



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

مقاله پژوهشی:

بررسی تاثیر ارتعاشات مکانیکی هنگام انجماد بر ریز ساختار و خواص سایشی کامپوزیت Zn-4Si

فائزه اکبری^۱، رضا تقی‌آبادی^{۲*}، مرتضی ثقفی یزدی^۲، ایمان انصاریان^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین.

۲- دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین.

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین.

* نویسنده مکاتبه کننده: تلفن: ۰۲۸-۳۳۹۰۱۱۴۳، قزوین، کد پستی: ۹۶۸۱۸-۳۴۱۴۸، Email: taghiabadi@ikiu.ac.ir

چکیده:

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۵

در این تحقیق، تاثیر ارتعاشات مکانیکی هنگام انجماد بر سه فرکانس مختلف ۲۰، ۴۰ و ۶۰ هرتز بر ریزساختار و خواص سایشی لغزشی خشک کامپوزیت Zn-۴Si بررسی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، افزودن سیلیسیم موجب شکل گیری ذرات سخت سیلیسیم اولیه (SiP) و یوتکتیک (SiE) در ریزساختار روی خالص شده و سختی آن از حدود ۳۰ برینل به حدود ۶۰ برینل افزایش می یابد. با این حال به علت توزیع غیر یکنواخت ذرات SiP در زمینه کامپوزیت، توزیع خواص (سختی) در زمینه کامپوزیت کاملاً غیر یکنواخت است. اعمال ارتعاشات مکانیکی هنگام انجماد موجب بهبود قابل توجه توزیع ذرات SiP در زمینه کامپوزیت و کاهش ابعاد ذرات و میزان تخلخل ها می شود. بر اساس نتایج آزمایش سایش پین روی دیسک، مقاومت به سایش کامپوزیت فرآوری شده تحت فرکانس ۶۰ هرتز تحت سه فشار مختلف ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ مگاپاسکال، به ترتیب حدود ۵۰، ۶۰ و ۶۵ درصد بیش از کامپوزیت ریخته‌گری است. همچنین در سایش تحت بار ۰/۷۵ مگاپاسکال، میانگین ضریب اصطکاک نمونه فرآوری شده در فرکانس ۶۰ هرتز حدود ۲۳ درصد کمتر از نمونه ریخته‌گری است. بررسی مورفولوژی سطوح سایش و ذرات سایشی نشان داد که علت بهبود خواص سایشی کامپوزیت‌های فرآوری شده، افزایش قابل ملاحظه پایداری لایه تریبولوژیکی است که احتمالاً ناشی از استحکام بخشی زیرلایه در حضور ذرات سخت سیلیسیم است.

واژه‌های کلیدی:

کامپوزیت Zn-4Si

زیست تخریب‌پذیر

ارتعاش مکانیکی

ریزساختار

سایش

ارجاع به این مقاله:

فائزه اکبری، رضا تقی‌آبادی، مرتضی ثقفی یزدی، ایمان انصاریان، بررسی تاثیر ارتعاشات مکانیکی هنگام انجماد بر ریزساختار و خواص سایشی کامپوزیت Zn-4Si، پژوهش‌نامه

ریخته‌گری، بهار و تابستان ۱۴۰۱، جلد ۶، شماره ۱، صفحات ۵۳-۶۵.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/FRJ.2023.378853.1170

۱- مقدمه

فلزات و آلیاژهای زیست تخریب‌پذیر^۱ به دلیل تجزیه‌پذیری مناسب و زیست‌سازگاری خوب در محیط بدن، از جمله بهترین مواد مورد استفاده برای تولید کاشتنی‌های^۲ موقت به شمار می آیند. این دسته از مواد پس از کاشت، به تدریج دچار خوردگی و تخریب شده و ضمن ایفای نقش موثر در بهبود کامل بافت‌های موضع مورد نظر، خروج‌شان نیازمند عمل جراحی مجدد نیست لذا هزینه‌های پزشکی و دردهای فیزیکی بیمار به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۱و۲]. مهم‌ترین آلیاژهای زیست تخریب‌پذیر، آلیاژهای بر پایه آهن و منیزیم هستند که بیشتر از

سایر فلزات و آلیاژها مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند [۱]. با این حال، طی سالیان اخیر، آلیاژهای پایه روی به دلیل نرخ خوردگی متوسط (سریع‌تر از آهن و آهسته‌تر از منیزیم)، زیست‌سازگاری خوب، عدم تولید هیدروژن در طول فرآیند تخریب و خواص فیزیکی/مکانیکی مناسب، به‌عنوان دسته جدیدی از مواد فلزی زیست تخریب‌پذیر مورد توجه محققان قرار گرفته و در ساخت تجهیزات ارتوپدی، استنت‌های سه قلبی عروقی و سایر زمینه‌های پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳-۵].

² Implants

¹ Biodegradable

روی خالص دارای ضعیف‌ترین خواص مکانیکی در بین مواد زیستی فلزی است (استحکام نهایی روی خالص ریخته‌گری شده حدود ۳۰-۲۰ مگاپاسکال، درصد ازدیاد طول آن حدود ۰/۲۵ و سختی ویکرز آن حدود ۳۷ است). بر این اساس، روی نمی‌تواند الزامات مکانیکی مورد نیاز در کاربردهای پزشکی (استحکام تسلیم بیش از ۲۰۰ مگاپاسکال، استحکام کششی نهایی بیش از ۳۰۰ مگاپاسکال و ازدیاد طول بیش از ۱۵ تا ۱۸ درصد) را برآورده کند [۴]. علاوه بر این استحکام خستگی و مقاومت خزشی نسبتاً کم، تبلور مجدد دما پایین ممکن است موجب شکست قطعات پزشکی ساخته شده از این ماده هنگام استفاده در محیط بدن شود [۴و۵]. بنابراین ضروری است خواص مکانیکی روی خالص را به طریق مناسب ارتقا بخشید. از جمله مهمترین روش‌های مورد استفاده برای ارتقای خواص مکانیکی روی خالص می‌توان به آلیاژسازی و فرآوری توسط فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید اشاره نمود.

آلیاژسازی یک فرایند ساده و نسبتاً کم هزینه است و اجرای آن غالباً نیازمند تجهیزات خاصی نیست. بر این اساس تاکنون تاثیر عناصر مختلف مانند لیتیم، منیزیم، کلسیم، مس، استرانسیم و نقره بر خواص مکانیکی روی خالص مورد بررسی قرار گرفته است [۴]. یکی دیگر از عناصر سازگار و حیاتی برای محیط بدن سیلیسیم است [۶و۷]. سیلیسیم عنصری سخت ($>100 \text{ KHN}$) با نقطه ذوب بالا (۱۴۱۴ درجه سانتیگراد) است که حضور آن می‌تواند موجب بهبود سختی و استحکام و کاهش چگالی آلیاژ شود [۸]. با این حال تحقیقات قبلی نشان داده است که به دلیل حلالیت حالت جامد بسیار محدود سیلیسیم در زمینه روی، افزودن این عنصر می‌تواند موجب شکل‌گیری ذرات سیلیسیم اولیه با ابعاد بزرگ و مورفولوژی خشن و نامطلوب در ساختار و افت قابل ملاحظه خواص مکانیکی آلیاژ شود [۹]. علاوه بر این، تشکیل ذرات درشت سیلیسیم اولیه به‌صورت تجمع‌یافته (آگلومره) در ساختار، به‌واسطه انسداد مسیرهای تغذیه بین‌ذره ای، احتمال شکل‌گیری تخلخل‌های میکروسکوپی و جواهرزنی و اشاعه ترک‌های میکروسکوپی را افزایش می‌دهد [۸و۹]. بنابراین برای بهره‌مندی مناسب از مزایای افزایش غلظت سیلیسیم در ترکیب این آلیاژها، باید ابعاد، مورفولوژی و نحوه توزیع ذرات سیلیسیم تشکیل شده در ساختار، به‌ویژه ذرات خشن اولیه، را به طریق مناسب کنترل نمود. یکی از راهکارهای موثر کنترل ابعاد، مورفولوژی و نحوه توزیع ذرات فاز ثانوی در زمینه آلیاژهای مهندسی، استفاده از ارتعاشات مکانیکی است. استفاده از ارتعاشات مکانیکی نخستین بار در سال ۱۸۶۸ و برای تولید آستنیت ریزدانه در فولادها مورد استفاده قرار گرفت اما پس از

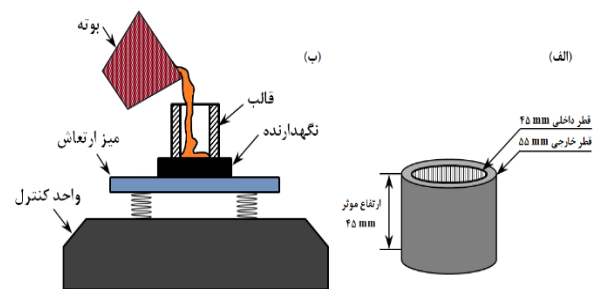
کسب نتایج موفقیت آمیز، این روش برای اصلاح ساختار آلیاژهای مختلف به ویژه آلیاژهایی که حاوی ذرات درشت اولیه در ساختار خود هستند توسعه یافت [۱۰]. دماوندی و همکاران تاثیر دمای بارریزی، ارتعاش مکانیکی (در دو فرکانس ۳۰ و ۶۰ هرتز) و گرمایش مجدد را بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ هایپرپروتکتیک A390 آلومینیم مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج حاصل از تحقیقات ایشان، استفاده از دمای بارریزی بالا و ارتعاش قالب موجب کاهش قابل توجه ابعاد ذرات سیلیسیم اولیه و بهبود توزیع این ذرات در زمینه و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی می‌شود [۱۱]. تحقیقات صفاری و همکاران وی روی تاثیر ارتعاشات مکانیکی حین انجماد روی سطح شیب‌دار بر ساختار کامپوزیت‌های $\text{Al-15Mg}_2\text{Si}$ و $\text{Al-25Mg}_2\text{Si}$ نیز حاکی از بهسازی موثر ساختار این کامپوزیت‌ها است [۱۲]. در تحقیقی دیگر دل شکسته و همکاران تاثیر دما، زمان و فرکانس ارتعاشات مکانیکی را بر ریزساختار و سختی آلیاژ نیمه جامد A380 بررسی نمودند [۱۳]. بر اساس نتایج به دست آمده، متغیر دما دارای بیشترین تاثیر بر ساختار آلیاژ است و فرکانس و زمان ارتعاش در رده‌های بعدی اثرگذاری قرار دارند. همچنین بیشترین سختی در دمای ۶۲۵ درجه سانتیگراد، فرکانس ارتعاش ۶۰ هرتز و زمان ارتعاش ۱۵ ثانیه حاصل می‌شود.

