

# مقایسه خواص سایشی کامپوزیت آلومینیم-گرافیت همگن شده در مایع و تولید شده با روش تفجوشی پلاسمایی و بدست آوردن درصد بهینه

حسین پاکدل نوقابی، سید عبدالکریم سجادی و ابوالفضل باباخانی

گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

( دریافت مقاله ۹۴/۰۳/۰۲ - پذیرش مقاله : ۹۴/۰۸/۰۳ )

## 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. سپس 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. سپس از پودر های خشک شده حاصل به روش تفجوشی پلاسمایی (SPS) تحت فشار و دما و زمان های مختلف نمونه های کامپوزیتی تولید شد. به منظور بررسی ریزساختار، نمونه های حاصل به وسیله میکروسکوپ نوری و SEM بررسی شدند. همچنین به منظور بررسی خواص مکانیکی، نمونه ها تحت آزمون های سختی سنجی (برینل) و سایش قرار گرفتند. با توجه به مشاهدات، توزیع ذرات گرافیت در زمینه آلومینیم در این روش نسبت به روش های دیگر بهبود چشم گیری را نشان داد که همین امر باعث بهبود خواص مکانیکی شده است. همچنین افزودن گرافیت تا سه درصد وزنی بطور بسیار یکنواخت در زمینه و بدون کلوخه شدن رخ داد. درحالی که درصد بهینه توزیع گرافیت برای این کامپوزیت با سایر روش های اختلاط حداکثر یک درصد بوده است. با توجه به نتایج آزمون سایش، میزان مقاومت به سایش به دست آمده از این روش اختلاط، نسبت به سایر روش های تولید این کامپوزیت افزایش داشت. همچنین در نمونه با درصد بهینه (سه درصد گرافیت)، دارای افزایش سختی تا ۷۰ درصد و کاهش نرخ سایش تا ۵۵ درصد نسبت به آلومینیم خالص بود.

واژه های کلیدی: کامپوزیت Al/Gr، همگن سازی در مایع، تفجوشی پلاسمایی، خواص سایشی، سختی.

## Wear Properties of Al-Gr Composites Produced Using Liquid Homogenization Followed by spark plasma sintering (SPS)

H. Pakdel Noghabi, S. A. Sajjadi and A. Babakhani

Department of Materials Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

(Received 23 May 2015, accepted 25 October 2015)

### Abstract

To produce aluminum-matrix composite reinforced with graphite particles, mixing of pure aluminum and graphite powders by a new method, called homogenization in liquid phase, was used. In this procedure at first different amounts of graphite from zero to 4.5wt.% were poured into acetone, and mixed by ultrasonic. Aluminum powder was added to the solution and sonication was continued. Then the filtered mixture was dried in vacuum atmosphere at optimized temperature and time. Composite samples were produced using the mixed powder by way spark plasma sintering (SPS) under different pressure, temperature and time. The specimen microstructures were investigated by optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM). To evaluate the mechanical properties of samples, hardness and wear tests were performed. According to the results, homogenization in liquid phase method caused significant improvement in distribution of graphite particles in the matrix and the addition of 3wt.% graphite in the matrix was gained. Improved mechanical properties were obtained at 3wt.% graphite. According to the results, SPS process decreased the wear rate of Al-3wt.% Gr composite up to 55%, compared to the pure aluminum.

**Keywords:** Aluminum-matrix composite; Graphite; liquid phase homogenization; SPS; Wear properties, hardness.

**E-mail of corresponding author:** pakdellnoghabi.hossein@stu.um.ac.

## مقدمه

شناخته شده ترین کامپوزیت زمینه فلزی، کامپوزیت با زمینه AI می باشد ولیکن 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 حقیقت، انتظار می رود که گرافیت در آلیاژهای آلومینیم باعث توسعه عملکرد سایشی و اصطکاکی شود. این رفتار بنیادین اهمیت زیادی در صنعت دارد. علاوه بر این، افزایش ذرات گرافیت در آلیاژ آلومینیم باعث 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 ۸]، 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، نیاز به توسعه مواد جدید را برای عملکردهای سایشی و ضد اصطکاکی بهتر در قطعاتی مانند پیستون و شافت های انتقال نیرو باعث شده است. برای مثال، برای کاربردهای سایشی، کامپوزیت آلومینیم-گرافیت باعث کاهش هزینه و وزن شده و دارای مزیت خود روغن کاری 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] ولی گاهی اوقات باعث 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]. ولی تحقیقاتی نیز انجام گرفت که در آنها 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]. همچنین 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 باعث افت خواص مکانیکی می شود. پس تا زمانی که ذرات تقویت کننده در زمینه بطور یکنواخت توزیع شود و کلوخه شدن رخ ندهد، خواص مکانیکی افت نمی کند.

یکی از روش های تفجوشی در متالورژی پودر روش تفجوشی پلاسمایی (SPS) است. در روش SPS، مخلوط پودر آلومینیم - گرافیت درون قالب استوانه ای شکل ریخته می شود و با اعمال همزمان فشار و جریان الکتریکی و ایجاد جرقه بین ذرات، تفجوشی پودرها انجام می شود. این روش در مقایسه با روش فشردن گرم در مدت کوتاه تر و دمای پایین تر انجام می شود و بازدهی

کامپوزیت موثر باشند از جمله: زمان آلتراسونیک کردن مخلوط پودر، فرکانس آلتراسونیک کردن، شرایط اتمسفری خشک نمودن پودر، شرایط فشرده‌سازی پودر، شرایط تف‌جوشی از قبیل: جریان و شرایط اتمسفری و زمان، اندازه ذرات تقویت‌کننده و پودر آلومینیوم، و خلوص پودر آلومینیوم و پودر گرافیت مورد استفاده.

