

## مقایسه خواص سایشی کامپوزیت آلومینیم-گرافیت همگن شده در مایع و تولیدشده با روش پرس سرد-تف جوشی در کوره خلأ و بدست آوردن درصد بهینه حسین پاکدل نوقابی<sup>۱\*</sup>، ابوالفضل باباخانی<sup>۲</sup>، سید عبدالکریم سجادی<sup>۳</sup>

### چکیده

در این پژوهش، اختلاط پودرهای آلومینیم خالص و گرافیت برای تولید کامپوزیت‌های پایه آلومینیم تقویت شده با ذرات پودر گرافیت، از روشی جدید به نام همگن سازی در مایع استفاده شد. میزان گرافیت در این پژوهش از صفر تا ۴/۵ درصد وزنی در نظر گرفته شد. ابتدا پودر گرافیت در استون ریخته و آلتراسونیک گردید و نیز پودر آلومینیم به محلول اضافه و آلتراسونیک ادامه پیدا کرد. سپس مخلوط حاصل فیلتر و در دما و زمان مناسب در اتمسفر خلأ خشک گردید. هم‌چنین از پودرهای خشک شده حاصل به روش پرس سرد - تف جوشی در کوره خلأ تحت دما و زمان مناسب نمونه‌های کامپوزیتی تولید شد. به منظور بررسی ریزساختار، نمونه‌های حاصل به وسیله میکروسکوپ نوری و SEM بررسی و تحلیل شدند. هم‌چنین به منظور بررسی خواص مکانیکی، نمونه‌ها تحت آزمون‌های سختی سنجی (برینل) و سایش قرار گرفتند. با توجه به نتایج و مشاهدات، توزیع ذرات گرافیت در زمینه‌ی آلومینیم در این روش نسبت به روش‌های دیگر بهبود چشمگیری را نشان داد که همین امر سبب بهبود خواص مکانیکی شده است. هم‌چنین، افزودن گرافیت تا ۲/۵ درصد وزنی به طور بسیار یکنواخت در زمینه و بدون کلوخه شدن رخ داد. درحالی که درصد بهینه توزیع گرافیت برای این کامپوزیت با سایر روش‌های اختلاط حداکثر یک درصد بوده است. در این روش اختلاط، با افزودن گرافیت تا درصد بهینه، سختی و مقاومت به سایش افزایش یافت. با توجه به نتایج آزمون سایش، میزان مقاومت به سایش به دست آمده از این روش اختلاط، نسبت به سایر روش‌های تولید این کامپوزیت افزایش داشت.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت Al/Gr، همگن سازی در مایع، پرس سرد، خواص سایشی، سختی.

<sup>۱</sup> - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۲</sup> - دانشیار، مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۳</sup> - استاد، مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

\* نویسنده مسئول مقاله: pakdellnoghahi.hossein@stu.um.ac.ir

## بیشگفتار

شناخته شده ترین کامپوزیت زمینه فلزی، کامپوزیت با زمینه AI می باشد؛ اما استفاده از آن در درجه حرارت بالا به دلیل تجزیه زمینه کامپوزیت بسیار محدود است. محدودیت دیگر آن، مدول الاستیسیته نسبتاً پایین چنین زمینه ای است. در واقع، انتظار می رود که گرافیت در آلیاژهای آلومینیم باعث توسعه عملکرد سایشی و اصطکاکی شود. این رفتار بنیادین اهمیت زیادی در صنعت دارد. افزون بر این، افزایش ذرات گرافیت در آلیاژ آلومینیم سبب توسعه خاصیت سایش لغزشی در مقایسه با آلیاژهای آلومینیم یک پارچه می شود. کامپوزیت های AI/Gr به واسطه خاصیت خودروانکاری و خواص سایشی مطلوب به دلیل تشکیل فیلم روانکار بر سطح [۱-۶]، سبک بودن [۷ و ۱۰]، قابلیت ماشین کاری بهتر نسبت به زمینه [۸]، ضریب انبساط حرارتی کم، و قابلیت جذب ارتعاش [۹-۱۱] پتانسیل بالایی را برای ساخت آستر سیلندر، پیستون، یاتاقان ها و کاربردهای عمومی مهندسی دارا می باشند [۱۲ و ۱۳]. از آن جایی که ذرات گرافیت سبک تر از آلیاژهای فلزی زمینه هستند، کامپوزیت های آلومینیم-گرافیت برای کاهش وزن قطعات استفاده می شوند. آلومینیم و گرافیت، مواد قابل پذیرشی برای قطعات خودرو هستند. پیشرفت های اخیر در تکنولوژی موتورهای خودرو، باعث نیاز به توسعه مواد جدید را برای عملکردهای سایشی و ضد اصطکاکی بهتر در قطعاتی مانند پیستون و شافت های انتقال نیرو شده است. برای مثال، برای کاربردهای سایشی، کامپوزیت آلومینیم-گرافیت سبب کاهش هزینه و وزن شده و دارای مزیت خود روغن کاری نیز می باشد. تلاش های قابل ملاحظه ای برای ترکیب کردن ذرات روغن کاری کننده در زمینه های آلیاژهای آلومینیم جهت کاهش اصطکاک صورت گرفته است [۱-۶].

