



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Establishment of Graded Hybrid Microstructure Through Centrifugal Casting of a Hypereutectic Al-Mg₂Si Alloy

Ebrahim Aghazadeh¹, Ahad Samadi^{2*}, Seifollah Aghazadeh¹

1. M.Sc. Student, in Materials Engineering, 2 Associate Professor,
Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

Received: 30 May 2018
Accepted: 12 October 2018

Abstract:

In this study, centrifugal casting method was used to produce a hyper-eutectic composite Al-Mg₂Si with hybrid microstructure and graded hardness. For this purpose, two cylinders with a chemical composition of Al-20Si and Al-20Si-9Mg (weight percent) were cast using a vertical centrifugal casting machine. Then the microstructure and hardness of the cast cylinders were studied along the radial direction by optical and scanning electron microscopes and brinell method, respectively. The results show that in Al-20Si cast cylinder; in contrary to the outer layer which shows only a binary eutectic Al-Si microstructure, the inner layer contains a high volume fraction of in situ segregated primary silicon particles inside the eutectic matrix. By addition of 9% Mg to Al-20Si alloy, the inner layer of the cast cylinder form a hybrid microstructure containing of both Si and Mg₂Si particles inside the eutectic matrix, while the outer layer shows only a ternary eutectic Al-Si-Mg₂Si microstructure. As a result of these microstructure changes along the radial direction of the cylinders, not only the hardness of both cylinders are smoothly increased from the outer towards the inner layers, but also all radial sections of the Al-20Si-9Mg cylinder in compared with the other one, indicate higher hardness (about 18 brinell).

Keywords:

Centrifugal Casting,
Functionally Graded
Materials,
Al-Si-Mg Alloys,
Phase Segregation,
Hybrid Microstructure.

Journal homepage: www.foundingjournal.ir

Please cite this article using:

Aghazadeh E., Samadi A., Aghazadeh S., Establishment of graded hybrid microstructure through centrifugal casting of a hypereutectic Al-Mg₂Si alloy, in Persian, Founding Research Journal, 2018, 2(2) 79-88.

DOI: 10.22034/FRJ.2018.134151.1042

* Corresponding Author:

Ahad Samadi, Associate Professor

Address: Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran,

Tel.: +98 (41)33459434

E-mail: : samadi@sut.ac.ir



انجمن علمی ریخته‌گری ایران

فصل نامه علمی پژوهشی

پژوهش نامه ریخته‌گری

ایجاد ریزساختار هیبریدی مدرج با ریخته‌گری گریز از مرکز یک آلیاژ هایپر یوتکتیک Al-Mg₂Si

ابراهیم آقازاده^۱، احد صمدی^{۲*}، سیفاله آقازاده^۱

۱- کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

۲- دانشیار مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز. samadi@sut.ac.ir (نویسنده مکاتبه کننده)

چکیده:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۹

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۲۰

در این پژوهش از ریخته‌گری گریز از مرکز برای تولید کامپوزیت هایپر یوتکتیک Al-Mg₂Si با ریزساختار هیبریدی و سختی مدرج استفاده شد. به این منظور به روش گریز از مرکز عمودی، دو استوانه با ترکیب Al-20Si-9Mg و Al-20Si (بر حسب درصد وزنی) ریخته‌گری شد. سپس ریزساختار و سختی مقاطع شعاعی مختلف آنها به ترتیب با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری و SEM مجهز به سیستم میکروآنالیز فازی (EDS) و سختی‌سنجی برینل مورد بررسی قرار گرفت. همچنین از نرم افزارهای Thermo-Calc و JMat Pro به ترتیب برای رسم نمودارهای فازی تعادلی آلیاژها، کسر جرمی و چگالی فازهای درجای تشکیل شده حین انجماد استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که با افزودن ۹ درصد منیزیم به آلیاژ Al-20Si، لایه‌های داخلی استوانه دارای یک ریزساختار هیبریدی متشکل از ذرات اولیه سیلیسیم و Mg₂Si در زمینه یوتکتیکی Al(α)-Si-Mg₂Si بوده و لایه خارجی فقط شامل یک ریزساختار یوتکتیک سه‌تایی ظریف Al(α)-Si-Mg₂Si است. به تبع این تغییرات ریزساختاری در راستای شعاعی استوانه‌ها، نه تنها سختی هر دو استوانه از جداره خارجی با شیب ملایمی به سمت جداره داخلی افزایش می‌یابد بلکه استوانه Al-20Si-9Mg در تمامی مقاطع شعاعی خود در مقایسه با استوانه دیگر حدود ۱۸ برینل افزایش سختی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی:

ریخته‌گری گریز از مرکز، مواد مدرج، آلیاژهای Al-Si-Mg، جدایش فازی، ریزساختار هیبریدی.

۱- مقدمه

واژه مواد درجه‌بندی شده (مدرج) نخستین بار در سال ۱۹۸۰ میلادی توسط پژوهشگران ژاپنی به جامعه مهندسی و علم مواد معرفی شد [۱]. قطعات با ریزساختار مدرج خانواده جدیدی از قطعات کامپوزیتی هستند که تغییرات پیوسته و درجه‌بندی شده‌ای از ترکیب شیمیایی، ریزساختار و خواص را در جهات معینی از خود نشان می‌دهند [۲] و به همین خاطر گزینه‌های مناسبی برای استفاده در محیط‌های کاری سخت با تغییرات دمایی و تنش‌ی بالا همچون نازل موشک‌ها و قطعات توربین‌ها و ... می‌باشند [۳]. از روش‌های مختلفی نظیر متالورژی پودر، پوشش‌دهی از طریق رسوب دهی شیمیایی و فیزیکی بخار، پلازما اسپری و ریخته‌گری برای فراوری مواد و قطعات مدرج استفاده شده است که اغلب از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نبوده و در مقیاس صنعتی با محدودیت‌های زیادی