#### مواد و روش تحقیق

در این آزمایش از پودر آلومینیوم با خلوص بالا (۹۹/۹٪) با حداکثر اندازه دانه  $45 \mu\text{m}$  به عنوان زمینه کامپوزیت و پودر گرافیت با استاندارد UF4 (با اندازه  $10 \mu\text{m}$ ) به عنوان ماده تقویت‌کننده استفاده شد. پودر آلومینیوم محصول merck آلمان بود و پودر گرافیت نیز از کارخانه متالورژی پودر مشهد تهیه گردید. از استون نیز به عنوان ماده همگن‌کننده در فاز مایع در طی مراحل آماده‌سازی استفاده شد.

#### روش انجام آزمایش

ابتدا مقدار مورد نیاز گرافیت و آلومینیوم برای تولید کامپوزیت با درصد‌های گرافیت صفر و  $1/5$ ،  $2/5$ ،  $3/5$ ،  $4/5$  درصد وزنی توزین و بعد گرافیت‌های مربوط به هر نوع کامپوزیت در بشرهای جداگانه در استون ریخته شد و به مدت  $1 \text{ h}$  در دستگاه آلتراسونیک قرار گرفت. سپس پودر آلومینیوم به محلول حاصل از مرحله قبل به آهستگی اضافه شد و دوباره به مدت  $4 \text{ h}$  در دستگاه آلتراسونیک قرار گرفت. آنگاه مخلوط حاصل فیلتر شد و در دمای  $90^\circ\text{C}$  و اتمسفر خلأ در دستگاه آون به مدت  $6$  ساعت خشک گردید. سپس عملیات پرس و تف‌جوشی پودر مخلوط خشک شده حاصل به روش SPS انجام شد. در روش SPS ابتدا پودر خشک شده حاصل در یک قالب استوانه‌ای گرافیتی با قطر خارجی  $20 \text{ mm}$ ، قطر داخلی  $16 \text{ mm}$  و ارتفاع  $25 \text{ mm}$  با فشار مناسب ( $1 \text{ MPa}$  و  $28 \text{ MPa}$ ) و  $38/5 \text{ MPa}$  و  $45/5 \text{ MPa}$ ) فشرده شدند، و سپس تف‌جوشی به روش SPS در دمای  $590^\circ\text{C}$  و شرایط

این روش بسیار بالاست، زیرا انواع مکانیزم‌های گرمایش مختلف (پلاسمایی و ژولی) با تغییر شکل پلاستیک به طور همزمان انجام می‌شود و بنابراین، پیوند بین ذرات تف‌جوشی شده آن قوی‌تر خواهد شد. همچنین از آنجایی که فقط لایه‌های سطحی ذرات پودر در این روش گرم می‌شوند، (دمای میانگین توده‌ی پودر نسبتاً پایین می‌باشد)، باعث خالص‌سازی و فعال‌سازی بهتر سطح ذرات پودر (تبخیر آلودگی‌های از پیش موجود در سطح ذرات پودر) نیز می‌شود. همچنین نرخ گرمایش در این روش بالاست و زمان فرآیند بسیار کم است.

در تحقیق حاضر، از یک روش جدید با نام روش همگن‌سازی در مایع که برای اولین بار توسط این گروه تحقیقاتی در دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد ابداع شده، برای اختلاط و تولید مخلوط پودری Al/Gr استفاده شده است. روش همگن‌سازی در مایع، که آماده‌سازی پودر توسط همگن و یکنواخت کردن اجزا کامپوزیت در یک محلول آبی و به کمک دستگاه آلتراسونیک انجام می‌شود، برای تولید کامپوزیت به روش متالورژی پودر استفاده شده است. با استفاده از روش همگن‌سازی در مایع امکان توزیع یکنواخت ذرات ریز وجود دارد. بنابراین، این روش یک فرآیند کارآمد برای ارتقاء تولید مواد توسط متالورژی پودر است. مقدار استحکام‌بخشی توسط ذرات ریز، وابسته به نوع ذرات، اندازه، مورفولوژی، کسر حجمی و توزیع آنها دارد.

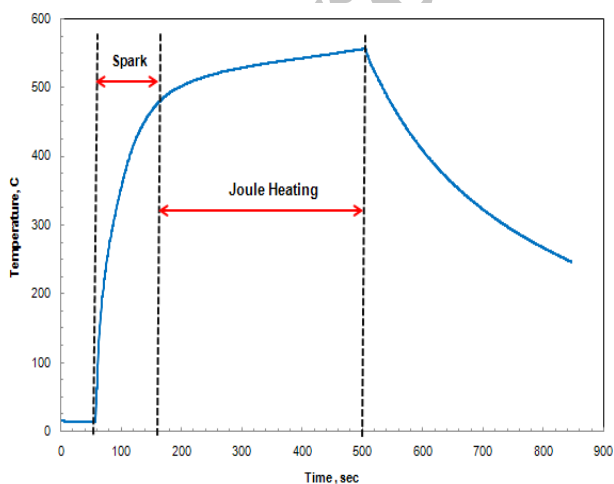
موضوع این تحقیق، بررسی خواص سایشی و سختی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم که توسط ذرات گرافیت تقویت‌شده است می‌باشد. پودرهای اولیه مورد نیاز به روش همگن‌سازی در مایع تهیه شده است و تولید آن به روش SPS انجام شده است. همچنین به بررسی تاثیر درصد وزنی گرافیت روی مقاومت به سایش پرداخته شده است. اگرچه در این تحقیق تنها تاثیر مقدار ذرات افزودنی و فشار و دما و زمان بررسی شده است ولی عوامل و پارامترهای دیگری نیز می‌توانند روی خواص مکانیکی

(m) گزارش شد. برای مطالعه سطح ساییده شده از میکروسکوپ نوری و SEM استفاده شد. سپس سختی نمونه‌ها به وسیله سختی‌سنجی برینل (HB) با بار ۵ kgf از میانگین ۵ اندازه‌گیری برای هر نمونه تعیین گردید.

