

Effect of melt superheat on microstructure and properties of in situ Al-20Si composites prepared via gravity casting, still cooling slope and vibrating cooling slope

Mohammad Sadegh Sharbafpoor¹, *Farshad Akhlaghi²

1- PhD Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, School of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, School of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Citation: Sharbafpoor MS, Akhlaghi F. Effect of melt superheat on microstructure and properties of in situ Al-20Si composites prepared via gravity casting, still cooling slope and vibrating cooling slope, Metallurgical Engineering, 2024; 27(3):209 -218 <https://doi.org/10.22076/me.2024.2026862.1401>

doi: <https://doi.org/10.22076/me.2024.2026862.1401>

ABSTRACT

Hypereutectic Al-Si composites due to their low density and desirable properties have attracted a great amount of interest by the automotive and aerospace industries. However, the coarse size and un-modified morphology of the primary silicon particles that usually forms during the solidification of these alloys impose negative effects on the mechanical properties of these composites. Therefore, it is necessary to choose a suitable casting and solidification technique to overcome this drawback. In the present study, the vibrating cooling slope (VCS) technique as a semi-solid casting process was employed for preparation of composites by using the hypereutectic Al-20wt.%Si ingot as the starting material. The ingot melted and superheated at 50, 70 and 100 °C and after passing a cooling slop with 800mm length at 45° angle that was vibrating at a constant frequency and magnitude poured into a cast iron mold. For the purpose of comparison composite samples by using the conventional cooling slope (CS) and gravity casting (GC) also prepared by applying the identical materials and superheating temperatures as the VCS samples. The effect of the superheating temperatures on the microstructure, porosity and hardness of the composites investigated. A set of samples that processed at 50°C superheating temperature subjected to pin-on-disc wear test. The increased superheating temperature resulted in increased size of the Si particles for all the investigated samples. The CS samples despite of their higher porosity exhibited higher hardness values as compared with their GC counterparts. Also the hardness of VCS samples was higher than their CS counterparts despite of their higher porosity values. The wear test results confirmed the decreased both the wear loss and friction coefficient for the VCS samples. These desirable properties attributed to the refined size and relatively modified morphology of the primary Si particles obtained via the VCS process.

Keywords: In-situ composite, Vibrating cooling slope, Melt superheating, Microstructure, Hardness, Wear.

Received: April 19, 2024

Accepted: July 1, 2024

■ ■
*Corresponding Author:

Farshad Akhlaghi, PhD

Address: School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Tel: +98 (21) 82084087

E-mail: fakhlagh@ut.ac.ir

تاثیر میزان فوق‌گداز بر ریز ساختار و خواص کامپوزیت‌های درجای Al-20Si تهیه شده از روش‌های ریخته‌گری ثقلی، سطح شیب‌دار ساکن و سطح شیب‌دار لرزان

محمد صادق شعراف پور^۱، * فرشاد اخلاقی^۲

۱- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- استاد دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

کامپوزیت‌های هایپر یوتکتیک Al-Si به دلیل چگالی پایین و خواص مکانیکی مطلوب مورد توجه صنایع خودروسازی و هوافضا قرار گرفته‌اند. ذرات سیلیسیم اولیه که در طی فرآیند انجماد ایجاد می‌شوند، ساختار درشتی دارند که این ساختار اثرات مخربی بر خواص کامپوزیت دارد. در این پژوهش از فرایند سطح شیب‌دار لرزان جهت ریخته‌گری کامپوزیت Al-Si استفاده شده است. شمش کامپوزیتی حاوی ۲۰ درصد وزنی سیلیسیم ذوب شد و در فوق‌گدازهای ۷۵، ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از سه فرایند ریخته‌گری ثقلی (Gravity Casting, GC)، سطح شیب‌دار ساکن (Cooling Slope, CS) و سطح شیب‌دار لرزان (Vibrating Cooling Slope, VCS) در قالب استوانه‌ای چدنی ریخته‌گری شد. در این پژوهش، تأثیر فوق‌گداز بر ریزساختار، تخلخل و سختی نمونه‌های تولید شده از طریق سه فرایند مذکور مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین رفتار سایشی برخی از نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش فوق‌گداز در تمامی نمونه‌های کامپوزیتی ریخته شده به روش‌های مختلف سبب افزایش اندازه ذرات سیلیسیم اولیه می‌شود. نمونه‌های CS در مقایسه با نمونه‌های GC و نیز نمونه‌های VCS نسبت به CS دارای تخلخل بالاتری هستند. در ضمن نمونه‌های VCS در مقایسه با نمونه‌های CS و نمونه‌های CS در مقایسه با نمونه‌های GC دارای سختی بالاتری هستند. نتایج آزمون سایش نشان داد که کمترین میزان سایش و ضریب اصطکاک برای نمونه‌های فرآوری شده با استفاده از سطح شیب‌دار لرزان حاصل شد.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت‌های درجا، آلیاژ Al-20Si، سطح شیب‌دار لرزان، فوق‌گداز مذاب، ریز ساختار، سختی، سایش.

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۳۱ | پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۱

۱. مقدمه

مشخصات کامپوزیت‌های هایپر یوتکتیک Al-Si

کامپوزیت به ماده‌ای گفته می‌شود که از دو یا چند سازنده متفاوت ساخته شده و خواص بهتری را نسبت به اجزای سازنده‌ی خود ارائه دهد. دامنه‌ی وسیعی از آلیاژهای آلومینیم در اشکال گوناگون به منظور کاربردهای مختلف از جمله به عنوان زمینه در کامپوزیت‌های زمینه فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرند آلیاژهای Al-Si به دلیل سیالیت بالا در بین آلیاژهای ریخته‌گری آلومینیم، به خصوص برای شکل‌دهی قطعات پیچیده و مقاطع نازک مناسب هستند. از دیگر دلایل کاربرد آلومینیم در تولید این کامپوزیت‌ها می‌توان به مواردی از قبیل چگالی پایین، شکل‌پذیری مناسب، خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب و مقاومت به خوردگی بالای این فلز اشاره

نمود. Si عنصری شیمیایی از خانواده ی شبه فلزها است، بیشتر سیلیسیمی که به صورت تجاری کاربرد دارد بدون هیچ گونه جداسازی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. نکته‌ی جالب درباره ی سیلیسیم این است که این ماده در حالت مایع چگالی بیشتری نسبت به حالت جامد دارد و در نتیجه رفتار آن هنگام انجماد مانند رفتار معمول در دیگر مواد متداول، با کاهش حجم همراه نیست بلکه حجم آن افزایش می‌یابد. آلیاژهای هایپر یوتکتیک Al-Si به دلیل وجود سیلیسیم اولیه در ساختار در زمره کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی هستند که در آن‌ها ذرات سیلیسیم اولیه به عنوان فاز تقویت‌کننده محسوب می‌شود. این کامپوزیت‌ها خواص مطلوبی از قبیل مقاومت به سایش را ارائه می‌دهند. به طور کلی کامپوزیت‌های زمینه فلزی را می‌توان از دو روش غیر درجا (ex-situ) و روش‌های درجا (in-situ) تولید کرد. در فرآیندهای

