

تأثیر ارتعاش بر خواص مکانیکی کامپوزیت A356 /SiCp تولید شده به روش ریخته‌گری گردابی

آرمین دهنوی^۱، مسعود گلستانی پور^۲، حیدر خدیوی آیسک^{۳*}، محمدصادق ابروی^۴، مصطفی ملک جعفریان^۵، محمد حسین زاده^۱

۱- کارشناس متالورژی، موسسه آموزش عالی علمی-کاربردی جهاد دانشگاهی واحد مشهد، مشهد، ایران

۲- عضو هیأت علمی موسسه آموزش عالی علمی-کاربردی و گروه پژوهشی مواد جهاد دانشگاهی مشهد، مشهد، ایران

۳- دانشجوی دکتراى مهندسی مواد، گروه متالورژی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی واحد مشهد، مشهد، ایران

۴- عضو موسسه آموزش عالی علمی-کاربردی جهاد دانشگاهی واحد مشهد، مشهد، ایران

۵- عضو گروه پژوهشی مواد جهاد دانشگاهی واحد مشهد، مشهد، ایران

*H_khadivi10@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۲/۲۵، تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۶/۱۰)

چکیده

در تحقیق حاضر از روش ریخته‌گری گردابی و اعمال ارتعاشات مکانیکی روی قالب در حین ریخته‌گری، جهت تولید و بررسی نقش ارتعاش بر خواص مکانیکی کامپوزیت Al-SiCp استفاده شد. بدین منظور ابتدا شمش‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با مقادیر متفاوت فاز تقویت کننده SiCp ($d_{average} \approx 10 \mu m$ و ۱۵، ۱۰، ۵) به روش ریخته‌گری گردابی تهیه و سپس ذوب مجدد گردید و در ادامه در دو حالت ساکن و مرتعش شده با فرکانس‌های ۳۵، ۲۵ و ۱۵ در قالب فلزی ریخته‌گری شد. نتایج نشان داد که در تمامی نمونه‌ها، با افزایش کسر حجمی فاز تقویت کننده، تنش تسلیم و سختی افزایش می‌یابد. همچنین استفاده از ارتعاشات مکانیکی بر روی قالب مذاب، در محدوده خاصی از فرکانس (۲۵ Hz)، توزیع یکنواخت‌تر ذرات در زمینه و در نتیجه افزایش تنش تسلیم (بیش از ۱۰٪) و سختی (بیش از ۲۰٪) را به همراه داشته است.

واژه‌های کلیدی:

کامپوزیت، Al-SiCp، ریخته‌گری گردابی، ارتعاشات مکانیکی تنش تسلیم، سختی.

۱- مقدمه

قطعات مهندسی به عنوان جایگزین آلیاژهای آلومینیوم برای کاربردهای ویژه از قبیل کاربردهای نظامی، خودرو، هوا فضا و الکترونیک قرار گرفته است [۱-۲]. در این کامپوزیت‌ها، ذرات سرامیکی تقویت کننده معمولاً اکسیدی (Al_2O_3)، کاربیدی (TiC، SiC) یا بورایدی (TiB_2) می‌باشند که بسته به کاربرد

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات (PAMCs) (Particle reinforced Aluminium Matrix Composites) به علت داشتن ترکیب منحصر به فردی از خواص مانند مدول ویژه و (E/p) بالا، استحکام ویژه (σ/p) مطلوب و مقاومت سایشی و خوردگی مناسب مورد توجه بسیاری از طراحان و سازندگان

زمینه فلزی است که با روش‌هایی همچون تزریق ذرات به زمینه در حالت نیمه جامد، همزدن مذاب و نیز استفاده از عوامل ترک‌کننده مناسب بین زمینه و ذره سرامیکی می‌توان این مشکل را به حداقل رساند. پوشش دادن سطح ذرات تقویت کننده با فلزاتی از قبیل نیکل و مس، قبل از جاسازی آنها در فلز مذاب یکی دیگر از راهکارهای بهبود ترشوندگی ذرات در مذاب است که این روش نه تنها انرژی سطحی را به حداقل می‌رساند بلکه احتمال انجام فعل و انفعال شیمیایی بین ذرات را نیز کاهش می‌دهد. انجام عملیات حرارتی روی ذرات قبل از پخش در مذاب و یا اعمال امواج التراسونیک به مذاب از دیگر روش‌هایی است که تاکنون به منظور بهبود ترشوندگی ذرات و زمینه استفاده شده است.

پیشگرم کردن ذرات SiC باعث حذف آلودگی‌های سطحی، هیدروکسید و دیگر گازهای جذب شده و نیز تغییر ترکیب شیمیایی و تشکیل لایه‌ای از SiO₂ روی سطح ذرات می‌شود. استفاده از عامل‌های ترک‌کننده و عناصر واکنشی مانند Mg و Li در مذاب Al یکی دیگر از راهکارهای ارائه شده جهت بهبود ترشوندگی ذرات SiC می‌باشد [۷-۸]. Zlaticanin و همکارانش [۹] گزارش کردند که Mg باعث بهبود ترشوندگی بین ذرات SiC با Al از طریق اصلاح و کاهش لایه اکسیدی روی سطح ذرات SiC می‌شود. اندازه ذرات سرامیکی یکی دیگر از عوامل محدود کننده میزان ترشوندگی ذرات توسط مذاب است به طوری که با کاهش اندازه ذرات، میزان ترشوندگی کاهش می‌یابد. در نتیجه در این روش معمولاً از ذراتی با میانگین ۱۰ μm یا بیشتر استفاده می‌شود [۱۰-۱۱]. ترشوندگی ضعیف ذرات ریز ناشی از انرژی سطحی بالای ذرات، حضور لایه اکسیدی روی سطح مذاب، ایجاد لایه گازی روی سطح ذرات سرامیکی و نیز مساحت سطح ویژه آنها می‌باشد [۷، ۱۰]. دی یو و همکارانش [۱۲] برای حل مشکل توزیع شعاعی غیریکنواخت ذرات SiC در مذاب آلومینیوم A356 در روش متداول هم زدن مکانیکی، نوعی پره با تیغه‌های کج را طراحی کردند و نتیجه گرفتند برای توزیع شعاعی یکنواخت ذرات SiC در زمینه آلومینیومی، زاویه