از جمله روش های اقتصادی جهت ساخت کامپوزیت های AI/Gr روش متالورژی پودر می باشد [۱ و ۱۴]. مراحل اصلی تولید در این روش شامل مخلوط سازی، متراکم سازی و تفجوشی مخلوط پودری آلومینیم و گرافیت است [۱]. حضور گرافیت در زمینه ای از آلیاژ آلومینیم، گاهی اوقات باعث افزایش خواص مکانیکی می شود [۱۵ و ۱۶]؛ اما گاهی اوقات موجب

کاهش خواص مکانیکی کامپوزیت نسبت به زمینه می شود [۱۲ و ۱۷-۱۹]. تحقیقاتی انجام گرفت که نشان داد، سختی و خواص مکانیکی نمونه های کامپوزیت های AI/Gr تا یک مقدار بهینه ای، افزایش یافت [۱۵ و ۱۶]. اما پژوهش های دیگری نیز انجام گرفت که در آن ها معمولاً کاهش سختی کامپوزیت های AI/Gr را با افزایش درصد گرافیت نشان می دهند [۱۲ و ۱۷]. خواص سایشی کامپوزیت های AI/Gr تحت تاثیر مقدار گرافیت می باشد به طوری که معمولاً با افزایش درصد گرافیت خواص سایشی کامپوزیت افزایش می یابد [۱۸]. هم چنین گزارش شده است، چقرمگی شکست و استحکام کامپوزیت های AI/Gr با افزایش مقدار گرافیت کاهش می یابد [۱۹]. مطالعات انجام گرفته روی کامپوزیت های AI/Gr نشان داده که انجام عملیات حرارتی با توجه به آلیاژ زمینه باعث بهبود خواص سایشی و مکانیکی این دسته از کامپوزیت ها می گردد [۲۰ و ۲۱].

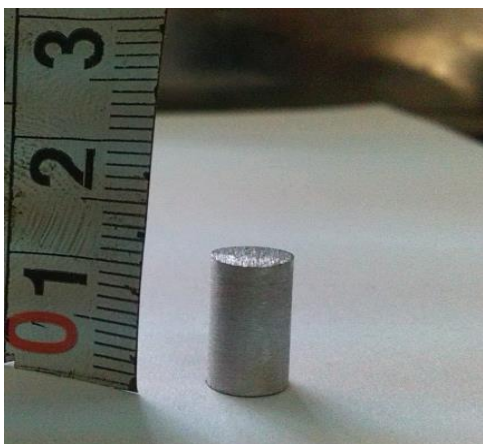
مشخص است که اولین نیاز یک کامپوزیت برای نشان دادن کارایی بالای آن، توزیع یکنواخت فاز تقویت کننده است. آگلومره شدن ذرات تقویت کننده سبب افت خواص مکانیکی می شود. پس تا زمانی که ذرات تقویت کننده در زمینه به طور یکنواخت توزیع شود و کلوخه شدن رخ ندهد، خواص مکانیکی افت نمی کند.

در پژوهش حاضر، از یک روش جدید با نام روش همگن سازی در مایع که برای اولین بار توسط این گروه تحقیقاتی در دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد ابداع شده، جهت اختلاط و تولید مخلوط پودری AI/Gr استفاده شده است. روش همگن سازی در مایع که آماده سازی پودر توسط همگن و یکنواخت کردن اجزا کامپوزیت در یک محلول ابی به کمک دستگاه آلتراسونیک انجام می شود، برای تولید کامپوزیت به روش متالورژی پودر استفاده گردیده است. با استفاده از روش همگن سازی در مایع، امکان توزیع یکنواخت ذرات ریز وجود دارد. بنابراین، این روش یک فرآیند کارآمد برای ارتقاء تولید مواد توسط متالورژی پودر است. مقدار استحکام بخشی توسط ذرات ریز، وابسته به نوع ذرات، اندازه، مورفولوژی، کسر حجمی و توزیع آن ها است.

موضوع این پژوهش، بررسی خواص سایشی و سختی

پودر مخلوط خشک شده حاصل به روش پرس سرد - تف جوشی در کوره خلأ انجام شد.

جهت انجام روش پرس سرد - تف جوشی در کوره خلأ، ابتدا مخلوط پودر خشک شده حاصل از فرایند همگن سازی در فاز مایع در فشار ۵۰۰ MPa به صورت سرد فشرده شد. در ادامه کامپوزیت در دمای ۵۰۰ °C در اتمسفر خلأ به مدت ۶ ساعت تف جوشی گردید و در همان محیط (خلأ) سرد شد. در نهایت نمونه‌های استوانه‌ای شکل با قطر ۶ mm و طول ۱۰ mm تولید شدند. تصاویری از نمونه‌های تولید شده را در شکل ۱ مشاهده می‌کنید.



شکل ۱- نمونه‌ی تولید شده

نمونه‌های حاصل را ابتدا تحت بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و SEM قرار گرفت. در ادامه به منظور بررسی رفتار سایشی کامپوزیت‌های تولید شده، آزمایش سایش به روش پین روی دیسک دوار در دمای اتاق و در اتمسفر محیط انجام شد که در شکل ۲ شماتیکی از دستگاه آزمون سایش آورده شده است. در حین انجام آزمایش، پین (نمونه‌های کامپوزیتی استوانه‌ای شکل) ثابت بوده و دیسک می‌چرخید. در این آزمون دیسک از جنس سنباده SiC به شماره ۶۰۰ ساخت آلمان می‌باشد. محیط دیسک ۱۴ سانتی‌متر و سرعت چرخش دستگاه ۱ دور در ثانیه انتخاب شده است. این در حالی است که در تمام این مدت یک بار عمودی ۵ N بر سطح بالایی کامپوزیت وارد شد. تست سایش بر اساس برنامه زیر انجام گرفت: هفت مسافت لغزش ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۵۰