* نویسنده مسئول:

دکتر فرشاد اخلاقی

نشانی: تهران، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد

تلفن: ۸۷۰۸۴۰۸۲۱ (۲۱) +۹۸

پست الکترونیکی: fakhlagh@ut.ac.ir

تا کنون مطالعه‌ای در مورد تاثیر فوق‌گداز بر ریز ساختار و خواص کامپوزیت‌های حاصل از آلیاژهای پیر یوتکتیک Al-Si درجای تولید شده ریخته‌گری شده از سه فرایند ثقلی (GC)، سطح شیب‌دار ساکن (CS) و سطح شیب‌دار لرزان (VCS) انجام نشده است که در تحقیق حاضر به آن پرداخته شده است. همچنین خواص سایشی کامپوزیت‌های تولید شده در فوق‌گداز ثابت ۵۰ درجه سانتی‌گراد ریخته‌گری شده از سه روش مذکور با هم مقایسه شده اند.

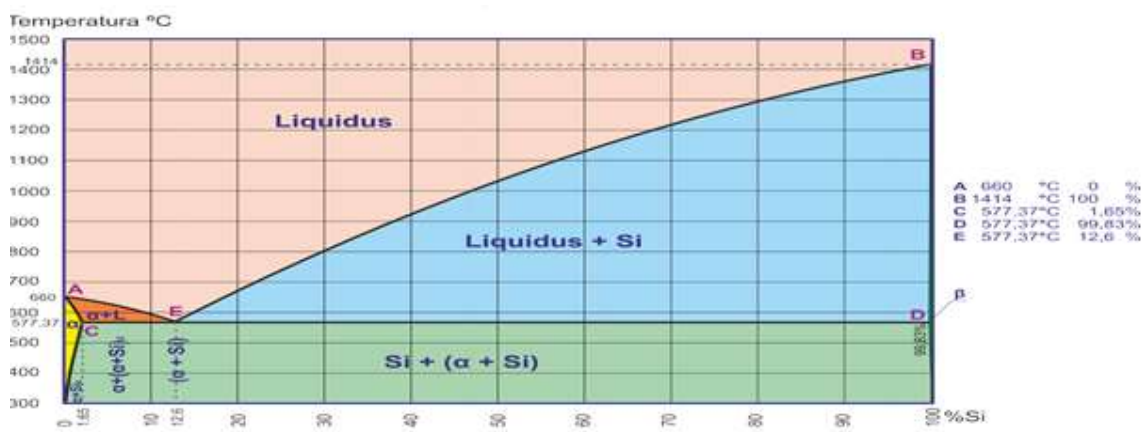
۲. مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از یک دستگاه سطح شیب‌دار لرزان که قبلاً در دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران برای انجام تحقیقات بر روی آلیاژ آلومینیم طراحی و ساخته شده بود استفاده شده است [۱۶، ۱۷]. این دستگاه شامل یک صفحه خنک شونده از جنس مس با ضخامت ۱۰ میلی‌متر و طول ۸۰۰ میلی‌متر و عرض ۱۲۰ میلی‌متر است، که بر روی یک قاب فولادی متصل شده است. این قاب بر روی یک میز با استفاده از چهار فنر ثابت شده است. یک شفت فولادی با استفاده از دو بلبرینگ به این صفحه متصل شده که قادر است با استفاده از یک موتور الکتریکی با توان ۲/۲ کیلو وات و دور اسمی ۲۸۴۰ دور بر دقیقه به کمک دو پولی و یک تسمه بچرخد. پایه‌های سطح شیب‌دار برای انتقال بهتر ارتعاش به سطح اصلی به زمین پیچ شده‌اند. همچنین برای انتقال ارتعاش به صفحه در حین چرخش، از لنگی‌های فولادی استفاده شده که بر روی شفت بسته شده اند. فرکانس ارتعاش را می‌توان با تغییر سرعت چرخش شفت از طریق استفاده از پولی‌هایی با اندازه متفاوت تغییر داد. در شکل ۲ تجهیزات دستگاه سطح شیب‌دار لرزان نشان داده شده است. با توجه به تحقیقات انجام شده با استفاده از همین دستگاه بهینه‌ترین فرکانس برای دستیابی به ساختار بهینه فرکانس ۶۰ هرتز و دامنه‌ی ۶۸۰ میکرومتر است. لازم به توضیح است که برای تهیه نمونه‌هایی از طریق سطح شیب‌دار ساکن نیز از همین دستگاه در حالت موتور خاموش استفاده شده است [۱۸].

غیر درجا فاز تقویت‌کننده از قبل آماده شده و در حین فرایند تولید در زمینه ادغام می‌شود اما در روش‌های درجا، تقویت‌کننده در حین فرایند تولید در زمینه ایجاد می‌شود. از مزایای روش‌های درجا می‌توان به توزیع یکنواخت فاز تقویت‌کننده در زمینه، عدم آلودگی سطحی تقویت‌کننده و در نتیجه ترشوندگی و پیوند مناسب تقویت‌کننده و زمینه، سازگاری ترمودینامیکی فاز‌های تشکیل دهنده کامپوزیت و در برخی موارد هزینه پایین تولید اشاره نمود. با توجه به نمودار فازی Al-Si (شکل ۱) نقطه یوتکتیک در ترکیبی حاوی ۱۲/۶ درصد وزنی سیلیسیم و دمای ۵۷۷ درجه سانتی‌گراد وجود دارد. آلومینیم قابلیت انحلال کمتر از ۳٪ در سیلیسیم را دارد، اما سیلیسیم به طور کامل در Al نامحلول است. ترکیبات حاوی بالاتر از ۱۲/۶ درصد سیلیسیم تحت عنوان ترکیبات هایپر یوتکتیک مطرح می‌شوند [۱-۴]. بنابراین در اثر انجماد مذاب آلیاژهای هایپر یوتکتیک Al-Si به سادگی و با هزینه پایین، کامپوزیت‌های درجای زمینه آلومینیمی تقویت شده با ذرات اولیه سیلیسیم تولید می‌شوند.