مورد نظر، کسر حجمی آنها در زمینه آلومینیومی متفاوت است، به عنوان مثال این مقدار برای کاربردهای ساختمانی یا مقاوم به سایش کمتر از ۳۰٪ و برای بسته بندی‌های الکترونیکی می‌تواند تا ۷۰٪ حجمی افزایش یابد. به هر حال رفتار مکانیکی کامپوزیت به ترکیب ماده زمینه، نوع، اندازه و کسر حجمی ذرات تقویت کننده و روش ساخت کامپوزیت بستگی دارد. توزیع ذرات تقویت کننده در زمینه آلیاژ متأثر از عواملی مانند رفتار رئولوژیکی مذاب، روش جاسازی ذرات در زمینه و اثر متقابل ذرات و زمینه، قبل، حین و بعد از مخلوط سازی است [۳، ۱]. در بین روش‌های مختلف ساخت مواد AMCs مانند متالورژی پودر، پیوند نفوذی و ترسیب پاششی، تکنیک ریخته‌گری گردابی یکی از روش‌های آسان، انعطاف‌پذیر (به لحاظ انتخاب نوع ماده زمینه، شکل و ریزساختار نهایی) و البته کاربردی در حجم تولید بالا است. در این روش، فازهای تقویت کننده (معمولاً به شکل پودر) که از قبل پیشگرم شده‌اند، درون گردابی از مذاب آلومینیوم که توسط پره‌های همزن مکانیکی ایجاد شده، توزیع می‌شوند.

روش ریخته‌گری گردابی اقتصادی‌ترین روش قابل دسترس در تولید مواد کامپوزیتی زمینه فلزی است [۴]. طبق بررسی‌های Skibo و همکارانش [۵] هزینه تهیه کامپوزیت‌های زمینه فلزی به روش ریخته‌گری در حدود نصف تا یک سوم روش‌های در حال رقابت با ریخته‌گری می‌باشد و حتی عنوان شده که در حجم تولید بالا این هزینه‌ها تا حد یک دهم کاهش می‌یابد. تحقیقات گوناگونی در مورد نوع ذرات تقویت کننده بر خواص مکانیکی مواد PAMC انجام شده است. Kheder و همکارانش [۶] با استفاده از روش ریخته‌گری و مخلوط‌سازی در حالت مذاب به این نتیجه رسیدند که در بین ذرات سرامیکی Al₂O₃، SiC و MgO، موثرترین استحکام بخشی مکانیکی مربوط به ذرات SiC بوده است.

توزیع غیر همگن ذرات در زمینه به دلیل عواملی همچون اختلاف چگالی و به ویژه عدم ترشوندگی مناسب بین ذرات و زمینه، یکی از بزرگترین مشکلات در ریخته‌گری کامپوزیت‌های

این تحقیق، ضمن استفاده از منیزیم جهت بهبود خاصیت تر شوندگی ذرات SiC و مذاب، ذوب مجدد شمش کامپوزیتی و استفاده از ارتعاشات مکانیکی روی قالب طی ذوب مجدد، برای بهبود توزیع ذرات فاز تقویت کننده در مخلوط بود و مشخص گردید که با استفاده از این راهکارها، این روش یک روش مقرون به صرفه، آسان، انعطاف پذیر و همچنین دارای قابلیت کاربردی در حجم تولید بالا برای تولید مواد AMC با خواص مکانیکی مطلوب می‌باشد.

۲- مواد و روش تحقیق

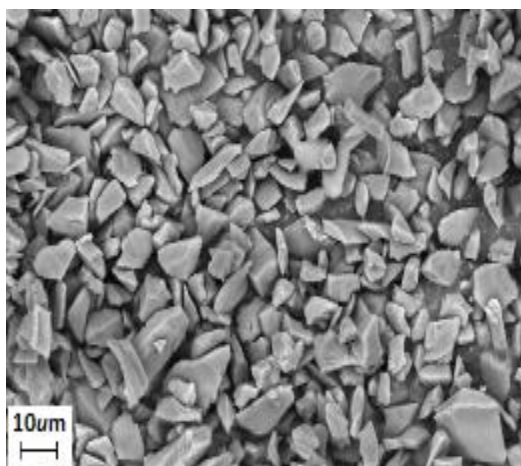
۲-۱- مواد

در این تحقیق از آلیاژ A356 با ترکیب ارائه شده در جدول (۱) به عنوان فاز زمینه استفاده شد.