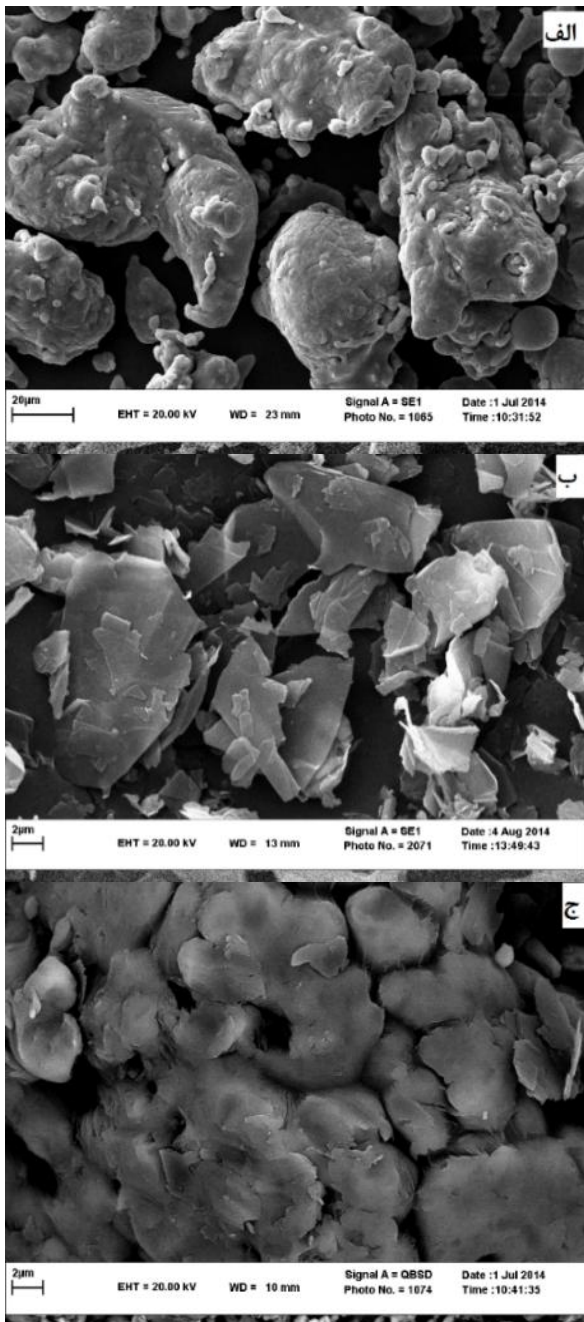
کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم که توسط ذرات گرافیت تقویت شده می‌باشد. پودرهای اولیه مورد نیاز به روش همگن سازی در مایع تهیه شده است و تولید آن به روش پرس سرد-تف جوشی در کوره خلأ انجام گردیده است. هم چنین به بررسی تاثیر درصد وزنی گرافیت روی مقاومت به سایش پرداخته شده است. اگرچه در این مطالعه تنها تاثیر مقدار ذرات افزودنی، فشار، دما و زمان بررسی شده است؛ اما عوامل و پارامترهای دیگری نیز می‌توانند روی خواص مکانیکی کامپوزیت موثر باشند از جمله: زمان آلتراسونیک کردن مخلوط پودر، فرکانس آلتراسونیک کردن، شرایط اتمسفری خشک نمودن پودر، شرایط فشرده سازی پودر، شرایط تف جوشی از قبیل: جریان، شرایط اتمسفری و زمان، اندازه ذرات تقویت کننده و پودر آلومینیم، خلوص پودر آلومینیم و پودر گرافیت مورد استفاده.

## مواد و روش‌ها

در این آزمایش از پودر آلومینیم با خلوص بالا (۹۹/۹٪) و اندازه‌ی دانه ۴۵ μm به عنوان زمینه کامپوزیت و نیز از پودر گرافیت با استاندارد UF4 (با اندازه ۱۰ میکرومتر) به عنوان ماده‌ی تقویت کننده استفاده شد. پودر آلومینیم محصول هند بوده و پودر گرافیت نیز از کارخانه متالورژی پودر مشهد تهیه گردید. از استون نیز به عنوان ماده همگن کننده در فاز مایع در طی مراحل آماده سازی استفاده شد.

## روش انجام آزمایش

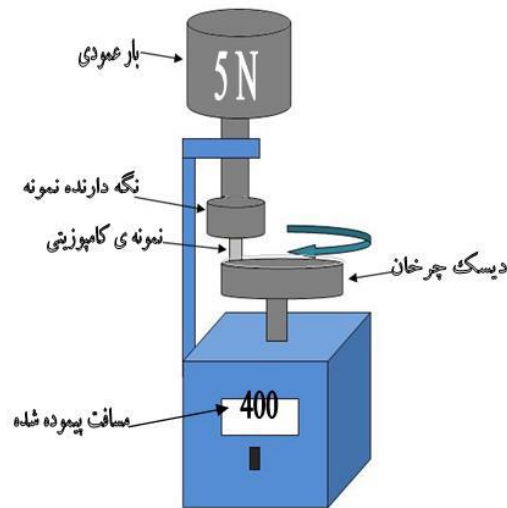
ابتدا مقدار مورد نیاز گرافیت و آلومینیم برای تولید کامپوزیت با درصدهای گرافیت صفر، ۱/۵، ۲/۵ و ۴/۵ درصد وزنی توزین و بعد گرافیت‌های مربوط به هر نوع کامپوزیت در بشرهای جداگانه در استون ریخته شد و به مدت ۱ h در دستگاه آلتراسونیک قرار گرفت. سپس پودر آلومینیم به محلول حاصل از مرحله‌ی قبل به آهستگی اضافه شد و دوباره به مدت ۴ h در دستگاه آلتراسونیک قرار گرفت. آنگاه مخلوط حاصل فیلتر شد و در دمای ۹۰ °C و اتمسفر خلأ در دستگاه آون به مدت ۶ ساعت خشک گردید. سپس عملیات پرس و تف جوشی



شکل ۳ - تصویر SEM تهیه شده الف- پودر آلومینیم خالص ب- پودر گرافیت خالص ج- پودر Al-Gr مخلوط شده

طبق تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ نوری و SEM ( اشکال ۴ و ۵ )، گرافیت در زمینه به دو صورت مشاهده می شود. نوع اول گرافیتها به صورت توده ای بسیار ریز (ترجیحاً کروی) در بخش هایی از زمینه به صورت همگن با توزیع یکسان قرار دارند و نوع دوم گرافیتها به صورت لایه های نازک کشیده شده بسیار کوتاه در زمینه دیده می شوند. در حالی که گزارش شده

متر با بار عمودی ۵ نیوتن برای نمونه های با درصد های وزنی مختلف از گرافیت ( صفر و ۱/۵ و ۲/۵ و ۴/۵ ) انجام شد. تغییرات جرمی نمونه های ساییده شده در مسافت های مختلف (پس از طی هر ۵۰m) توسط ترازوی حساس الکتریکی دیجیتال با دقت  $0.001$  g اندازه گیری و ثبت شد. هم چنین پس از طی هر ۵۰m سمباده تعویض شد. نرخ سایشی به صورت وزن کاهش یافته نمونه ها (g) بر حسب مسافت طی شده (m) گزارش شد. برای مطالعه سطح ساییده شده از میکروسکوپ نوری و SEM استفاده شد. سپس سختی نمونه ها به وسیله سختی سنجی برینل (HB) با بار ۵ kgf از میانگین ۵ اندازه گیری برای هر نمونه تعیین گردید.