روش‌های تولید کامپوزیت‌های هایپر یوتکتیک Al-Si

از روش‌های تولید کامپوزیت‌های هایپر یوتکتیک Al-Si می‌توان به ریخته‌گری به روش ثقلی و ریخته‌گری گریز از مرکز اشاره کرد. این دو روش به دلیل سادگی و پیچیدگی کمتر نسبت به روش‌های جدید از دیر باز مورد توجه بوده‌اند. البته نشان داده شده که کامپوزیت‌های حاصل از روش ریخته‌گری گریز از مرکز خواص بهتری نسبت به روش ثقلی داشته‌اند [۵-۷]. از طرفی استفاده از فرایندهای نیمه جامد به منظور ریز کردن و بهینه‌سازی سیلیسیم اولیه در تولید این کامپوزیت‌ها همواره مورد توجه بوده است. در این خصوص می‌توان به فرایند هایی از قبیل: هم‌زدن به روش‌های مغناطیسی، استفاده از امواج اولتراسونیک، روش سطح شیب‌دار خنک‌کننده و روش اسپری کردن اشاره نمود [۹-۱۴]. از روش‌های شیمیایی نیز برای بهسازی و ریز نمودن ذرات سیلیسیم اولیه با استفاده عنصر اسکاندیم (Sc) استفاده شده که نتایج بیانگر کاهش اندازه ذرات سیلیسیم و بهبود چشم‌گیر خواص مکانیکی ماده از جمله سختی است [۱۵].



شکل ۱: دیاگرام دوتایی Al-Si [۴].

دقت ۰/۱ میلی گرم اندازه گیری شد و تخلخل آن ها با در نظر گرفتن چگالی کامل آلیاژ محاسبه شد. جهت انجام آزمون سایش از روش پین روی دیسک استفاده شد. در تحقیق حاضر نمونه هایی با ابعاد $25 \times 25 \times 10$ میلی متر از قسمت میانی شمش به عنوان دیسک در نظر گرفته شدند. در ابتدا سطح نمونه ها تا سمباده ۱۰۰۰ یکنواخت شده و سپس آلودگی های سطحی نمونه ها و پین در محیط استون و با استفاده از دستگاه فراصوت زدوده شدند. در ادامه نمونه ها خشک شده و وزن آن ها توسط ترازو با دقت ۴ رقم اعشار اندازه گیری شد. در تمامی آزمون ها نیرویی معادل ۱۰ نیوتون به وسیله پینی به قطر ۵ میلی متر از جنس فولاد ۵۲۱۰۰ به سطح نمونه ها اعمال شد. در این حالت دیسک با سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه شروع به چرخش کرده و پس از طی ۱۰۰۰ متر وزن نمونه ها مجدداً اندازه گیری شد. نتایج به دست آمده بر اساس میزان حجم ساییده شده گزارش شد. به این ترتیب که بر اساس داده های به دست آمده از نتایج کاهش وزن و همچنین چگالی نسبی نمونه ها، میزان حجم ساییده محاسبه شد. ضریب اصطکاک نیز که از میزان نیروی افقی اعمال شده به پین در حین آزمون سایش که توسط حسگرهای دستگاه ثبت می شود به وسیله ی نرم افزار متصل به دستگاه ثبت و گزارش شد.

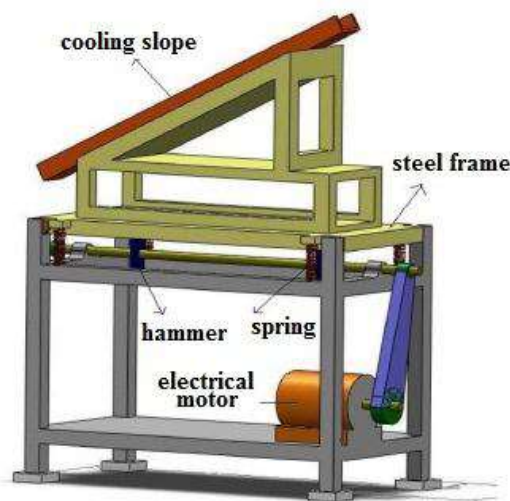
۳. نتایج و بحث

مطالعات ریز ساختاری

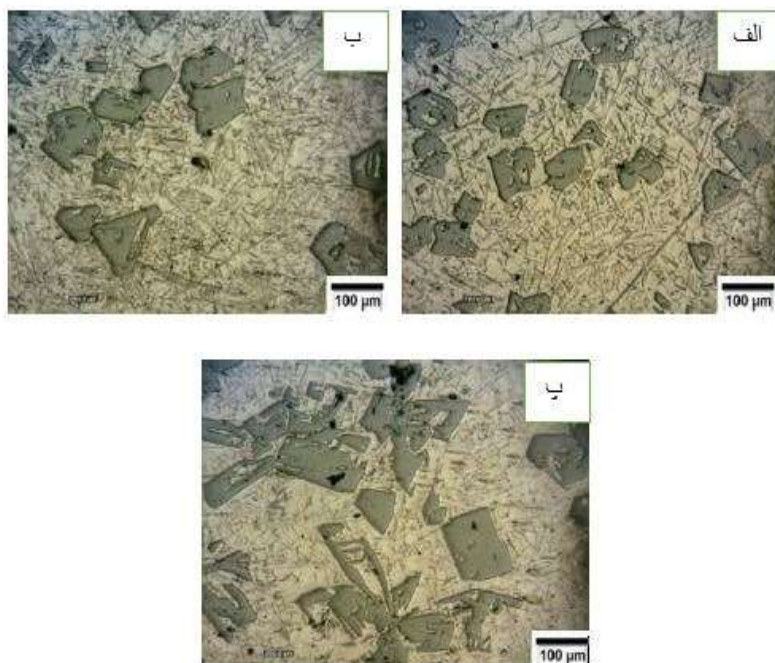
در شکل های ۳-۵ تصاویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار کامپوزیت حاوی ۲۰ درصد سیلیسیم که به ترتیب توسط روش های ثقلی، سطح شیب دار ساکن و سطح شیب دار لرزان در سه فوق گداز ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درجه سانتی گراد ریخته گری شده اند نشان داده شده است.