## نتایج و بحث

### تغییرات دما بر حسب زمان

شکل ۱ تغییرات دما بر حسب زمان را در حین تف‌جوشی پودر آلومینوم-گرافیت به وسیله SPS نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود به محض اعمال جریان الکتریکی دما به شدت افزایش می‌یابد. ابتدا شیب نمودار دما-زمان بسیار تند است که علت آن به خاطر ایجاد جرقه‌هایی در فضای بین ذرات پودر است که باعث ایجاد مناطق نقطه‌ای با دمای خیلی بالا بر روی سطح ذرات پودر می‌شوند که در نهایت منجر به ایجاد گلوبی در بین ذرات پودر شده و پس از آن جریان الکتریکی مستقیم پالسی از ذره‌ای به ذره‌ی دیگر از طریق گلوبی اتصال دهنده‌ی آن‌ها جریان می‌یابد. در این مرحله گرمایش ژولی به واسطه مقاومت الکتریکی پودر ذکر شده انجام می‌گیرد که باعث کاهش شیب نمودار نسبت به حالت قبل می‌شود.



شکل ۱. تغییرات دما بر حسب زمان را در حین تف‌جوشی پودر

آلومینیم-گرافیت بوسیله SPS

اتمسفری خلأ ( $10^{-2}$ Torr) و به مدت زمان مناسب (۳۹۰ ثانیه) و با جریان الکتریکی مستقیم پالسی با چگالی  $7 \text{ A/mm}^2$  انجام شد. آنگاه در شرایط خلأ نمونه‌ها سرد شدند. یکی از مهمترین ویژگی‌های SPS سرعت گرمایش بسیار بالای این روش نسبت به روش‌های معمولی تف‌جوشی است. بررسی تغییرات دما در حین تف‌جوشی با قرار دادن ترموکوپل در جداره قالب گرافیتی اندازه‌گیری شد. پس از تف‌جوشی پودرهای مورد نظر، جریان الکتریکی قطع شده و نمونه به صورت طبیعی در محیط خلأ سرد شد. در نهایت نمونه‌های استوانه‌ای شکل با قطر ۶ mm و طول ۱۰ mm تولید شدند.

نمونه‌های حاصل را ابتدا تحت بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و SEM قرار دادیم. 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 (حداقل ۳ بار) انجام شد.

در حین انجام تست، 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 cm 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 از ۵۰m تا ۱۴۰۰m (هر ۵۰m)، با بار عمودی ۵ نیوتن برای نمونه‌های با درصد‌های وزنی مختلف از گرافیت (صفر و ۱/۵ و ۳ و ۴/۵) تولید شده در فشار ۲۸ MPa و زمان تف‌جوشی شده به مدت ۳۹۰ ثانیه انجام شد. تغییرات جرمی نمونه‌های ساییده شده در مسافت‌های مختلف (پس از طی هر ۵۰m) توسط ترازوی حساس الکتریکی دیجیتال با دقت  $0.001 \text{ gr}$  اندازه‌گیری و ثبت شد. همچنین پس از طی هر ۵۰m سنباده تعویض شد. نرخ سایشی به صورت وزن کاهش‌یافته نمونه‌ها (gr) برحسب مسافت طی شده