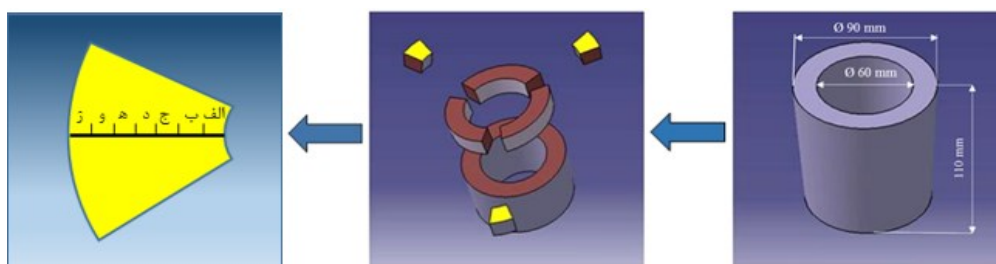
مواجه هستند. در این میان، ریخته‌گری گریز از مرکز به علت ارزانی و سادگی نسبی و کاهش تعداد مراحل تولید نسبت به سایر روش‌ها، توجه زیادی را برای فراوری قطعات با ساختار مدرج به خود جلب کرده است [۸-۱۱]. در روش ریخته‌گری گریز از مرکز، تفاوت چگالی مذاب با ذرات داخل آن (ذرات اضافه شده اولیه به مذاب و یا ذرات تشکیل شده درجا حین انجماد مذاب) باعث جدایش ذرات در راستای نیروی گریز از مرکز مطابق قانون استوکس می‌شود که در نهایت منجر به شکل‌گیری ساختار درجه‌بندی شده در راستای شعاعی قطعات ریختگی متقارن (دارای تقارن محوری) پس از خاتمه انجماد می‌شود. با این روش، کامپوزیت‌های مدرج حاوی ذرات تقویت کننده Al₂O₃، SiC، Al₃Zr، Al₃Ni، Si، Mg₂Si و Al₂Cu در زمینه آلومینیمی با موفقیت تولید شده و خواص آنها مورد ارزیابی قرار گرفته است [۲۲-۱۱].

تمامی ترکیب‌های شیمیایی ذکر شده در این مقاله بر حسب درصد وزنی خواهد بود، مگر اینکه واحد آن ذکر شود). برای این منظور، ابتدا آلومینیم و سیلیسیم با استفاده از کوره مقاومتی آزمایشگاهی در داخل بوتنه گرافیتی در دمای 850°C ذوب شده و شمش‌های آلیاژی با ترکیب Al-20Si در قالب‌های فلزی به صورت ثقلی ریخته‌گری شدند. در مرحله بعد برای تهیه آلیاژ Al-20Si-9Mg مقدار منیزیم لازم براساس ترکیب شیمیایی آلیاژ Al-20Si-9Mg محاسبه، توزین و تا دمای 350°C پیش‌گرم شد و به مذاب Al-20Si اضافه گردید. لازم به توضیح است که وزن منیزیم به میزان ۲۰٪ بیشتر از مقدار محاسبه شده برای آلیاژ Al-20Si-9Mg در نظر گرفته شد تا تلفات ناشی از سوختن آن حین ذوب و آلیاژسازی جبران شود لازم به توضیح است که این میزان تلفات منیزیم به صورت تجربی و بر اساس نتایج آنالیز شیمیایی ریخته‌گری‌های قبلی همین آلیاژ محاسبه شد. در مرحله بعد برای ریخته‌گری گریز از مرکز دو استوانه توخالی، دو شمش حاوی منیزیم و فاقد آن با در نظر گرفتن 100°C فوق‌گداز برای هر کدام، به ترتیب و به طور جداگانه در دماهای 720°C و 790°C مجدداً ذوب شده و پس از عملیات گاززدایی مذاب با قرص هگزا کلرواتان درون قالب فولادی استوانه‌ای چرخان ماشین ریخته‌گری گریز از مرکز عمودی ریخته شد. به منظور جداسازی راحت استوانه‌ها از قالب و نیز کاهش سرعت انجماد مذاب در تماس با جداره قالب، سطوح داخلی قالب فولادی قبلاً با یک لایه نازک سرامیکی با اسم تجاری دایکوت (سوسپانسیونی از پودر استخوان، گچ و پودر بنتونیت) پوشش داده شد. دمای پیش‌گرم قالب 300°C و سرعت چرخش آن 1400 دور بر دقیقه در نظر گرفته شد. طرح واره‌ای از شکل و ابعاد استوانه‌های ریخته‌گری در شکل (۱) نشان داده شده است.

کامپوزیت‌های درج‌ای Al-Mg₂Si گروه جدیدی از کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی هستند که به خاطر حضور ذرات سخت، پایدار و سبک Mg₂Si با ضریب انبساطی پایین به عنوان فاز تقویت کننده اصلی در ریزساختار آنها بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲۳]. ترکیب شیمیایی بیشتر آلیاژهای سه‌تایی Al-Si-Mg که برای ایجاد ریزساختار مدرج به روش ریخته‌گری گریز از مرکز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند غالباً دارای نسبت استوکیومتری Mg:Si برابر ۲:۱ بوده‌اند (دقیقاً مطابق استوکیومتری ترکیب فاز Mg₂Si) که فقط ظرفیت تشکیل درج‌ای ذرات تقویت کننده Mg₂Si و جدایش درجه بندی آنها در راستای نیروی گریز از مرکز مد نظر بوده است که البته در نهایت نیز منجر به شکل‌گیری استوانه‌های ریخته‌گری با ریزساختار مدرج دارای کسر حجمی بالای ذرات اولیه Mg₂Si در لایه داخلی و ریزساختار یوتکتیکی Al-Mg₂Si عاری از ذرات تقویت کننده دیگر در لایه خارجی استوانه شده‌اند [۱۰]. به نظر می‌رسد که با انتخاب یک ترکیب شیمیایی هایپرئوتکتیک با نسبت Mg:Si کوچک‌تر از ۲ در سیستم سه‌تایی Al-Si-Mg می‌توان کامپوزیتی با ریزساختار هیبریدی متشکل از ذرات تقویت کننده Mg₂Si+Si در زمینه آلومینیمی فراوری نمود که نحوه جدایش و توزیع این ذرات حین ریخته‌گری گریز از مرکز و تأثیر آنها بر خواص مکانیکی نظیر سختی مقاطع شعاعی مختلف قطعات ریخته شده استوانه‌ای برای صنعت ریخته‌گری و مهندسی مواد و متالورژی جالب باشد که در ادامه به آنها پرداخته شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

از آلومینیم، سیلیسیم و منیزیم خالص با درجه خلوص تجاری به عنوان مواد اولیه برای آماده‌سازی آلیاژهای Al-20Si و Al-20Si-9Mg استفاده شد (از این به بعد