همچنین از پودر کاربید سیلیسیم (SiC) (مش ۴۰۰-) متوسط اندازه ذرات $10\mu\text{m}$ ، خلوص $\leq 99.5\%$ ، $\rho = 3.2\text{ g.cm}^{-3}$ محصول شرکت (Merck) به عنوان فاز تقویت کننده استفاده شد.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم A356 (درصد وزنی)

| | | | | |
|---------|------|------|------|---------|
| Si | Fe | Cu | Mn | Mg |
| 6.5-7.5 | 0.2 | 0.2 | 0.03 | 0.55 |
| Ni | Zn | Sn | Ti | Al |
| 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.2 | balance |



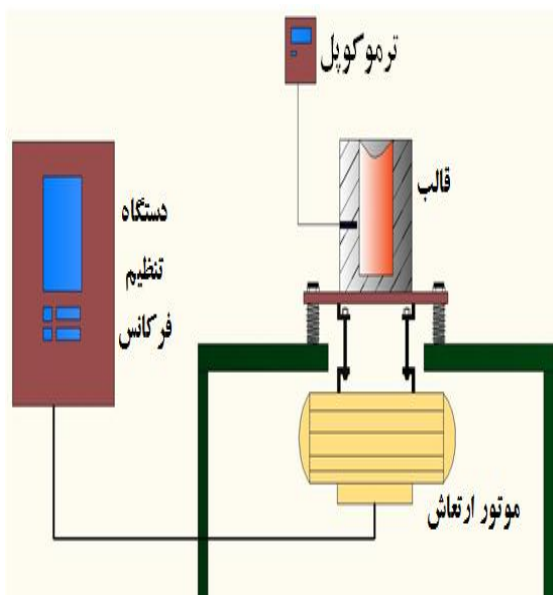
شکل (۱): تصویر SEM ذرات کاربید سیلیسیم عملیات حرارتی شده

در شکل (۱) تصویر SEM ذرات SiC مورد استفاده، نشان داده

انحراف محیطی مناسب تیغه‌های پره، ۲۶ درجه است. امیرخانلو و همکارانش [۱۳] در پی یافتن روشی جدید برای توزیع مناسب ذرات SiC در مذاب آلومینیوم و تولید کامپوزیت Al356/5Vol%SiCp از سه نوع پودر و دو روش ریخته‌گری متفاوت استفاده کردند. نهایتاً آنها نتیجه گرفتند از بین پودرهای خام SiC، کامپوزیتی آسیاکاری شده Al-SiCp و Al-SiCp-Mg و روش‌های ریخته‌گری در حالت کاملاً مذاب و نیمه جامد، بهره‌گیری از پودر Al-SiCp-Mg و روش ریخته‌گری نیمه جامد، باعث افزایش ماکرو و میکرو سختی، انرژی ضربه، استحکام خمشی و کرنش خمشی به ترتیب به میزان ۶۳٪، ۲۰٪، ۲۰٪ و ۴۰٪، در مقایسه با کامپوزیت‌های تولید شده با روش هم‌زدن مکانیکی معمولی پودر خام SiC در مذاب، شده است. Meena و همکارانش [۱] تاثیر مقدار و اندازه ذرات تقویت کننده SiC بر خواص مکانیکی Al/SiC-MMC، تولید شده به روش ریخته‌گری گردابی در حالت نیمه جامد، را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که با افزایش اندازه ذرات (مش ۴۰۰، مش ۳۰۰ و مش ۲۲۰) و درصد وزنی (۲۰٪، ۱۵٪، ۱۰٪، ۵٪) فاز تقویت کننده، استحکام مکانیکی، دانسیته و چگالی، افزایش و مقاومت به ضربه کاهش می‌یابد.

به هر حال استفاده از تکنیک ریخته‌گری در حالت نیمه جامد نیاز به کنترل دقیق شرایط دمایی در محدوده لیکوئیدوس و سالیدوس دارد که خود نوعی محدودیت به شمار می‌آید. Ghauri و همکارانش [۱۴] در تحقیقی پیرامون تاثیر مقدار فاز تقویت کننده SiC بر خواص مکانیکی کامپوزیت Al-SiC مشاهده کردند که با افزایش تدریجی کسر حجمی ذرات SiC به میزان ۲۰٪، سختی و چقرمگی افزایش یافته است، اما در مقادیر ۲۵-۳۰٪ از ذرات SiC، این روند ثابت نبوده و آنها علت را به وابستگی شدید خواص به یکنواختی توزیع ذرات در زمینه ربط دادند.

هدف از این تحقیق بررسی تولید کامپوزیت زمینه آلومینیومی Al-SiCp، دارای خواص مکانیکی مطلوب و با استفاده از یک روش ریخته‌گری گردابی اصلاح شده است. ایده‌ی اصلی در



شکل (۲): تصویر شماتیکی از دستگاه ارتعاش به همراه دستگاه تنظیم فرکانس.

جدول (۲): شرایط مربوط به تهیه ۱۶ نمونه کامپوزیتی Al/SiCp

| No. | Frequency (Hz) | SiC | |
|-----|----------------|------|-------|
| | | Vol% | Wt% |
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 5 | 5.89 |
| 3 | 0 | 10 | 11.67 |
| 4 | 0 | 15 | 17.34 |
| 5 | 15 | 0 | 0 |
| 6 | 15 | 5 | 5.89 |
| 7 | 15 | 10 | 11.67 |
| 8 | 15 | 15 | 17.34 |
| 9 | 25 | 0 | 0 |
| 10 | 25 | 5 | 5.89 |
| 11 | 25 | 10 | 11.67 |
| 12 | 25 | 15 | 17.34 |
| 13 | 35 | 0 | 0 |
| 14 | 35 | 5 | 5.89 |
| 15 | 35 | 10 | 11.67 |
| 16 | 35 | 15 | 17.34 |

شده است. با توجه به نتایج بررسی‌های محققان که در بخش مقدمه نیز به آن اشاره شد، به دلیل مشکل بودن فرایند توزیع یکنواخت ذرات SiC در مقادیر بیشتر از ۲۰٪ حجمی، در این تحقیق از مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵ Vol% SiCp به عنوان فاز تقویت کننده استفاده شد. از طرفی به منظور بهبود خاصیت ترشوندگی مذاب و ذرات پودر SiC، از مقدار کمی منیزیم در مذاب کامپوزیتی استفاده شد.

