

การพัฒนาโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr สำหรับการปรับสภาพเกรน
ละเอียดและปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนในโลหะผสมหล่อ
อลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียม

The Development of Al-4%B-2%Sr Master Alloy for Refining
and Eutectic Silicon Modification in Al-Si-Mg Cast Alloys

พิสิทธ์ เมืองน้อย จิณกมล ลุยจันทร์ เฉลิมพล กล้ายนิล

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

อีเมล: Phisith.muatr@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr สำหรับการปรับสภาพเกรนละเอียดและการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน พิจารณาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิคอนของโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr ในโลหะผสม Al-Si-Mg โดยการเติมระดับแตกต่างกัน 1-4 wt.% เวลาค้างน้ำโลหะคงที่ 30 นาที จากการศึกษาด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบเชิงโลหะ AlB_2 , SrB_6 และ Al_4Sr บนพื้นอลูมิเนียม ผลการทดลองโดยการเติมโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr ปริมาณ 4 wt.% ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนละเอียดมากกว่าปริมาณการเติม 1, 2 และ 3 wt.% ในขณะที่เฟสยูเทคติกซิลิคอนปรับสภาพกลมมนทั้งหมด จากการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคแสดงว่าขนาดเกรนเฉลี่ยในโลหะผสมจะลดต่ำลง เมื่อปริมาณโลหะแม่เพิ่มมากขึ้น

คำสำคัญ: โลหะแม่, การปรับสภาพ, การปรับสภาพเกรนละเอียด, งานหล่อ

Abstract

The objective of this research is to development of Al-4%B-2%Sr master alloy for refining and modification of eutectic silicon. Efficiency comparison of Al-4%B-2%Sr master alloy in grain refinement and eutectic modification in Al-Si-Mg cast alloy with different additions (1, 2, 3 and 4.0 wt.%) and constant holding time (30 min) were investigated. The XRD studies show AlB_2 , SrB_6 and Al_4Sr intermetallic compound in α -Al matrix. The results show that the addition 4 wt.% of Al-4%B-2%Sr master alloy leads to refining efficiency than 1, 2 and 3 wt.% addition, while eutectic silicon was fully modified into globular morphology. The analyze of macrostructure show that the average grain size of alloy decreased with increasing the master alloy content.

Keywords : Master alloys, Modification, Grain refinement, Casting

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

การปรับสภาพเกรน α -Al ให้มีขนาดเล็กและละเอียด นั้น ส่งผลดีต่อชิ้นงานหล่อหลายประการ เช่น ปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น มีส่วนผสมทางเคมีสม่ำเสมอ ช่วยลดโอกาสการเกิดรูพรุนและจุดเสียต่างๆ ลดการแตกร้าวร้าวที่เกิดขึ้นระหว่างการแข็งตัวและเพิ่มความสามารถในการป้อนเต็มน้ำโลหะหลอมเหลวให้ดียิ่งขึ้น [1] ในปัจจุบันการปรับสภาพเกรนละเอียดนั้นนิยมเติมธาตุผสม เข้าไปในน้ำโลหะหลอมเหลว โดยธาตุดังกล่าวจะฟอร์มตัวเป็นสารประกอบต่างๆ และทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นจากการเกิดนิวเคลียส (Heterogeneous nucleation) เช่น สารประกอบ $TiAl_3$, TiB_2 ในโลหะแม่ชนิด Al-Ti-B, สารประกอบ AlB_2 ในโลหะแม่ Al-B เป็นต้น [1-10]

การปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอน เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญในกระบวนการหล่อ ในโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิกอน สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนเนื่องจากปริมาณซิลิกอน 5-18 wt.% จะส่งผลดีด้านสมบัติการไหลของน้ำอลูมิเนียมหลอมเหลว [11] เป็นที่ทราบกันดีว่าเฟสยูเทคติกซิลิกอนมีลักษณะเป็นแผ่น รูปทรงไม่แน่นอน เนื่องจากการฟอร์มตัวและเติบโต (Growth) ในระนาบ $\langle 112 \rangle$ และมีการ Twining ในระนาบ (111) ในปัจจุบันนิยมเติมธาตุสตรอนเทียม ปริมาณ 0.02-0.04 wt.% ลงไปในน้ำโลหะหลอมเหลว เมื่อโลหะหลอมเหลวแข็งตัวธาตุสตรอนเทียมจะเข้าไปขัดขวางการเติบโตของเฟสซิลิกอนในระนาบ $\langle 112 \rangle$ และเกิดการเติบโตได้หลายทิศทาง ทำให้เฟสยูเทคติกซิลิกอนมีขนาดเล็กลงและมีรูปร่างกลมมนมากขึ้น จากลักษณะดังกล่าวจะส่งผลดีต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่สูงขึ้น [12-13], สามารถลดเวลาการอบให้เป็นเนื้อเดียวกัน [14] การเติมธาตุสตรอนเทียม จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องควบคุมให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสม ในกรณีที่เติมมากเกินไปจะเกิด ฟอร์มตัวเป็นสารประกอบเชิงโลหะ Al_3SrSi_3 มีลักษณะเป็นก้อน กระจายตัวในโครงสร้างจุลภาคและส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อลดต่ำลง [15]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา C. Limmaneevichitr [1] ได้ศึกษาการเชื่อมประสิทธิภาพของโลหะแม่ Al-3%Ti-0.5%B โดย

การเติมในโลหะผสมอลูมิเนียม A356 พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการปรับสภาพอยู่ในช่วง 20 นาที แต่ไม่เกิน 60 นาที เนื่องจากเกิดการตกตะกอนของสารประกอบ $TiAl_3$ และ TiB_2 บริเวณก้นของเบ้าหล่อ มีการศึกษาการปรับสภาพเกรน α -Al โดยใช้โลหะแม่ Al-5%Ti, Al-5%Ti-1%B และ Al-4%B ในโลหะผสม A356 [2] พบว่าโลหะแม่ชนิด Al-4%B มีประสิทธิภาพสูงสุดในการปรับสภาพเกรน การศึกษาผลกระทบของการปรับสภาพเกรนละเอียดในโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิกอน [5] โดยการเติมโลหะแม่ Al-Ti-B ระดับการเติม 0.01-0.15 wt% พบว่าที่ปริมาณการเติม 0.1-0.15 wt% มีประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนละเอียดสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณธาตุซิลิกอนเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนละเอียดจะลดต่ำลง มีงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบการปรับสภาพเกรนละเอียดและปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอนในโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิกอน โดยการผสมกันระหว่างโลหะแม่ Al-Ti-B, Al-B กับ Al-Sr พบว่ามีประสิทธิภาพในการปรับเกรนละเอียดและการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิกอน [3, 6-9] และทำให้สมบัติเชิงกลชิ้นงานหล่อสูงขึ้น [3,9] นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดการฟอร์มตัวของสารประกอบ SrB_6 ในโครงสร้างจุลภาค [6, 8-9] มีการพัฒนาโลหะแม่ขึ้นมาใหม่และทดลองในโลหะผสม A356 [10] โดยเติม Al-4%Sr+2%B ปริมาณ 0.5 wt.% เทลงโมลเหล็กที่อัตราการเย็นตัว $12^\circ C/s$ พบว่ามีประสิทธิภาพที่ดีในการปรับเกรนละเอียด ในขณะที่เฟสยูเทคติกซิลิกอนมีการปรับสภาพแบบ Over modify เนื่องจากสัดส่วนของธาตุสตรอนเทียมสูงและอัตราการเย็นตัวที่เร็วเกินไป

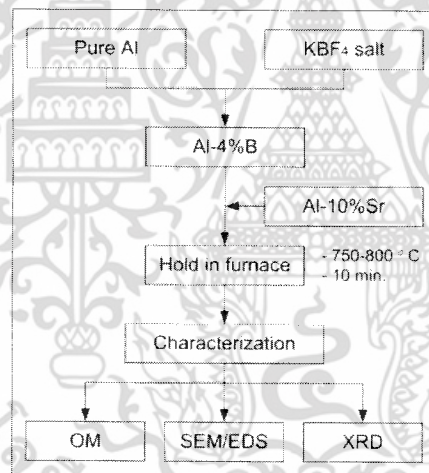
จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะพบว่า การปรับสภาพเกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิกอนนั้น ส่งผลต่อคุณภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อ ซึ่งด้วยข้อจำกัดต่างๆ ที่ทำให้ประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนละเอียดลงต่ำลง เช่น ปริมาณการเติมโลหะแม่ที่ไม่เหมาะสม ปริมาณธาตุซิลิกอนที่สูงของโลหะผสมอลูมิเนียม และการเสื่อมสภาพเมื่อเวลาคั่งน้ำโลหะเพิ่มขึ้น เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมา นั้นยังไม่พบว่ามีการศึกษาและพัฒนาโลหะแม่ชนิด Al-4%B-2%Sr เพื่อใช้ในการปรับสภาพเกรนละเอียดและเฟส