شمش های پیر یوتکتیک Al-20Si در بوتله ی گرافیتی رسی ۴ کیلوپی درون کوره مقاومتی به قطر محفظه ۲۵ سانتی متر و عمق ۲۰ سانتی متر ذوب شده و به دمای مورد نظر رسانیده شد. بارریزی در سه فوق گداز ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درجه سانتی گراد با استفاده از سه فرآیند ریخته گری سطح شیب دار ساکن، سطح شیب دار لرزان و ریخته گری ثقلی در قالب چدنی استوانه ای شکل به قطر داخلی ۶۰ و ارتفاع ۲۵ میلی متر و ضخامت دیواره ۲ میلی متر انجام گرفت. بدین ترتیب ۹ نمونه برای سه فوق گداز به سه روش ریخته گری به دست آمد. ریخته گری بر روی سطح شیب دار لرزان تحت شرایط طول سطح ۸۰ میلی متر، زاویه سطح ۴۵ درجه، فرکانس و دامنه ارتعاش به ترتیب ۶۰ هرتز و ۶۸۰ میکرومتر صورت گرفت. نمونه ها از مرکز و در راستای قطر به صورت عمودی برش داده شده و سطح مقطع آن ها تحت عملیات سمباده زنی سیغل کاری و پولیش کاری با استفاده از پودر آلومینا (۰/۳ میکرومتر) قرار گرفته و در نهایت با محلول HF ۵ درصد به مدت ۳۰ ثانیه حکاکی شدند. بررسی های ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری Olympus-BX60M در بزرگنمایی ۱۲۵ برابر انجام گرفت. جهت بررسی اندازه ذرات Si از نرم افزارهای مرتبط مانند climax و MIP استفاده شد. به این منظور مساحت هر ذره A، برای ذرات موجود در ۳۰ ناحیه مختلف از نمونه ها در تصاویر میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی ۱۲۵ اندازه گیری شد. اندازه ذرات معادل قطر دایره هم مساحت با آن ها در نظر گرفته شد و سپس قطر معادل هر ذره محاسبه شده و میانگین داده های مربوط به قطر معادل گزارش شد.

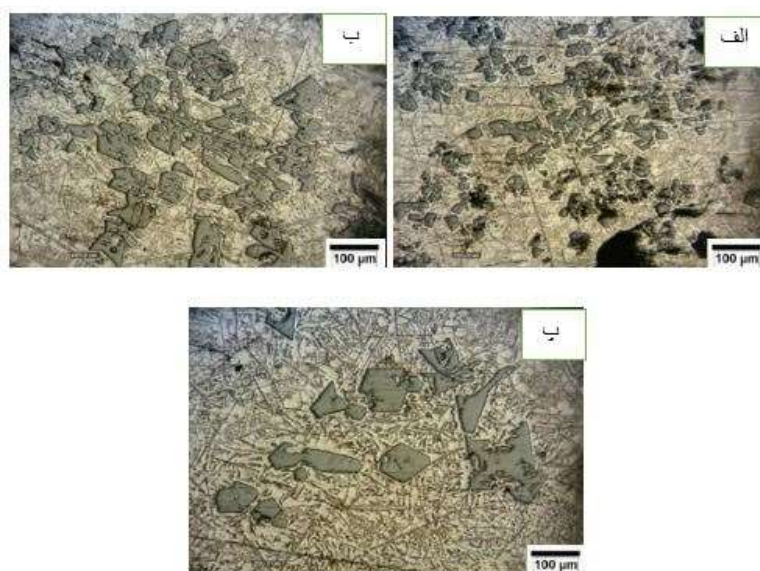
سختی نمونه ها به وسیله ی سختی سنج برینل اندازه گیری شد. به این منظور فرورونده به قطر ۲/۵ میلی متر توسط بار ۳۰ کیلوگرم به مدت ۳۰ ثانیه اعمال شد. به منظور دقت بیشتر از هر نمونه پنج بار در مکان های مختلف تست سختی صورت گرفت. چگالی نمونه ها از روش ارشمیدس مطابق استاندارد ASTM B 325 با به کارگیری ترازویی با



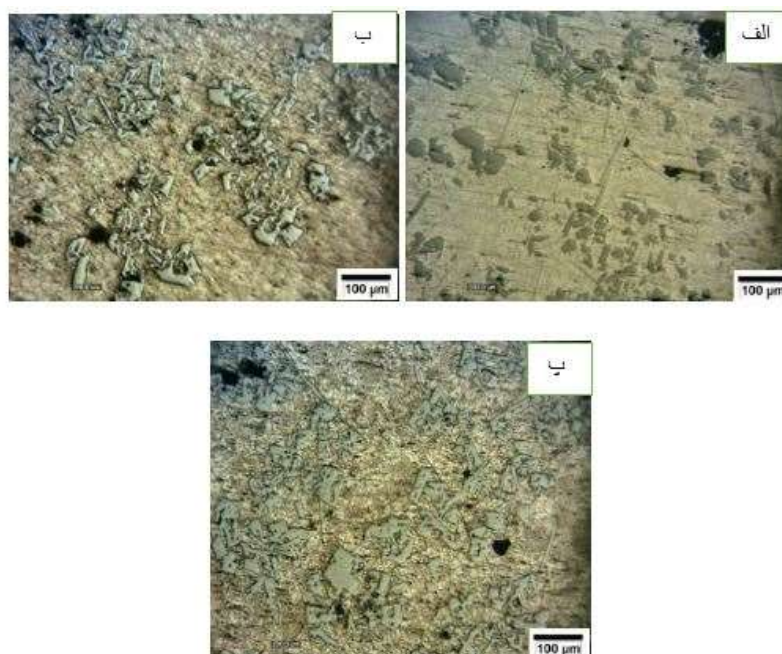
شکل ۲: نمایی شماتیک از دستگاه سطح شیب دار لرزان [۱۶].



شکل ۳: ریزساختار کامپوزیت Al-20% Si ریخته‌شده به روش ثقلی در فوق‌گدازهای مختلف: (الف) ۵۰، (ب) ۷۵ و (پ) ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد.



شکل ۴: ریزساختار کامپوزیت Al-20% Si ریخته‌شده به روش سطح شیب‌دار ساکن در فوق‌گدازهای مختلف: (الف) ۵۰، (ب) ۷۵ و (پ) ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد.



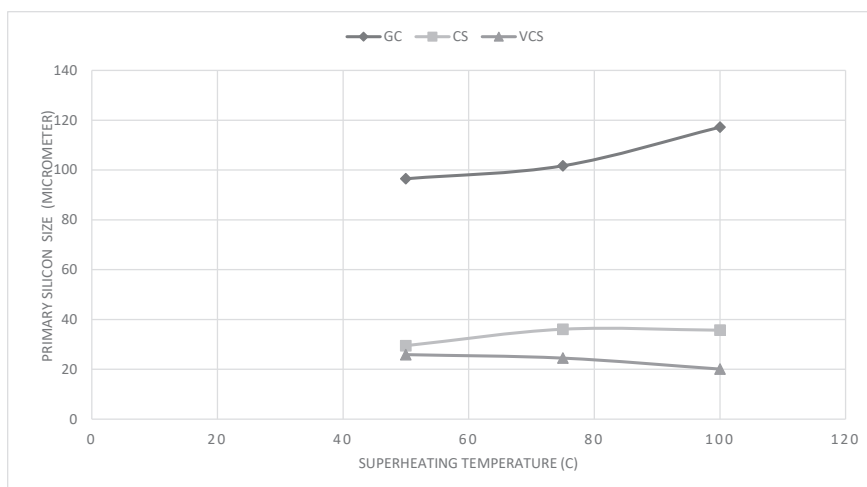
شکل ۵: ریزساختار کامپوزیت Al-20% Si ریخته شده به روش سطح شیب دار لرزان در فوق گدازهای مختلف: (الف) ۵۰، (ب) ۷۵ و (پ) ۱۰۰ درجه سانتی گراد.