شکل ۱- طرح واره‌ای از مقاطع برش نمونه‌های متالوگرافی از استوانه‌های ریخته‌گری

۳- نتایج و بحث

ریزساختار مقاطع شعاعی مختلف استوانه هایپریوتکتیک Al-20Si در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌گونه که در مقاله قبلی [۱۷] نیز نشان داده شده است، ریزساختار جداره این استوانه ریخته‌گری در راستای شعاعی مطابق شکل (۳) از سه ناحیه متمایز زیر تشکیل یافته است:

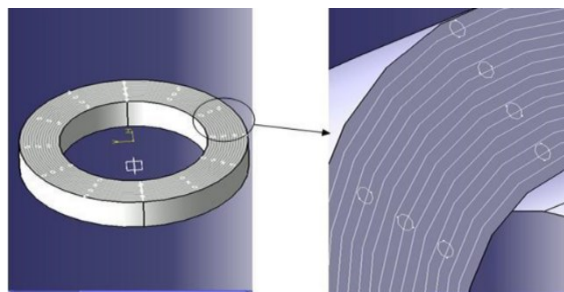
الف) لایه‌های داخلی حاوی کسر حجمی بالایی از ذرات تقویت کننده درجا سیلیسیم اولیه (شکل ۳-الف تا ۳-د).

ب) لایه انتقالی که در یک سمت حاوی ذرات تقویت کننده Si و در سمت دیگر فاقد آن است (شکل ۳-ه).

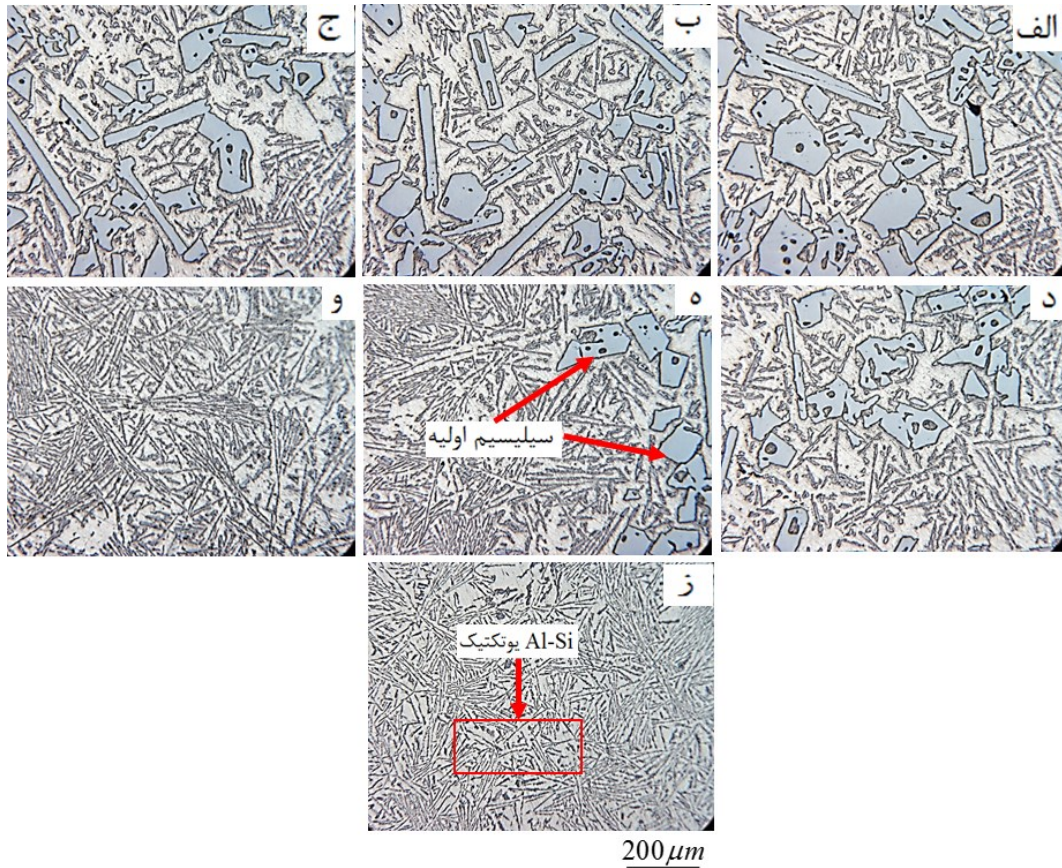
ج) لایه‌های خارجی شامل ریزساختار کاملاً یوتکتیکی Al(α)-Si و عاری از هرگونه فاز اولیه (شکل ۳-و تا ۳-ز).

بر اساس تصاویر ارائه شده در شکل (۳)، ریزساختار زمینه یوتکتیکی از جداره داخلی به سمت جداره خارجی استوانه ظریفتر شده است که دلیل آن نرخ بالای سرمایش مذاب حین انجماد در تماس با قالب می‌باشد. همچنین بر اساس نمودار فازی تعادلی آلیاژهای Al-Si در شکل (۴-الف)، آلیاژ Al-20Si دارای ترکیب شیمیایی‌هایپریوتکتیک است که کسر جرمی Si اولیه درجای تشکیل شده در آن با افت دما در شکل (۴-ب) نشان داده شده است. بر اساس این شکل انجماد تعادلی آلیاژ Al-20Si در دمای حدود 690°C (خط مشکی شماره ۱ در شکل (۴-ب)) که دمای لیکوئیدوس آلیاژ است شروع شده و سپس وارد ناحیه دوفازی مذاب و سیلیسیم جامد (محدوده خط قرمز رنگ شماره ۲ در شکل (۴-ب)) می‌شود و با کاهش دما از 690°C تا 580°C که دامنه انجماد آلیاژ محسوب می‌شود کسر جرمی فاز جامد Si اولیه (غیر یوتکتیکی) تشکیل شده به صورت خطی افزایش یافته است. با عبور دمای آلیاژ از این محدوده دمایی حین انجماد، با توجه به اینکه ذرات سیلیسیم از چگالی پایین‌تری ($2/33 \text{ g/cm}^3$) نسبت به مذاب ($2/67 \text{ g/cm}^3$) برخوردارند بر اساس قانون استوکس [۱۶-۱۷] در خلاف جهت نیروی گریز از مرکز به سمت جداره داخلی استوانه جدایش پیدا کرده (جدایش معکوس) و به صورت ذرات درشت سیلیسیم اولیه بلوکی شکل در جداره داخلی استوانه تجمع می‌یابند (شکل ۳).