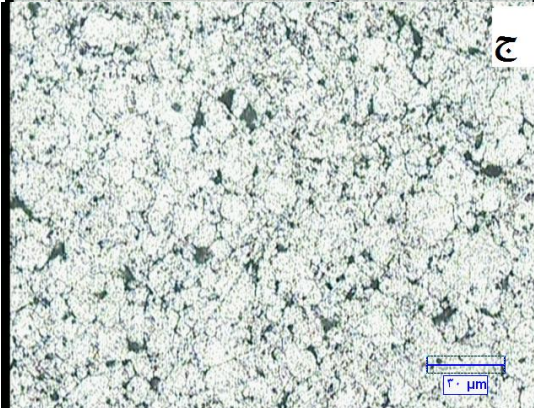
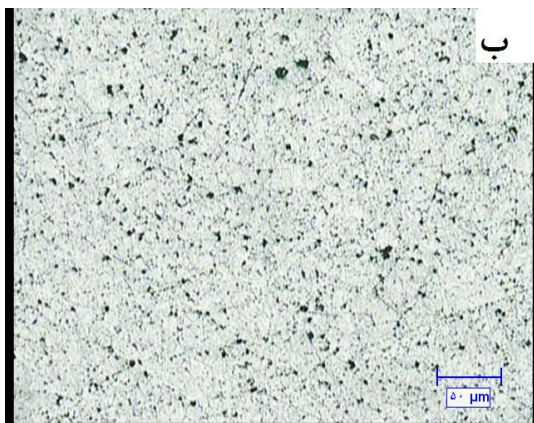
شکل ۲ - شماتیک دستگاه آزمون سایش

## نتایج و بحث

### بررسی ریز ساختار

شکل ۳ تصویر مواد اولیه مورد استفاده را نشان می دهد.

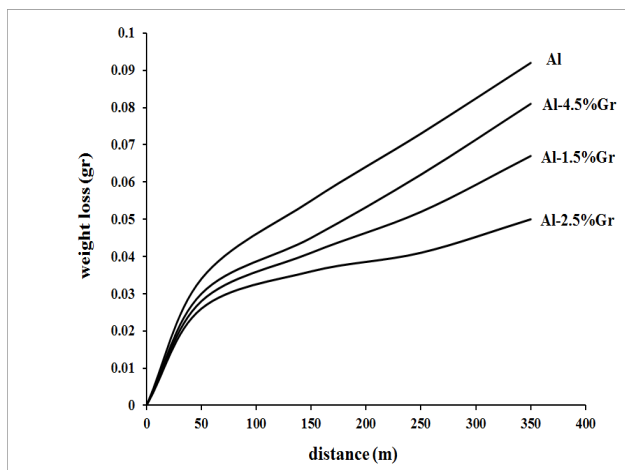
مایع دارند و تقریباً خطوط گرافیت به صورت موازی و ممتد می‌باشند [۲۲]؛ اما در روش همگن‌سازی در مایع خطوط گرافیت لایه‌ای منقطع و بسیار کوتاه‌تر و نازک‌تر هستند که همین امر موجب بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت می‌شود. هم‌چنین مشخص شد که با افزایش درصد گرافیت ضخامت لایه‌های گرافیتی افزایش یافته‌اند.



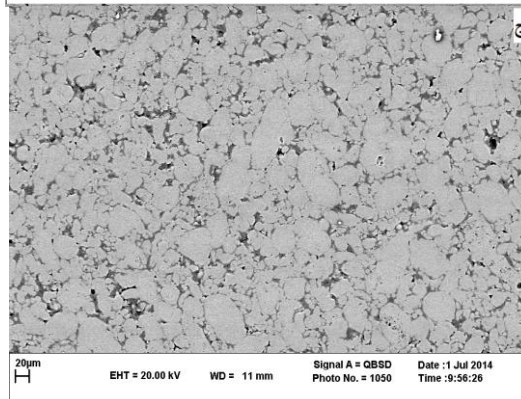
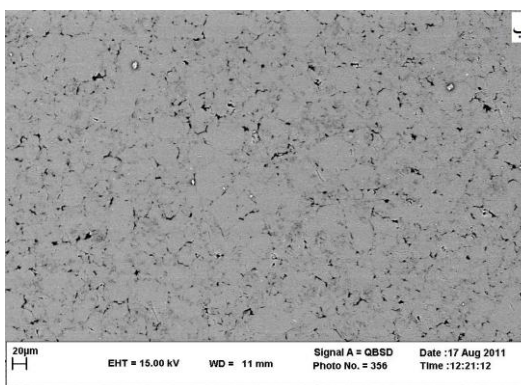
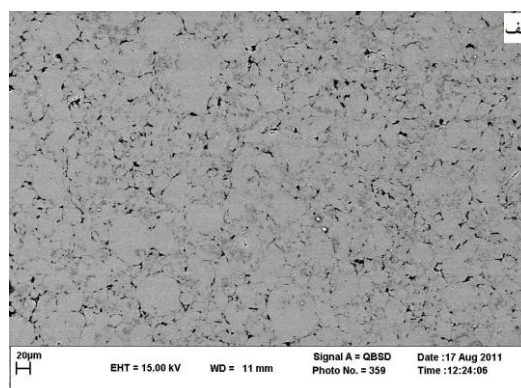
شکل ۴ - تصویر OM کامپوزیت های الف - Al - 1.5  
 Gr % - ب - Al - 3 % Gr - ج - Al - 4.5 % Gr  
 تولید شده به روش همگن سازی در مایع - پرس سرد -  
 تف جوشی در کوره خلأ

