) micrograph) ของ (ก) ผงอะลูมิเนียม และ (ข) ผงแก้ว

รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปอะลูมิเนียมพูนในการขึ้นรูปอะลูมิเนียมพูนจะเริ่มต้นจากการผสมผงแก้วกับผงอะลูมิเนียมในอัตราส่วนตามตารางที่ 1 จากนั้นทำการผสมโดยใช้เครื่องผสม (Mixing machine) 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำผงอะลูมิเนียมที่ผ่านการผสมแล้วไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่ความดันคงที่ 400 เมกะปาสคาล ในแม่พิมพ์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ชิ้นงานที่ผ่านการอัดจะถูกนำไปทำการสลายเกล็ดในน้ำด้วยเครื่องอุลตราโซนิกที่อุณหภูมิคงที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการเผาหลอมรวม (Sintering) ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง



รูปที่ 2 กระบวนการขึ้นรูปอะลูมิเนียมพูน

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมระหว่างผงแก้ว(NaCl) และผงอะลูมิเนียม (Al) ในหน่วย % โดยน้ำหนัก (wt%)

Composite	Al (wt%)	NaCl (wt%)
Al	100	0
Al-10NaCl	90	10
Al-20NaCl	80	20
Al-30NaCl	70	30
Al-40NaCl	60	40
Al-50NaCl	50	50
Al-60NaCl	40	60

ชิ้นงานที่ผ่านการเผาหลอมรวมจะถูกนำไปศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชิ้นงานที่จะนำไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคจะถูกเตรียมผิวหน้าทดสอบโดยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800 และ 1,000 ตามลำดับ จากนั้นขัดด้วยผงอะลูมินาขนาด 0.5, 0.3 และ 0.05 ไมโครเมตร ตามลำดับ การขัดในขั้นตอนนี้จะทำการขัดโดยใช้เครื่องขัด (Mechanical polishing machine) ในอัตราเร็ว 1200 รอบต่อนาที จากนั้นทำการกัดกรด (Etching) ในสารละลาย ที่มีส่วนผสมของ 6 % กรดไนตริก 12 % กรดไฮโดรคลอริก 1 % กรดไฮโดรฟลูออริก และ 81 % น้ำกลั่น 15 วินาที

ค่าความพรุนของชิ้นงานที่ผ่านการเผาหลอมรวมจะวัดโดยวิธีอาร์คิมิดีส (Archimedes method) ชิ้นงานที่จะทำการวัดค่าความพรุนจะถูกนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปต้มในน้ำเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ทั้งให้อิ่มตัวในน้ำ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักในน้ำ จากนั้นชั่งน้ำหนักด้วยกระดาษชั่งแล้วนำไปชั่งน้ำหนักในอากาศ ค่าความพรุนและความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) และ (2) [10,12,13] ตามลำดับ

$$\text{ความพรุน (\%)} = \frac{(W_w - W_d) \times 100\%}{(W_w - W_s)} \dots\dots (1)$$

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{W_d \times \rho_w}{(W_w - W_s)} \dots\dots (2)$$

เมื่อ :

Wd คือ น้ำหนักแห้งของชิ้นงาน (กรัม)

Ws คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ (กรัม)

Ww คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งในอากาศวัดค่า (กรัม)

ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

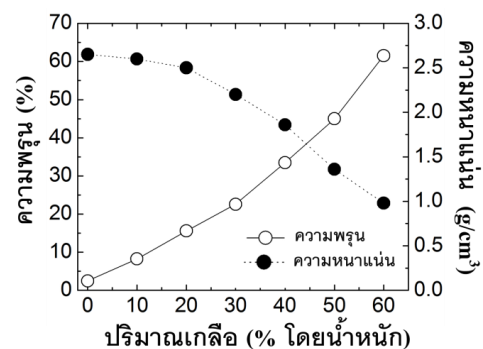
ความแข็งของชิ้นงานจะทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งรุ่น Instron wolpert เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปครั้งนี้มีความพรุนค่อนข้างสูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานในหน่วยของบิลเนลล์ โดยใช้หัวกดลูกบอลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตรและแรงกด 31.5 กิโลกรัมแรง (kgf)

