Archive of SID

تولید و مشخصه‌یابی کامپوزیت Al-15%Si تولید شده با روش ریخته‌گری گریز از مرکز

حمید ناظمی *(۱) **محمدرضا درخشش** (۲)

(۱) مربی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی، گروه مهندسی مواد، شهر مجلسی، ایران

(۲) عضو باشگاه پژوهشگران جوان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی، ایران

چکیده یکی از روش‌های تولید مواد کامپوزیت با ترکیب شیمیایی متفاوت روش ریخته‌گری گریز از مرکز می باشد. در این پژوهش از روش ریخته‌گری گریز از مرکز جهت تولید آلیاژ Al-15%Si استفاده شد. با این روش کسر حجمی ذرات سیلیکون در نواحی سطحی نمونه ها به حدود ۲۵ درصد می رسد و متعاقباً سختی سطحی آلیاژ تولیدی افزایش می‌یابد که برای کاربردهای مقاوم به سایش مناسب می‌باشد. در این راستا نتایج به دست آمده از آزمون‌های سایش مشخص کرد که تشکیل ذرات سیلیکون در فاصله ۲۰ mm از سطح نمونه‌های تولیدی باعث افزایش کلی سختی نمونه‌ها به میزان ۹۵HV و متعاقباً افزایش مقاومت به سایش در این نواحی می‌گردد. علاوه بر این، مقادیر میکرو، سختی یک کاهش تقریباً خطی را با افزایش فاصله از سطح نشان دادند. هم‌چنین بررسی سطوح سایش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نشان داد که سطوح سایش ترکیبی از ذرات سیلیکون جدا شده از سطح و هم‌چنین لایه‌های تریبولوژی به هم چسبیده می‌باشند. این دو مورد هر دو بیانگر مقاومت به سایش بالای نمونه‌های تولید شده توسط این روش می‌باشد.

واژه‌های کلیدی کامپوزیت، آلیاژ Al-15%Si، ریخته‌گری گریز از مرکز.

* عهده دار مکاتبات

نشانی: اصفهان، شهر جدید مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مواد

تلفن: ۰۹۱۲۲۳۱۲۵۸۹ **پست الکترونیکی:** hnazemi@iaumajlesi.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMCs) تقویت شده با سرامیک یا ذرات فلزی به دلیل استحکام و مقاومت سایش بالا به صورت گسترده ای استفاده می‌شوند. علاوه بر این، کامپوزیت‌های زمینه فلزی به عنوان یک جایگزین برای مواد فلزی مونولیتیک یا آلیاژهای متداول در کاربردهای ویژه نیز در نظر گرفته می‌شوند [۱]. گزارش شده است که کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی (AMCs) با افزایش کسر حجمی ذرات استحکام‌دهنده خواص مقاومت به سایش و ضریب اصطکاک کم‌تری در مقایسه با آلیاژهای آلومینیوم بدون ذرات تقویت شونده پیدا می‌کنند [۲].

مواد کامپوزیت با خواص متغیر توزیع کسر حجمی از مواد استحکام‌دهنده را در بر می‌گیرند که به صورت پیوسته از بخش‌های داخلی تا بخش‌های خارجی تغییر می‌کنند و یک ریزساختار غیر یکنواخت کنترل‌شده با خواص متغیر پیوسته حاصل می‌گردد [۳].

اصلاح‌سازی‌های سطحی و روش‌های پوشش‌دهی می‌توانند چنین خواصی را فراهم کنند و به صورت گسترده‌ای برای بهبود خواص تریبولوژی سطح استفاده می‌شوند [۱]. با این وجود، اعمال این عملیات سطحی هزینه‌های تولید را افزایش می‌دهد. بنابراین روش ریخته‌گری گریز از مرکز به عنوان یک روش برتر و کم هزینه در ساخت مواد کامپوزیت با خواص متغیر به کار برده می‌شود. این روش ریخته‌گری شامل ریختن مذاب در یک قالب می‌باشد و همزمان قالب و متعلقات آن تحت یک نیروی گریز از مرکزی قرار دارند که توسط یک حرکت چرخشی به وجود می‌آید [٤].