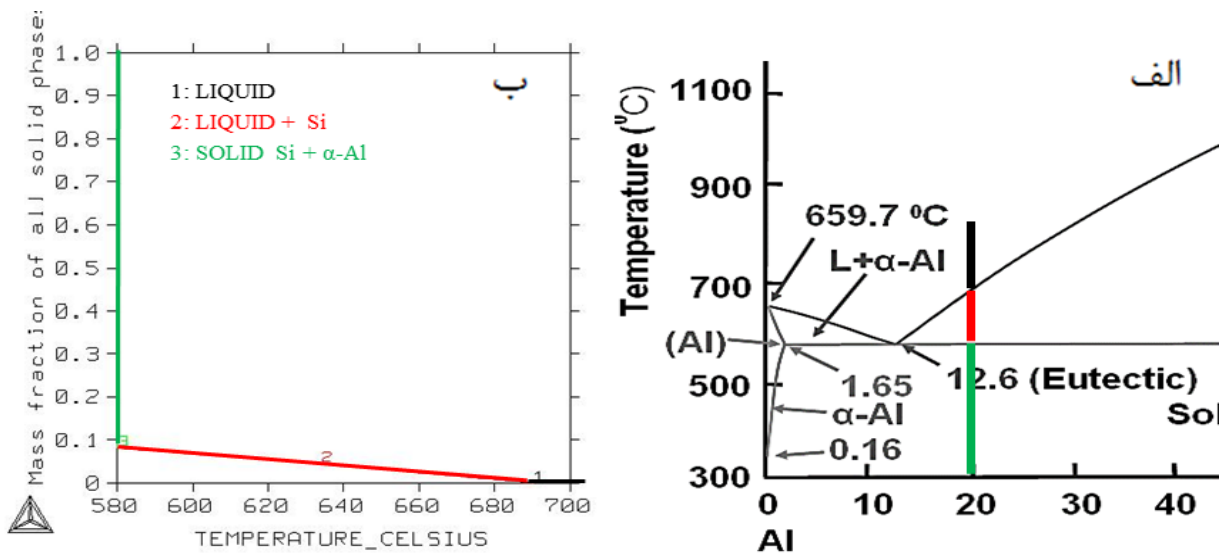
برای متالوگرافی مقاطع شعاعی استوانه‌های ریخته‌گری، حلقه‌هایی به ضخامت ۱۵ میلی‌متر در نصف ارتفاع استوانه‌ها مطابق شکل (۱) برش داده شد. سه قطاع از این حلقه‌ها با سیم‌برش تهیه و در هفت ناحیه (الف)، (ب)، (ج)، (د)، (ه)، (و)، (ز) به صورت شعاعی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های متالوگرافی با کاغذ سنباده‌های شماره ۸۰ تا ۵۰۰۰ سنباده‌زنی شدند و پس از پولیش‌کاری با خمیر الماسه با دانه‌بندی زیر $0/3$ میکرومتر و حکاکی شیمیایی در محلول $0/5 \text{ vol.}\% \text{ HF}$ برای مشاهده ریزساختار با میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی (SEM) مدل Cam Scan MV2300 مجهز به سیستم میکرو آنالیز شیمیایی فازی (EDS) مدل Inca-Oxford آماده شدند. برای ارزیابی تأثیر درجه‌بندی ریزساختار استوانه‌ها بر سختی آنها، سختی برینل استوانه‌ها با استفاده از فرورونده ساچمه‌ای به قطر ۵ mm و اعمال بار ۲۵۰ Kgf در راستای شعاعی اندازه‌گیری شد. برای این منظور، مطابق شکل (۲)، دایره‌های شعاعی به فاصله ۲ mm از یکدیگر بر روی حلقه شعاعی برش خورده از استوانه‌ها ترسیم شد. سپس بر روی هر دایره با رعایت حداقل فاصله استاندارد از اثر سختی سنجی‌های قبلی، سه الی پنج بار سختی‌سنجی برینل انجام گرفت و سپس میانگین سختی‌سنجی‌ها برای هر دایره به تفکیک محاسبه و گزارش شد. برای رصد نمودن تغییرات فازی در حین انجماد و رسم نمودارهای فازی تعادلی، کسر جرمی فازهای جامد تشکیل شده حین انجماد و نیز نمودار تغییرات چگالی فازهای شکل گرفته در حین انجماد آلیاژها به ترتیب از نرم‌افزارهای Thermo Calc و JMat Pro و در مواقع لازم نیز از نرم‌افزار Image برای آنالیز کمی تصاویر ریزساختاری استفاده شد.



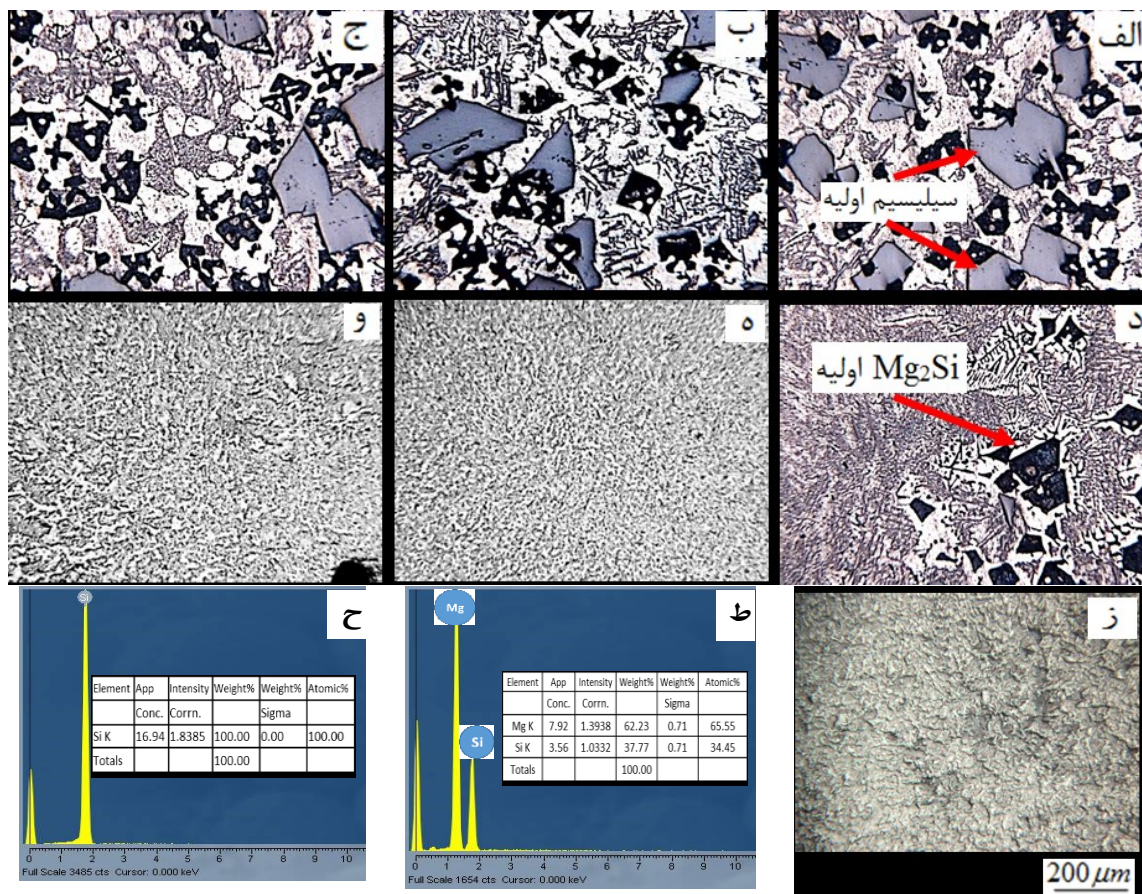
شکل ۲- طرح‌واره‌ای از نقاط سختی‌سنجی روی حلقه شعاعی برش خورده از استوانه‌ها