۲-۲- روش تحقیق

۲-۲-۱- تهیه نمونه‌های کامپوزیتی اولیه:

از روش ریخته‌گری گردابی برای تولید شمش‌های کامپوزیتی اولیه استفاده شد. مذاب را با استفاده از کوره مقاومتی (محصول شرکت اکسایتون) آماده نموده و سپس مذاب آماده شده توسط پره گرافیتی با استفاده از دستگاه دریل ستونی در دمای 720°C به مدت ۲۰ دقیقه هم زده شد و در طی این مدت، ذرات تقویت کننده که در دمای 500°C پیشگرم شده بودند، با توجه به درصد وزنی شمش کامپوزیتی مد نظر به مذاب اضافه شد.

۲-۲-۲- ذوب مجدد و تهیه نمونه‌های کامپوزیتی اصلی:

۱۶ نمونه شمش کامپوزیتی با مقادیر متفاوت ذرات تقویت کننده (۰، ۵، ۱۰، ۱۵ Vol% SiCp) که در مرحله قبل تهیه شده بودند، ذوب مجدد گردید و در دمای 720°C به مدت ۱۰ دقیقه توسط پره گرافیتی اتوماتیک به طور کامل هم زده شد و پس از رسیدن به دمای مورد نظر به درون قالب فلزی که تا دمای 400°C پیشگرم شده بود با ۴ فرکانس متفاوت (بدون اعمال فرکانس ۰ Hz، ۱۵ Hz، ۲۵ Hz، ۳۵ Hz) ریخته‌گری شد.

نمونه‌ها تا پایان انجماد کامل تحت ارتعاش قرار گرفت و سپس از قالب خارج شد. برای ایجاد ارتعاش از موتور ارتعاش و برای تنظیم مقدار ارتعاش و فرکانس‌های مورد نظر از دستگاه تنظیم فرکانس استفاده شد. در شکل (۲) سیستم طراحی شده برای فرایند ذوب‌ریزی و انجام ارتعاشات مکانیکی بر روی قالب به طور شماتیکی ترسیم شده است. در جدول (۲)، شرایط مربوط به تهیه ۱۶ نمونه کامپوزیتی Al/SiCp آورده شده است.

۲-۳-۲- بررسی خواص

پس از سمباده زنی و پولیش نمونه‌ها توسط خمیر الماس بر روی صفحه پولیش ۱ میکرون، بررسی ریزساختاری نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری Olympus مدل PMG3 انجام شد. سختی سنجی نمونه‌ها بر اساس معیار برینل (HB)، با قطر فرو رونده ۲/۵ اینچ و نیروی اعمالی ۶۲/۵ نیوتن، توسط دستگاه کوپا (Koopa) مدل UV1 انجام شد.

در نهایت نیز به منظور بررسی خواص مکانیکی و تنش تسلیم، نمونه‌های استوانه‌ای شکل ماشین کاری شده (قطر ۱ cm، ارتفاع ۱/۵ cm)، با استفاده از دستگاه آزمون فشار Zwick مدل Z250 تحت آزمون فشار تک محوری قرار گرفت. جهت اثبات تکرارپذیری نتایج، برای هر آزمون از تعداد حداقل ۲ نمونه استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

در شکل (۳) تصاویر متالوگرافی مربوط به ۱۶ نمونه کامپوزیتی تهیه شده با درصد‌های متفاوت SiC و اعمال شرایط ارتعاشی مختلف نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۳-۱ (الف-د) مشخص می‌شود که در نمونه‌های بدون اعمال ارتعاش، با افزایش کسر حجمی فاز تقویت کننده، ضمن افزایش توزیع ذرات تقویت کننده در زمینه، میزان آگلومراسیون ذرات نیز افزایش یافته است.

تصاویر مربوط به نمونه‌هایی که تحت اعمال فرکانس ارتعاشی ۱۵Hz قرار گرفته‌اند (شکل ۳-۲) حاکی از آن است که این فرکانس، تأثیر مطلوبی بر توزیع یکنواخت ذرات SiC نداشته است.