مواد کامپوزیت زمینه آلومینیومی با خواص متغیر که با سیلیکون استحکام یافته‌اند یک جایگزین مناسب در کاربردهای هوا فضا به شمار می‌روند، به ویژه زمانی که وزن پایین و مقامت به سایش بالا مورد نیاز می‌باشد. علاوه بر این، روش ریخته‌گری گریز از مرکز یکی از بهترین روش‌ها برای تولید مواد کامپوزیت زمینه آلومینیومی می‌باشد؛ زیرا تحت نیروهای گریز از مرکز ذرات سرامیک محفوظ در فلز مذاب به سمت سطوح خارجی جابه‌جا می‌شوند[۵-٦]. مزیت اصلی روش ریخته‌گری گریز از مرکز پر کردن خوب قالب است که کنترل خوب ریز ساختار به دست آمده که منجر به بهبود خواص مکانیکی قطعه حاصله می‌شود، را سبب می‌گردد [٦].

این تحقیق فرایند ساخت، مشخصات ریزساختار اولیه، نتایج آزمون‌های سختی و سایش انجام شده روی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی که توسط روش ریخته‌گری گریز از مرکز تولید شده‌اند، و توسط ذرات استحکام‌دهنده از نوع سیلیکون استحکام‌یافته، را تشریح می‌کند. هم‌چنین مقایسه‌ای بین روش ریخته‌گری گریز از مرکز با روش‌های ریخته‌گری ثقلی متداول نیز انجام شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

برای تولید مواد کامپوزیت با خواص متغیر، روش ریخته‌گری گریز از مرکز به عنوان بهترین روش در نظر گرفته می‌شود [٦]. ترکیب شیمیایی آلیاژ تولیدی مطابق جدول (۱) می‌باشد. ریزساختار کامپوزیت تولیدشده به دو روش کیفی و کمی مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز تصویری کمی برای ارزیابی توزیع ذرات سیلسیم برای آلیاژ Al-Si در حالت‌های ریخته‌گری ثقلی و نقاط داخلی و خارجی نمونه ریخته‌گری‌شده به صورت گریز از مرکز مورد استفاده قرار گرفت. برای انجام آنالیز تصویری از میکروسکوپ آنالیز تصویری Olympus مدل BX51RF با نرم‌افزار Olysia m3 analySIS استفاده شد. این نتایج با نتایج آزمون‌های میکروسختی ویکرز که روی کامپوزیت‌های تولید شده اجرا شده بود، ارتباط داده شد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده در تحقیق بر حسب درصد وزنی که با استفاده از آنالیز EDAX حاصل از میکروسکوپ SEM به دست آمده است

%Al	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%Ti
Bal.	۱۵	<۰/۲	<۰/۲	<۰/۱	۰/۳۵	<۰/۱	<۰/۲

در فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز به دلیل اعمال نیروی گریز از مرکز، قطعه تولیدی دارای دانسیته بالاتری در نواحی خارجی خود می‌باشد. در این تحقیق جهت اجرای فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز از یک قالب در حال چرخش با طول ۱۰۰mm و قطری برابر با ۸۰mm استفاده شد. در این راستا مقدار ۳٤۰ گرم از مذاب آلیاژ فوق الذکر توسط پیمانه پیش‌گرم شده‌ای به درون قالبی انتقال داده شد. این قالب که توسط ریخته‌گری دقیق ساخته شده بود، قبل از ریختن مذاب درون آن تحت عملیات پیش‌گرم در درجه حرارت ٤۰۰°C به مدت یک ساعت قرار گرفته بود. فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز ابتدا با سرعت چرخشی برابر با ۲۰۰ rpm، در حالی که درجه حرارت مذاب درون قالب برابر با ۷۸۰°C بود، آغاز شد. این سرعت چرخش در فرآیندهای ریخته‌گری گریز از مرکز سرعتی متداول محسوب می‌شود.

در فرآیند ریخته‌گری گریز از مرکز سرعت قبل از این‌که قالب تحت نیروی گریز از مرکز از حرکت باز ایستد به بالاترین مقدار خود می‌رسد. زمان چرخش و سرعت قالب وابسته به استحکام تسمه مورد استفاده و مقدار ماده مورد استفاده در آزمایش است.

در فرآیند ریخته‌گری ثقلی، عملیات ذوب با استفاده از یک بوتهٔ گرافیکی و توسط کورهٔ القایی با فرکانس متوسط انجام شد و متعاقباً نمونه‌هایی مشابه با نمونه‌های حاصل از ریخته‌گری گریز از مرکز در یک قالب فولادی، ریخته‌گری شدند.