شکل ۳- ریزساختار مقاطع شعاعی استوانه ریختگی از آلیاژ Al-20%Si (از الف) تا (ز) به ترتیب دلالت دارند بر ریزساختار داخلی ترین تا خارجی ترین لایه شعاعی استوانه).



شکل ۴- قسمت غنی از Al نمودار فازی Al-Si (الف)، تغییرات کسر جرمی ذرات سیلیسیم تشکیل شده با افت دما حین انجام تبادلی آلیاژ Al-20Si. رسم شده با نرم‌افزار Thermo calc.



شکل ۵- ریزساختار مقاطع شعاعی استوانه ریختگی Al-20Si-9Mg و طیف های EDS فازهای اولیه Si (ح) و Mg₂Si (ط) در ریزساختارهای نشان داده شده ((الف) تا (ز)) به ترتیب دلالت دارند بر ریزساختار داخلی ترین تا خارجی ترین لایه شعاعی استوانه)

آلومینیم، غنی از سیلیسیم و Mg₂Si در ریزساختار هیبریدی این نمونه را به خوبی تأیید می‌کند. با مقایسه تصاویر ریزساختاری شکل‌های (۳) و (۵)، مشاهده می‌شود که به واسطه افزودن منیزیم به ترکیب آلیاژ، ریزساختار یوتکتیکی فاز زمینه در تمامی مقاطع شعاعی استوانه ریزتر شده و از مورفولوژی سوزنی به شکل گلبولی تبدیل شده است. با در نظر گرفتن موقعیت هایپرپوتکتیکی آلیاژ Al-20Si-9Mg در نمودار فازی شکل (۷-الف)، کسر جرمی فازهای جامد اولیه در جای تشکیل شده حین انجماد تعادلی در شکل (۷-ب) رسم شده است. با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که انجماد تعادلی آلیاژ Al-20Si-9Mg با جوانه‌زنی فاز اولیه Mg₂Si شروع شده (خط شماره ۲) و در ادامه به مرحله رسوب هم‌زمان Mg₂Si و Si (خط شماره ۳) می‌رسد. این نمودار نشان می‌دهد که در این آلیاژ مقدار Mg₂Si اولیه تشکیل یافته به تنهایی کم و ناچیز بوده و بخش اعظم فرایند انجماد مربوط به تشکیل هم‌زمان دو ذره Mg₂Si و سیلیسیم به صورت هیبریدی

در شکل (۵)، ریزساختار مقاطع شعاعی مختلف استوانه Al-20Si-9Mg به همراه طیف‌های EDS از فازهای Si و Mg₂Si اولیه در ریزساختار آنها نشان داده شده است. بر اساس تصاویر ارائه شده در شکل (۵)، ریزساختار این استوانه نیز در راستای شعاعی از سه ناحیه متمایز تشکیل یافته است:

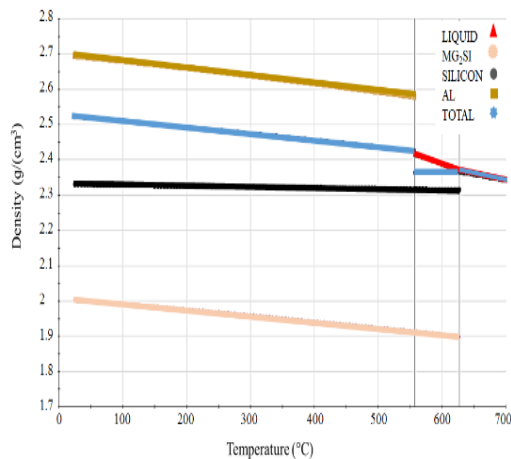
الف) لایه‌های داخلی حاوی کسر حجمی بالایی از ذرات تقویت کننده در جای Si و Mg₂Si اولیه (شکل ۵-الف تا ۵-ج).

ب) لایه انتقالی که در یک سمت دارای ساختار هیبریدی از ذرات تقویت کننده سیلیسیم و Mg₂Si در فاز زمینه و در سمت دیگر فاقد این ذرات است (شکل ۳-د).

ج) لایه‌های خارجی شامل ریزساختار یوتکتیکی سه تایی Al(α)-Si-Mg₂Si عاری از ذرات اولیه غیر یوتکتیکی (شکل ۵-ه تا ۵-ز).