بسیار محسوس است. با توجه به این که گوشه های تیز سیلیسیم اولیه در ساختار به دلیل تمرکز تنش در آن نواحی سبب کاهش خواص مکانیکی می شوند می توان نتیجه گیری نمود که استفاده از روش سطح شیب دار لرزان به دلیل قابلیت اصلاح مورفولوژی ذرات سیلیسیم اولیه بر روش های ثقلی و سطح شیب دار ساکن ارجحیت دارد.

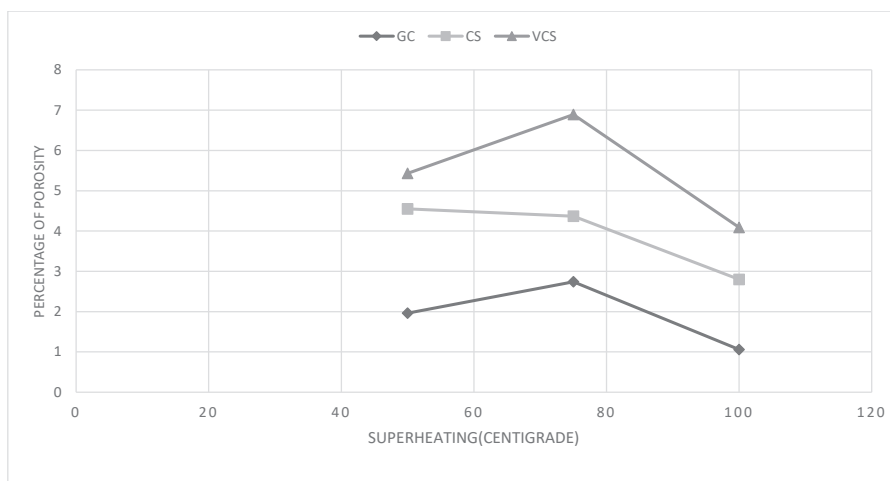
در شکل ۶ نمودار تغییرات اندازه ذرات سیلیسیم اولیه بر حسب فوق گداز در نمونه های ریخته گری شده از روش های مختلف نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۶، مشخص می شود که استفاده از سطح شیب دار (اعم از ساکن یا لرزان) در مقایسه با ریخته گری ثقلی، تاثیر بسیار زیادی در کاهش اندازه ذرات سیلیسیم داشته و این تاثیر برای فوق گداز ۱۰۰ درجه سانتی گراد بسیار بارز است. اما تغییر روش ریخته گری از سطح شیب دار ساکن به سطح شیب دار لرزان و به عبارت دیگر مرتعش سازی سطح شیب دار تاثیر چندانی بر اندازه ذرات سیلیسیم اولیه در نمونه ها نداشته است. البته در مواردی مانند فوق گداز ۷۵ و ۱۰۰ درجه سانتی گراد کاهش اندازه ذرات به صورت محسوس رخ داده است. در هنگام عبور مذاب از روی سطح شیب دار لایه فوقانی مذاب که با هوا در تماس است، منجمد شده و به حالت نیمه جامد وارد قالب می شود و البته تعدادی جوانه هم در اثر تماس مذاب با سطح شیب دار تشکیل می شوند. لایه های تحتانی مذاب در اثر تلاطم شدید وارد توده مذاب شده و فرصت لازم را برای تشکیل جوانه های جدید فراهم می کنند [۱۸].

باتوجه به ساختارهای متالوگرافی نشان داده شده در شکل های ۳ و ۴ مشخص می شود که در هر دو مورد نمونه های GC و CS با افزایش فوق گداز اندازه ذرات سیلیسیم اولیه درشت تر شده است. البته در نمونه های ریخته شده به روش ثقلی شکل ۳، درشت شدن ذرات سیلیسیم محسوس تر است. دلیل افزایش اندازه ذرات سیلیسیم افزایش سیالیت مذاب به دلیل افزایش دما است. با افزایش سیالیت تاثیر پذیری مذاب از سطح شیب دار کمتر می شود. به این معنی که تنش وارد شده بر مذاب کاهش یافته و تعداد مراکز جوانه زنی برای سیلیسیم نیز کاهش می یابد. اما در نمونه های ریخته شده به روش سطح شیب دار لرزان (شکل ۵)، با افزایش فوق گداز اندازه ذرات سیلیسیم اولیه کاهش یافته است که دلیل آن بالا رفتن سیالیت مذاب با افزایش فوق گداز است که سبب افزایش تاثیر لرزش بر ساختار نهایی شده است. دلیل افزایش اندازه ذرات سیلیسیم با افزایش فوق گداز را می توان به سهولت نفوذ سیلیسیم در دمای بالاتر نسبت داد. در دمای بالاتر نفوذ سیلیسیم راحت تر صورت می گیرد لذا فرصت برای رشد سیلیسیم های اولیه فراهم می شود [۱۹]. در ضمن شکل های ۳ تا ۵ نشان می دهند که مورفولوژی ذرات سیلیسیم اولیه با تغییر روش ریخته گری از ثقلی به سطح شیب دار ساکن و سپس به سطح شیب دار لرزان به تدریج از حالت گوشه دار خارج شده و لبه های تیز آن ها انحناءدار می شود. این مورد در خصوص نمونه های ریخته شده در فوق گداز ۵۰ درجه سانتی گراد، (مقایسه شکل های ۳-الف، ۴-الف و ۵-الف)



شکل ۶: نمودار تغییرات اندازه ذرات سیلیسیم اولیه بر حسب فوق‌گداز در نمونه‌های ریخته‌گری شده از روش‌های مختلف.



شکل ۷: نمودار تغییرات تخلخل بر حسب دمای فوق‌گداز برای نمونه‌های تهیه‌شده از سه روش ریخته‌گری ثقلی، سطح شیب‌دار ساکن و سطح شیب‌دار لرزان.