پس از اجرای فرآیند نمونه‌های استوانه‌ای با طول ۲۰ mm و قطری برابر با ۱٦ mm تولید شدند. به منظور تهیهٔ نمونه‌هایی از قسمت‌های خارجی، میانی و درونی قطعات ریخته‌گری شده به صورت گریز از مرکز، این نمونه‌ها بریده شدند. این نمونه‌گیری از نقاط مختلف باعث بررسی دقیق ریزساختار میکروسکوپی در نقاط مختلف قطعات تولیدی می‌شود. فرآیند متالوگرافی به صورت دقیق انجام شد تا قابلیت تجدید پذیری نتایج به دست آمده بررسی شود.

در ابتدا مراحل سنباده‌زنی با کاغذهای سنباده ۳۲۰، ٤۰۰، ٦۰۰ و ۸۰۰ از جنس SiC انجام شد. در حین عملیات سنباده‌زنی از آب به عنوان روان‌ساز و خنک‌کننده استفاده شد و در نهایت عملیات پولیش با استفاده از امولسیون SiO_2 انجام شد. سپس ریزساختار میکروسکوپی نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری بررسی شدند.

برای تعیین میکروسختی آلیاژ در مقیاس ویکرز از آزمون استاندارد ASTM تحت استاندارد E384 استفاده شد. برای انجام این آزمون از یک ماشین کالیبره شده برای اعمال نیروی ۵kgf به یک فرورونده الماسی به شکل هرم مربع‌القاعده با زاویهٔ رأس ۱۳٦ درجه استفاده شد. در نهایت اثر باقی‌مانده روی سطح نمونه به صورت نوری اندازه‌گیری می‌شود. عدد ویکرز در نهایت با تقسیم بار اعمالی بر حسب kgf بر اثر سطح به دست آمده توسط میکروسکوپ نوری بر حسب

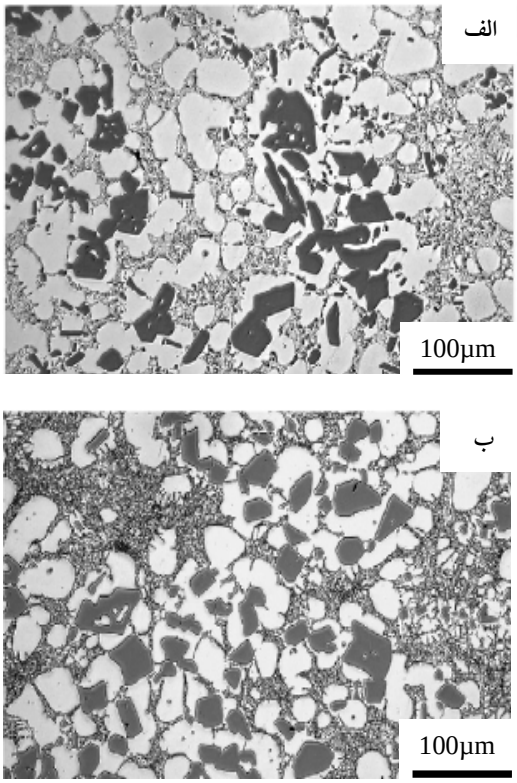
www.SID.ir

Archive of SID

میلی‌متر مربع به دست می‌آید. در نهایت عدد متوسط سختی‌های به دست آمده به عنوان سختی گزارش شد.
به منظور بررسی مقاومت به سایش نمونه‌های تولیدی از آزمون سایش pin-on-disk استفاده شد. در این آزمون از یک پین با رأس کروی که به صورت عمود بر یک نمونه دیسکی شکل قرار گرفته بود، استفاده شد. حرکت دستگاه به نحوی تنظیم شده بود که پین و نمونه به دور مرکز نمونه دیسکی شکل حرکت کروی داشته باشند. این آزمون با سرعت لغزش ثابتی برابر با $۰/۰۰٦٦ \ ms^{-۱}$ انجام شد. قطر پین مورد استفاده برابر با ۳/۱۷۵mm و از نوع فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی از نوع AISI410 بود. مدت زمان انجام تست و میزان بار اعمالی به ترتیب برابر با ٤٥ دقیقه و ۰/۱۵ نیوتن (۱۵ گرم) بود. مسافت لغزش برای نمونه‌های مورد بررسی برابر با ۱۸/۵ متر بود. شرایط دستگاه سایش به گونه‌ای بود که حجم سایش نمونه‌ها با دقت ٥٪± اندازه‌گیری شد. در نهایت به منظور مطالعه بیشتر شرایط سایش، سطح مقطع نمونه‌ها پس از آزمون سایش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شد.