طیف پراش اشعه X بدست آمده از لایه داخلی استوانه ریختگی Al-20Si-9Mg در شکل (۶)، وجود سه فاز غنی از

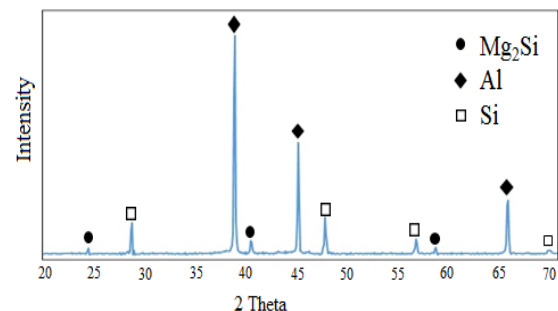
شکل (۸)، تغییرات چگالی فازهای تشکیل شده در حین انجماد آلیاژ Al-20Si-9Mg را نشان می‌دهد که با استفاده از نرم‌افزار JMat pro رسم شده است. این تصویر گویای آن است که با کاهش دما تا حدود 627°C چگالی مذاب پیوسته و به صورت خطی افزایش یافته و با رسیدن دمای آلیاژ به 627°C ، ذرات Si و Mg_2Si از مذاب شروع به جوانه‌زنی کرده و تا دمای 560°C رشد می‌کنند و در این فاصله دمایی به خاطر چگالی پایین‌تر ذرات سیلیسیم و به خصوص ذرات Mg_2Si اولیه ($1/88 \text{ g/cm}^3$) نسبت به مذاب ($2/67 \text{ g/cm}^3$) تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز بواسطه جدایش معکوس (مطابق قانون استوکس)، به سمت جداره داخلی استوانه ریختگی جدایش یافته‌اند.



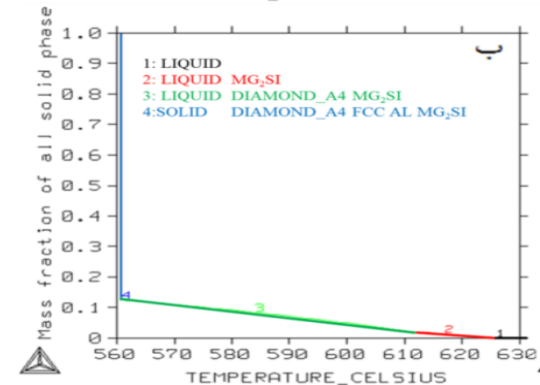
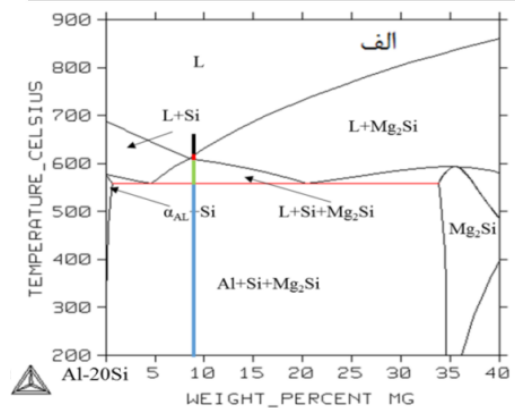
شکل ۸- تغییرات چگالی اجزای فاز تشکیل شده در حین انجماد آلیاژ Al-20Si-9Mg رسم شده با استفاده از نرم‌افزار JMat Pro.

شکل (۹)، تصاویر ریزساختار SEM از مورفولوژی زمینه یوتکتیکی سه تایی $\text{Al}(\alpha)+\text{Mg}_2\text{Si}+\text{Si}$ را در مقاطع شعاعی مختلف استوانه ریختگی Al-20Si-9Mg نشان می‌دهد. این تصاویر نشان می‌دهند که چگونه به واسطه تفاوت نرخ سرمایش مقاطع شعاعی مختلف استوانه، ریزساختار زمینه یوتکتیکی آنها تغییر یافته است. در لایه خارجی استوانه به دلیل نرخ سرمایش بالا، امکان رشد ذرات سیلیسیم و Mg_2Si یوتکتیکی فراهم نشده و این ذرات به صورت یوتکتیک میله‌ای و لایه‌ای ظریف تشکیل شده‌اند اما با اتمام انجماد لایه خارجی استوانه و به واسطه تشکیل فاصله هوایی میان قالب و جداره استوانه (که ناشی از انقباض انجمادی جداره خارجی استوانه است) نرخ سرمایش کاهش

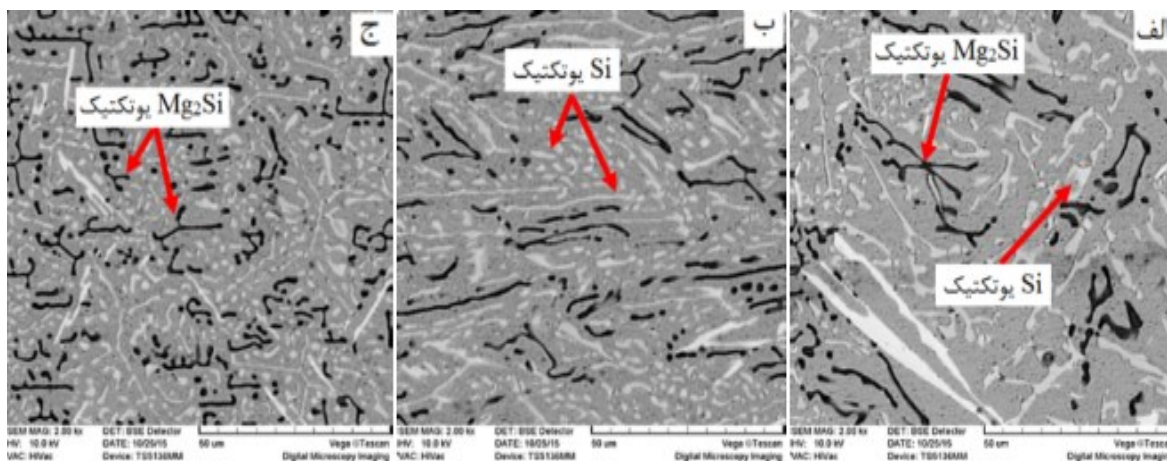
است. زیرا مطابق نمودار فاز (۷-الف)، محدوده پایداری ناحیه دو فاز $\text{L}+\text{Mg}_2\text{Si}$ خیلی باریک‌تر از محدوده پایداری ناحیه سه فاز $\text{L}+\text{Mg}_2\text{Si}+\text{Si}$ بوده و در نمودار شکل (۷-ب) نیز شیب خط ۳ (که بیان‌گر کسر جرمی ذرات هیبریدی $\text{Mg}_2\text{Si}+\text{Si}$ است) بیشتر از شیب خط ۲ (کسر جرمی ذرات Mg_2Si) است. از این رو، می‌توان از مرحله اول انجماد این آلیاژ صرف‌نظر نمود و چنین فرض کرد که حین انجماد، مستقیماً آلیاژ وارد ناحیه‌فازی تشکیل هم‌زمان ذرات هیبریدی سیلیسیم و Mg_2Si شده است.