با توجه به اثربخشی قابل توجه ارتعاشات مکانیکی حین انجماد بر ابعاد، مورفولوژی و نحوه توزیع ذرات فاز ثانوی به ویژه ذرات درشت و خشن اولیه که حین انجماد آلیاژ از فاز مذاب متبلور می‌شوند، در تحقیق حاضر سعی شده است تاثیر این ارتعاشات بر ریزساختار کامپوزیت Zn-۴Si به لحاظ تاثیر بر ابعاد، مورفولوژی و نحوه توزیع ذرات سیلیسیم اولیه مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به زمینه کاربردی پیش بینی شده برای کامپوزیت مورد نظر (تولید ایمپلنت)، بررسی مقاومت به سایش آن بسیار حائز اهمیت است زیرا سایش مواد در بدن می‌تواند منجر به ایجاد عوارضی نامطلوب شود. سایش مواد باعث تولید ذرات ساینده‌ای می‌شود که می‌توانند به بافت سلولی آسیب رسانده و باعث واکنش‌های سرطان‌زا شوند. حضور این ذرات سایشی همچنین می‌تواند منجر به پوکی استخوان، التهاب و سایر واکنش‌های نامطلوب شود [۱۴و۱۵]. بنابراین، ماده ایمپلنت باید دارای خواص تریبولوژیکی مناسبی باشد که می‌تواند تولید بقایای سایش را کاهش داده و از التهاب و تحلیل استخوان جلوگیری کند. بر این اساس، هدف دوم از تحقیق حاضر، بررسی تاثیر ارتعاشات هنگام انجماد بر مقاومت به سایش لغزشی خشک کامپوزیت مورد بررسی است.

۲- روش تحقیق

برای تهیه کامپوزیت Zn-۴Si از یک بوته کاربید سیلیسیمی استفاده شد و عملیات ذوب در یک کوره مقاومتی (سه فاز AZAR-VM60L-1200 با توان خروجی ۱۴ کیلووات) انجام شد. پس از ذوب شمش‌های روی (با خلوص ۹۹/۹۹ درصد) تحت فلاکس پوششی متشکل از ۵۰ درصد وزنی کلرید روی و ۵۰ درصد وزنی کلرید آمونیم، مقادیر مورد نظر سیلیسیم خالص خرد شده (۹۹/۵ درصد) به صورت تدریجی در دمای 920 ± 5 درجه سانتیگراد به مذاب افزوده شد و به منظور تسریع در انحلال ذرات سیلیسیم، مذاب به آرامی و طی بازه زمانی ۵ دقیقه در سه مرحله به مدت ۳۰ ثانیه توسط یک میله گرافیتی هم زده شد. بعد از تکمیل عملیات ذوب و سرباره گیری، بخشی از مذاب در دمای حدود ۸۷۰ درجه سانتیگراد درون یک قالب فولادی استوانه‌ای (شکل ۱-الف) ریخته شد. دمای قالب هنگام ریخته‌گری حدود ۲۵ درجه سانتیگراد بود. ترکیب شیمیایی نمونه به دست آمده در جدول (۱) ارائه شده است.

برای بررسی تاثیر ارتعاشات مکانیکی روی ریزساختار و خواص سایشی، باقیمانده مذاب درون قالب فولادی با هندسه و ابعاد نشان داده شده در شکل ۱-الف نصب شده روی دستگاه ارتعاش دهنده مکانیکی (شکل ۱-ب) ریخته شد تا انجام کامپوزیت هم زمان با ارتعاش مکانیکی در سه فرکانس ۲۰، ۴۰ و ۶۰ هرتز صورت پذیرد. مدت زمان تکمیل انجماد (زمان ارتعاش) حدود ۱۵ ثانیه بود.



شکل ۱- تصویر طرحواره (الف) قالب فولادی استوانه‌ای و (ب) دستگاه ارتعاش‌دهنده مکانیکی.

سختی برینل نمونه‌ها توسط دستگاه سختی سنج Koopa UV1 تحت بار پنج کیلوگرم با استفاده از یک ساچمه فولادی با قطر ۲/۵ میلی‌متر اندازه‌گیری و میانگین شش اندازه‌گیری به‌عنوان مقدار نهایی گزارش شد. دستگاه پین روی دیسک (TR-20 DUCOM) برای آزمایش سایش لغزشی خشک مطابق با استاندارد ASTM G 99-90 استفاده شد. آزمایش سایش سه تنش اعمالی ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ مگاپاسکال، با سرعت لغزش ثابت ۰/۱۳ متر بر ثانیه برای فاصله لغزشی ۱۰۰۰ متر در دمای محیط انجام شد. پین‌های استوانه‌ای به ارتفاع ۱۵ میلی‌متر و قطر ۵ میلی‌متر به وسیله برش با سیم (وایرکات) از قطعات ریختگی تهیه شدند. دیسک سایشی از جنس فولاد AISI 52100 سخت شده با سختی 60 ± 2 را کول سی ساخته شد. آزمایش‌ها سه بار در شرایط یکسان تکرار شدند.

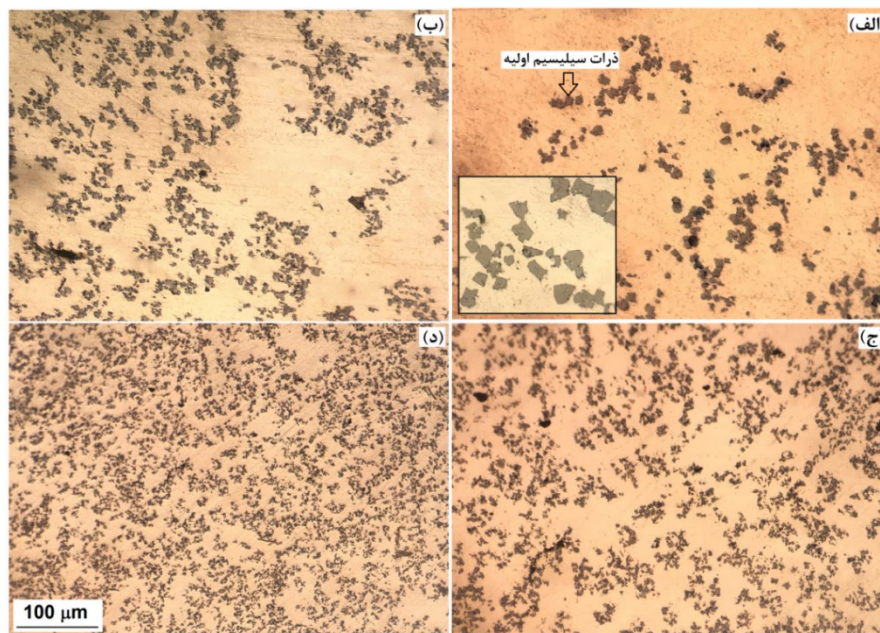
برای بررسی‌های متالوگرافی، پس از آماده‌سازی سطح شامل سنباده‌زنی و صیقل کاری با خمیر الماس ۰/۵ میکرومتر، عملیات حکاکی توسط محلول نایتال ۴۴ درصد حجمی انجام شد. برای بررسی ریزساختار از یک میکروسکپ نوری و برای بررسی مورفولوژی سطح سایش و ذرات سایشی و همچنین آنالیز عنصری رسوبات، از یک دستگاه میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به سیستم آنالیز عنصری (EDS) استفاده شد. برای تعیین و بررسی مشخصات هندسی ذرات سیلیسیم و اندازه دانه از نرم افزار آنالیز تصویری UTHSCSA image tool ورژن ۱/۲۸ استفاده شد. همچنین اندازه موثر دانه‌ها (d_{eff}) توسط معادله (۱) تعیین گردید:

$$d_{eff} = f_{Col} \times d_{Col} + f_{Eq} \times d_{Eq} \quad (1)$$

که در آن f_{Eq} و f_{Col} به ترتیب کسر حجمی دانه‌های با مورفولوژی ستونی و هم محور و d_{Eq} و d_{Col} به ترتیب اندازه دانه‌های ستونی ((طول دانه ستونی + قطر دانه ستونی) $\times 0/5$) و هم محور است [۱۶].