3. ผลการทดลอง

ปริมาณรูพรุน

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเกลือกับความพรุนและความหนาแน่นของอะลูมิเนียม จากการทดลองพบว่าปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 2.47 % เป็น 8.25 % เมื่อเติมเกลือในปริมาณ 10 % โดยน้ำหนัก และปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณของเกลือเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นลดลงเมื่อปริมาณของเกลือเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองครั้งนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของนักวิจัยหลายท่านที่ใช้เกลือเป็นสารสร้างรูพรุนในการขึ้นรูปโลหะพอร์ซเซดอื่น เช่น นิเกิลผสมพอร์ซเซด [9] อะลูมิเนียมพอร์ซเซด [10] และไทเทเนียม [11] การเกิดรูพรุนในเนื้อของอะลูมิเนียมพอร์ซเซดเกิดจากการสลายตัวของเกลือในระหว่างกระบวนการสลายเกลือในน้ำโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก ส่งผลให้บริเวณนั้นเกิดช่องว่างหรือที่เราเรียกว่า “รูพรุน” ขึ้นในเนื้อของอะลูมิเนียม ดังนั้นเมื่อปริมาณของเกลือเพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลให้ปริมาณรูพรุนในเนื้อของอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ในการทดลองครั้งนี้ค้นพบว่าการผลิตอะลูมิเนียมพอร์ซเซดโดยใช้เกลือเป็นสารสร้างรูพรุนครั้งนี้สามารถผลิตอะลูมิเนียมพอร์ซเซดที่มีความพรุนสูงถึง 61.54 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณเกลือ 60 % โดยน้ำหนัก ซึ่งสูงกว่างานวิจัยของ Z. Hussain และ N. S. A. Suffin [10] ที่ใช้เกลือเป็นสารสร้างรูพรุนในปริมาณ 60 % โดยน้ำหนักเท่ากันในการขึ้นรูปอะลูมิเนียมพอร์ซเซด

โดยอาศัยกรรมวิธีในการขึ้นรูปในลักษณะเดียวกัน ซึ่งสาเหตุที่ค่าความพรุนในงานวิจัยนี้สูงกว่าของ Z. Hussain และ N. S. A. Suffin อาจเกิดจากการลำดับขั้นตอนในการสลายเกลือที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ทำการสลายผงเกลือก่อนที่จะทำการเผาหลอมรวม ในขณะที่ Z. Hussain และ N. S. A. Suffin ได้ทำการสลายเกลือหลังจากกระบวนการเผาหลอมรวม ซึ่งอุณหภูมิของอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการนี้ (Sintering) จะมีการเรียงตัวที่แน่นชิดติดกันมากขึ้นซึ่งอาจจะส่งผลต่อการสลายของเกลือออกจากอะลูมิเนียม มีความยากขึ้นและอาจทำให้มีเกลือบางส่วนตกค้างอยู่ในเนื้อของอะลูมิเนียมพอร์ซเซด

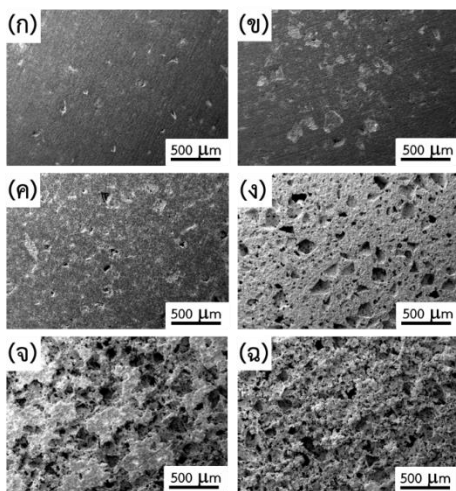


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเกลือกับความพรุนและความหนาแน่นของอะลูมิเนียมพอร์ซเซด