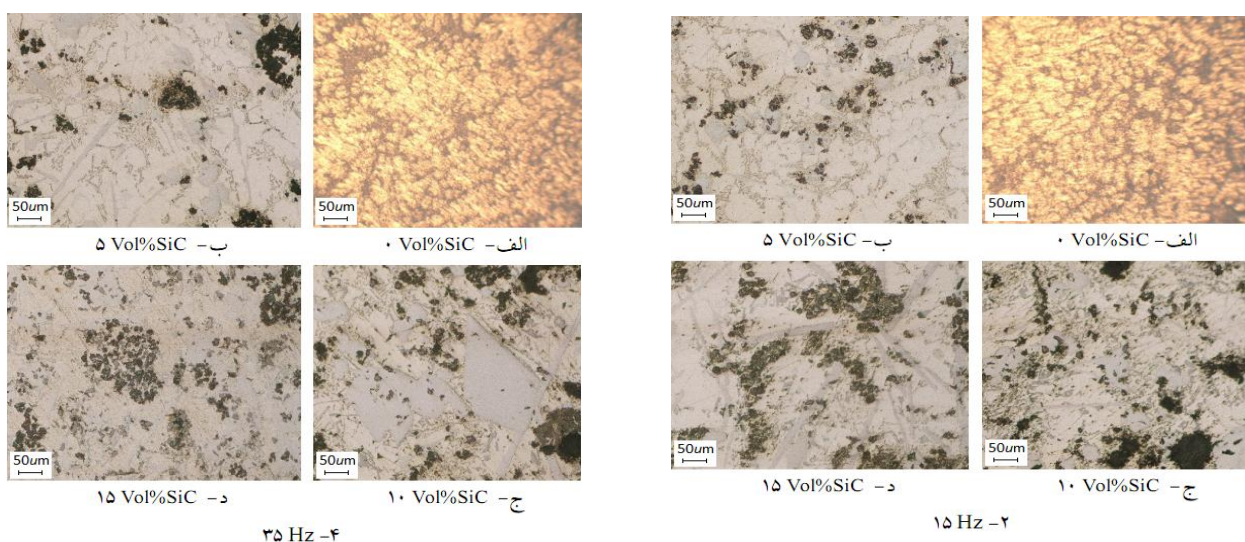
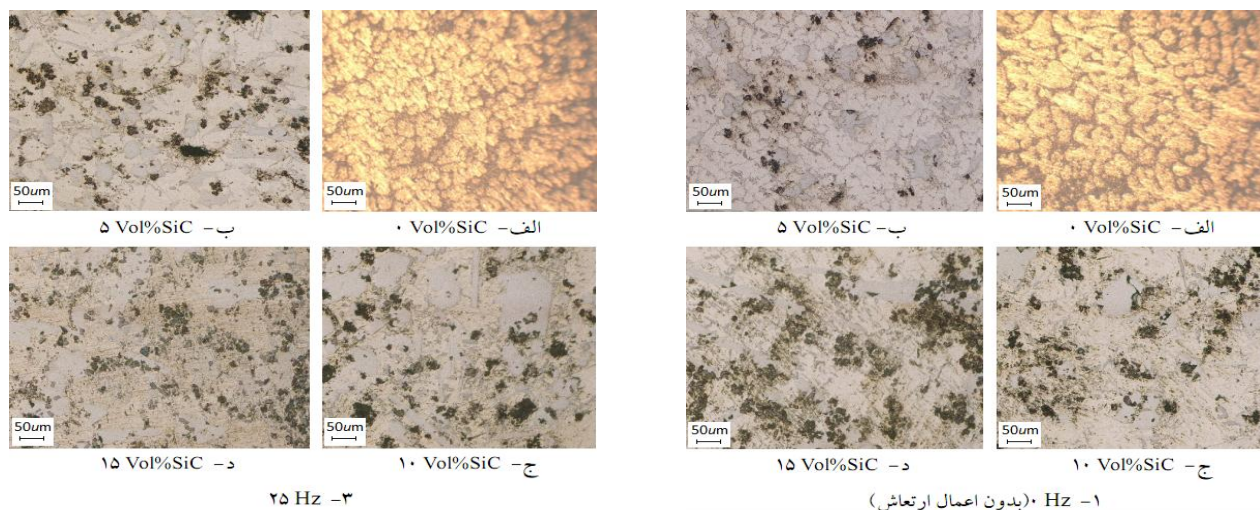
با بررسی تصاویر نمونه‌هایی که تحت اعمال ارتعاشات مکانیکی قرار گرفته‌اند (شکل‌های ۳-۲ تا ۳-۴) مشاهده می‌شود که بهترین حالت توزیع ذرات تقویت کننده مربوط به نمونه‌هایی است که تحت اعمال فرکانس ارتعاشی ۲۵Hz (شکل ۳-۳) قرار گرفته‌اند. با مقایسه تصاویر متالوگرافی نمونه‌های ریختگی در فرکانس ۲۵Hz (شکل ۳-۳)، با نمونه‌های تهیه شده در فرکانس

۳۵Hz (شکل ۳-۴) مشخص می‌شود که افزایش فرکانس و در نتیجه افزایش ارتعاش، به خصوص در نمونه‌هایی که دارای درصد بیشتری از ذرات تقویت کننده هستند، تأثیر مثبتی بر توزیع یکنواخت ذرات فاز تقویت کننده نداشته است. به عبارتی دیگر، افزایش فرکانس ارتعاشی روی قالب از ۲۵Hz به ۳۵Hz باعث آگلومراسیون ذرات شده است. بنا بر یافته‌های Naher و همکارانش [۱۵] با افزایش میزان ارتعاشات، آشفستگی (Turbulence) زیادی در مذاب به وجود آمده و این منجر به توزیع نامناسب ذرات SiC در مذاب شده است.

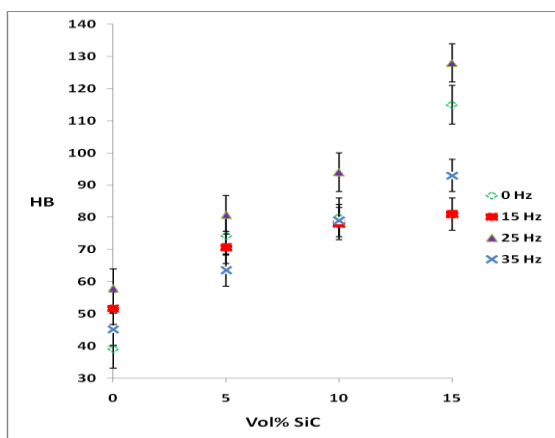
در نمودار شکل (۴) نتایج بدست آمده از سختی سنجی ۱۶ نمونه تهیه شده، بر حسب درصد حجمی فاز تقویت کننده (Vol%SiC)، ۱۵، ۱۰، ۵، ۰ و در فرکانس‌های ارتعاشی متفاوت (۳۵ Hz، ۲۵، ۱۵، ۰) ارائه شده است.