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژهای مورد استفاده در تحقیق حاضر (درصد وزنی)

ماده	Zn	Pb	Cd	Cu	Fe	Al	Sn	Si	سایر ناخالصی‌ها
روی خالص	۹۹/۹۹	max ۰/۰۰۵	max ۰/۰۰۳	max ۰/۰۰۵	max ۰/۰۰۳	max ۰/۰۰۲	max ۰/۰۰۱	--	--
آلیاژ Zn-4Si	۹۶/۱۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۳/۸۳	۰/۰۱



شکل ۲- تصاویر میکروسکپ نوری از ریزساختار ریختگی کامپوزیت Zn-۴Si:

(الف) قبل از فرآوری ارتعاشی مذاب (در دو بزرگنمایی مختلف) و بعد از فرآوری ارتعاشی مذاب در فرکانس‌های مختلف (ب) ۲۰ Hz، (ج) ۴۰ Hz و (د) ۶۰ Hz

ادامه با کاهش دما، به دلیل مصرف اتم‌های سیلیسیم، غلظت مذاب به تدریج کاهش یافته و پس از رسیدن به حدود ۰/۰۴۵ درصد وزنی سیلیسیم، انجماد با واکنش یوتکتیک می‌یابد. بنابراین ریز ساختار ریختگی کامپوزیت Zn-۴Si (شکل ۲- الف) شامل ذرات سیلیسیم اولیه (ذرات چندوجهی تیره رنگ) با آنالیز شیمیایی ارائه شده در شکل (۴) در زمینه یوتکتیک α -Zn/Si_E است. با توجه به تصاویر میکروسکوپی، در شرایط ریختگی، ذرات سیلیسیم اولیه با توجه به بالا بودن دمای شکل-گیری و نفوذ آسان، به صورت ذرات درشت چندوجهی دارای گوشه‌های تیز و به صورت کاملاً غیر یکنواخت (تجمع یافته) در زمینه کامپوزیت توزیع شده‌اند. با این حال، اعمال ارتعاشات مکانیکی به مذاب هنگام انجماد کامپوزیت، موجب کاهش قابل توجه ابعاد ذرات سیلیسیم اولیه و بهبود شرایط توزیع آنها در زمینه می‌شود.

درصد تخلخل نمونه‌ها از طریق تعیین چگالی (به روش غوطه‌وری در سیال ارشمیدس^۱) محاسبه شد. در این روش پس از تعیین جرم نمونه در هوا و آب مقطر توسط یک ترازوی دیجیتالی با دقت 10^{-4} gr، با بهره‌گیری از رابطه (۲) چگالی واقعی نمونه تعیین شد:

$$\rho_r = \frac{m}{m - m_w} \times \rho_w \quad (2)$$

در این رابطه m جرم نمونه، m_w جرم نمونه در آب، ρ_r چگالی واقعی نمونه و ρ_w چگالی آب مقطر است. سپس برای تعیین درصد تخلخل نمونه‌ها از رابطه (۳) استفاده شد:

$$\%P = \frac{\rho_{th} - \rho_r}{\rho_{th}} \quad (3)$$

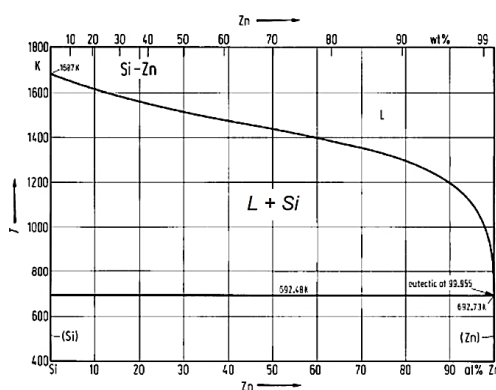
که در آن ρ_r چگالی واقعی و ρ_{th} چگالی تئوری نمونه‌ها است که با بهره‌گیری از آنالیز شیمیایی آلیاژ و چگالی دقیق عناصر مختلف تعیین شد [۱۷].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی تاثیر ارتعاشات مکانیکی بر مشخصات ریزساختاری

کامپوزیت Zn-۴Si

ریزساختار ریختگی کامپوزیت Zn-۴Si قبل و پس از فرآوری ارتعاشی در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به نمودار فازي دو تایی Zn-Si (شکل ۳) انجماد کامپوزیت با جوانه‌زنی ذرات سیلیسیم اولیه در ناحیه دو فازي L+Si_P آغاز می‌شود. در



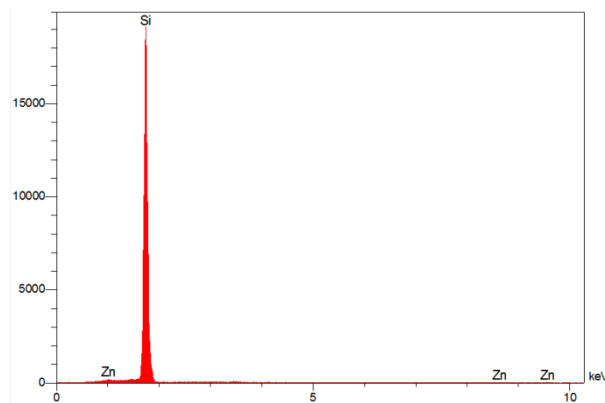
شکل ۳- نمودار فازي دو تایی Si-Zn [۱۸].

¹ Archimedes

خردایش این ذرات در اثر ارتعاشات وارده بسیار سخت و دور از ذهن است. بنابراین در توافق با نتایج تحقیقات قبلی، کاهش موثر ابعاد ذرات سیلیسیم اولیه در کامپوزیت مورد بررسی را می‌توان به بهبود شرایط انتقال جرم و حرارت درون مذاب (قالب) و در نتیجه افزایش سرعت سرد شدن مذاب نسبت داد که موجب می‌شود تعداد قابل توجهی از ذرات سیلیسیم روی سطح مذاب و دیواره‌های قالب جوانه زده و در اثر نیروهای جابجایی ناشی از ارتعاش [۲۱] به درون مذاب هدایت و توزیع شوند. علاوه بر این به نظر می‌رسد که تغییر حالت جریان از آرام به مخلوط (حالتی بین جریان آرام و جریان آشفته) و اعمال تنش‌های خمشی نیز می‌توانند به بهبود شرایط توزیع ذرات سیلیسیم در زمینه کمک شایانی نمایند.

شکل (۵) اثر ارتعاشات مکانیکی حین انجماد بر اندازه دانه موثر (اندازه موثر سلول‌های دندریتی فاز α -Zn) کامپوزیت مورد بررسی را نشان می‌دهد. اعمال ارتعاشات مکانیکی سبب توسعه دانه‌های با مورفولوژی هم‌محور و کاهش اندازه میانگین دانه‌ها می‌شود به گونه‌ای که پس از اعمال ارتعاش با فرکانس ۲۰، ۴۰ و ۶۰ هرتز، اندازه دانه موثر کامپوزیت در مقایسه با حالت بدون ارتعاش به ترتیب حدود ۵۰، ۶۸ و ۷۶ درصد کاهش یافته است. فرایند انجماد آلیاژ هایپریوتکتیک Zn-۴Si با جوانه‌زنی ذرات سیلیسیم اولیه آغاز شده و با انجماد یوتکتیک خاتمه می‌یابد. هنگام رشد ذرات سیلیسیم اولیه به دلیل مصرف اتم‌های سیلیسیم مذاب، لایه‌ای فقیر از سیلیسیم در فصل مشترک‌شان تشکیل شده و بسته به غلظت عنصر محلول و سرعت انجماد، شرایط برای شکل‌گیری فاز آلفا (α -Zn) به صورت گلبول‌های منفرد یا دندریت‌های آلفا موسوم به سلول‌های دندریتی ترغیب می‌شود [۱۱].

تشکیل دندریت‌ها/گلبول‌های فاز آلفا در ساختار آلیاژهای هایپریوتکتیک توسط محققان مختلف گزارش شده است که از جمله می‌توان به آلیاژهای هایپریوتکتیک Al-Si [۲۲ و ۲۳] و آلیاژ هایپریوتکتیک Al-Fe-Zr [۲۴] اشاره نمود. بر اساس نتایج تحقیقات کریتا و همکاران [۲۵] و کودریاوشوا و همکاران [۲۶] ارتعاش مکانیکی مذاب هنگام انجماد به دلیل افزایش تماس بین مذاب و قالب و در نتیجه افزایش انتقال حرارت (با مکانیزم جابجایی) و همچنین تشدید تلاطم سطحی، موجب افزایش سرعت انجماد و ترغیب انجماد غیرتعدادی آلیاژ شده و احتمال شکل‌گیری دانه‌های فاز آلفا به صورت منفرد یا دندریتی در زمینه آلیاژ هایپریوتکتیک را افزایش می‌دهد. اندازه این دانه‌ها (سلول‌ها) متأثر از سرعت انجماد است و با افزایش بسامد ارتعاش،



شکل ۴- آنالیز شیمیایی EDS ذره سیلیسیم اولیه نشان داده شده در شکل (۲-ب).

تصاویر میکروسکوپی نشان‌دهنده تاثیر ارتعاشات مکانیکی در سه فرکانس ۲۰، ۴۰ و ۶۰ هرتز بر ریزساختار کامپوزیت Zn-۴Si به ترتیب در شکل‌های (۲-ب) تا (۲-د) ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل از بررسی‌های آنالیز تصویری (جدول ۲)، اعمال ارتعاشات مکانیکی با فرکانس ۲۰، ۴۰ و ۶۰ هرتز ضمن کاهش ۴۳، ۶۵ و ۷۶ درصدی اندازه متوسط ذرات سیلیسیم اولیه، موجب افزایش ۶، ۳۱ و ۶۰ درصدی تعداد ذرات در واحد سطح شده است.