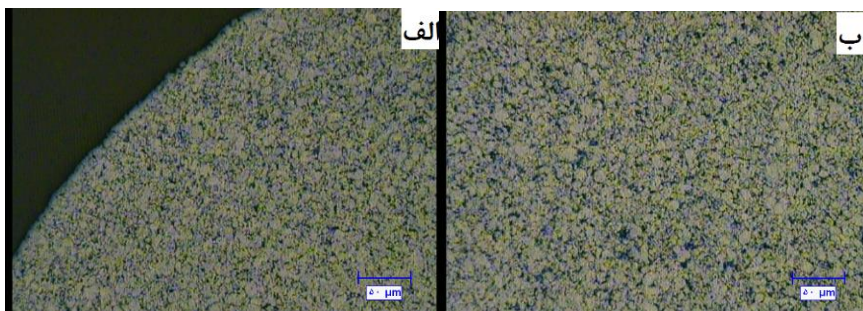
### بررسی ریزساختار

طبق تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ نوری و SEM (اشکال ۲ و ۳ و ۴ و ۵)، گرافیت در زمینه به دو صورت مشاهده می شود. نوع اول گرافیت ها به صورت توده های بسیار ریز (ترجیحاً کروی) در بخش هایی از زمینه به صورت همگن با توزیع یکسان قرار دارند، و نوع دوم گرافیت ها به صورت لایه های نازک کشیده شده بسیار کوتاه در زمینه دیده می شوند. در حالیکه گزارش شده است وقتی اختلاط با استفاده از روش آسیاکاری و پرس گرم در فشار ۴۵۰ MPa و تف جوشی در کوره در دمای ۶۵۰ °C انجام شده است، گرافیت ها به صورت لایه های کشیده و کلوخه های بزرگ در روی زمینه دیده می شوند [۲۲]. گرافیت توده ای هرچه بزرگتر و توزیع آن ناهمگن تر باشد، باعث بوجود آمدن محل های تمرکز تنش در ساختار می شود و همین امر موجب کاهش خواص مکانیکی می گردد. در نمونه هایی که آماده سازی پودر و اختلاط آن توسط آسیاکاری و تف جوشی توسط SPS انجام شد، نیز گرافیت به صورت کاملاً همگن و یکنواخت نبود و توده های گرافیت بزرگی وجود داشت که توزیع یکنواختی نداشتند و به صورت پراکنده در نقاط مختلف زمینه قرار داشتند [۲۳]. این توده های گرافیتی با افزایش درصد گرافیت بیشتر می شدند. طبق مشاهدات می توان بیان نمود که با افزایش درصد گرافیت، تا یک اندازه ی بهینه ای (تا سه درصد گرافیت) افزودن گرافیت در این روش موجب کلوخه شدن نخواهد شد و یکنواختی توزیع خود را حفظ می کند. ولی بعد از این درصد بهینه با افزودن گرافیت کمی از یکنواختی کاهش می یابد اما در عین حال باز هم یکنواختی و همگن بودن آن نسبت به نمونه های مشابه تولید شده با روش های دیگر بیشتر است. همچنین مقدار این درصد بهینه گرافیت (آلومینیوم با سه درصد گرافیت) بسیار بیشتر از درصد بهینه گرافیت برای کامپوزیت های مشابه تولید شده با روش های جدید دیگر، که تلاش شده است به توزیع همگن دست یابد، است

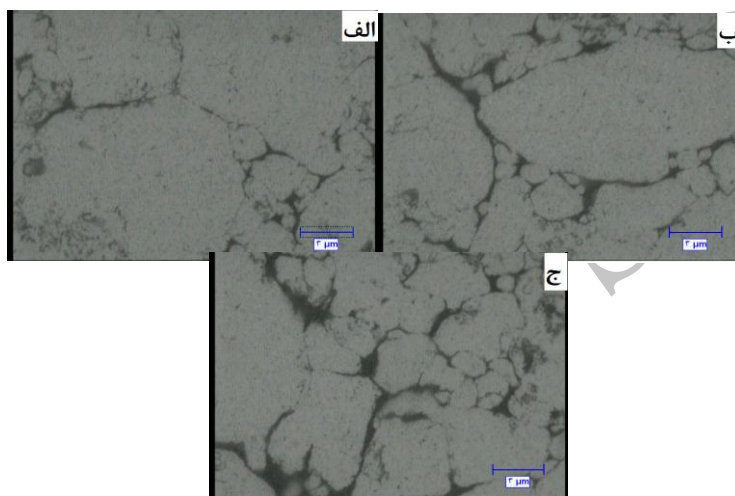
(حداکثر درصد بهینه در سایر روش ها یک بوده است). این توزیع یکنواخت تر و کوچک تر بودن توده های گرافیتی روی بهبود خواص مکانیکی و خوردگی تأثیر زیادی دارد که نتیجه این امر از نتایج آزمون های مکانیکی به وضوح مشاهده می شود. بعد از درصد بهینه، هر چه میزان و اندازه گرافیت های توده ای افزایش داشته باشد، هر چند که توزیع آن ها در زمینه یکنواخت باشد، می تواند باعث کاهش در خواص مکانیکی شود. مقایسه دو روش اختلاط ذرات گرافیت در آلومینیوم نشان می دهد که گرافیت های لایه ای در روش اختلاط با استفاده از روش آسیاکاری و پرس گرم در فشار ۴۵۰ MPa و تف جوشی در کوره در دمای ۶۵۰ °C طول بیشتری نسبت به روش همگن سازی در مایع دارند و تقریباً خطوط گرافیت به صورت موازی و ممتد می باشند [۲۲]. ولی در روش همگن سازی در مایع خطوط گرافیت لایه ای منقطع و بسیار کوتاه تر و نازک تر هستند که همین امر موجب بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت می شود. همچنین مشخص شد که با افزایش درصد گرافیت ضخامت لایه های گرافیتی افزایش یافته اند. ضمناً به این نکته توجه شود که در روش SPS یک نوع تلاطم و جنبش ذرات به وجود می آید که در همگن سازی به مقدار کم مؤثر است. زیرا در نمونه های آسیاکاری-SPS شده [۲۳]، همگن سازی یکنواخت و خوبی نسبت به نمونه هایی که به روش همگن شده در فاز مایع-SPS است، ندارد.



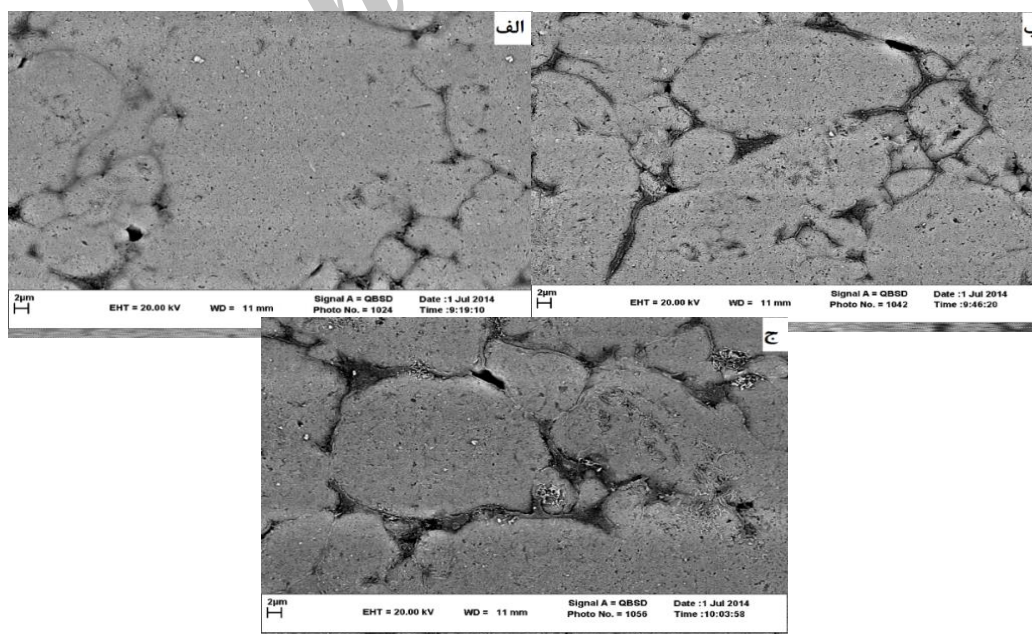
شکل ۲. تصویر OM کامپوزیت Al - 1.5 % Gr تولید شده به روش همگن شده در مایع-SPS.