شکل ۶. طیف پراش اشعه X از لایه داخلی استوانه ریختگی Al-20Si-9Mg

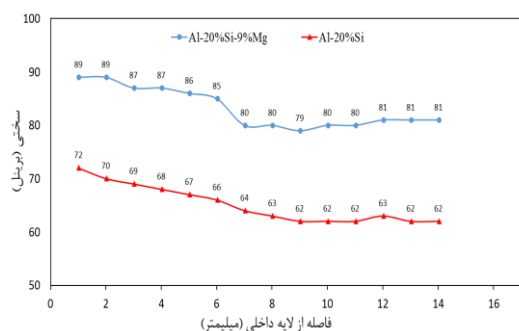


شکل ۷- الف- بخشی از نمودار فاز تعادلی Al-20Si-XMg، ب) تغییرات کسر جرمی ذرات جامد Si و Mg_2Si تشکیل شده با افت دما حین انجماد تعادلی آلیاژ Al-20Si-9Mg رسم شده با نرم‌افزار Thermo calc



شکل ۹- ریزساختار SEM از زمینه یوتکتیکی مقاطع شعاعی مختلف استوانه ریختگی Al-20Si-9Mg از لایه داخلی (الف) به سمت لایه خارجی (ج)

۱۲۰۰-۱۰۰۰ ویکرز [۲۱] و سختی Mg_2Si حدود ۴۵۰ ویکرز [۲۲] گزارش شده است. دلیل آن می‌تواند تغییر مورفولوژی ذرات سیلیسیم اولیه در لایه داخلی از حالت بلوکی/صفحه‌ای در استوانه Al-20Si به حالت چند ضلعی نامنظم و همچنین کاهش اندازه آنها از ۱۲۵ میکرومتر به ۱۰۰ میکرومتر در استوانه Al-20Si-9Mg باشد. علاوه بر آن با اضافه شدن منیزیم، یوتکتیک دو تایی Al-Si با مورفولوژی سوزنی (شکل ۳) به یوتکتیک سه تایی Al-Si-Mg با مورفولوژی نقطه‌ای/فیبری ریز و ظریف (شکل ۹) تغییر یافته است. برآیند این تغییرات ریزساختاری باعث شده است که مطابق شکل (۱۰)، سختی استوانه Al-20Si-9Mg در تمامی مقاطع شعاعی حدود ۱۸ برینل بالاتر از استوانه Al-20Si باشد. از سوی دیگر، به خاطر همان شیب تغییرات ریزساختاری ناشی از جدایش حین انجماد ذرات اولیه استحکام بخش Si و Mg_2Si مورد اشاره در خلاف جهت نیروی گریز از مرکز به سمت جداره داخلی استوانه‌ها، سختی مقاطع شعاعی هر دو استوانه مطابق شکل (۱۰) با شیب ملایمی از لایه‌های خارجی به سمت لایه‌های داخلی افزایش نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- تغییرات سختی در راستای شعاعی استوانه‌های ریختگی

یافته و ذرات سیلیسیم و Mg_2Si زمینه یوتکتیکی در لایه‌های میانی و داخلی استوانه عمدتاً به صورت ذرات لایه‌ای درشت ظاهر شده‌اند.

در شکل (۱۰)، نمودار تغییرات سختی استوانه‌ها بر حسب فاصله از لایه داخلی نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود سختی استوانه Al-20Si-9Mg در تمامی مقاطع شعاعی بیشتر از استوانه Al-20Si است. پیش از این، ملاحظه شد که لایه‌های داخلی استوانه Al-20Si در ریزساختار خود فقط دارای ذرات تقویت کننده سیلیسیم در زمینه یوتکتیکی هستند (شکل‌های ۳-الف تا ۳-د) و ریزساختار لایه‌های خارجی آن نیز فقط از زمینه یوتکتیک دو تایی Al-Si تشکیل شده است (شکل‌های ۳-و تا ۳-ز). از سوی دیگر کسر جرمی ذرات تقویت کننده سیلیسیم اولیه تشکیل شده در حین انجماد استوانه Al-20Si بر اساس نمودار شکل ۴ (ب) حداکثر به حدود ۸٪ می‌رسد در حالی که در استوانه Al-20Si-9Mg کسر جرمی ذرات تقویت کننده اولیه Mg_2Si+Si تشکیل شده می‌تواند به حدود ۱۳٪ افزایش یابد (شکل ۷-ب) که البته قسمت اعظم آنها مطابق شکل‌های (۵-الف) تا (۵-د) در خلاف جهت نیروی گریز از مرکز به سمت لایه‌های داخلی استوانه جدایش یافته‌اند به طوری که کسر حجمی ذرات سیلیسیم اولیه سخت از ۲۸ درصد در لایه داخلی آلیاژ Al-20Si به ۱۷ درصد در آلیاژ Al-20Si-9Mg کاهش یافته است (کسر حجمی و همچنین اندازه ذرات سیلیسیم یا Mg_2Si توسط نرم‌افزار Image اندازه‌گیری شده است). با وجود این، سختی استوانه Al-20Si بر خلاف انتظار، در تمامی مقاطع شعاعی نسبت به استوانه Al-20Si-9Mg کاهش پیدا کرده است (زیرا سختی سیلیسیم حدود