با توجه به نتایج تحقیقات گذشته، دلایل مختلفی برای توجیه تاثیر مثبت ارتعاشات حین انجماد در بهسازی ساختار آلیاژهای مهندسی ارائه شده است که از جمله مهمترین آن‌ها می‌توان به خردایش و شکسته شدن فازهای در حال رشد در اثر نیروهای برشی (تنش خمشی) وارده از جانب مذاب، بهبود شرایط انتقال جرم درون مذاب، بهبود شرایط انتقال حرارت درون مذاب و انتقال حرارت از مذاب به دیواره قالب (افزایش سرعت سرد شدن مذاب)، کاهش دمای مذاب، تغییر حالت جریان مذاب از آرام به آشفته و شکل‌گیری و فروپاشی حباب‌های کاویتاسیونی^۱ درون مذاب اشاره نمود. لازم به ذکر است که وقوع کاویتاسیون ضمن شکستن و خردایش ذرات فاز دوم درون مذاب (در اثر برخورد مستقیم حباب‌ها با ذرات یا فشار ناشی از فروپاشی حباب‌ها)، با ایجاد مراکز موضعی دارای تحت تبرید^۲ (فشاری) قابل توجه درون مذاب (با توجه به قانون کلازیوس-کلاپیرون^۳) [۱۱ و ۱۳ و ۱۹-۲۱]، موجب کاهش ابعاد اجزای ساختاری می‌شود.

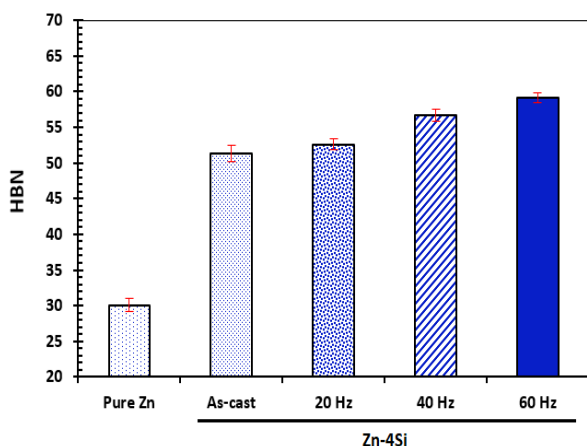
با این حال، به نظر می‌رسد که اثربخشی برخی از مکانیزم‌های فوق در تحقیق حاضر، بسیار کم یا وقوع‌شان نامحتمل است. به عنوان مثال، با توجه به پایین بودن فرکانس ارتعاشات، شکل‌گیری و فروپاشی حباب‌های کاویتاسیونی عملاً غیر ممکن است. همچنین با توجه به سختی بالا و صلب بودن ذرات سیلیسیم،

³ Clausius Clapeyron

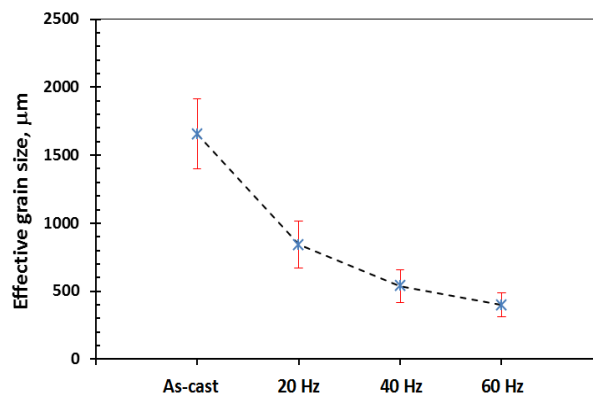
¹ Cavitation bubbles

² Undercooling

است که علت آن حضور ذرات سخت سیلیسیم [۹] در زمینه نرم روی است. در توافق با نتایج تحقیقات قبلی روی آلیاژهای هایپریوتکتیک Al-Si و کامپوزیت Al-Mg₂Si [۱۱ و ۱۲]، اعمال ارتعاشات مکانیکی با فرکانس ۲۰، ۴۰ و ۶۰ هرتز به ترتیب موجب افزایش ۷۵، ۹۰ و ۹۷ درصدی سختی برینل کامپوزیت ریختگی شده است. با توجه به ثابت بودن درصد وزنی سیلیسیم در نمونه‌های مورد بررسی، بهبود مشاهده شده در سختی کامپوزیت‌های متأثر از ارتعاشات مکانیکی حین انجماد را عمدتاً می‌توان به استحکام بخشی مرزدانه‌ای در اثر کاهش اندازه موثر دانه‌ها (شکل ۵) و در نتیجه افزایش چگالی مرزهای دانه به عنوان موانع موثر در برابر لغزش نابجایی‌ها، پراکندسختی زمینه به واسطه کاهش ابعاد و توزیع یکنواخت‌تر ذرات سیلیسیم اولیه در زمینه کامپوزیت (افزایش کسر سطحی و تعداد ذرات در واحد سطح، مطابق شکل (۲) و جدول (۲)) و حذف عیوب متالورژیکی (تخلخل‌های انقباضی) که عمدتاً در فضای مابین مناطق تجمع ذرات سیلیسیم اولیه در زمینه کامپوزیت ریختگی دیده می‌شوند، نسبت داد.



شکل ۶- تغییرات سختی نمونه‌های کامپوزیتی Zn-۴Si در شرایط ریختگی و فراوری ارتعاشی شده در فرکانس‌های مختلف.



شکل ۵- تاثیر فرکانس ارتعاشات مکانیکی بر اندازه دانه موثر کامپوزیت Zn-۴Si

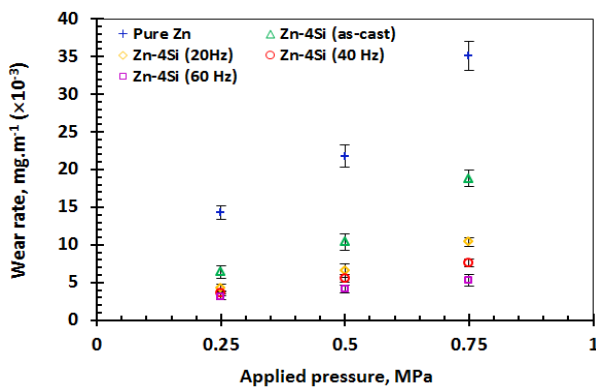
احتمالا به دلیل تاثیر هم زمان افزایش سرعت انجماد و افزایش نیروهای برشی ناشی از ارتعاش [۲۶ و ۲۷]، کاهش می‌یابد. اثر ارتعاش مکانیکی بر کاهش اندازه دانه آلیاژها قبلا توسط محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیقات چن^۱ و همکاران [۲۸] نشان دادند که افزایش فرکانس ارتعاشات مکانیکی حین انجماد از ۳۵ به ۱۰۰ هرتز موجب کاهش ۳۶ درصدی اندازه متوسط دانه‌ها در آلیاژ AZ91 منیزیم شده است. تحقیقات ژیانگ و همکاران نیز موید تاثیر مثبت ارتعاش مکانیکی حین انجماد در کاهش اندازه دانه در آلیاژ A356 آلومینیم است. بر اساس نتایج حاصل از تحقیقات ایشان، اعمال ارتعاشات مکانیکی با فرکانس ۱۰۰ هرتز موجب کاهش ۳۷ درصدی اندازه دانه (از حدود ۳۲۵ به حدود ۲۰۵ میکرومتر) می‌شود [۲۹].

۳-۲- بررسی تاثیر ارتعاشات مکانیکی حین انجماد بر سختی و خواص سایشی کامپوزیت Zn-۴Si

نمودار تغییرات سختی برینل کامپوزیت Zn-۴Si قبل (حالت ریختگی) و پس از اعمال ارتعاشات مکانیکی در شکل (۶) نشان داده شده است. برای انجام مقایسه، سختی روی خالص نیز در نمودار ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، سختی کامپوزیت ریختگی حدود ۷۰ درصد بیش از سختی روی خالص

جدول ۲- نتایج آنالیز تصویری ریزساختار کامپوزیت Zn-۴Si قبل و پس از اعمال ارتعاشات مکانیکی حین انجماد

نمونه	اندازه متوسط ذرات Sip (میکرومتر)	محیط ذرات Sip (میکرومتر)	مساحت ذرات Sip (میکرومتر مربع)	تعداد ذرات Sip در واحد سطح (میلیمتر مربع)
کامپوزیت ریختگی	۷/۴±۲/۴	۲۲/۸	۴۴/۳	۰/۰۸×۱۰ ^۶
ارتعاش با فرکانس ۲۰ هرتز	۴/۲±۱/۷	۱۰/۷	۱۳/۷	۰/۵۸×۱۰ ^۶
ارتعاش با فرکانس ۴۰ هرتز	۲/۶±۰/۹	۸/۳	۶/۶	۲/۵۵×۱۰ ^۶
ارتعاش با فرکانس ۶۰ هرتز	۱/۸±۰/۵	۵/۴	۲/۳	۴/۸۶×۱۰ ^۶



شکل ۷- نمودار تاثیر فشار اعمالی و فرکانس ارتعاشات مکانیکی حین انجماد بر نرخ سایش کامپوزیت Zn-۴Si

برای بررسی دقیق‌تر اثر ارتعاشات مکانیکی حین انجماد بر رفتار سایشی و تبیین مکانیزم‌های سایش مربوطه، سطوح سایش و ذرات سایشی تولید شده هنگام آزمایش، توسط میکروسکپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفتند. تصاویر میکروسکوپی سطح سایش کامپوزیت ریختگی Zn-۴Si پس از ۱۰۰۰ متر سایش تحت دو فشار اعمالی ۰/۲۵ و ۰/۷۵ مگاپاسکال در شکل (۸) ارائه شده است. همچنین آنالیز EDS نواحی مختلف سطح سایش این نمونه‌ها در جدول (۳) ارائه شده است.