โครงสร้างทางจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมพอร์ซเซดที่ได้จากการขึ้นรูปจากการเติมผงเกลือในปริมาณส่วนผสมที่แตกต่างกันตั้งแต่ 10 % ถึง 60 % แสดงดังรูปที่ 4 (ก) – (จ) ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าที่ส่วนผสมเกลือ 10 % โดยน้ำหนัก รูพรุนที่เกิดขึ้นมีปริมาณค่อนข้างน้อยและมีการกระจายตัวของรูพรุนไม่สม่ำเสมอ (รูปที่ 4 (ก)) ขนาดของรูพรุน (วัดจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด) โดยเฉลี่ยคือ 161 ไมโครเมตร ซึ่งขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้นที่ส่วนผสมนี้มีขนาดเล็กกว่าขนาดของเกลือ เล็กน้อย เมื่อเพิ่มปริมาณเกลือมากขึ้น พบว่าปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการวัดค่าความพรุนในเนื้อของอะลูมิเนียมพอร์ซเซดในรูปที่ 3 นอกจากนี้ยังพบว่าการกระจายตัวของรูพรุนมีความสม่ำเสมอ

มากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเกลือ ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) และ (ค) โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมพูนมีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนที่ส่วนผสมของเกลือตั้งแต่ 40 % โดยน้ำหนักขึ้นไป นั่นคือพื้นผิวส่วนมากของอะลูมิเนียมพูนถูกครอบครองโดยรูพูน ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) – (จ) โดยโครงสร้างภายในมีการเชื่อมต่อกันด้วยผนังอะลูมิเนียม (รูปที่ 4 (ง) และ (จ)) การทดลองนี้พบว่าปริมาณของผงเกลือสูงสุดที่สามารถผสมลงในผงอะลูมิเนียมแล้วทำให้เมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้วชิ้นงานยังคงรูปร่างได้คือ 60 % โดยน้ำหนัก



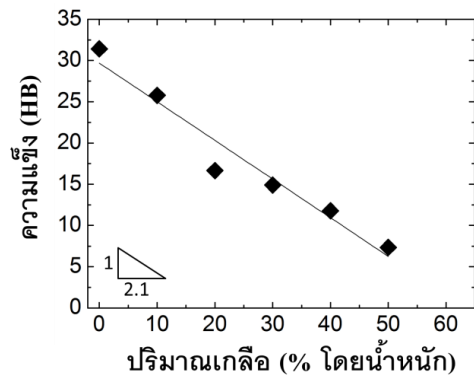
รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมพูนที่เกิดจากการเติมส่วนผสมของเกลือในปริมาณที่แตกต่างกัน (ก) 10 % (ข) 20 % (ค) 30 % (ง) 40 % (จ) 50 % และ (จ) 60 % โดยน้ำหนัก

ความแข็ง

รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบความแข็งของอะลูมิเนียมพูนที่ได้จากการขึ้นรูปโดยวิธีการอัดขึ้นรูปโดยใช้เกลือเป็นสารสร้างรูพูนในปริมาณส่วนผสมของเกลือที่แตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่าความแข็งของอะลูมิเนียมพูนลดลงจาก 32 HB เป็น 27 HB เมื่อเติมผงเกลือในปริมาณ 10 % และค่าความแข็งลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณของเกลือ สาเหตุหลักของการลดลงของค่าความแข็งของอะลูมิเนียมพูนเมื่อปริมาณเกลือเพิ่มขึ้นเกิดจากการเพิ่มขึ้นของรูพูนในเนื้อของอะลูมิเนียมพูนทำให้พื้นที่ของชิ้นงานที่ใช้สำหรับการรับแรงลดลง ส่งผลให้ความแข็ง