ریخته‌گری از ثقلی به سطح شیب‌دار ساکن و از سطح شیب‌دار ساکن به سطح شیب‌دار لرزان درصد تخلخل نمونه‌ها افزایش یافته است.

در مورد ایجاد تخلخل در این نمونه‌ها عوامل متعددی دخیل هستند. از یک طرف افزایش فوق‌گداز سبب افزایش واکنش‌پذیری مذاب با محیط اطراف می‌شود و در نتیجه جذب گاز و رطوبت از اتمسفر و همچنین بدنه سطح شیب‌دار به مذاب بیشتر شده و به تبع آن تخلخل افزایش می‌یابد. از طرف دیگر افزایش فوق‌گداز، سبب می‌شود که از لحظه ورود مذاب به قالب تا ختم انجماد زمان بیشتری سپری شده که این امر به خروج موثرتر گازهای محلول در مذاب کمک کرده

تخلخل کامپوزیت‌ها

در شکل ۷ نمودار تغییرات تخلخل بر حسب دمای فوق‌گداز برای نمونه‌های تهیه‌شده از سه روش ریخته‌گری ثقلی، سطح شیب‌دار ساکن و سطح شیب‌دار لرزان نشان داده شده است. به طوری که ملاحظه می‌شود در کامپوزیت‌های ریخته‌گری شده به روش‌های ثقلی و سطح شیب‌دار لرزان، با افزایش دمای فوق‌گداز از ۵۰ به ۷۵ درجه سانتی‌گراد تخلخل افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر این کمیت به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است. اما در روش سطح شیب‌دار ساکن با افزایش دما در تمام دامنه ۵۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، تخلخل روند کاهشی داشته است. در ضمن در همه ی موارد با تغییر روش

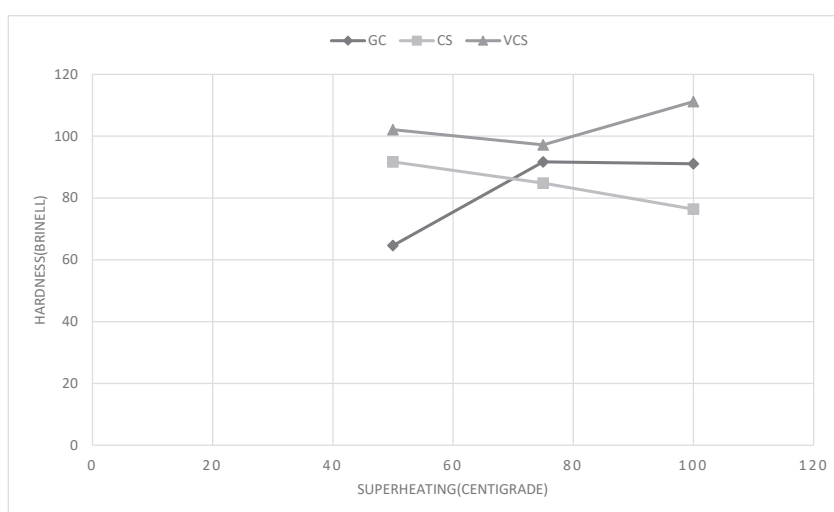
فوق‌گداز و سه‌روش ریخته‌گری ثقلی، سطح شیب‌دار ساکن و سطح شیب‌دار لرزان نشان داده شده است. به طوری که ملاحظه می‌شود با افزایش فوق‌گداز میزان سختی در نمونه‌های ریخته‌گری شده به روش‌های مختلف در برخی موارد افزایش داشته و در موارد دیگر کاهش نشان می‌دهد و در برخی نمونه‌ها هم افزایش فوق‌گداز تاثیر چندانی بر سختی نداشته است. در واقع می‌توان تاثیر فوق‌گداز بر سختی را از طریق تاثیر این کمیت بر ریز ساختار (مورفولوژی و اندازه ذرات سیلیسیم اولیه و نیز ساختار یوتکتیک) و همچنین میزان تخلخل بررسی نمود. دو عامل تخلخل و اندازه ذرات سیلیسیم اولیه که با فوق‌گداز در ارتباط بوده اند در سختی این نمونه‌ها موثر هستند. با توجه به شکل ۸ در همه‌ی نمونه‌ها، در هر سه فوق‌گداز ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد میزان سختی در روش ریخته‌گری سطح شیب‌دار لرزان از دو روش دیگر ریخته‌گری بالاتر است. این موضوع در صورتی است که با توجه به بخش ۳-۲ بیشترین میزان تخلخل نیز مربوط به نمونه‌های ریخته‌شده به روش سطح شیب‌دار لرزان است. دلیل افزایش میزان سختی در این نمونه‌ها تاثیر سطح شیب‌دار لرزان بر میانگین اندازه ذرات سیلیسیم اولیه و گلوله‌ی شدن ذرات آلومینیوم است. در شکل ۸ مشاهده می‌شود که میزان سختی در ریخته‌گری به روش شیب‌دار ساکن، گاهی از روش ریخته‌گری ثقلی بیشتر و گاهی بالعکس بوده است. این نتایج در شرایطی به دست آمده‌اند که با توجه به شکل ۷ در اغلب موارد میزان تخلخل در روش سطح شیب‌دار ساکن بیشتر از ثقلی بوده است. لذا کمتر بودن میزان سختی در برخی نمونه‌ها به دلیل بالاتر بودن تخلخل در نمونه ریخته‌شده به روش سطح شیب‌دار لرزان است.

و می‌تواند منجر به کاهش تخلخل در کامپوزیت شود. همچنین در مورد نمونه‌های ریخته‌شده از طریق سطح شیب‌دار ساکن و یا لرزان، افزایش فوق‌گداز از طرفی سبب تلاطم بیشتر مذاب و جذب گاز بیشتر و تخلخل بیشتر می‌شود و از طرف دیگر به دلیل افزایش سیالیت، زمان حضور مذاب بر روی سطح شیب‌دار کاهش یافته و مذاب تلاطم کمتری را تجربه می‌کند و لذا تخلخل کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج به دست آمده، افزایش فوق‌گداز می‌تواند اثرات متفاوتی در جهت ازدیاد و یا کاهش تخلخل داشته باشد که در مجموع در برخی موارد باعث کاهش و در مواردی دیگر باعث افزایش تخلخل نمونه‌ها شده است.