با توجه به شکل (۸) و آنالیزهای ارائه شده در جدول (۳)، سطح سایش کامپوزیت ریختگی توسط یک لایه تریبولوژیکی^۱ غنی از اکسیژن (اکسید) پوشیده شده است که ورقه‌ای شدن^۲ قابل توجهی را (به خصوص در فشار اعمالی ۰/۷۵ مگاپاسکال) به عنوان مکانیزم سایش غالب تجربه کرده است. لایه تریبولوژیکی لایه‌ای است که در اثر اختلاط شیمیایی/مکانیکی و فشرده شدن ذرات ناشی از سایش سطوح در تماس لغزشی با یکدیگر روی سطح سایش تشکیل می‌شود [۳۳ و ۳۴]. با توجه به ماهیت سرامیکی لایه تریبولوژیکی و متخلخل بودن آن، انتظار می‌رود تشکیل این لایه به واسطه کاهش احتمال تماس مستقیم و وقوع جوش سرد بین دندانه‌های ۳ سطوح در حال اندرکنش لغزشی، اصطکاک و چسبندگی بین سطوح به میزان قابل توجهی کاهش یابد [۳۵]. با این وجود، با توجه به مشابهت ترکیب شیمیایی نقاط A و B (داخل ناحیه سایش ورقه‌ای) و نقاط C و D (خارج از ناحیه سایش ورقه‌ای) شکل (۸-الف و ب)، به نظر می‌رسد که ترک‌های ناشی از سایش ورقه‌ای از درون لایه تریبولوژیکی انتشار یافته‌اند لذا می‌توان گفت که علی‌رغم شدت قابل توجه سایش به ویژه در فشار ۰/۷۵ مگاپاسکال، برداشت ماده منحصر به لایه تریبولوژیکی بوده است.

با توجه به بررسی‌های انجام شده، درصد تخلخل در نمونه‌های تحت ارتعاش ۲۰، ۴۰ و ۶۰ هرتز به ترتیب حدود ۰/۷۲، ۰/۸۴ و ۰/۶۵ درصد است که بیانگر کاهش به ترتیب ۲۲، ۳۳ و ۴۰ درصدی نسبت به میزان تخلخل در کامپوزیت ریختگی است. با توجه به بررسی‌های میکروسکوپی، تخلخل‌های موجود در ساختار کامپوزیت‌های مورد بررسی غالباً از نوع تخلخل‌های انقباضی است که بین ذرات سیلیسیم اولیه و به دلیل انسداد مسیرهای تغذیه بین ذرات تشکیل می‌شوند. پس از اعمال ارتعاش به مذاب، به نظر می‌رسد که به دلیل توزیع بهتر ذرات و بهبود شرایط تغذیه مذاب، کسر قابل توجهی از تخلخل‌ها حذف می‌شوند. تشکیل تخلخل‌های انقباضی مابین ذرات سیلیسیم اولیه قبلاً توسط یوسفی و همکاران نیز گزارش شده است [۹]. همچنین گزارش‌هایی مبنی بر تاثیر مثبت ارتعاشات مکانیکی حین انجماد در کاهش میزان تخلخل‌های انقباضی وجود دارد [۳۰ و ۳۱].

تأثیر ارتعاشات مکانیکی حین انجماد بر رفتار سایش لغزشی خشک کامپوزیت مورد بررسی تحت فشارهای مختلف اعمال شده در شکل (۷) نشان داده شده است. مجدداً برای مقایسه، نمودار تغییرات نرخ سایش روی خالص و کامپوزیت ریختگی (بدون ارتعاش) Zn-۴Si بر حسب فشار اعمالی نیز در نمودار ارائه شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، افزودن سیلیسیم و تشکیل کامپوزیت موجب ارتقای قابل توجه خواص سایشی روی خالص می‌شود که این افزایش را می‌توان به افزایش سختی زمینه در اثر شکل‌گیری ذرات سخت سیلیسیم اولیه و سیلیسیم یوتکتیک نسبت داد. حضور این ذرات علاوه بر افزایش سختی شکل (۶) و توانایی تحمل بار سطح لغزش، موجب کاهش چسبندگی بین سطح نمونه و جسم مقابل فولادی و کاهش میزان تغییر شکل پلاستیک لایه‌های زیر سطحی طی فرایند لغزش می‌شود [۳۲ و ۳۸]. اعمال ارتعاشات مکانیکی موجب ارتقای قابل توجه خواص سایشی کامپوزیت شده است به گونه‌ای که تحت دو فشار ۰/۲۵ و ۰/۷۵ مگاپاسکال، نرخ سایش کامپوزیت فرآوری شده تحت فرکانس ۲۰ هرتز به ترتیب حدود ۳۳ و ۴۱ درصد کمتر از نرخ سایش کامپوزیت ریختگی است. همچنین افزایش فرکانس ارتعاش تا ۶۰ هرتز موجب بهبود مجدد مقاومت به سایش کامپوزیت شده است به گونه‌ای که تحت دو فشار ۰/۲۵ و ۰/۷۵ مگاپاسکال، نرخ سایش کامپوزیت به ترتیب حدود ۵۱ و ۶۶ درصد کمتر می‌شود.

³ Asperities

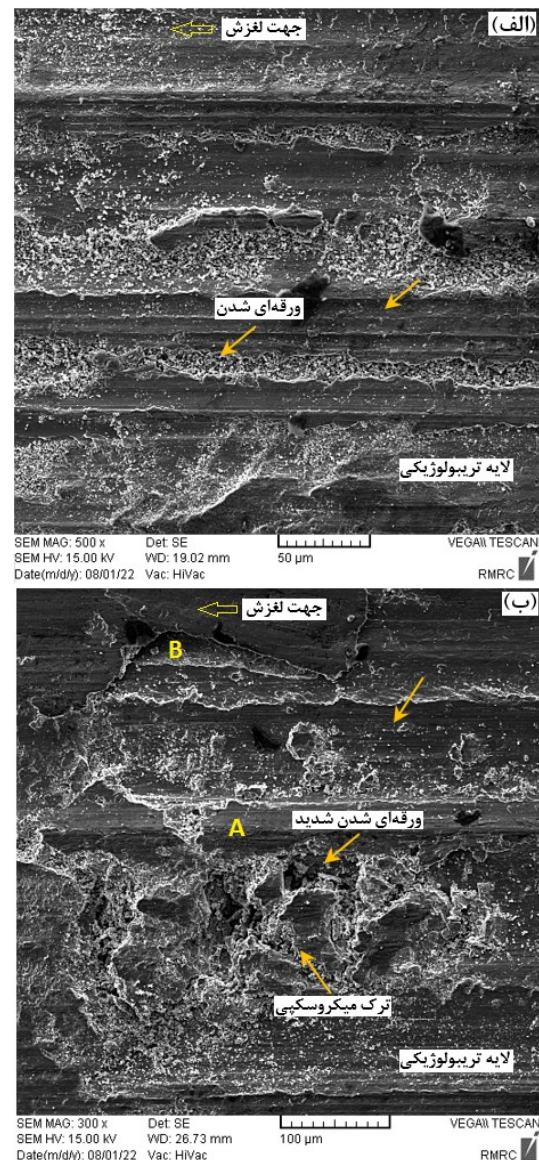
¹ Tribolayer

² Delamination

دیسک فولادی، به صورت اجسام خارجی موجب بروز سایش خراشان سه جسمه و شکل‌گیری خراش‌های نسبتاً وسیع در راستای جهت لغزش روی سطح سایش آن شده‌اند، شکل (۸-ب). به نظر می‌رسد بالا بودن غلظت آهن در آنالیز موقعیت A روی لایه تریبولوژیکی نمونه ریختگی متأثر از تشدید سایش سطح دیسک فولادی باشد، (جدول ۳).