است، هنگامی اختلاط با استفاده از روش آسیاکاری و پرس گرم در فشار ۴۵۰ MPa و تف‌جوشی در کوره در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد انجام شده است که گرافیت‌ها به صورت لایه‌های کشیده و کلوخه‌های بزرگ در روی زمینه دیده می‌شوند [۲۲]. گرافیت توده‌ای هرچه بزرگ‌تر و توزیع آن ناهمگن‌تر باشد، باعث به وجود آمدن محل‌های تمرکز تنش در ساختار می‌شود و همین امر موجب کاهش خواص مکانیکی می‌گردد. در نمونه‌هایی که آماده سازی پودر و اختلاط آن توسط آسیاکاری و تف‌جوشی پلاسمایی انجام شد نیز گرافیت به صورت کاملاً همگن و یکنواخت نبود و توده‌های گرافیت بزرگی وجود داشت که توزیع یکنواختی نداشتند و به صورت پراکنده در نقاط مختلف زمینه قرار داشتند [۲۳]. این توده‌های گرافیتی با افزایش درصد گرافیت بیش‌تر می‌شوند. طبق مشاهدات می‌توان بیان نمود که با افزایش درصد گرافیت، تا یک اندازه‌ی بهینه‌ای (تا ۲/۵ درصد درصد گرافیت) افزودن گرافیت در این روش موجب کلوخه شدن نخواهد شد و یکنواختی توزیع خود را حفظ می‌کند؛ اما بعد از این درصد بهینه با افزودن گرافیت کمی از یکنواختی آن کاهش می‌یابد؛ اما در عین حال باز هم یکنواختی و همگن بودن آن نسبت به نمونه‌های مشابه تولید شده با روش‌های دیگر بیش‌تر است. هم‌چنین، مقدار این درصد بهینه گرافیت (آلومینیم با ۲/۵ درصد گرافیت) بسیار بیش‌تر از درصد بهینه گرافیت برای کامپوزیت‌های مشابه تولید شده به روش‌های جدید دیگر که تلاش شده به توزیع همگن دست یابد، است (حداکثر درصد بهینه در سایر روش‌ها یک بوده است). این توزیع یکنواخت‌تر و کوچک‌تر بودن توده‌های گرافیتی، روی بهبود خواص مکانیکی و خوردگی تأثیر زیادی دارد که نتیجه این امر از نتایج آزمون‌های مکانیکی به وضوح مشاهده می‌شود. بعد از درصد بهینه، هر چه میزان و اندازه‌ی گرافیت‌های توده‌ای افزایش داشته باشد، هر چند که توزیع آن‌ها در زمینه یکنواخت باشد، می‌تواند باعث کاهش در خواص مکانیکی شود. مقایسه دو روش اختلاط ذرات گرافیت در آلومینیم نشان می‌دهد که گرافیت‌های لایه‌ای در روش اختلاط با استفاده از روش آسیاکاری و پرس گرم در فشار ۴۵۰ MPa و تف‌جوشی در کوره در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد طول بیش‌تری نسبت به روش همگن‌سازی در

یافته است که دلیل آن توزیع یکنواخت گرافیت در بین ذرات آلومینیم است که به واسطه استحکام بالایی که دارند، باعث افزایش مقاومت به سایش شده است. در واقع مکانیزم سایش همراه با ایجاد ترک و رشد آن‌ها است. هر عاملی که سبب جلوگیری از رشد ترک‌ها شود، می‌تواند سبب کاهش میزان سایش گردد. همان گونه که ذکر شد در کامپوزیت‌ها به واسطه توزیع مناسب گرافیت‌ها، پیوند خوبی بین زمینه و تقویت کننده برقرار می‌شود و لذا حضورشان می‌تواند به عنوان عاملی در مقابل رشد ترک عمل کنند؛ اما در نمونه‌های با درصد گرافیت بالاتر از درصد بهینه به علت آگلومره شدن و به هم چسبیدن گرافیت‌ها، لذا در اثر فرایند سایش این توده‌های حاصل از تجمع گرافیت‌ها از سطح سایش کنده شده و خود می‌توانند محلی مناسب برای جوانه‌زنی ترک محسوب شوند. از طرف دیگر در این نقاط، از آنجایی که سطح تماس این توده‌ها با ماده سایش‌دهنده زیاد باشد، توده‌ها طی سایش از هم پاشیده شده و از سطح کنده می‌شوند و در نهایت حفره‌هایی را روی سطح به جا می‌گذارند که موجب کاهش شدید مقاومت به سایش نمونه‌های کامپوزیتی با درصد بالای گرافیت نسبت به نمونه خالص شده است. شکل ۷ اثر میزان گرافیت را بر روی نرخ سایش نشان می‌دهد.



شکل ۶ - نمودار سایش کامپوزیت Al-Gr با درصدهای مختلف گرافیت و آلومینیم خالص تولید شده به روش همگن سازی در مایع-پرس سرد-تف جوشی در کوره خلأ

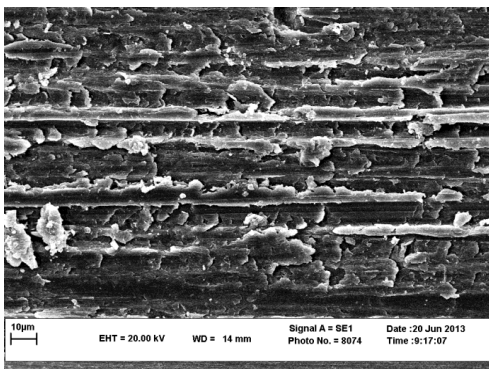


شکل ۵ - تصویر SEM کامپوزیت‌های الف - Al - 4.5 % Gr - ب - Al - 3 % Gr - ج - Al - 1.5 % Gr - د - Al - 2.5 % Gr تولید شده به روش همگن سازی در مایع-پرس سرد-تف جوشی در کوره خلأ