ยูเทคติกซิลิคอน ไปพร้อมๆ กัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโลหะแม่ชนิด Al-4%B-2%Sr เพื่อใช้สำหรับการปรับสภาพเกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิคอนในงานหล่อโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียม

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 การพัฒนาโลหะแม่ชนิด Al-4%B-2%Sr

รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนการพัฒนาโลหะแม่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยการหลอมอลูมิเนียมบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมเกลือ KBF_4 ในปริมาณเท่ากับ Al-4%B เกลือที่เตรียมไว้ จากนั้นนำโลหะไปหลอมอีกครั้ง ที่อุณหภูมิ 750-800 องศาเซลเซียส แล้วเติมโลหะผสมชนิด Al-10%Sr เพื่อให้ได้โลหะแม่ชนิด Al-4%B-2%Sr ค้างน้ำโลหะไว้ 10 นาที



รูปที่ 1 ขั้นตอนการพัฒนาโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr จากนั้นเทลงรางเหล็กที่เตรียมไว้ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงและส่องกราดที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ EDS นอกจากนี้ยังศึกษาสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นในโครงสร้างโดยใช้เทคนิค XRD

2.2 การทดลองการปรับสภาพ

โลหะผสมอลูมิเนียม (A356) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีที่ใช้ในการทดลอง (wt.%)

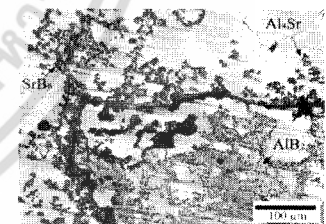
Alloys	Si	Fe	Mg	Cu	Zn
A356	6.95	0.14	0.34	0.04	0.01

กระบวนการหลอมจะใช้เตาไฟฟ้าชนิดลดด้านทานอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เมื่ออินกอตหลอมเหลวเติมฟลักซ์ปกคลุมผิวหน้า 0.5 wt.% และเติมโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr ที่ระดับ 1, 2, 3 และ 4 wt.% ตามลำดับ ค้างน้ำโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ฟันแก๊สอาร์กอน 2 นาที จากนั้นเทลงเบ้าสแตนเลสผั่งบาง ที่มีอัตราการเย็นตัวต่ำ 0.2 °C/s เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบการปรับสภาพเกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิคอนที่เกิดขึ้นจากการเย็นตัวที่เร็ว เทน้ำโลหะที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส นำชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างมหภาค โดยขัดกระดาษทรายจนถึงความละเอียด 800 grit กัดผิวหน้าโดยใช้สารละลาย Poulton's reagent ที่มีส่วนผสมทางเคมี HNO_3 , HCl , HF และน้ำกลั่น จากนั้นวัดขนาดเกรนเฉลี่ยโดยวิธี Linear intercept E112 และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 โครงสร้างจุลภาคโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr

เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคพบว่าประกอบด้วยสารประกอบ AlB_2 มีลักษณะเป็นก้อนขนาดใหญ่ สารประกอบ SrB ที่มีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็ก และสารประกอบ Al_3Sr บนพื้นอลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 2



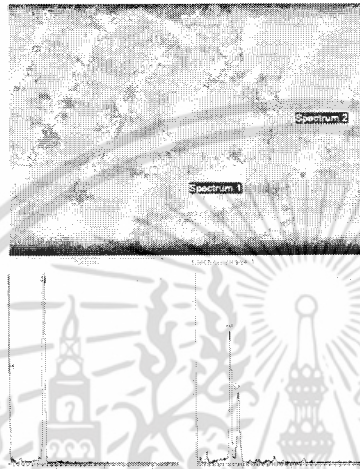
รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr

3.2 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดและเทคนิค ESD

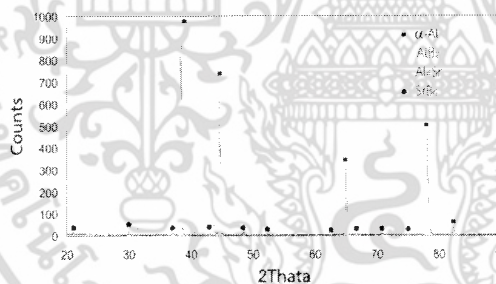
รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดและเทคนิค EDS พบว่าที่ Spectrum 1 ประกอบด้วยธาตุโบรอน 53.12 wt% และธาตุอลูมิเนียม 46.88 wt% ขณะที่ Spectrum 2 พบว่าเกิดจากการรวมตัวกันระหว่างธาตุอลูมิเนียม 37.90 wt% และธาตุสตรอนเทียม 62.10 wt%