شکل ۳. الف-تصویر OM کامپوزیت Al - 3% Gr ب- تصویر OM کامپوزیت Al - 4.5% Gr (به روش همگن‌شده در مایع-SPS).



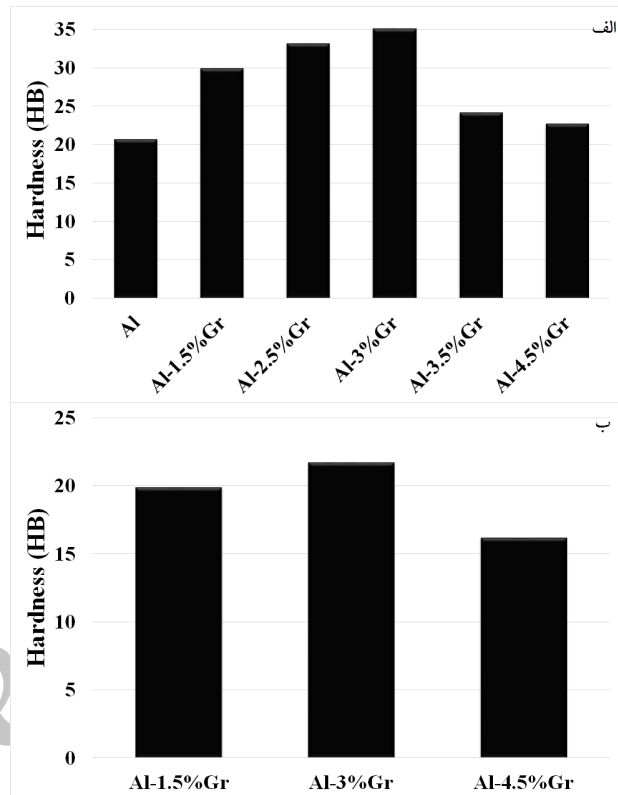
شکل ۴. تصویر OM کامپوزیت‌های الف- Al - 1.5 % Gr ب- Al - 3 % Gr ج- Al - 4.5% Gr تولید شده به روش همگن‌شده در مایع-SPS.



شکل ۵. تصویر SEM کامپوزیت‌های الف- Al - 1.5 % Gr ب- Al - 3 % Gr ج- Al - 4.5 % Gr تولید شده به روش همگن‌شده در مایع-SPS.

### آزمون سختی سنجی

نتایج آزمون سختی سنجی نمونه‌های ساخته شده در فشار ۲۸ MPa در شکل ۶ ارائه شده است.



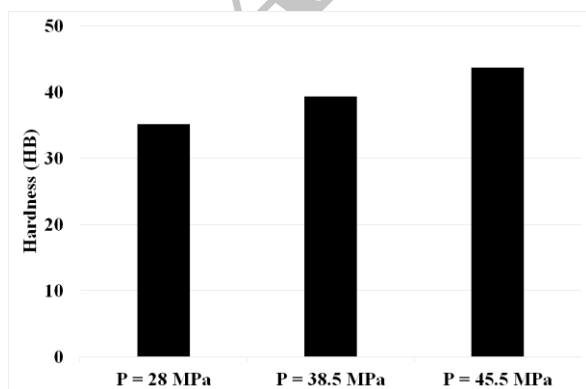
شکل ۶. الف- نمودار سختی کامپوزیت Al-Gr با درصد‌های مختلف گرافیت تولید شده به روش همگن‌سازی در فاز مایع و SPS در فشار ۲۸ MPa و ب- نمودار سختی کامپوزیت Al-Gr با درصد‌های مختلف گرافیت تولید شده به روش همگن‌سازی در فاز مایع و SPS در فشار ۱۴ MPa.

نرم‌تری نسبت به آلومینیم است، طبیعی است که با افزایش درصد آن، سختی کامپوزیت کاهش یابد. در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر فشار روی سختی، مقدار سختی نمونه‌های کامپوزیتی در فشار کمتر (MPa ۱۴) نیز بدست آمد که نتایج آن در (شکل ۶-ب) می‌باشد.

طبق داده‌های شکل ۶ مشاهده شد که سختی نمونه‌ها با کاهش فشار SPS نیز همین روند قبل را دارد اما مقدارش نسبت به نمونه‌های با فشار بیشتر، کمتر است که این بدیهی است زیرا در قطعات متالورژی پودر، با افزایش فشار پرس، سختی و استحکام و خواص مکانیکی نمونه‌ها افزایش می‌یابد.

همانگونه که مشاهده شد افزودن گرافیت تا مقادیر تقریباً ۳ درصد وزنی و کمتر از آن به ذرات پودر آلومینیم باعث ایجاد یک ساختار شبکه‌ای در محل سختی‌سنجی شده و مقدار سختی را در این نمونه‌ها افزایش می‌دهد. ولی با افزایش درصد وزنی گرافیت باعث به هم‌چسبیدن و آگلومره‌شدن آن‌ها شده که در نهایت افت سختی را در این نمونه‌ها بدنبال دارد.