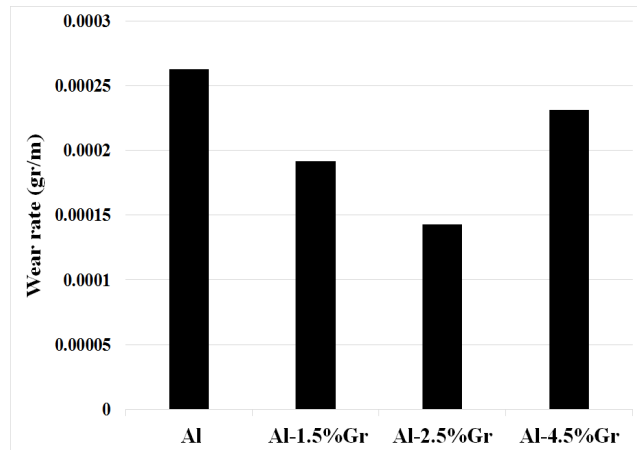
### آزمون سایش

شکل ۶، چگونگی تغییرات وزن نمونه‌های خالص کامپوزیتی با درصدهای وزنی مختلف از گرافیت (۱/۵ و ۲/۵ و ۴/۵) در مسافت‌های مختلف را نشان داده است. همان گونه که مشاهده شد، در نمونه‌های کامپوزیتی مقاومت به سایش نسبت به نمونه آلومینیم خالص افزایش

میکروسکوپی SEM از سطح سایش، اطلاعات ارزشمندی را در مورد مکانیزم سایش و هم‌چنین اثر پارامترهای مختلف روی آن ارائه می‌دهند. شکل ۸-۱۰، تصاویر میکروسکوپ SEM تهیه شده از سطح سایش یافته نمونه‌های خالص و کامپوزیتی را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده شد در نمونه بدون گرافیت، سایش شدید همراه با عمق سایش بالا مشاهده می‌شود که علت آن نرم بودن سطح سایش این نمونه‌هاست. بر اساس انجام فرایند اصطکاک، لایه‌های اصطکاک روی سطح سایش ایجاد شده و ترک‌های بین لایه اصطکاک و لایه پایه شروع شده و در اثر مقاومت کمی که آلومینیم نسبت به نرخ برش دارد، این ترک‌ها به سرعت رشد کرده، سرانجام تعدادی از لایه‌ها از بین رفته و از سطح سایش کنده می‌شوند. در مقابل کامپوزیت حاوی ۱/۵ تا ۲/۵ درصد وزنی گرافیت، مقاومت بیشتری نسبت به تنش برشی در مقایسه با فلز خالص آلومینیم دارد اگر چه در اینجا هم نیروهای اصطکاکی ایجاد می‌شود؛ اما از آنجایی که اتصال گرافیت‌ها و زمینه قوی می‌باشد به راحتی کنده نمی‌شوند. شکل ۹ و ۱۰ نشان داد که با افزودن گرافیت، عمق سایش کاهش پیدا نموده است. هم‌چنین تغییر شکل ایجاد شده بر روی نمونه سایش یافته بسیار پیوسته و فشرده دیده می‌شود و این باعث شده که به جای تغییر شکل عمودی و فرو رفتن ماده ساینده، بیش‌تر سیلان مواد به اطراف خطوط سایش وجود داشته باشد.



شکل ۸- تصاویر تهیه شده از سطح سایش یافته آلومینیم خالص با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

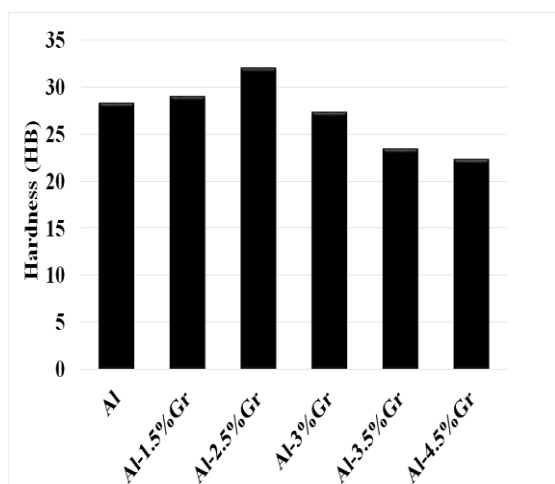


شکل ۷ - نمودار نرخ سایش کامپوزیت Al-Gr با درصد‌های مختلف گرافیت و آلومینیم خالص تولید شده به روش همگن سازی در مایع-پرس سرد-تف جوشی در کوره خلأ

در این پژوهش نرخ سایش به صورت میزان وزن کاهش یافته (g) بر مسافت طی شده (m) تعریف شده است. این پارامتر برای نمونه‌های مختلف با بار اعمالی (5 N) در شکل ۷ رسم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد گرافیت تا یک مقدار بهینه (۲/۵ درصد) افزایش مقاومت به سایش اتفاق می‌افتد که این امر به وضوح در شکل بالا مشاهده می‌شود. دلیل آن در این است که افزایش درصد گرافیت تا درصد بهینه، باعث افزایش میزان روانکاری (روغنکاری) به دلیل افزایش میزان گرافیت با توزیع یکنواخت و همگن می‌شود و هم‌چنین به واسطه استحکام بالایی که دارند، سبب کاهش نرخ سایش می‌شوند؛ اما با افزایش میزان گرافیت بیش از مقدار بهینه، باعث ایجاد تجمعات و کلوخه می‌شود و با توجه به نرم‌تر بودن گرافیت، سبب نرم‌تر شدن کامپوزیت و بیش‌تر شدن میزان سایش می‌شود؛ اما کامپوزیت‌های تولید شده به این روش، میزان سایش کم‌تری نسبت به نمونه آلومینیم خالص دارند و این مزیت به دلیل خاصیت روغنکاری گرافیت، توزیع یکنواخت و همگن آن توسط این روش، کوچک بودن کلوخه‌ها (در صورت داشتن آن) و هم‌چنین به واسطه استحکام بالایی که دارند، است.