3.4 การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค XRD

ผลวิเคราะห์โลหะแม่ Al-4%B-2%Sr โดยใช้เทคนิค XRD แสดงในรูปที่ 4 พบว่าเกิดการฟอร์มตัวของธาตุอลูมิเนียม, สารประกอบ AlB_2 , Al_3Sr และ SrB_6 สอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคที่แสดงในรูปที่ 2



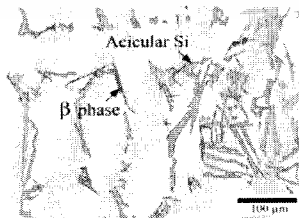
รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดและเทคนิค ESD



รูปที่ 4 ผลวิเคราะห์ XRD ของโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr

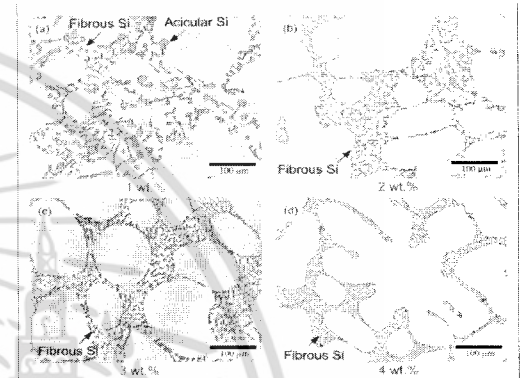
3.5 การปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน

รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน พบว่าประกอบด้วยเฟสซิลิคอนมีลักษณะเป็นแท่งขนาดใหญ่ มีรูปทรงไม่แน่นอน



รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน

รูปที่ 6 (a) แสดงโครงสร้างจุลภาคผ่านการปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน โดยการเติมธาตุสตรอนเทียมในรูปแบบของโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr ปริมาณ 1 wt.% พบว่าเฟสยูเทคติกซิลิคอนมีลักษณะกลมมนและรูปทรงไม่แน่นอน เมื่อปริมาณการเติมโลหะแม่เพิ่มมากขึ้น 2-4 wt.% พบว่าเฟสยูเทคติกซิลิคอนมีลักษณะกลมมนทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 6 (b-d)



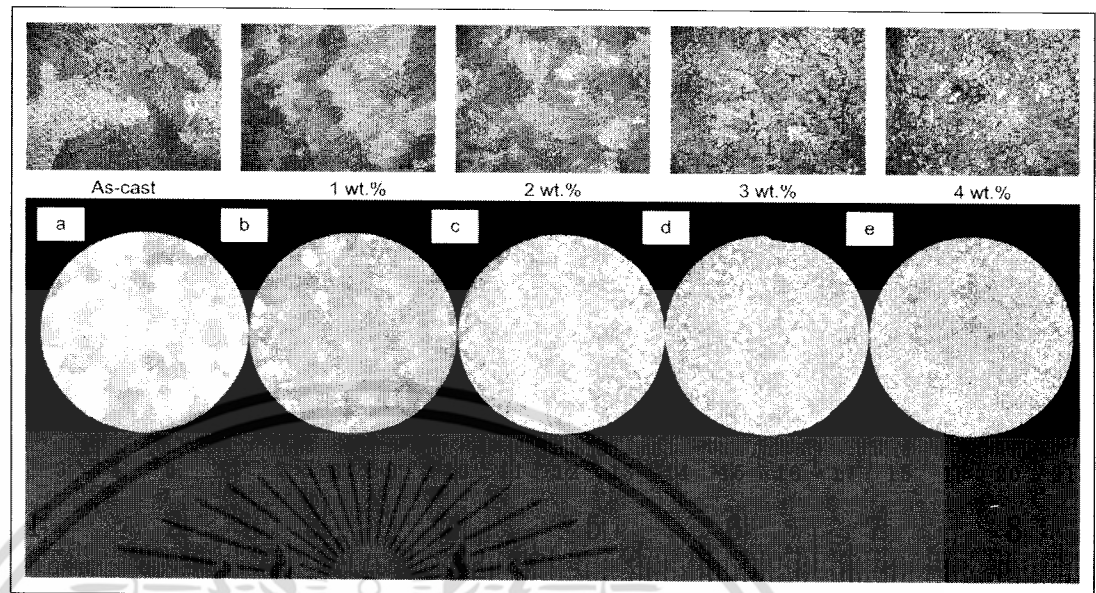
รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอลูมิเนียมหลังปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน

3.5 การปรับสภาพเกรนละเอียด

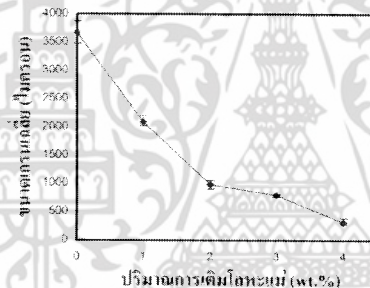
รูปที่ 7 (a) แสดงโครงสร้างมหภาคโลหะผสมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเกรน พบว่าเกรนมีลักษณะที่ใหญ่ เมื่อเติมโลหะแม่ชนิด Al-4%B-2%Sr ปริมาณการเติม 1 wt.% ทำให้เกรนมีขนาดเล็กลงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 7 (b) เมื่อปริมาณการเติมโลหะแม่เพิ่มขึ้นที่ 2 wt.% ส่งผลให้เกรนละเอียดมากขึ้น แสดงในรูปที่ 7 (c) และปริมาณการเติม 3-4 wt.% เกรนมีขนาดเล็กลงอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการเติมที่ 1-2 wt.% ดังแสดงในรูปที่ 7 (d-c)

3.6 ขนาดเกรนเฉลี่ย

รูปที่ 8 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของโลหะผสมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเกรนละเอียด พบว่าเกรนมีขนาดเกรนเท่ากับ 3665 ไมครอน ผลจากการเติมโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr ในปริมาณ 1 wt.% ส่งผลให้ขนาดเกรนมีขนาดเล็กลงเล็กน้อยเท่ากับ 2092 ไมครอน ปริมาณการเติม 2 wt.% เกรนมีเท่ากับ 987 ไมครอน เมื่อปริมาณการเติมโลหะแม่เพิ่มมากขึ้น 3-4 wt.% เกรนมีขนาดเท่ากับ 791 และ 324 ไมครอน ตามลำดับ



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอลูมิเนียมก่อนและหลังการปรับสภาพเกรน



รูปที่ 8 ขนาดเกรนเฉลี่ยที่ระดับการเติมแตกต่างกัน

4. วิเคราะห์การทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้เกิดขึ้นภายใต้งานวิจัยนี้ พบว่าปริมาณการเติมโลหะแม่ในระดับต่างๆ นั้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดและเฟสยูเทคติกซิลิคอนแตกต่างกัน ปริมาณการเติมโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr ระดับ 1-2 wt.% จะมีการฟอร์มตัวของสารประกอบ AlB_2 ที่ทำหน้าที่เป็นจุดกำเนิดนิวเคลียสที่น้อยเกินไป ทำให้ประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนละเอียดลดลง ในขณะที่ระดับการเติม 3-4 wt.% นั้น มีการฟอร์มตัวของสารประกอบ AlB_2 มากเพียงพอ ส่งผลต่อการปรับสภาพเกรนละเอียดที่สมบูรณ์

จากการฟอร์มตัวของสารประกอบ SrB_6 ในโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 2 ทำให้ประสิทธิภาพในการปรับสภาพเกรนละเอียดและปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Mohamed [16]

เนื่องจากสารประกอบดังกล่าวจะตกตะกอนอยู่ด้านล่างของน้ำโลหะหลอมเหลว เมื่อพิจารณาความหนาแน่นพบว่าสารประกอบ SrB_6 มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 3.4 g/cm^3 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความหนาแน่นของอลูมิเนียม 2.7 g/cm^3 จากสาเหตุดังกล่าวทำให้ค่าความเข้มข้นของธาตุโบรอนและธาตุสตรอนเทียมในน้ำโลหะลดลง แต่เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr มีการฟอร์มตัวของสารประกอบ AlB_2 ที่มีค่าความหนาแน่น 3.1 g/cm^3 และ Al_4Sr ที่มีค่าความหนาแน่น 2.949 g/cm^3 ใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นของอลูมิเนียม ส่งผลให้โลหะแม่ชนิดนี้ยังมีประสิทธิภาพที่ดี ในการปรับสภาพเกรนละเอียดและปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอน แต่มีความจำเป็นที่ต้องเติมในปริมาณที่สูงขึ้นมากกว่าปกติ