شکل ۷، نمودار سختی نمونه‌های کامپوزیتی Al-3%Gr تولیدشده به روش همگن‌سازی در فاز مایع و SPS در فشارهای مختلف را نشان می‌دهد که همان نتایج قبل را داشت. یعنی با افزایش فشار SPS، سختی افزایش یافت.



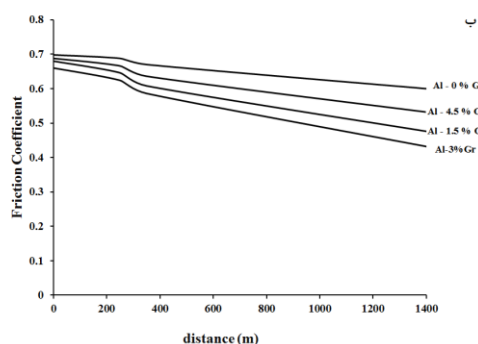
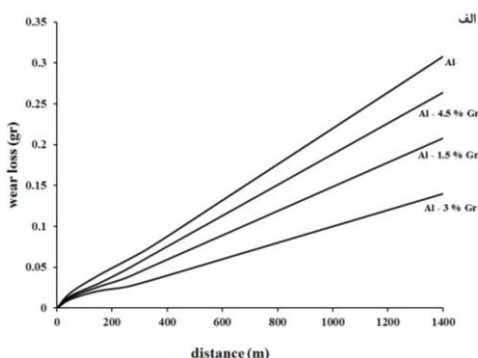
شکل ۷. نمودار سختی نمونه‌های کامپوزیتی Al-3%Gr تولیدشده به روش همگن‌سازی در فاز مایع و SPS در فشارهای مختلف.

طبق داده‌های نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش درصد گرافیت، سختی کامپوزیت ابتدا تا یک درصد بهینه‌ای افزایش و سپس کاهش می‌یابد. علت آن این است که چون توزیع گرافیت در زمینه آلومینیم تا سه درصد در فشار ۲۸ MPa به طور یکنواخت و همگن و بدون کلوخه شدن انجام می‌شود، باعث بهبود خواص مکانیکی شده و سختی رو به افزایش است. با افزایش درصد گرافیت بیش از مقدار بهینه، تجمعات تقریباً کروی گرافیت و کلوخه شدن آن روبه رشد است و از آنجایی که گرافیت ماده ی

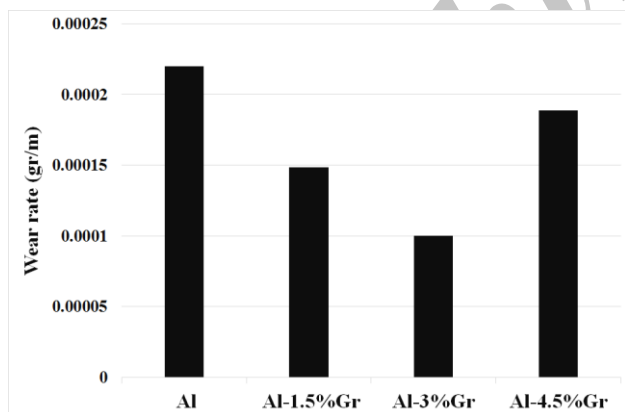
آزمون سایش

شکل ۸ چگونگی تغییرات وزن و ضریب اصطکاک نمونه‌های خالص کامپوزیتی با درصدهای وزنی مختلف از گرافیت (۱/۵ و ۳ و ۴/۵) تولید شده در فشار ۲۸ MPa و تفجوشی شده به مدت زمان ۳۹۰ ثانیه در مسافت‌های مختلف را نشان داده است. همانطور که مشاهده شد در نمونه‌های کامپوزیتی مقاومت به سایش نسبت به نمونه آلومینیم خالص افزایش یافته است که علت آن توزیع یکنواخت گرافیت در بین ذرات آلومینیم است که بواسطه 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. همانطور که ذکر شد در کامپوزیت‌ها بواسطه توزیع مناسب گرافیت‌ها، پیوند خوبی بین زمینه و تقویت‌کننده 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 جوانه زنی 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 شوند 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 ۹ اثر میزان گرافیت را بر روی نرخ سایش نشان می‌دهد.

در این تحقیق نرخ سایش به صورت میزان وزن کاهش یافته (gr) بر مسافت طی شده (m) تعریف شده است. این پارامتر برای نمونه‌های مختلف با بار اعمالی



شکل ۸ الف- نمودار سایش و ب- ضریب اصطکاک: کامپوزیت Al-Gr با درصدهای مختلف گرافیت و آلومینیم خالص تولید شده به روش همگن سازی در فاز مایع و SPS در فشار ۲۸ MPa.



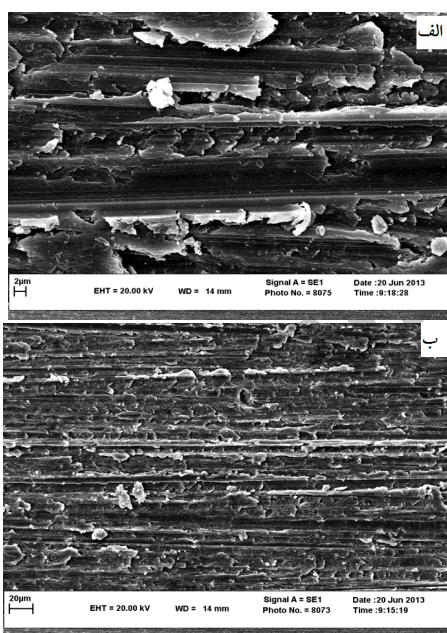
شکل ۹. نمودار نرخ سایش کامپوزیت Al-Gr با درصدهای مختلف گرافیت و آلومینیم خالص تولید شده به روش همگن سازی در فاز مایع و SPS در فشار ۲۸ MPa.