مطابق با شکل (۴)، به طور کلی مشخص می‌شود که در هر فرکانس ثابت، با افزایش درصد ذرات فاز تقویت کننده، سختی نیز افزایش یافته است. این نتیجه مطابق با نتایج کار Ghauri و همکارانش پیرامون تأثیر مقدار فاز تقویت کننده SiC بر خواص مکانیکی کامپوزیت Al-SiC است. آنها در مورد علت افزایش سختی با افزایش درصد فاز تقویت کننده عنوان کردند که فاز تقویت کننده مانع سیلان پلاستیک زمینه می‌شود. همچنین فاز تقویت کننده باعث قفل شدن مرزانه‌ها و در نتیجه افزایش استحکام مکانیکی کامپوزیت می‌شود. به علاوه سختی ذاتی ذرات کاربید سیلیسیم نیز دلیل دیگری برای افزایش سختی کامپوزیت‌های A356-SiCp می‌باشد.

بررسی تغییر نرخ سختی با توجه به افزایش فرکانس در یک کامپوزیت با درصد ثابتی از ذرات SiC نشان می‌دهد که بیشترین نرخ سختی در فرکانس ۲۵Hz برای تمام نمونه‌ها با درصد‌های مختلف ذرات تقویت کننده SiC بدست آمده است.



شکل (۳): تصاویر میکروسکوپ نوری (در بزرگنمایی ۲۰۰X) مربوط به نمونه‌های تهیه شده به روش ریخته‌گری گردابی با کسر حجمی متفاوت از ذرات SiC: (الف) ۰٪، (ب) ۵٪، (ج) ۱۰٪، (د) ۱۵٪ در شرایط ارتعاشی مختلف ۱- ۰Hz، ۲- ۱۵Hz، ۳- ۲۵Hz و ۴- ۳۵Hz.

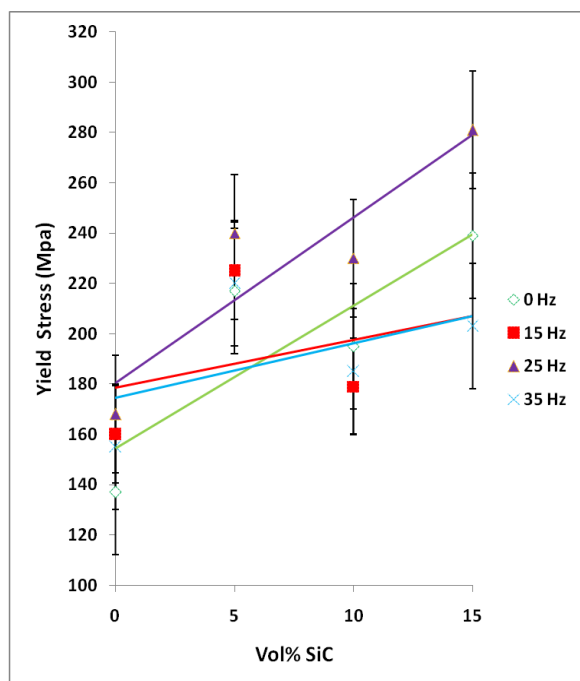


شکل (۴): نمودار سختی بر حسب درصد حجمی SiC برای نمونه‌های کامپوزیتی تهیه شده به روش ریخته‌گری گردابی در شرایط ارتعاشی مختلف.

با توجه به نمودار شکل (۴) مشخص می‌شود که بیشترین میزان سختی (۱۲۸ HB) مربوط به نمونه‌ای است که دارای حداکثر مقدار فاز تقویت کننده (۱۵Vol%SiC) است و ریخته‌گری آن در فرکانس ۲۵Hz انجام شده است (نمونه شماره ۱۲ در جدول ۲/ نمونه شکل ۳-۳-د). مقایسه سختی نمونه مذکور (۱۲۸ HB) با سختی نمونه پایه A356 (۳۹/۱ HB) حاکی از افزایش ۲۲۷ درصدی سختی و تاثیر خاص ذرات SiC بر استحکام بخشی کامپوزیت می‌باشد. این نتیجه به خوبی با توجه به شکل ۳-۳-د که نشان دهنده بهترین توزیع ذرات در فرکانس ۲۵Hz می‌باشد، قابل توجیه است.

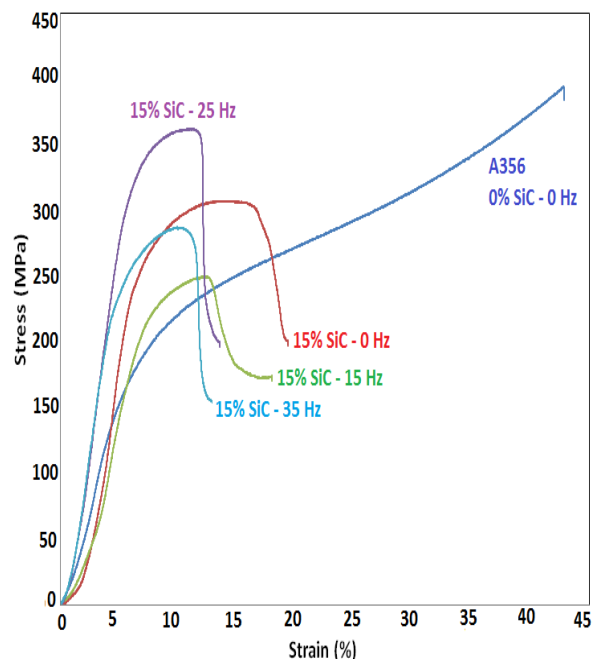
نسبت به آلیاژ اولیه (A356) افزایش داشته و در ضمن با افزایش درصد حجمی ذرات تقویت کننده، استحکام تسلیم افزایش یافته است. دلیل اصلی این افزایش، بیشتر بودن ضریب انبساط حرارتی آلیاژ آلومینیوم نسبت به ذرات SiC (در حدود ۷ برابر) می‌باشد که در هنگام سرد شدن کامپوزیت از دمای بالا (دمای تولید) تا درجه حرارت محیط، سبب ایجاد تنش‌های پسماند در زمینه و افزایش دانسیته نابجایی‌ها می‌شود [۱۶].