5. สรุปผลการทดลอง

โครงสร้างจุลภาคของโลหะแม่ Al-4%B-2%Sr ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ประกอบด้วยสารประกอบ AlB_2 , Al_4Sr และ SrB_6 เมื่อทดลองเติมโลหะแม่พบว่าสามารถปรับสภาพเกรน $\alpha\text{-Al}$ และเฟสยูเทคติกซิลิคอน โดยที่ประสิทธิภาพการปรับสภาพเกรนละเอียดจะเพิ่มมากขึ้นตามระดับโลหะแม่ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การปรับสภาพเฟสยูเทคติกซิลิคอนจะมีประสิทธิภาพสูง เมื่อเติมโลหะแม่ที่ปริมาณการเติม 2-4 wt.%

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ ผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่สนับสนุนงบประมาณสำหรับงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Limmaneevichitr, "Fading Mechanism of Grain Refinement of Aluminum-Silicon Alloy with Al-Ti-B Grain Refiners," *Materials Science and Engineering A* 349, pp.197-206, 2003.
- [2] D. Apelian and J. J. A. Chang, *Trans. AFS* 94, pp.797, 1985.
- [3] Y. C. Lee, A. K. Dahle, D. H. John, J. E. C. Hutt, "The Effect of Grain Refinement and Silicon Content on Grain Formation in Hypoeutectic Al-Si Alloys," *Materials Science and Engineering A* 259, pp.43-52, 1999.
- [4] J. G. Li, B. Q. Zhang, L. Wang, W. Y. Yang, H. T. Ma, "Combined Effect and Its Mechanism of Al-3wt.%Ti-4wt.%B and Al-10wt.%Sr Master Alloy on Microstructures of Al-Si-Cu Alloy," *Materials Science and Engineering A* 328, pp.169-176, 2002.
- [5] P. Feng, J. Tang, X. Jin, S. Li, D. Zeng, "Influences of Preparation Condition and Melt Treatment Procedures on Melt Treatment Performance of Al-Ti-B and Al-10Sr Master Alloys," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol.22, 2006.
- [6] L. Lu and A. K. Dahle, "Effects of Sr and B Interactions in Hypoeutectic Al-Si Foundry Alloys," *Light Metal*, 2006.
- [7] D. G. Mallapura, K. R. Udupaa, S. A. Kori, "Studies on The Influence of Grain Refining and Modification on Microstructure and Mechanical Properties of Forged A356 Alloys," *Materials Science and Engineering A* 528, pp.4747-4752, 2011.
- [8] H. Liao and G. Sun, "Mutual Poisoning Effect Between Sr and B in Al-Si Casting Alloys," *Scripta Material* 48, pp.1035-1039, 2003.
- [9] L. Lu and A. K. Dahle, "Effects of Combined Additions of Sr and AlTiB Grain Refiners in Hypocutectic Al-Si Foundry Alloys," *Materials Science and Engineering A*, pp.435-436, 2006.
- [10] M. Mahmoudi, R. Taghlabadi, M. Emamy, "Simultaneous Grain Refining and Modification of 356 Aluminium Alloy Using Aluminium Base Master Alloys Containing Strontium, Titanium and Boron," *Light Metal*, 2005.
- [11] J. Campbell, *Castings*, Butterworth-Heinemann, 2003.
- [12] S. Soo, "Modification Effect of Sr on The Microstructures and Mechanical Properties of Al-10.5Si-2.0Cu Recycled Alloy for Die Casting," *Materials Science and Engineering A*, vol. 532, pp. 151-157, 2012.
- [13] Y. Yang, "Effects of Sr and Sb Modifiers on The Sliding Wear Behavior of A356 Alloy Under Varying Pressure and Speed Conditions," *Wear* 261, pp.1348-1358, 2006.
- [14] K. Eidhed, "Effects of Solution Treatment Time and Sr-Modification on Microstructure and Mechanical Property of Al-Si Piston Alloy," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 24, No.1, 2008.
- [15] E. John and G. Bernard, *The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys*, USA, 1990.
- [16] A. M. A. Mohamed, F. H. Samuel, S. Alkahtani, "Thermal Analysis and Microstructures of Modified Grain-Refined Al-7Si-Mg Cast Alloy," *Light metals*, pp.334-339, 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้