۳- نتایج و بحث

شکل (۱) آنالیز ریزساختار میکروسکوپی نمونه‌های آلیاژ Al-15%Si را در نواحی مرکزی و خارجی نمونه ریخته‌گری شده به صورت گریز از مرکز نشان می‌دهد. در این شکل ذرات سیلیکون هایپریوتکتیک درون زمینه آلومینیومی دیده می‌شوند. همان‌طوری که به صورت ماکروسکوپی قابل مشاهده است، میزان کسر حجمی ذرات سیلیکون در نمونهٔ تهیه شده از نواحی خارجی (نمونه ب) در شکل (۱) زیادتر از نمونه تهیه شده از نواحی درونی (نمونه الف) در شکل (۱) می‌باشد. به عبارت دیگر، نیروهای گریز از مرکز اعمالی باعث حرکت ذرات سیلیکون از نواحی درونی نمونه در حال چرخش به سمت نواحی خارجی آن می‌گردند.

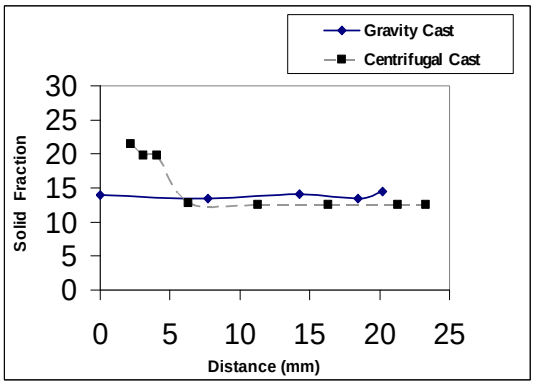


شکل ۱ ریز ساختار میکروسکوپی آلیاژ Al-15%Si در دو ناحیه (الف) مرکزی و (ب) خارجی

www.SID.ir

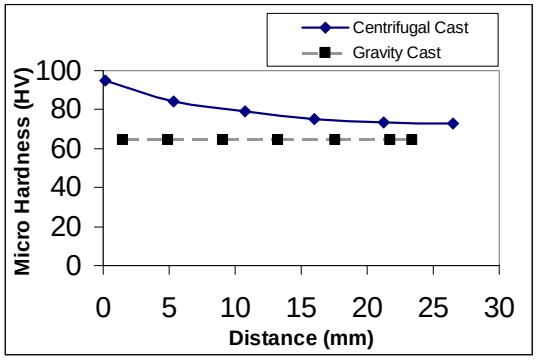
Archive of SID

شکل (۲) نحوهٔ توزیع کسر حجمی ذرات سیلیکون در نمونه‌های مختلف مورد مطالعه در این پروژه را نشان می‌دهد که با استفاده از آنالیز تصویری ریزساختار میکروسکوپی مقاطع مختلف نمونه‌های تولیدی حاصل شده است. به صورت طبیعی همان‌طوری که در شکل (۲) مشاهده می شود، نمونه‌های به دست آمده از قطعات ریخته‌گری‌شده به صورت ثقلی (gravity cast) توزیع یکنواختی از ذرات استحکام‌دهنده سیلیکون را نشان می‌دهند. در مقابل نمونه‌های مورد بررسی از کامپوزیت‌های تولید شده توسط روش ریخته‌گری گریز از مرکز، دانسیته بالاتری از ذرات سیلیکون را در نواحی خارجی در مقایسه با نواحی داخلی قطعه ریخته‌گری نشان می‌دهد. این امر ناشی از این موضوع می‌باشد که ذرات سیلیکون در اثر اعمال نیروی گریز از مرکز تحت تأثیر جدایش قرار می‌گیرند و ضخامت ناحیه غنی از این ذرات به صورت شدیدی تابع سرعت چرخش و زمان انجماد موضعی و اختلاف دانسیته بین آلیاژ پایه و ذرات استحکام‌دهنده می‌باشد.