دلیل دیگر افزایش تنش تسلیم را می‌توان به نرخ بالای کار سختی کامپوزیت در کرنش‌های کم نسبت داد. این افزایش کار سختی نیز به دلیل خواص الاستیک ذرات کاربید سیلیسیم و ممانعت آنها از تغییر شکل پلاستیک زمینه است، زیرا ذرات کاربید سیلیسیم فقط دارای قابلیت تغییر فرم الاستیک هستند، در حالی که زمینه آلومینیومی می‌تواند تغییر فرم پلاستیک بدهد. فصل مشترک غیر کوهرنت بین زمینه و ذرات کاربید سیلیسیم، یک مانع محکم برای حرکت نابجایی‌های زمینه خواهد بود که باعث افزایش کار سختی می‌شود [۱۳، ۱۶-۱۷].



شکل (۶): نمودار تنش تسلیم بر حسب درصد حجمی متفاوت SiC برای نمونه‌های کامپوزیتی تهیه شده به روش ریخته‌گری گردابی در شرایط ارتعاشی مختلف.

در شکل (۵) منحنی‌های تنش-کرنش فشاری نمونه آلیاژی اولیه (A356) به همراه نمونه‌های کامپوزیتی A356-۱۵Vol%SiC در فرکانس‌های مختلف نشان داده شده است. با مقایسه رفتار فشاری نمونه‌های کامپوزیتی با نمونه آلومینیومی اولیه به خوبی تاثیر استحکام بخشی ذرات SiC قابل مشاهده است. با بررسی منحنی‌های تنش-کرنش مشخص می‌شود که کامپوزیت‌های A356-SiCp ریخته‌گری شده به روش گردابی نسبت به آلیاژ زمینه (A356) دارای استحکام تسلیم بالاتر و سفتی بیشتری هستند. اگرچه، این کامپوزیت‌ها نسبت به آلیاژ زمینه از استحکام کششی و درصد ازدیاد طول کمتری برخوردار هستند. وجود ذرات سخت کاربید سیلیسیم سبب افزایش سختی و کاهش میزان تغییر شکل پلاستیک قطعه قبل از شکست می‌شود [۱۶].



شکل (۵): منحنی‌های تنش-کرنش فشاری نمونه آلیاژی اولیه (A356) و نمونه‌های کامپوزیتی A356-۱۵ Vol%SiC در فرکانس‌های ارتعاشی مختلف.

در شکل (۶) نتایج بدست آمده از انجام آزمون فشار به منظور تعیین استحکام تسلیم تمامی ۱۶ نمونه، ارائه شده است. به طور کلی ملاحظه می‌گردد که استحکام تسلیم نمونه‌های کامپوزیتی

آلیاژ اولیه A356(۳۹HB) شد. میزان افزایش سختی در حدود ۲۲٪ می باشد.

۳- در بین فرکانس های اعمالی مختلف، فرکانس ۲۵Hz بهترین اثر را بر یکنواختی توزیع ذرات داشته است.

۴- در فرکانس ۳۵Hz، به علت افزایش میزان ارتعاشات، آشفته‌گی زیادی در مذاب به وجود آمده که نتیجه آن توزیع نامناسب و آگلومره شدن ذرات SiC، ایجاد تخلخل و حفرات گازی و نهایتاً افت خواص مکانیکی است.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از کارشناسان و اعضای گروه پژوهشی مواد و مجتمع فنی جهاد دانشگاهی واحد مشهد، به‌خاطر فراهم آوردن کلیه امکانات انجام این تحقیق، تشکر نمایند.

۶- مراجع

- [1] K. L. Meena, A. Manna, S. S. Banwait & Dr. Jaswanti, "An Analysis of Mechanical Properties of the Developed Al/SiC-MMC's", American Journal of Mechanical Engineering, Vol. 1, pp.14-19, 2013.
- [2] Manna, B. Bhattacharyya, "Study on Different Tooling Systems during Turning for Effective Machining of Al/SiC-MMC", The Institution of Engineers (India) Journal-Production, Vol. 83, pp.46-50, 2003.
- [3] J. Hashim, L. Looney & M.S.J. Hashmi, "Particle Distribution in Metal Matrix Composites," Part-I, Journal of Materials Processing Technology, Vol.123, pp. 251-257, 2002.
- [4] M. K. Surappa, "Microstructure evolution during solidification of DRMMCs (Discontinuously reinforced metal matrix composites): State of art", Journal of Materials Processing Technology, Vol.63, pp. 325-333, 1997.
- [5] D.M. Skibo, D.M. Schuster & L. Jolla, "Process for preparation of composite materials containing nonmetallic particles in a metallic Matrix, and composite materials", US Patent No. 4, pp.786 467, 1988.

همچنین با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌شود که با تغییر فرکانس، استحکام نمونه‌ها نیز دچار تغییر شده و بیشترین مقدار تنش لازم برای تغییر شکل در نمونه‌ها و بالاترین نقطه تسلیم مربوط به نمونه‌هایی است که با فرکانس ۲۵Hz ریخته‌گری شده است.