در شکل ۹ (۵ N) رسم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد گرافیت تا یک مقدار بهینه (۳ درصد) افزایش مقاومت به سایش اتفاق می‌افتد که این امر به



سرانجام تعدادی از لایه‌ها از بین رفته و از سطح سایش کنده می‌شوند. در مقابل کامپوزیت حاوی ۱/۵ تا ۳ درصد وزنی گرافیت، مقاومت بیشتری نسبت به تنش برشی در مقایسه با فلز خالص آلومینیوم دارد، اگر چه در اینجا هم نیروهای اصطکاکی ایجاد می‌شود ولی از آنجایی که اتصال گرافیت‌ها و زمینه قوی می‌باشد به راحتی کنده نمی‌شوند.

اشکال ۱۰، ۱۱ و ۱۲ 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 ساییده، بیشتر سیلان مواد به اطراف خطوط سایش وجود داشته باشد.



شکل ۱۰. الف و ب - تصاویر تهیه شده از سطح سایش یافته آلومینیوم خالص با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM).

پس از انجام تست سایش با مشاهده ی مقاطع سایش یافته در زیر میکروسکوپ مشاهده گردید که خطوط سایش یافته با رسیدن به توده های گرافیتی پایان یا کاهش یافته اند و توده ها از امتداد خطوط سایش جلوگیری کرده اند. با توجه به آن می

وضوح در شکل بالا مشاهده می‌شود. علت آن در این است که با افزایش درصد گرافیت تا درصد بهینه، باعث افزایش میزان روانکاری (روغنکاری) به دلیل افزایش میزان گرافیت با توزیع یکنواخت و همگن می‌شود و همچنین بواسطه استحکام بالایی که دارند، باعث کاهش نرخ سایش می‌شوند. ولی با افزایش میزان گرافیت بیش از مقدار بهینه باعث ایجاد تجمعات و کلوخه می‌شود و با توجه به نرم تر بودن گرافیت، باعث نرم تر شدن کامپوزیت و بیشتر شدن میزان سایش می‌شود. ولی کامپوزیت‌های تولید شده به این روش میزان سایش کمتری نسبت به نمونه آلومینیوم خالص دارد و این مزیت مدیون خاصیت روغنکاری گرافیت و توزیع یکنواخت و همگن آن توسط این روش و کوچک بودن کلوخه‌ها (در صورت داشتن آن) و همچنین بواسطه استحکام بالایی که دارند، است. نکته دیگر، هر چه سختی بیشتر و ضریب اصطکاک کمتر باشد، مقاومت به سایش بیشتر و در نتیجه نرخ سایش کمتر خواهد بود و نمونه ۳ درصد، بهترین خواص سایشی را داشت.

مشاهده می‌شود که با افزایش درصد گرافیت بیش از درصد بهینه (سه درصد گرافیت)، میزان سایش به طور قابل ملاحظه ای افزایش یافته است. بررسی‌های میکروسکوپی SEM از سطح سایش، اطلاعات ارزشمندی را در مورد مکانیزم سایش و همچنین اثر پارامترهای مختلف روی آن ارائه می‌دهند.

شکل ۱۰، تصاویر میکروسکوپ SEM تهیه شده از سطح سایش یافته نمونه‌های خالص و کامپوزیتی را نشان می‌دهد. همانطور 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 آلومینیوم نسبت به نرخ برش دارد این ترک‌ها به سرعت رشد کرده،

## نتیجه گیری

توان بیان کرد که مکانیزم سایشی میکروپیلینگ رخ داده است [۵].

(۱) با استفاده از همگن سازی ذرات گرافیت در مایع و روش متالورژی پودر می توان یکنواختی بیشتری را در توزیع گرافیت ایجاد نمود، که این موجب افزایش و بهبود خواص مکانیکی می شود.

(۲) با افزایش درصد گرافیت (۰ و ۱/۵ و ۲/۵) تا درصد بهینه (۳ درصد)، میزان سختی ۷۰ درصد (نسبت به آلومینیم خالص) افزایش یافت. برای حالت مقدار بیشتر از درصد بهینه (۳/۵ و ۴/۵ درصد گرافیت)، عکس این روند رخ داد.

(۳) با افزایش درصد گرافیت بیش از درصد بهینه، بزرگتر شدن توده های کروی گرافیتی مشاهده می شود که به عنوان محل های تمرکز تنش و باعث کاهش خواص مکانیکی می شوند.

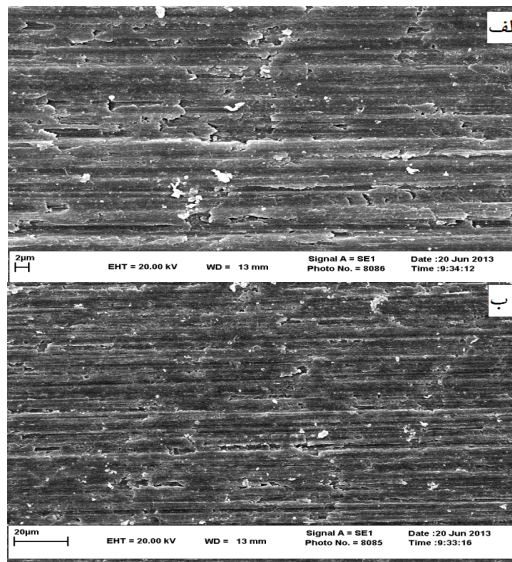
(۴) در مقایسه با روش های دیگر، در این روش حذف عیوب ریخته گری از جمله جدایش اتفاق می افتد و نسبت به روش آسیاکاری نیز افزایش یکنواختی در توزیع گرافیت در زمینه مشاهده می شود که باعث افزایش خواص مکانیکی می شود.