شکل ۲ تغییرات کسر حجمی ذرات سیلیکون بر حسب فاصله ازمرکز نمونه‌های استوانه‌ای شکل

شکل (۳) تغییرات میکروسختی نمونه‌های ریخته‌گری‌شده به صورت ثقلی و نمونه Al-15%Si ریخته‌گری شده به صورت گریز از مرکز را نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، میزان تغییرات سختی در نمونه ریخته‌گری‌شده به صورت ثقلی و بدون اعمال نیروی گریز از مرکز تقریباً در نقاط مختلف نمونه برابر می‌باشد؛ ولی در مورد نمونه ریخته‌گری‌شده به صورت گریز از مرکز با دور شدن از سطح قطعه میزان سختی کاهش می‌یابد [۸-۷] که این موضوع با توجه به نتایج به‌دست آمده در شکل (۲) قابل توجیه می‌باشد. به عبارت دیگر با دور شدن از سطح، همان‌طوری که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، کسر حجمی ذرات استحکام‌دهنده کاهش می‌یابد و در نتیجه انتظار می‌رود میزان سختی نیز متعاقباً کاهش یابد [۹] که نتایج به دست آمده در شکل (۳) این پیش‌بینی را تأیید می‌کند.



شکل ۳ تغییرات سختی ویکرز بر حسب فاصله از سطح نمونه‌های استوانه‌ای شکل

شکل (٤) نتایج آزمون سایش انجام شده روی نمونه آلیاژ Al-15%Si تولیدشده توسط روش ریخته‌گری گریز از مرکز را نشان می‌دهد. این نمودار در برگیرندهٔ مقادیر حجم سایش به دست آمده در فواصل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متری از مرکز نمونه‌های استوانه‌ای تولید شده می‌باشد.

بیشترین حجم سایش مواد در مرکز نمونه‌های تولید شده مشاهده می‌شود. نرخ سایش به صورت تابعی از فاصله کاهش می‌یابد؛ به نحوی که حجم سایش در فاصله ۲۰ mm دارای کم‌ترین مقدار خود

www.SID.ir

Archive of SID

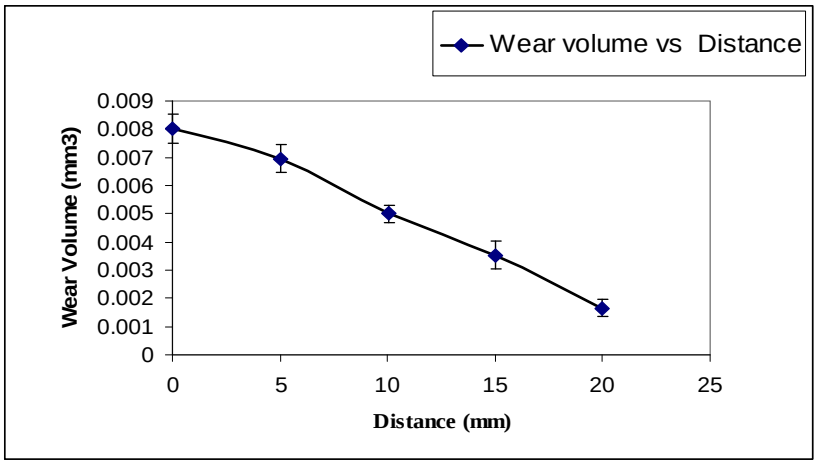
می‌باشد. این موضوع تأیید می‌کند که مقاومت به سایش قطعات تولید شده توسط این روش به‌وسیله مقدار سیلیکون کنترل می‌شود. همان‌طوری که در شکل (٤) مشاهده می‌شود با افزایش میزان سیلیکون از بخش‌های مرکزی قطعات تولیدی به سمت نواحی خارجی با میزان بالاتر ذرات سیلیکون، حجم سایش کاهش یافته است.