بیشترین استحکام تسلیم مربوط به نمونه‌ای است که دارای ۱۵Vol%SiC است و ریخته‌گری آن تحت ارتعاش ۲۵Hz انجام شده است ($\sigma_{yield} = 281 \text{ Mpa}$). این مقدار بیش از دو برابر (۱۰۵٪) استحکام تسلیم نمونه آلیاژی اولیه A356 ($\sigma_{yield} = 137 \text{ Mpa}$) می باشد. این نتیجه به خوبی تاثیر مثبت اعمال ارتعاش روی قالب ریخته‌گری بر بهبود استحکام تسلیم کامپوزیت را نشان می‌دهد.

در کامپوزیت‌های دارای مقادیر بیشتر ذرات تقویت کننده و در فرکانس‌های بالاتر (۳۵Hz)، ارتعاش بالا باعث جذب بیشتر گاز و در نتیجه افزایش حفرات گازی در نمونه‌ها می‌شود و همین امر باعث افت خواص مکانیکی نمونه‌ها گردیده است [۱۳، ۱۶].

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق کامپوزیت‌های Al/SiCp با استفاده از آلیاژ آلومینیوم A356 و ذرات کاربرد سیلیسیم (SiC) با مقادیر کسر حجمی متفاوت (۰، ۵، ۱۰، ۱۵Vol%SiC) تولید شد. ذوب مجدد نمونه‌ها و اعمال ارتعاشات مکانیکی روی قالب در فرکانس‌های متفاوت (۰، ۱۵، ۲۵، ۳۵ Hz) در حین ذوب ریزی تا انجماد، این نتایج را به همراه داشت:

۱- بیشترین استحکام تسلیم مربوط به نمونه‌ای است که دارای ۱۵Vol%SiC است و ریخته‌گری آن تحت ارتعاش ۲۵Hz انجام شده است ($\sigma_{yield} = 281 \text{ Mpa}$). این مقدار بیش از دو برابر (۱۰۵٪) استحکام تسلیم نمونه آلیاژی اولیه A356 ($\sigma_{yield} = 137 \text{ Mpa}$) می باشد.

۲- در بین نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده، استفاده از مقدار ۱۵Vol%SiC به همراه ریخته‌گری در شرایط ارتعاشی ۲۵Hz منجر به دستیابی کامپوزیتی با بیشترین سختی (۱۲۸HB) نسبت به

- Processing Technology, Vol. 166, pp 430–439, 2004.
- [16] D. P. Myriounis, S. T. Hasan, T. E. Matikas, "Microdeformation behaviour of Al–SiC metal matrix composites", *Composite Interfaces*, Vol. 15, pp. 495–514, 2008.
- [17] K.K. Alaneme, A.O. Aluko, "Fracture toughness (K_{Ic}) and tensile properties of as-cast and age-hardened aluminium (6063)–silicon carbide particulate composites", *Scientia Iranica*, Vol. 19, pp. 992-996, 2012.
- [6] R. I. Kheder, G.S. Marahleh & D.M.K. Al-Jamea, "Strengthening of Aluminum by SiC, Al_2O_3 and MgO", *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, Vol. 5, pp.533-541, 2011.
- [7] J. Hashim, L. Looney & M. S. J. Hashmi, "The enhancement of wettability of SiC particles in cast aluminum matrix composites", *Journal of Materials Processing*, Vol. 119, pp. 329-335, 2001.
- [8] W. Zhou, Z.M. Xu., "Survey on wetting of SiC by molten metals", *Ceramics International*, Vol. 36, pp.1177–1188, 2010.
- [9] B. Zlaticanin, M. Filipovic, A. Valcic, R. Aleksic, S. Nikolic, B. Radonjic & B. Bosnjak, "The effect of magnesium and titanium addition on the microstructure and properties of as-cast Al-5%Cu alloys", *Materiali in Tehnologije*, Vol.38, pp.1-2, 2004.
- [10] S. Tzamtzis, N.S. Barekar, N. Hari Babu, J. Patel, B.K. Dhindaw & Z. Fan, "Processing of Advanced Al/SiC Particulate Metal Matrix Composites Under Intensive Shearing—A Novel Rheo-Process", *Compos. A*, Vol. 40(2), pp 144–151, 2009.
- [11] N. Tolochko, A. Andrushevich & Y. Shienok, "Fabrication of Metal Matrix Nanocomposites", *University of Science and Technology, Qingdao*, PP. 425–428, 2009.
- [12] Y. D. P. Zhang, Y. Wang, J. Zhang, Sh. Yao & Ch. Li, "The Uniform Distribution of SiC Particles in an A356-SiCp Composite Produced by the Tilt-blade Mechanical Stirring", *Acta metallurgica science*, Vol. 26, pp. 69-74, 2013.
- [13] S. Amirkhanlou, B. Niroumand, "Microstructure and Mechanical Properties of Al356/SiCp Cast Composites Fabricated by a Novel Technique", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 22, pp. 85-93, 2013.
- [14] Kh. M. Ghauri, L. Ali, A. Ahmad, R. Ahmad, K. M. Din, I. A. Chaudhary & R. A. Karim, "Synthesis and Characterization of Al/SiC Composite Made by Stir Casting Method", *Pak. J. Engg. & Appl. Sci.* Vol. 12, pp. 102-110, 2013.
- [15] S. Naher, D. Brabazon & L. Looney, "Development and assessment of a new quick quench stir caster design for the production of metal matrix composites", *Journal of Materials*