تصویر میکروسکپی نواحی زیر سطح سایش کامپوزیت ریختگی در شکل (۱۰-الف) ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، هنگام سایش و در اثر کرنش‌های برشی وارده (ناشی از اصطکاک)، لایه‌های زیر سطحی در راستای لغزش تغییر شکل پلاستیک و سیلان قابل توجهی را تجربه می‌نمایند (عمق تغییر شکل زیر سطحی حدود ۲۵ میکرومتر). حضور ذرات درشت سیلیسیم به عنوان ذرات سخت (فاز ثانوی) قطعاً تأثیری مثبت در کاهش سیلان زیرلایه و افزایش توانایی آن در حمایت از لایه تریبولوژیکی روی سطح دارند اما ابعاد، مورفولوژی و به ویژه نحوه توزیع این ذرات در زمینه در کسب بهترین اثربخشی‌شان حائز اهمیت است. با توجه به شکل (۱۰-الف)، توزیع غیر یکنواخت ذرات سیلیسیم در کامپوزیت ریختگی و تشکیل عیوبی مانند تخلخل در مجاورت ذرات آگلومره شده موجب کاهش کسر حجمی این ذرات در نواحی نزدیک سطح و کاهش اثر بخشی آن‌ها در استحکام بخشی این نواحی و کاهش تغییر شکل لایه‌های زیر سطحی به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. این مشاهدات در تطابق با نتایج تحقیقات محرمی و همکاران [۳۶] است که نشان دادند کاهش ابعاد و بهبود توزیع ذرات فاز ثانوی، موجب ارتقای قابل توجه خواص سایشی کامپوزیت در جای $Al-Mg_2Si$ می‌شود. بنابراین دو مکانیزم اصلی سایش در نمونه کامپوزیت ریختگی را می‌توان سایش ورقه‌ای و سایش خراشان لایه تریبولوژیکی عنوان نمود. تصویر سطح سایش دو نمونه کامپوزیتی بهسازی شده (تحت فرکانس ۶۰ هرتز) پس از سایش لغزشی تحت فشار اعمالی ۰/۷۵ مگاپاسکال در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، بر خلاف نمونه ریختگی شکل (۸)، سطح سایش این نمونه‌ها توسط یک لایه تریبولوژیکی پایدار و فشرده (با آنالیز شیمیایی ارائه شده در جدول (۳)) دارای کندگی‌های^۱ کم وسعت و شیارهایی کم عمق و ضعیف در جهت لغزش پوشیده شده است. همچنین می‌توان مشاهده نمود که افزایش فرکانس ارتعاش موجب افزایش قابل توجه پایداری لایه تریبولوژیکی شکل گرفته روی سطح کامپوزیت شده است. ابعاد و مورفولوژی بقایای ناشی از سایش نمونه آزمایش شده تحت



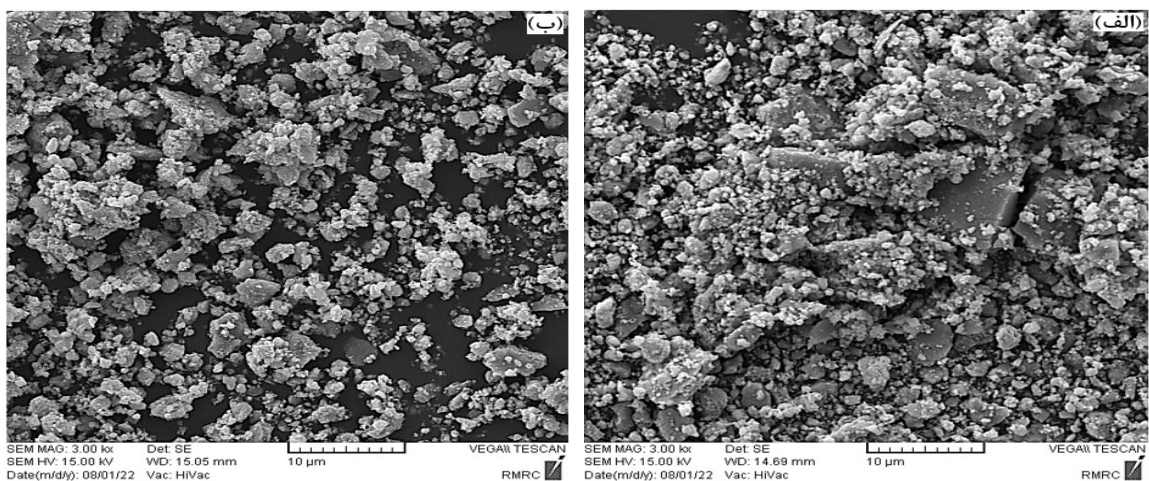
شکل ۸ تصاویر SEM سطح سایش کامپوزیت Zn-4Si ریختگی پس از سایش تحت دو فشار اعمالی (الف) ۰/۲۵ و (ب) ۰/۷۵ مگاپاسکال.

جدول ۳- آنالیز عنصری EDS نواحی مشخص شده روی شکل‌های (۸) و (۱۱) (درصد وزنی)

موقعیت آنالیز	اکسیژن	روی	سیلیسیم	آهن
A	۱۶/۳۲	۷۷/۸۶	۴/۵۶	۱/۲۶
B	۵/۷۱	۷۹/۴۹	۱۴/۸۰	-
C	۲۶/۰۷	۵۴/۸۱	۱۹/۱۲	-
D	۳۰/۵۳	۶۰/۱۹	۹/۲۸	-

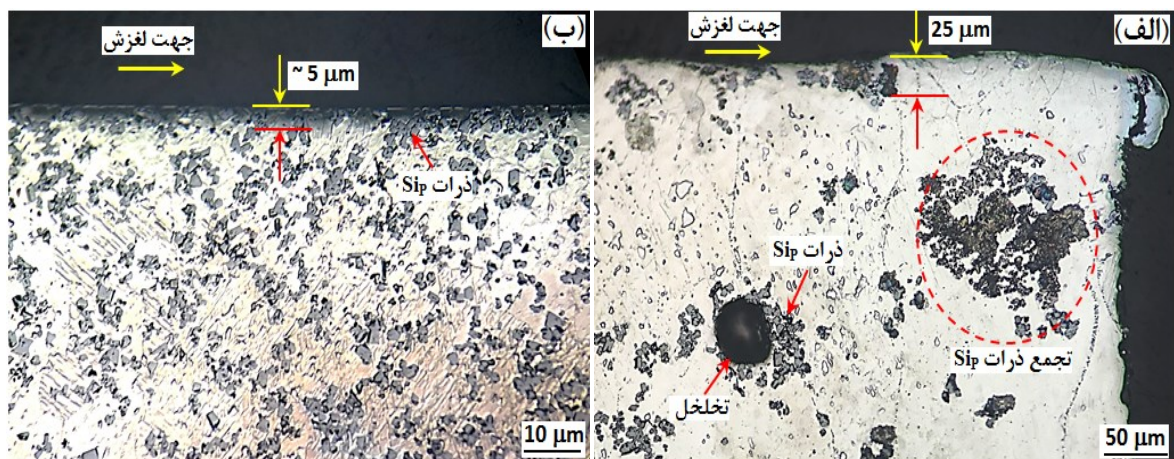
بررسی ابعاد و مورفولوژی ذرات سایشی تولید شده حین سایش این نمونه شکل (۹-الف) نیز حاکی از سایش ورقه‌ای شدید لایه تریبولوژیکی شکل گرفته روی سطح آن است. ذرات سایشی نسبتاً بزرگ و غالباً ورقه‌ای شکل تولید شده طی سایش این نمونه، پس از تشکیل و هنگام خروج از فضای مابین نمونه و

^۱Craters



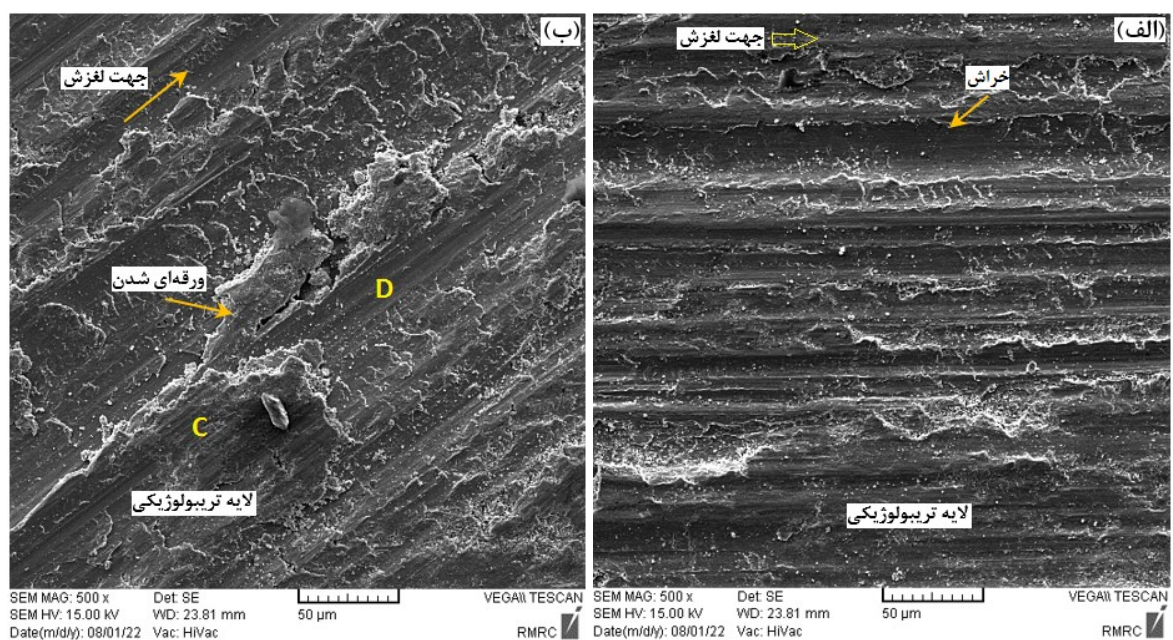
شکل ۹- تصاویر SEM ذرات ناشی از سایش کامپوزیت Zn-۴Si پس از سایش تحت فشار اعمالی ۰/۷۵ مگاپاسکال:

(الف) کامپوزیت ریخته‌گری و (ب) کامپوزیت فرآوری شده تحت فرکانس ۶۰ هرتز.