مشاهده می‌شود که با افزایش درصد گرافیت بیش از درصد بهینه (۲/۵ درصد گرافیت)، میزان سایش به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. بررسی‌های

سبب بهبود خواص مکانیکی شده و سختی روبه افزایش است. با افزایش درصد گرافیت بیش از مقدار بهینه، تجمعات تقریباً کروی گرافیت و کلوخه شدن آن روبه رشد است و با توجه به اینکه گرافیت ماده‌ی نرم‌تری نسبت به آلومینیم است، طبیعی است که با افزایش درصد آن سختی کامپوزیت کاهش یابد. در ضمن سختی کامپوزیت‌های Al-2.5%Gr و Al-1.5%Gr از آلومینیم خالص بیش‌تر بوده که ناشی از بهبود خواص مکانیکی آن است.



شکل ۱۱ - نمودار سختی کامپوزیت Al-Gr با

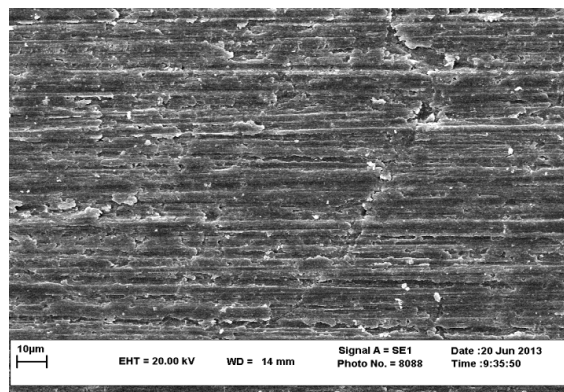
درصدهای مختلف گرافیت تولید شده به روش همگن سازی در مایع و پرس سرد و تفجوشی در کوره خلأ

همان گونه که مشاهده شد، افزودن گرافیت تا مقادیر تقریباً ۲/۵ درصد وزنی و کم‌تر از آن به ذرات پودر آلومینیم، باعث ایجاد یک ساختار شبکه‌ای در محل سختی سنجی شده و مقدار سختی را در این نمونه‌ها افزایش می‌دهد؛ اما با افزایش درصد وزنی گرافیت، سبب به هم چسبیدن و آگلومره شدن آن‌ها شده که در نهایت افت سختی را در این نمونه‌ها به دنبال دارد.

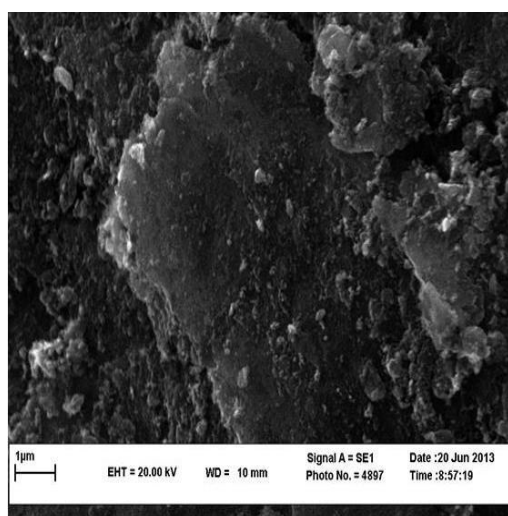
### نتیجه گیری

۱- با استفاده از همگن سازی ذرات گرافیت در مایع و روش متالورژی پودر می‌توان یکنواختی بیش‌تری را در توزیع گرافیت ایجاد نمود که این موجب افزایش و بهبود خواص مکانیکی می‌شود.

۲- با افزایش درصد گرافیت تا درصد بهینه (۲/۵)



شکل ۹ - تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تهیه شده از سطح سایش Al-1.5%Gr



شکل ۱۰ - تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از تجمع گرافیت در قسمت‌های کنده شده از سطح سایش نمونه‌ی Al-4.5%Gr

### آزمون سختی سنجی

در روش همگن سازی در مایع پرس سرد-تفجوشی در کوره، سختی نمونه‌ها اندازه گیری و نتایج حاصل در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

همان گونه که طبق داده‌های شکل ۱۱ مشاهده شد، در این روش نیز با افزایش درصد گرافیت، سختی کامپوزیت ابتدا تا یک درصد بهینه‌ای افزایش و سپس کاهش می‌یابد. دلیل آن این است که چون توزیع گرافیت در زمینه آلومینیم تا ۲/۵ درصد در این روش به طور یکنواخت و همگن و بدون کلوخه شدن انجام می‌شود و



افزایش خواص مکانیکی می شود .

۵- روش همگن سازی در مایع برای اختلاط، بیشترین بازدهی را نسبت به سایر روش‌های قطعات متالورژی پودر دارد.

۶- میزان نرخ سایش نیز با افزایش درصد گرافیت تا درصد بهینه (۲/۵ درصد)، کاهش یافت. برای حالتی که مقدار بیش‌تر از درصد بهینه است، عکس این روند رخ داد.

درصد)، میزان سختی (نسبت به آلومینیم خالص) افزایش یافت. برای حالتی که مقدار بیش‌تر از درصد بهینه (۳/۵ و ۴/۵ درصد گرافیت) است، عکس این روند رخ داد.

۳- با افزایش درصد گرافیت بیش از درصد بهینه، بزرگتر شدن توده‌های کروی گرافیتی مشاهده می‌شود که به عنوان محل‌های تمرکز تنش، باعث کاهش خواص مکانیکی می‌شوند.

۴- در مقایسه با روش‌های دیگر، در این روش حذف عیوب ریخته‌گری از جمله جدایش اتفاق می‌افتد و نسبت به روش آسیاکاری نیز افزایش یکنواختی در توزیع گرافیت در زمینه مشاهده می‌شود که سبب

Metallurgical and Mater. Trans., Vol 22A, pp. 1435-1441, 1991.