(۵) با افزایش فشار SPS (از ۱۴ MPa به ۲۸ MPa)، میزان سختی ۶۲ درصد افزایش پیدا کرد.

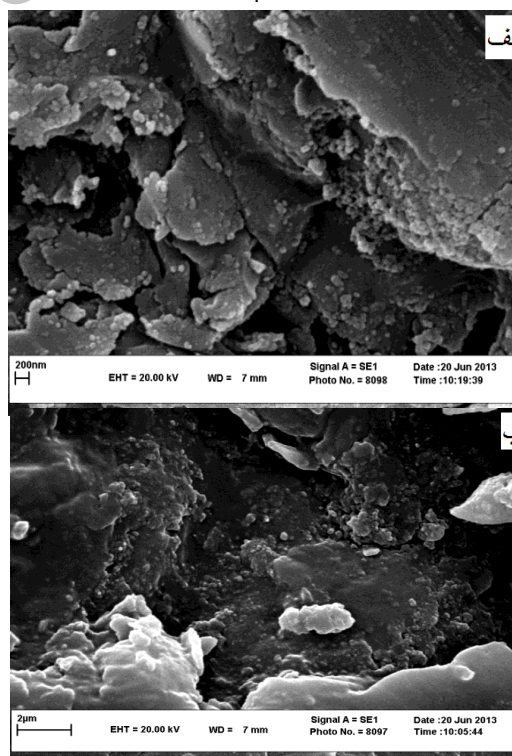
(۶) روش SPS برای تف جوشی، بیشترین بازدهی را نسبت به سایر روش های تف جوشی قطعات متالورژی پودر دارد.

(۷) میزان نرخ سایش هم با افزایش درصد گرافیت تا درصد بهینه (۳ درصد)، تا ۵۵ درصد کاهش یافت. برای حالت مقدار بیشتر از درصد بهینه، عکس این روند رخ داد.

(۸) میزان افزایش و کاهش نرخ سایش با سختی رابطه عکس دارد و درصد بهینه در هر دو یکی است.



شکل ۱۱. الف و ب- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تهیه شده از سطح سایش 1.5% Gr-I



شکل ۱۲. الف و ب- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از تجمع گرافیت در قسمت های کنده شده از سطح سایش نمونه Al-4.5% Gr.

30(1995)1455-1461.

[10] K. Parasad, S. Das, *The significance of the matrix microstructure on the solid lubrication characteristics of graphite in aluminium alloys*, Mater. Sci. Eng., 144A(1991)229-235.

[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., 325A(2002)444-453.

[12] A. K. Jha, S. V. Prasad, G. S. Upadhyaya, *Preparation and properties of 6061 aluminium alloy/graphite composites by PM route*, Powder Metallurgy, 32(1989)309-313.

[13] S. Biswas, U. Srinivasa, S. Seshan, P. K. Rohatgi, *Cast aluminum-graphite composites for industrial applications*, AFS Transactions, 88(1980)159-166.

[14] J. M. Torralba, A. E. Costa, F. Velasco, *PM aluminum matrix composites: an overview*, J. of Mater. Processing Tech., 133(2003)203-206.

[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, 18(2012)2129-2134.

[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, 434-435(2007)518-521.

[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., 60(2000)65-74.

[18] H. Chu, K. Liu, J. Yeh, *An insitu composite of Al (graphite, Al4C3) produced by reciprocating extrusion*, Mater. Sci. and Eng., A277(2000)25-32.

[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, 483(2009)173-177.

(۹) مکانیزم سایشی میکروپلینگ در این کامپوزیت رخ داده است.

(۱۰) هر چه سختی بیشتر و ضریب اصطکاک کمتر باشد، مقاومت به سایش بیشتر و در نتیجه نرخ سایش کمتر خواهد بود و نمونه ۳ درصد، بهترین خواص سایشی را داشت.

## مراجع

[1] J. F. Lin, M. G. Shih, Y. W. Chen, *The tribological performance of 6061 aluminium materials in oil lubricants with EP additives*, Wear, 198(1996)58-70.

[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., A123(1990)213-218.

[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, 28(2006)1393-1398.

[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, 138(1991)123-132.

[5] P. K. Rohatgi, Y. Liu, Ti. Barr, *Tribological behavior and surface analysis of tribodeformed Al alloy-50 pct graphite particle composites*, Metallurgical and Mater. Trans., 22A(1991)1435-1441.

[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, 257(2004)941-952.

[7] I.A. Ibrahim, F. A. Mohamed, E. J. Lavernia, *Particulate reinforced metal matrix composites-a review*, Materials Science, 26(1991)1137-1156.

[8] H. Liu, P. K. Rohatgi, *Tribological characteristics of aluminum-50 vol pct graphite composite*, Metallurgical Trans. A22(1993)151-159.

[9] U. T. S. Pillai, B. C. Pal, K. G. Satyanarayana, A. D. Damodaran, *Fracture behaviour of pressure die-cast aluminium-graphite composites*, Mater. Sci.,

[20] C. B. Lin, R. J. Chang, W. P. Wang, *A study on process and tribological behavior of Al alloy /Gr(p) composite*, *Wear*, 217(1998)167-174.

[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.*, 13(1997)584-589.

[۲۲] تفریشی رضا، باباخانی ابوالفضل، بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیم 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)22-24.

Archive of SID