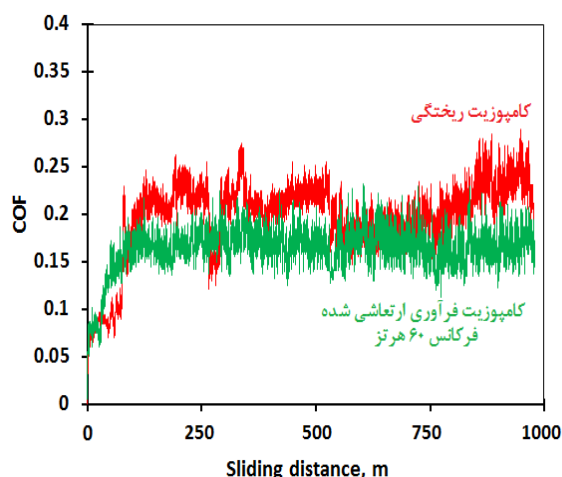
شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپی نواحی زیر سطح سایش کامپوزیت Zn-۴Si پس از سایش تحت فشار اعمالی ۰/۷۵ مگاپاسکال:

(الف) کامپوزیت ریخته‌گری و (ب) کامپوزیت فرآوری شده تحت فرکانس ۶۰ هرتز.



شکل ۱۱ تصاویر SEM سطح سایش کامپوزیت Zn-۴Si پس از فرآوری ارتعاشی در فرکانس ۶۰ هرتز پس از سایش تحت دو فشار اعمالی ۰/۷۵ و ۰/۷۵ مگاپاسکال.

لایه تریبولوژیکی در نمونه فرآوری شده و محدود شدن شدید تماس فلز-فلز در زوج سایشی مربوطه، جزء چسبان ضریب اصطکاک به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. افزایش پایداری لایه تریبولوژیکی و در نتیجه کاهش میزان و ابعاد ذرات سایشی در گیر بین سطوح در حال لغزش، موجب کاهش سایش خراشان سه‌جسمه و افت جزء تغییر شکل پلاستیک ضریب اصطکاک می‌شود.



شکل ۱۲ تغییرات ضریب اصطکاک کامپوزیت Zn-4Si ریختگی و فرآوری شده تحت فرکانس ۶۰ Hz (فشار اعمالی ۰/۷۵ مگاپاسکال).

نتیجه‌گیری

۱. سختی کامپوزیت ریختگی حدود ۷۰ درصد بیش از سختی روی خالص است. اعمال ارتعاش هنگام انجماد نمونه‌های کامپوزیتی موجب کاهش اندازه دانه، کاهش ابعاد، بهبود مورفولوژی و بهبود توزیع ذرات سیلیسیم اولیه در زمینه کامپوزیت می‌شود. بر اساس نتایج آنالیز تصویری، اعمال ارتعاشات مکانیکی با فرکانس ۶۰ هرتز ضمن کاهش ۷۶ درصدی اندازه متوسط ذرات سیلیسیم اولیه، موجب افزایش ۶۰ درصدی تعداد ذرات در واحد سطح شده است.
۲. اعمال ارتعاشات مکانیکی با فرکانس ۶۰ هرتز موجب افزایش ۱۵ درصدی سختی کامپوزیت ریختگی می‌شود. با توجه به ثابت بودن درصد وزنی سیلیسیم در نمونه‌های مورد بررسی، بهبود مشاهده شده در سختی کامپوزیت‌های متاثر از ارتعاشات مکانیکی حین انجماد را عمدتاً می‌توان به کاهش ابعاد و توزیع یکنواخت‌تر ذرات سیلیسیم اولیه در زمینه کامپوزیت و کاهش قابل توجه تخلخل‌های انقباضی در زمینه کامپوزیت ریختگی نسبت داد.
۳. افزودن سیلیسیم و تشکیل کامپوزیت علاوه بر افزایش سختی و توانایی تحمل بار سطح لغزش، موجب کاهش چسبندگی

فشار اعمالی ۰/۷۵ مگاپاسکال نیز در شکل (۹-ب) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در تایید نتایج سایش شکل (۷) و مورفولوژی سطح سایش شکل (۱۱)، ذرات سایشی شکل گرفته از این دو نمونه عمدتاً از ورقه‌های کوچک^۱ و ذرات ریز هم محور تشکیل شده‌اند. بنابراین، ورقه‌ای شدن خفیف و سایش خراشان سبک لایه تریبولوژیکی را می‌توان به عنوان مکانیزم‌های سایش غالب کامپوزیت‌های بهسازی شده به ویژه نمونه ۶۰ هرتز در نظر گرفت.

بررسی ساختار ناحیه زیر سطح سایش نمونه ۶۰ هرتز شکل (۱۰-ب) حاکی از آن است که در اثر اعمال ارتعاش هنگام انجماد کامپوزیت و به دلیل کاهش ابعاد و بهبود شرایط توزیع ذرات سیلیسیم اولیه در زمینه کامپوزیت، عمق و شدت تغییر شکل لایه تغییر شکل پلاستیک یافته زیر سطح به میزان قابل توجهی کاهش یافته است (حدود ۸۰ درصد). با توجه به آنکه زیرلایه وظیفه حمایت از لایه تریبولوژیکی شکل گرفته روی سطح را بر عهده دارد، افزایش استحکام و دوام زیرلایه موجب ارتقای پایداری و عملکرد لایه تریبولوژیکی روی سطح سایش می‌شود. همانگونه که قبلاً عنوان شد، در حضور این لایه ضمن کاهش احتمال تماس مستقیم و بروز چسبندگی بین سطوح فلزی کامپوزیتی و جسم مقابل، میزان تنش‌های برشی بین سطوح به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد زیرا لایه تریبولوژیکی یک لایه با ماهیت سرامیکی و متخلخل است که در صورت واقع شدن در معرض کرنش‌های مماسی ناشی از اصطکاک، برش خورده و از بروز چسبندگی و افزایش اصطکاک جلوگیری می‌کند [۳۷]. بررسی و مقایسه نمودار ضریب اصطکاک دو نمونه کامپوزیت ریختگی و کامپوزیت فرآوری ارتعاشی شده تحت فرکانس ۶۰ هرتز نیز موید این مطلب است، شکل (۱۲). همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در سایش تحت فشار ۰/۷۵ مگاپاسکال، میانگین ضریب اصطکاک نمونه فرآوری شده در فرکانس ۶۰ هرتز (0.17 ± 0.09) حدود ۲۳ درصد کمتر از نمونه ریختگی (0.22 ± 0.16) است ضمن آنکه میزان نوسانات نمودار این نمونه نیز (احتمالاً به دلیل کاهش وقوع پدیده‌هایی مانند چسبندگی موضعی و خردایش ذرات سایشی درگیر بین سطوح به عنوان پدیده‌های مستهلک کننده انرژی) به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است.

بر اساس نظریه‌های موجود [۳۸]، عوامل متعددی در شکل‌گیری اصطکاک موثر هستند اما دو عامل اصلی و موثر در افزایش ضریب اصطکاک عبارت از چسبندگی و تغییر شکل پلاستیک (یا جزء خراشی) هستند. با توجه به شکل ۱۲، به دلیل افزایش پایداری

^۱ Tiny flakes

[۱۲] صفاری ش.، اخلاقی ف.، بررسی تاثیر اعمال ارتعاش مکانیکی روی سطح شیبدار بر ریزساختار کامپوزیت درجای $Al-Mg_2Si$ ، دومین همایش بین المللی و هفتمین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی و انجمن علمی ریخته گری ایران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۱۳۹۲.

[۱۳] دلشکسته ن.، کلاه‌دوز ا.، بررسی آماری ریزساختار و سختی آلیاژ آلومینیم نیمه جامد A380 تولید شده به روش ارتعاش مکانیکی در محیط گاز آرگن، پژوهش نامه ریخته‌گری، زمستان ۱۳۹۷، ۲(۴)، ۲۸۶-۲۷۵.

[14] Günay Bulutsuz A., Tribological behavior of high-pressure torsion processed biodegradable pure Zn under dry and wet conditions, *Industrial Lubrication and Tribology*, 2022, 74(5), 542-549.

[15] Li H., Huang J., Zhang P., Zhang Q., Investigation on tribological behaviors of biodegradable pure Zn and Zn-X (Li, Cu, Ge) binary alloys, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2021, 32(12).

[16] Taghiabadi R., Fayege A., Pakbin A., Nazari M., Ghoncheh M.H., Quality index and hot tearing susceptibility of Al-7Si-0.35Mg-xCu alloys, *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*, 2018, 28(7), 1275-1286.

[17] Taylor R.P., McClain S.T., Berry J.T., Uncertainty analysis of metal-casting porosity measurements using Archimedes' principle, *International Journal of Cast Metals Research*, 1999, 11(4), 247-257.

[18] Olesinski R.W., Abbaschian G.J., 1985, The Si-Zn (Silicon-Zinc) system. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*. 1995, 6(6), 545-548.

[19] Guan R.G., Tie D., A review on grain refinement of aluminum alloys: progresses, challenges and prospects, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2017, 30(5), 409-432.

[۲۰] یداله‌تبار ح.، ثقفیان ح.، شبستری س.، بررسی تاثیر ارتعاشات مکانیکی حین انجماد بر خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژ آلومینیم A380، نشریه بین المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، ویژه نامه مهندسی متالورژی و مواد، ۱۳۸۷، ۱۹(۵)، ۷۴-۶۵.

[21] Yoshitake Y., Yamamoto K., Sasaguri N., Era H., Refinement of primary Si grains of Al-21%Si alloy using vibration mold, *Materials Transactions*, 2020, 61(2), 355-360.