همان‌طور که شکل (۲) نشان می‌دهد در ریخته‌گری گریز از مرکز، در فواصل تقریباً ۵mm از مرکز نمونه، میزان ذرات سیلیکون به یک مقدار ثابت می‌رسد. اما در شکل (۳) مشخص است که سختی همواره تا مرکز قطعه روند کاهشی نشان می‌دهد. البته گرادیان تغییرات سختی از مرکز نمونه تا سطح در حال تغییر است. شکل (٤) استمرار روند کاهشی میزان سایش را از مرکز نمونه تا سطح آن نشان می‌دهد. ارتباط این تغییرات به یکدیگر از آن جهت است که سختی هر منطقه علاوه بر درصد فازهای موجود در آن و میزان ذرات سیلیکون و نحوهٔ پراکندگی آن‌ها به سرعت انجماد آن منطقه نیز بستگی دارد. به عبارتی، سرعت انتقال حرارت بیشتر سطح نمونه نسبت به مرکز آن در مرحلهٔ انجماد، دلیلی بر کاهش میزان سایش از مرکز تا سطح نمونه علیرغم عدم تغییر اساسی در میزان ذرات سیلیکون موجود می‌باشد.

شکل (۵) تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح سایش نمونه‌های به دست آمده از قسمت‌های مختلف نمونه‌های تولیدشده توسط روش ریخته‌گری گریز از مرکز و ثقلی را نشان می‌دهد.

در شکل (۵) سطوح سایش غیر یکنواخت نشان‌دهندهٔ ذرات سیلیکون جدا شده از سطح نمونه‌ها می‌باشد و از سوی دیگر وجود لایه‌های تریبولوژی با ظاهر صاف در نمونه‌های ریخته‌گری شده توسط روش ریخته‌گری گریز از مرکز مشهود می‌باشد. هر دو مورد یعنی ذرات سیلیکون جدا شده از سطح و هم‌چنین لایه‌های تریبولوژی به هم چسبیده نشان‌دهندهٔ مقاومت به سایش بالای نمونه‌های تولیدشده توسط روش ریخته‌گری گریز از مرکز می‌باشد.

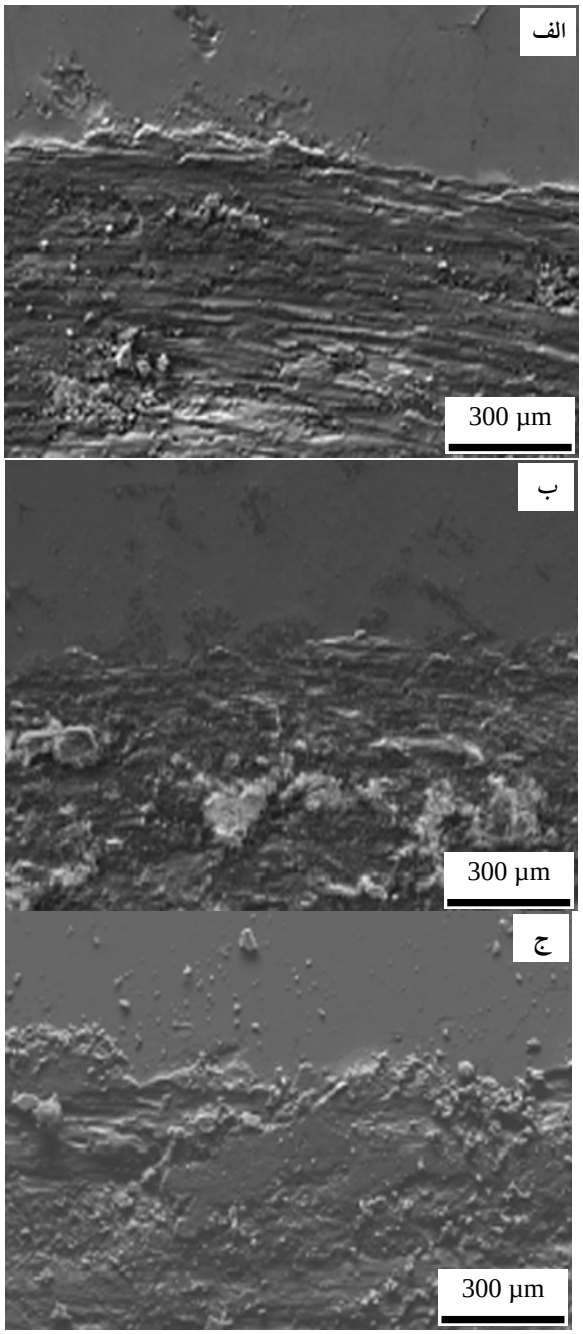
مطابق تصاویر الکترونی به دست آمده از سطوح سایش نمونه‌ها می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های به دست آمده از فاصله ۱۰mm، قطعات تولید شده توسط روش ریخته‌گری گریز از مرکز، دارای یک نرخ سایش بالاتر در مقایسه با نمونه‌های به دست آمده از فواصل ۲۰ mm می‌باشند. این موضوع این نظریه را تأیید می‌کند که مقاومت به سایش می‌تواند با افزایش میزان کسر حجمی ذرات سخت افزایش یابد [۹].