در مورد علل بیشتر بودن میزان تخلخل در نمونه‌های سطح شیب‌دار ساکن و سطح شیب‌دار لرزان در مقایسه با نمونه‌های ریخته‌شده به روش ثقلی می‌توان به عوامل زیر اشاره نمود: یک عامل سرعت انجماد بالاتر مذاب در هنگام استفاده از سطح شیب‌دار و عامل دیگر تلاطم مذاب در حین عبور از سطح شیب‌دار و در هنگام ورود به قالب است. افت دمایی و همچنین تشکیل جوانه‌های غیرتعدادی در داخل مذاب کامپوزیتی به علت عبور از سطح شیب‌دار باعث می‌شود که ویسکوزیته مذاب و نیز سرعت انجماد افزایش یابند. با کاهش زمان انجماد و افزایش ویسکوزیته امکان خروج گازها از داخل مذاب کمتر شده و لذا میزان تخلخل در مقایسه با نمونه‌های ریخته‌شده به روش ثقلی افزایش می‌یابد. در فرایند سطح شیب‌دار لرزان به علت عبور از روی سطح لرزان و در هنگام ورود به درون قالب، مذاب دچار تلاطم بیشتری در مقایسه با سطح شیب‌دار ساکن و ریخته‌گری ثقلی شده است که این پدیده سبب جذب گاز بیشتر و افزایش تخلخل شده است.

سختی کامپوزیت‌ها

در شکل ۸ نمودار تغییرات سختی برینل بر حسب دمای

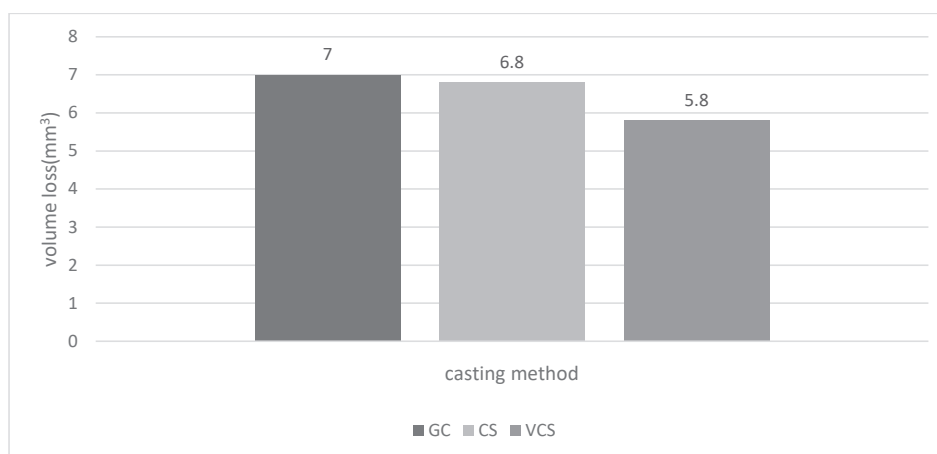


شکل ۸: نمودار تغییرات سختی برینل بر حسب دمای فوق‌گداز برای نمونه‌های تهیه‌شده از سه روش ریخته‌گری ثقلی، سطح شیب‌دار ساکن و سطح شیب‌دار لرزان.

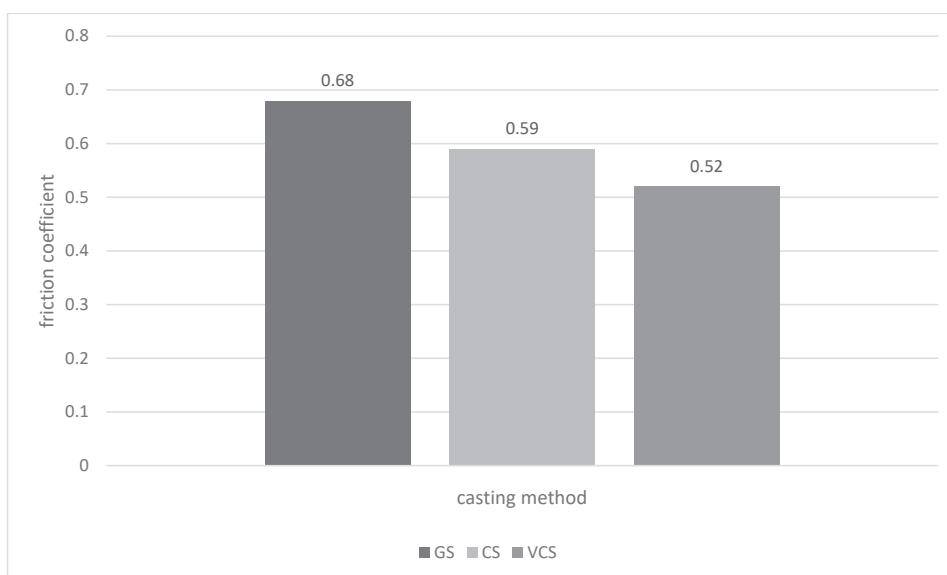
سطح شیب‌دار لرزان در مقایسه با فرآیندهای سطح شیب‌دار ساکن و ریخته‌گری ثقلی حاصل شده‌اند. بنابراین عوامل دیگری بر افزایش مقاومت سایشی نمونه‌های سطح شیب‌دار لرزان در مقایسه با نمونه‌های سطح شیب‌دار ساکن و ثقلی تأثیرگذار هستند. همانطور که در قسمت‌های قبل اشاره شد استفاده از روش سطح شیب‌دار و همچنین مرتعش‌سازی آن سبب کاهش اندازه ذرات سیلیسیم اولیه و گلبولی شدن آلومینیم می‌شود. همچنین نرخ سایش با افزایش میزان سختی، کاهش می‌یابد. سختی نمونه‌های ریخته‌شده به روش ثقلی، سطح شیب‌دار ساکن و سطح شیب‌دار لرزان به ترتیب سیر صعودی داشته است که با نتایج به دست آمده از آزمون سایش هم‌خوانی دارد.

تأثیر روش ریخته‌گری بر رفتار سایشی کامپوزیت‌ها

در شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب نمودارهای مربوط به میزان کاهش حجم در اثر سایش و ضریب اصطکاک کامپوزیت‌های تهیه شده از سه روش ریخته‌گری ثقلی، سطح شیب‌دار ساکن و سطح شیب‌دار لرزان که در فوق‌گداز ۵۰ درجه سانتی‌گراد ریخته‌گری شده‌اند نشان داده شده است. این نمودارها نشان می‌دهند که با تغییر فرایند ریخته‌گری از ثقلی به سطح شیب‌دار ساکن و سپس به سطح شیب‌دار لرزان، میزان حجم ساییده شده و ضریب اصطکاک کاهش یافته‌اند. بهبود خواص سایشی را می‌توان به بهینه شدن ساختار ذرات در حالت سطح شیب‌دار لرزان نسبت داد. در واقع این نتایج علی‌رغم میزان تخلخل بالاتر بدست آمده در فرآیند



شکل ۹: کاهش حجم در اثر سایش کامپوزیت‌های ریخته‌شده از سه روش ریخته‌گری ثقلی، سطح شیب‌دار ساکن و سطح شیب‌دار لرزان در فوق‌گداز ۵۰ درجه سانتی‌گراد.