[22] Ünal N., Çamurlu H.E., Koçak S., Düztepe G., Effect of external ultrasonic treatment on hypereutectic cast aluminium-silicon alloy, *International Journal of Cast Metals*, 2012, 25(4), 246-250.

[23] Jiandon P., Talangkun S., Microstructural modification mardness and surface roughness of hypereutectic Al-Si alloys by a combination of bismuth and phosphorus, *Crystals*, 2022, 12(8) 1026.

[24] Chankitmongk S., Eskin D.G., Limmaneevichitr C., Structure refinement, mechanical properties and feasibility of deformation of hypereutectic Al-Fe-Zr and Al-Ni-Zr alloys subjected to ultrasonic melt processing. *Materials Science and Engineering: A*. 2020, 788, 139567.

[25] Chirita G., Stefanescu I., Soares D., Silva F.S., Influence of vibration on the solidification behavior and tensile properties of an Al-18wt%Si alloy, *Materials & Design*, 2019, 30(5), 1575-1580.

[26] Kudryashova O., Khmeleva M., Danilov P., Dammer V., Vorozhtsov A., Eskin D., Optimizing the conditions of metal solidification with vibration, *Metals*, 2019, 9(3), 366.

[27] Plotkowski A.J., Refinement of the cast microstructure of hypereutectic aluminum-silicon alloys with an applied electric potential, 2012, Masters Theses, 15.

[28] Chen J., Chen X., Luo Z., Effect of mechanical vibration on microstructure and properties of cast AZ91D alloy, *Results in Physics*, 2018, 11, 1022-1027.

[29] Jiang W., Chen X., Wang B., Fan Z., Wu H., Effects of vibration frequency on microstructure, mechanical properties, and fracture behavior of A356 aluminum alloy

بین سطح نمونه و جسم مقابل فولادی، کاهش تغییر شکل پلاستیک لایه‌های زیرسطحی طی فرایند لغزش و بهبود خواص سایشی می‌شود. همچنین اعمال ارتعاشات مکانیکی موجب ارتقای مجدد خواص سایشی کامپوزیت $Zn-4Si$ می‌شود به گونه‌ای که تحت دو فشار ۰/۲۵ و ۰/۷۵ مگاپاسکال، نرخ سایش کامپوزیت فرآوری شده تحت فرکانس ۶۰ هرتز به ترتیب حدود ۵۰ و ۶۵ درصد کمتر از نرخ سایش کامپوزیت ریخته‌گری است.

۴. دو مکانیزم اصلی سایش کامپوزیت $Zn-4Si$ ریخته‌گری عبارتند از ورقه‌ای شدن و سایش خراشان شدید لایه تریبولوژیکی. بهسازی ساختار کامپوزیت توسط ارتعاشات مکانیکی حین انجماد، موجب کاهش قابل توجه شدت عمل مکانیزم‌های فوق می‌شود.

مراجع

- [1] Mostaed E., Sikora-Jasinska M., Mostaed A., et al., Novel Zn-based alloys for biodegradable stent applications: Design, development and in vitro degradation, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2016, 60, 581-602.
- [2] Katarivas Levy G., Goldman J., Aghion E., The prospects of Zinc as a structural material for biodegradable implants—A review paper, *Metals*, 2017, 7(10), 402.
- [3] Liu Y., Lu B., Cai Z., Recent progress on Mg- and Zn-based alloys for biodegradable vascular stent applications, *Journal of Nanomaterials*, 2019, 1-16.
- [4] Kabir H., Munir K., Wen C., Li Y., Recent research and progress of biodegradable zinc alloys and composites for biomedical applications: Biomechanical and biocorrosion perspectives, *Bioactive Materials*, 2021, 6(3), 836-879.
- [5] Wątroba M., Bednarczyk W., Kawałko J., et al., A novel high-strength Zn-3Ag-0.5Mg alloy processed by hot extrusion, cold rolling or high-pressure torsion. *Metallurgical and Materials Transactions A.*, 2020, 51(7), 3335-3348.
- [6] Rosalbino F., De Negri S., Saccone A., Angelini E., Delfino S., Bio-corrosion characterization of Mg-Zn-X (X = Ca, Mn, Si) alloys for biomedical applications, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2009, 21(4), 1091-1098.
- [7] Jiang W., Yu W., Corrosion behavior and osteogenic activity of a biodegradable orthopedic implant Mg-Si alloy with a gradient structure. *Metals*, 2021, 11(5), 781.
- [8] Rajabi F., Taghiabadi R., Shaeri M.H., Tribology of Si-rich TIG-deposited coatings on Zn-40Al-2Cu alloy, *Surface Engineering*, 2020, 36(7), 735-744.
- [9] Yousefi D., Taghiabadi R., Shaeri M.H., Ansarian I., Microstructural evolution and mechanical properties of multi-directionally forged SiP/Zn22 composite, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2020, 20(4).
- [10] Chirita G., Stefanescu I., Soares D., Silva F.S., Influence of vibration on the solidification behavior and tensile properties of an Al-18wt%Si alloy, *Materials & Design*, 2009, 30(5), 1575-1580.
- [۱۱] دماوندی ا.، نوروزی س.، ربیعی ف.، اثر دمای بارریزی، ارتعاش مکانیکی و گرمایش مجدد بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ ریخته‌گری AL-A390، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، بهار ۱۳۹۷، ۲(۱)، ۵۳-۳۹.

- obtained by expendable pattern shell casting, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 83(1-4), 167-175.
- [30] Chen W., Wu S., Wang R., Effect of mechanical vibration on the mechanical properties and solidification feeding in low-pressure sand casting of Al-Cu-Mn-Ti alloy, Materials (Basel), 2022, 15(22), 8243.
- [31] Al-Ethari H., Haleem A.H., Hassan M.H., Effect of mold vibration on microstructure and mechanical properties of Al-Si eutectic alloy, 3rd Int. conf. on sustainable engineering techniques (ICSET 2020).
- [32] Yousefi D., Taghiabadi R., Shaeri M.H., Effect of multi-pass multi-directional forging on tribological properties of Si-rich eutectoid ZA alloys, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(7), 2024-2038.
- [33] Lu Z.C., Zeng M.Q., Gao Y., Zhu M., Minimizing tribolayer damage by strength-ductility matching in dual-scale structured Al-Sn alloys: A mechanism for improving wear performance, Wear, 2013, 304(1-2), 162-172.
- [34] Mao Y.S., Wang L., Chen K.M., Wang S.Q., Cui X.H., Tribo-layer and its role in dry sliding wear of Ti-6Al-4V alloy, Wear, 2013, 297(1-2), 1032-1039.
- [35] Nouri Z., Taghiabadi R., Tribological properties improvement of conventionally-cast Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si alloy by multi-pass friction stir processing, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(5), 1262-1275.
- [36] Moharrami A., Razaghian A., Paidar M., et al., Enhancing the mechanical and tribological properties of Mg₂Si-rich aluminum alloys by multi-pass friction stir processing, Materials Chemistry and Physics, 2020, 250, 123066.
- [37] Nadim A., Taghiabadi R., Razaghian A., Effect of Mn modification on the tribological properties of in situ Al-15Mg₂Si composites containing Fe as an impurity, Journal of Tribology, 2018, 140(6).
- [38] Hutching I.M., Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, Edward Arnold UK, 1992.



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper:

Investigation of Effect of Mechanical Vibration During Solidification on Microstructure and Wear Properties of Zn-4Si Composite

Faezeh Akbari¹, Reza Taghiabadi^{2*}, Morteza Saghafi Yazdi², Iman Ansarian³

1. M.Sc. student, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, IRAN.

2. Associate Professor, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, IRAN.

3. Ph.D. student, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, IRAN.

* Corresponding author, taghiabadi@ikiu.ac.ir

Paper history:

Received: 02 January 2023

Accepted: 25 April 2023

Keywords:

Zn-4Si composite,
Biodegradable,
Mechanical vibration,
Microstructure,
Wear.

Abstract:

In this study the effect of mechanical vibration (20 Hz, 40 Hz, and 60 Hz) during solidification on microstructure, hardness, and dry sliding wear resistance of Zn-4Si composite was studied. According to the results, Si addition led to the formation of primary Si (SiP) and eutectic Si (SiE) in the microstructure. This increased the hardness of Zn matrix from 30 BHN to more than about 60 BHN. However, uneven distribution (agglomeration) of SiP particles resulted in uneven hardness within the composite matrix. Applying the mechanical vibration during the solidification of composite improved the SiP particle distribution and refines them. According to the pin-on-disk sliding wear results, at the applied pressures of 0.25, 0.5, and 0.75 MPa, the sliding wear resistance of the modified composite (at the 60 Hz frequency) is higher than that of the as-cast composite by 50, 60, and 65%, respectively. Moreover, at the applied pressure of 0.75 MPa the average friction coefficient of mechanically-vibrated composite (60 Hz) is lower than that of as-cast composite by about 23%. Based on worn surface and wear debris analyses the substantial improvement of wear resistance in modified composites can be attributed to the improved tribolayer stability due to the strengthening effect of hard Si particles on the substrate material.

[Please cite this article using:](#)

Faezeh Akbari, Reza Taghiabadi, Morteza Saghafi Yazdi, Iman Ansarian, Investigation of Effect of Mechanical Vibration During Solidification on Microstructure and Wear Properties of Zn-4Si Composite, in Persian, Founding Research Journal, 2022, 6(1) 53-65.

DOI: 10.22034/FRJ.2023.378853.1170

Journal homepage: www.foundingjournal.ir