ของอะลูมิเนียมพูนลดลง

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของอะลูมิเนียมพูนกับปริมาณเกลือ



จากข้อมูลการทดลองในครั้งนี้พบว่าค่าความแข็งของอะลูมิเนียมพูนมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับปริมาณของเกลือ ดังสมการที่ 3

$$Y = -0.47X + 29.7 \dots\dots\dots (3)$$

เมื่อ:

Y คือ ค่าความแข็ง (HB)

X คือ ปริมาณของเกลือ (% โดยน้ำหนัก)

4. สรุป

จากผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของอะลูมิเนียมพูนขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีโลหะผงโดยใช้เกลือเป็นวัสดุแทนที่รูพูนสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าความพูนเพิ่มขึ้นและค่าความหนาแน่นของอะลูมิเนียมพูนลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเกลือในการทดลองครั้งนี้สามารถผลิตอะลูมิเนียมพูนที่มีความพูนสูงถึง 61.54 %
2. การกระจายตัวของรูพูนมีความสม่ำเสมอมากขึ้นและรูพูนมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเกลือ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่เห็นได้อย่างชัดเจนเกิดขึ้นที่ปริมาณส่วนผสมของเกลือ 40 % โดยน้ำหนัก
3. ความแข็งของอะลูมิเนียมพูนลดลงเมื่อปริมาณเกลือเพิ่มมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] นกิสพร มีมงคล, โลหกรรมวัสดุผง,
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2548
- [2] มนัส สติรจินดา, โลหะนอกกลุ่มเหล็ก,
กรุงเทพมหานคร:
สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541
- [3] สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, การ
สำรวจ
สถานภาพอุตสาหกรรมโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-
ferrous metals): อะลูมิเนียม ภายใต้โครงการ
พัฒนา
ศูนย์ข้อมูลเชิงลึกอุตสาหกรรมเหล็กและโลหะการ
ประจำปี
งบประมาณ 2557, 2557.
- [4] McCullough K.Y.G., Fleck N.A. and Ashby M.F.
(1999) Uniaxial stress-strain behavior of
aluminum alloy foams, *Acta mater*, Vol. 47, p.
2323±2330.
- [5] Bin J., Zejun W. and Naiqin Z. (2007) Effect of
pore size and relative density on the
mechanical properties of open cell aluminum
foams, *Scripta Materialia*, Vol. 56, p. 169–172
- [6] Campus J.M. (2000), *Met. Powder: A Global
survey of production, All. And markets*, Metal
Powder Industries Federation
- [7] Srivastava V.C. and Sahoo K.L. (2007)
Processing, stabilization and applications
of metallic foams, *Materials Science-
Poland*, p. 733–753
- [8] Hasan B. and Ali H. (2010) Production of
aluminum foam by spherical carbamide space
holder technique-processing parameters,
Materials and Design, p.4122–4129
- [9] Liu X.J., Huai Z., Lu Y., C.P. (2012) Wang,
Microstructure and mechanical behavior of
Ni–Cu–Fe–Si porous alloys, *Materials Science
and Engineering: A* 545, P. 111–117
- [10] Hussain Z. and Suffin N. S. A., (2011)
Microstructure and Mechanical Behaviour of
Aluminium Foam Produced by Sintering
Dissolution Process Using NaCl Space
Holder,
Journal of Engineering Science, P. 37–49
- [11] Torres Y., Pavón J.J., Rodríguez J.A.
(2011) Processing and characterization of
Porous titanium for implants by using NaCl
as Space holder, *Journal of Materials
Processing Technology* , P. 1061–1069
- [12] Michailidis, N. & Stergioudi, F., (2011)
Establishment of process parameters for
producing Al-foam by dissolution and powder
sintering method. *Mater. Des.*, 32(3), p. 1559–
1564
- [13] Bafti, H. & Habibolahzadeh, A. (2010).
Production of aluminum foam by spherical
carbamide space holder technique-
processing parameters. *Mater. Des.*, p.
4122–4129