6-J. B. Yang, C. B. Lin, , T.C. Wang, H. Y. Chu, "The tribological characteristics of A356.2 Al alloy/Gr(p) composites", Wear, Vol. 257, pp. 941-952, 2004.

7-I.A. Ibrahim, F. A. Mohamed, E. J. Lavernia, "Particulate reinforced metal matrix composites-a review", Journal of Materials Science, Vol. 26, pp. 1137-1156, 1991.

8-H. Liu, , P. K. Rohatgi, "Tribological characteristics of aluminum-50 vol pct graphite composite", Metallurgical Trans. A22, pp. 151-159, 1993.

9- U. T. S. Pillai, B. C. Pal, K. G. Satyanarayana, A. D. Damodaran, "Fracture behaviour of pressure die-cast aluminium-graphite composites", J. of mater. Sci., Vol. 30, pp. 1455-1461, 1995.

10-K. Parasad, S. Das, "The significance of the matrix microstructure on the solid lubrication characteristics of graphite in aluminium alloys", Mater. Sci. Eng., Vol. 144A, pp. 229-235, 1991.

### References:

1- J. F. Lin, M. G. Shih, Y. W. Chen, "The tribological performance of 6061 aluminium materials in oil lubricants with EP additives", Wear, Vol. 198, pp. 58-70, 1996.

2- P. K. Rohatgi, Y. Liu, M. Yin, Ti. Barr, "A surface-analytical study of tribodeformed aluminum alloy 319-10% Vol graphite particle composite", Mater. Sci. and Eng., Vol. A123, pp. 213-218, 1990.

3-S. Basavara Jappa, G. Chandramohan, J. Paul Davim, "Application of Taguchi techniques to study dry sliding wear behavior of metal matrix composites" Materials and Design, Vol. 28, pp. 1393-1398, 2006.

4-S. Das, S. V. Parasad, T. R. Ramachandran, "Tribology of Al-Si alloy - graphite composites: triboinduced graphite films and the role of silicon morphology", Mater. Sci. and Eng. A, Vol. 138, pp. 123-132, 1991.

5-P. K. Rohatgi, Y. Liu, Ti. Barr, "Tribological behavior and surface analysis of tribodeformed Al alloy-50 pct graphite particle composites",

- 11-J. N. Wei, H. F. Cheng, Y. F. Zhang, F. S. Han, Z. C. Zhou, J. P. Shui, "Effects of macroscopic graphite particulates on the damping behavior of commercially pure aluminum", *Mater. Sci. and Eng.*, Vol. 325A, pp. 444-453, 2002.
- 12-A. K. Jha, S. V. Prasad, G. S. Upadhyaya, "Preparation and properties of 6061 aluminium alloy/graphite composites by PM route", *Powder Metallurgy*, Vol. 32, pp. 309-313, 1989.
- 13-S. Biswas, U. Srinivasa, S. Seshan, P. K. Rohatgi, "Cast aluminum-graphite composites for industrial applications", *AFS Transactions*, Vol. 88, pp. 159-166, 1980.
- 14-J. M. Torralba, A. E. Costa, F. Velasco, "PM aluminum matrix composites: an overview", *J. of Mater. Processing Tech.*, Vol. 133, pp. 203-206, 2003.
- 15-F.H. Latief, El-Sayed M. Sherif, "Effects of sintering temperature and graphite addition on the mechanical properties of aluminum", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, pp. 2129-2134, 2012.
- 16-M.I. Flores-Zamora, I. Estrada-Guel, J. Gonzalez-Hernandez, M. Miki-Yoshida, R. Martinez-Sanchez, "Aluminum-graphite composite produced by mechanical milling and hot extrusion", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 434-435, pp. 518-521, 2007.
- 17-M. L. Ted Guo, C. Y. A. Tsao, "Tribological behavior of self-lubricating Aluminum/SiC/Graphite hybrid composites synthesized by the semi-solid powder densification method", *Comp. Sci. and Tech.*, Vol. 60(1), pp. 65-74, 2000.
- 18-H. Chu, K. Liu, J. Yeh, "An insitu composite of Al (graphite, Al4C3) produced by reciprocating extrusion", *Mater. Sci. and Eng.*, Vol. A277, pp. 25-32, 2000.
- 19-I. Estrada-Guel, C. Carreno-Gallardo, D.C. Mendoza-Ruiz, M. Miki-Yoshida, E. Rocha-Rangel, R. Martinez-Sanchez, "Graphite nanoparticle dispersion in 7075 aluminum alloy by means of mechanical alloying", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 483(1-2), pp. 173-177, 2009.
- 20-C. B. Lin, R. J. Chang, W. P. Wang, "A study on process and tribological behavior of Al alloy /Gr(p) composite", *Wear*, Vol. 217, pp. 167-174, 1998.
- 21- M. Gupta, S. C. Lim, W. B. Ng, "Processing, microstructure, and mechanical properties of (Al-Cu)/Cu composites synthesized using partial liquid phase casting process", *Mater. Sci. and Tech.*, Vol. 13, pp. 584-589, 1997.
- ۲۲- ر. تفریشی، ا. باباخانی، "بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیوم گرافیت تولید شده به روش متالورژی پودر"، سومین همایش مشترک مهندسان متالورژی ایران، ۱۳۸۸.
- 23-Sh. Daneshvar, F. Khoramshahi, D. Khademi, H. Yavari Mehrabani, A. Babakhani, "Fabrication of Aluminum-Graphite Composites by SPS Method", *The 3rd International Conference on Composites: Characterization, Fabrication and Application (CCFA-3)*, Tehran, Iran, 2012.
- ۲۴- ع. یزدانی، "تولید کامپوزیت های نانوساختار آلومینیوم-کاربید بور به روش اتصال تجمعی نورد"، نشریه مواد نوین، دوره اول، شماره ۳، ص. ۲۳-۳۲، بهار ۱۳۹۰.