شکل ۱۰: ضریب اصطکاک در حین سایش کامپوزیت‌های ریخته‌شده از سه روش ریخته‌گری ثقلی، سطح شیب‌دار ساکن و سطح شیب‌دار لرزان در فوق‌گداز ۵۰ درجه سانتی‌گراد.

References

- [1] A.C. Marshall, "Composite Basics", T C press, 1998, Vol.5, 20-30.
- [2] ASM Handbook, "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials", American Society for Metals, Metals Park, OH, Vol. 10th Edition, 1998, 2, 62-152.
- [3] S.P. Nikanorova, M.P. Volkova, V.N. Gurina, Yu.A. Burenkova, L.I. Derkachenko, B.K. Kardasheva, L.L. Regelb, W.R. Wilcox, "Structural and mechanical properties of Al-Si alloys obtained by fast cooling of a levitated melt", Materials Science and Engineering A, 2005, 390, 63-69.
- [4] <http://slideplayer.com/> "1 - Seminar: Metallography of casting alloys and metallurgical defects Fundamentals of solidification.
- [5] C. Li, Y.Y. Wu, H. Li and X.F. Liu, "Morphological evolution and growth mechanism of primary Mg₂Si phase in Al-Mg₂Si alloys", Acta Materialia, 2011, 59, 1058-1067.
- [6] S. Goto, Y. Komatsu and S. Aso, "Analysis of Slurry-Erosion Behavior in Silicon Particles Dispersed Al-Si Binary Alloys", Society of Materials Engineering for Resources of Japan, 2004, 17, 13-19.
- [7] K. Wang, Z.M. Zhang, T. Yu, N.J. He and Z.Z. Zhu, "The transfer behavior in centrifugal casting of SiCp/Al composites", Materials Processing Technology, 2017, 242, 60-67.
- [8] G. Chirita, I. Stefanescu, D. Cruz, D. Soares and F.S. Silva, "Sensitivity of different Al-Si alloys to centrifugal casting effect", Materials and Design, 2010, 31, 2867-2877.
- [9] Z.Fan, "Semisolid Metal Processing", International Materials Reviews, 2002, 47, 1-37.
- [10] D. Lu, Y. Jiang, G. Guan, R.Zhou, Z. Li and R. Zhou, "Refinement of primary Si in hypereutectic Al-Si alloy by electromagnetic stirring", Materials Processing Technology, 2007, 189, 13-18.
- [11] H.R. Kotadia and A. Das, "Modification of solidification microstructure in hypo- and hyper-eutectic Al-Si alloys under high-intensity ultrasonic irradiation", Alloys and Compounds, 2015, 620, 1-4.
- [12] K. Sukumaran, B.C. Pai and M. Chakraborty, "The effect of isothermal mechanical stirring on an Al-Si alloy in the semisolid condition", Materials Science and Engineering A, 2004, 369, 275-283.
- [13] M. Ramadan and N. Fathy, "Microstructure of Hyper-Eutectic Al-Si alloy Processed in Semi-Solid State", International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET), 2012, 1, 238-241.
- [14] F. Wang, Y. Ma, Z. Zhang, X. Cui and Y. Jin, "A comparison of the sliding wear behavior of a hypereutectic Al-Si alloy prepared by spray-deposition and conventional casting methods", wear, 2004, 256, 342-345.
- [15] N. Raghukiran and R. Kumar, "The role of the bimodal distribution of ultra-fine silicon phase and Nano-scale V-phase (AlSi₂Sc₂) on spark plasma sintered hypereutectic Al-Si-Sc alloys", Materials Science & Engineering A, 2016, 657, 123-135.
- [16] آ. طغانی، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران ۱۳۸۸
- [17] F. Akhlaghi and A. Taghani, "Development of Vibrating Cooling Slope (VCS) Method for Enhancing a Globular Structure in Aluminum A356 Alloy", Proceedings of the 12th International Conference on Aluminum Alloys, September 5-9, 2010, Yokohama, Japan, pp. 1839-1844.
- [18] ش. صفاری، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۹۲
- [19] R.G. Guan, F.R. Cao, L.Q. Chen, J.P. Li and C. Wang, "Dynamical solidification behaviors and microstructural evolution during vibrating wavelike sloping plate process", Mat. Proc. Tech., 2009, 209, 2592-2601.

۴. نتیجه گیری

در این تحقیق آلیاژهای هایپر یوتکتیک Al-20Si در فوق‌گدازهای ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد از طریق فرآیند های سطح شیب‌دار لرزان، سطح شیب‌دار ساکن و ثقلی ریخته‌گری شدند. نتایج مهم به دست آمده در این تحقیق را میتوان به شرح ذیل جمع‌بندی نمود:

- ۱- افزایش فوق‌گداز در اغلب نمونه‌های کامپوزیتی ریخته‌شده به روش‌های مختلف موجب افزایش اندازه ذرات سیلیسیم اولیه می‌شود. این نتایج در ریخته‌گری به روش ثقلی بارزتر هستند.
- ۲- استفاده از روش سطح شیب‌دار لرزان و ساکن در فوق‌گدازهای ثابت سبب کاهش اندازه ذرات سیلیسیم اولیه در مقایسه با روش ثقلی می‌شود. همچنین استفاده از سطح شیب‌دار لرزان سبب کاهش جزئی در اندازه ذرات سیلیسیم در مقایسه با سطح شیب‌دار ساکن می‌شود.
- ۳- میزان تخلخل در نمونه‌های ریخته‌گری شده با استفاده از فرایند سطح شیب‌دار لرزان در اغلب موارد بیشتر از میزان تخلخل در نمونه‌های ریخته‌گری شده با استفاده از روش سطح شیب‌دار ساکن است. همچنین میزان تخلخل در نمونه‌های ریخته‌گری شده با استفاده از فرایند سطح شیب‌دار ساکن بیشتر از میزان تخلخل در نمونه‌های تولید با استفاده از روش ثقلی است.
- ۴- میزان سختی نمونه‌های سطح شیب‌دار لرزان در مقایسه با نمونه‌های ریخته‌گری شده با استفاده از فرایند های ثقلی و سطح شیب‌دار ساکن تا حدودی بیشتر است.
- ۵- کمترین میزان کاهش حجم و ضریب اصطکاک برای نمونه‌های ریخته‌گری شده به روش سطح شیب‌دار لرزان در مقایسه با فرایندهای سطح شیب‌دار ساکن و ثقلی حاصل شده است.