- by powder metallurgy techniques, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2015, 25, 3569–3577.
- [5] Jiupeng S., Yang Y., Zhigang Zh., Youyun L., Yang Q., Preparation of W–Cu functionally graded material coated with CVD–W for plasma-facing components, *Journal of Nuclear Materials*, 2013, 442, S208–S213.
- [6] Dbrzanski L.A., Zukowska L.W., Kula J.M., Golombek K., Structure and mechanical properties of gradient PVD coatings, *J. Mater. Proc. Tech.*, 2008, 201, 310–314.
- [7] Pan C., Xu X., New functionally graded thermal barrier coating system based on LaMgAl11O19/YSZ prepared by air plasma spraying, *Surf. Coat. Tech.*, 2012, 206, 2265–2274.
- [8] Ogawa T., Watanabe Y., Sato H., Kim I., Fukui Y., Theoretical study on fabrication of functionally graded material with density gradient by a centrifugal solid-particle method, *Composites: Part A*, 2006, 37, 2194–2200.
- [9] Wang K., Zhang Z.M., Yu T., Zhu Z.Z., The transfer behavior in centrifugal casting of SiCp/Al composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 242, 60–67.
- [10] Jayakumar E., Jibin C.J., Rajan T.P.D., Joseph M.A., Pai B.C., Processing and characterization of functionally graded aluminum A319-SiCp metallic composites by centrifugal casting technique, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2016, 47, 4306–4315.
- [11] صمدی ا.، غایب لو م.، آزادی آ.، تاثیر افزودن آهن بر ریزساختار درجه‌بندی شده کامپوزیت $Al-13.8wt.\%Mg_2Si$ در ریخته‌گری گریز از مرکز، مهندسی متالورژی، ۱۳۹۴، ۵۷، ۴۵–۵۳.
- [12] Valhinho A., Botas J.D., Ariza E., Gomes J.R., Rocha L.A., Tribocorrosion studies in centrifugally cast Al-matrix SiC-reinforced functionally graded composites, *Materials Science Forum*, 2004, 455–456, 871–875.
- [13] Rajan T.P.D., Pillai R.M., Pai B.C., Characterization of centrifugal cast functionally graded aluminum-silicon carbide metal matrix composites, *Materials Characterization*, 2010, 61, 923–928.
- [14] Radhika N., Mechanical properties and abrasive wear behavior of functionally graded Al-Si₁₂Cu/Al₂O₃ metal matrix composite, *Trans. Indian Inst. Met.*, IIM, 2016, DOI 10.1007/s12666-016-0870-3.
- [15] El-Hadad Sh., Sato H., Watanabe Y., Wear of Al/Al₃Zr functionally graded materials fabricated by centrifugal solid-particle method, *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210, 2245–2251.
- [16] Matsuda K., Watanabe Y., Fukui Y., Particle size distributions in in situ Al–Al₃Ni FGMs fabricated by

۴- نتیجه‌گیری

با افزودن ۹ درصد وزنی منیزیم به ترکیب آلیاژ هایپریوتکتیک Al-20Si و بررسی تأثیر آن بر درجه‌بندی ریزساختار و سختی مقاطع شعاعی استوانه‌های (حاوی منیزیم و فاقد آن) ریخته‌شده با روش گریز از مرکز، نتایج زیر بدست آمدند:

۱- در استوانه Al-20Si به واسطه تشکیل درجای ذرات سیلیسیم اولیه با چگالی کمتر نسبت به مذاب و جدایش معکوس آنها در خلاف جهت نیروی گریز از مرکز حین انجماد، کسر حجمی بالایی از این ذرات در لایه‌های داخلی استوانه با ریزساختار هایپریوتکتیکی تجمع یافته و به واسطه آن، سختی استوانه با شیب ملایمی از ریزساختار یوتکتیکی جداره خارجی به سمت ریزساختار هایپریوتکتیکی لایه‌های داخلی افزایش می‌یابد.

۲- در استوانه Al-20Si-9Mg به واسطه تشکیل درجای ذرات هیبریدی Mg_2Si+Si با کسر جرمی بالاتر (حدود ۱۳٪) نسبت به تک ذره تقویت کننده سیلیسیم (حدود ۸٪) در استوانه Al-20Si و جدایش معکوس آنها به سمت جداره داخلی استوانه و تشکیل زمینه یوتکتیکی ریز و ظریف سه‌تایی $Al(\alpha)-Si-Mg_2Si$ در تمامی مقاطع شعاعی، سختی به طور میانگین حدود ۱۸ برینل در تمامی مقاطع شعاعی نسبت به استوانه Al-20Si افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] Yan-Bo Z., Chang-Ming L., Kai W., Mao-Hua Z., Yong X., Characteristics of two Al-based functionally gradient composites reinforced by primary Si particles and Si/ in situ Mg_2Si particles in centrifugal casting, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20, 361–370.
- [2] Yamagiwa K., Watanabe Y., Fukui Y., Kapranos P., Novel recycling of aluminium and iron wastes in-situ Al-Al₃Fe functionally graded material manufactured by a centrifugal method, *Materials Transaction*, 2003, 44, 2461–2467.
- [3] Rasheedat M.M., Akinlabi E. T., Functionally graded materials, Springer, 2017.
- [4] Erdemer F., Canakcl A., Varol T., Microstructural characterization and mechanical properties of functionally graded Al 2024/SiC composites prepared

- centrifugal in situ method, *Ceramic Trans*, 2001, 114, 1-8.
- [17] El-Hadad Sh., Sato H., Miura-Fujiwara E., Watanabe Y., Fabrication of Al-Al₃Ti/Ti₃Al functionally graded materials under a centrifugal force, *Materials*, 2010, 3(9), 4639-4656.
- [18] آقازاده س.، صمدی ا.، آقازاده ا.، تأثیر مقدار سیلیسیم بر درجه‌بندی ریزساختار آلیاژهای Al-Si ریخته شده به روش گریز از مرکز، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، ۱۳۹۶، ۱(۲) ۹۷-۸۹.
- [19] Zhang J., Fan Z., Wang Y.Q., Zhou B.L., Hypereutectic aluminium alloy tubes with graded distribution of Mg₂Si particles prepared by centrifugal casting, *Materials & Design*, 2000, 21(3) 149-153.
- [20] Samadi A., Shahbakhani H.R., Effect of pouring temperature and casting thickness on distribution gradient of in situ formed Al₂Cu particles during centrifugal casting of hypereutectic Al-Cu alloy, *International Journal of Cast Metals Research*, 2014, 27, 129-134.
- [21] Wang Q., Wei Y., Chen W., Zhu Y., Ma C., Ding W., In situ surface composites of (Mg₂Si+Si)/ZA27 fabricated by centrifugal casting, *Materials Letters*, 2003, 57, 3851-3858.
- [22] Zhang J., Fan Z., Wang Y.Q., Zhou B.L., Microstructure and mechanical properties of in-situ Al-Mg₂Si composites, *Materials Science and Technology*, 2000, 16, 913-918.
- [23] Emamy A., Emami A.R., Khorshidi R., The effect of Fe-rich intermetallics on the microstructure, hardness and tensile properties of Al-Mg₂Si die-cast composite, *Materials and Design*, 2013, 46, 881-888.