شکل ٤ تغییرات حجم سایش بر حسب فاصله از مرکز نمونه‌های استوانه‌ای تولید شده با روش ریخته‌گری گریز از مرکز

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۵ تصویر SEM سطح سایش نمونه‌های Al-15%Si ریخته‌گری شده با روش گریز از مرکز در فواصل (الف)mm ۱۰، (ب) mm ۲۰ و (ج) نمونه ریخته‌گری‌شده به صورت ثقلی

در نهایت به نظر می‌رسد توزیع نهایی کسر حجمی ذرات استحکام‌دهنده توسط نیروهای گریز از مرکز داخلی، کنترل می‌شود. جدایش اجباری ذرات سیلیکون به سمت نواحی خارجی قطعات ریخته‌گری شده به صورت گریز از مرکز موجب بهبود قابل توجه سختی سطحی و مقاومت به سایش کامپوزیت تولیدی می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

٤- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به دست آمده، روش ریخته‌گری گریز از مرکز روش خوبی جهت تولید مواد کامپوزیت با ترکیب شیمیایی متغیر می‌باشد. در طی انجام این فرایند ذرات سیلیکون در اثر نیروی گریز از مرکز به سمت لایه‌های خارجی حرکت داده می‌شوند. علاوه بر این مقادیر میکروسختی یک کاهش تقریباً خطی را با افزایش فاصله از سطح نشان دادند که تأییدکنندهٔ این موضوع می‌باشد که با استفاده از این روش می‌توان مواد کامپوزیت با سختی سطحی بالا جهت کاربردهایی که مقاومت به سایش زیاد مورد نیاز می‌باشد ، تولید کرد. نتایج به دست آمده از آزمون‌های سایش، تاییدکننده این موضوع هستند که قطعات تولید شده با روش ریخته-گری گریز از مرکز دارای مقاوت به سایش بالاتری در مقایسه با قطعات به دست آمده توسط سایر فرآیندهای تولید هستند.

٥- مراجع

1. J.R. Gomes, A.S. Miranda, D. Soares, A. E. Das, L. A. Rocha, S. J. Crnkovic,"Tribological Characterization of Al-Si/SiCp composites", Ceramic Transactions, 114. 579 – 586, 2000.
2. M.H. Korkut, "Effect of Particulate Reinforcement on Wear Behavior of Aluminum Matrix Composites", Materials Science and Technology, 20. 73-81, 2004.
3. C.G. Kang, P.K. Rohatgi, “Transient Thermal Analysis of Solidification in a Centrifugal Casting for Composite Materials Containing Particle Segregation", Metallurgical and Materials Transactions, 27B. 277-285, 1996.
4. L. Salvo, M. Suery, Y.D. Charentenay, W. Loue, "Microstructural Evolution and Rheological Behavior in the Semisolid State of a New Al-Si Based Alloy", 4th International Conference on Semisolid Processing of Alloys and Composites, England, 19-21 June 1996, 10-15.
5. T. Hirai, "Processing of Ceramics" vol. 17B, Weinheim, New York. NY, 1996, 293.
6. Y. Watanabe, R. Sato, I. Kim, S. Miura, H. Miura. "Functionally Graded Material Fabricated by Centrifugal Casting Method from ZK60A Magnesium Alloy", Materials Transactions, 46. 944-949, 2005.
7. Q. Wang, Y. X. Li, X. C. Li, "Grain Refinement of Al-7Si Alloys and the Efficiency Assessment by Recognition of Cooling Curves", Metallurgical and Materials Transactions A, 34A. 1175-1182, 2003.
8. L. Lajoye, M. Suery, S.G. Fishman, A.K. Dhingra, "Cast Reinforced Metal Composites", ASM International, Metals Park. OH, 1998, 15-20.
9. O.M. Surez, J. Yupa luna, H. E. Calderon, "Precipitation Hardening in Novel Cast Aluminum matrix Composite", American Foundry Society Trans, 111. 159-166, 2003.

www.SID.ir