

بررسی رفتار عملیات حرارتی و خواص مکانیکی کامپوزیت های Al₂O₃/Gr تولید شده با روش متالورژی پودردرجا

آرمان زارع بیدکی^۱ و فرشاد اخلاقی^{۲*}

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی متالورژی و مواد- پردیس دانشکده های فنی- دانشگاه تهران
^۲ دانشیار دانشکده مهندسی متالورژی و مواد- پردیس دانشکده های فنی- دانشگاه تهران
(تاریخ دریافت ۸۶/۳/۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۶/۱۱، تاریخ تصویب ۸۸/۷/۵)

چکیده

در این تحقیق کامپوزیت های Al₂O₃/Gr حاوی ۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی گرافیت با روش متالورژی پودردرجا تولید شدند. مخلوطهای پودری تولیدی پس از متراکم سازی و سینترینگ، در دمای ۴۹۵°C تحت عملیات محلولی قرار گرفته و سپس در دمای ۱۷۰°C تحت عملیات پیرسازی قرار گرفتند. پس از تعیین شرایط بهینه عملیات حرارتی، نمونه های کامپوزیتی حاوی درصد های مختلف گرافیت تحت تست خمش قرار گرفته و تاثیر مقدار گرافیت بر استحکام خمشی کامپوزیتهای Al₂O₃/Gr حاوی درصد های مختلف گرافیت بررسی شد. جهت بررسی توزیع گرافیت در داخل نمونه های کامپوزیتی، سطح مقطع شکست نمونه ها توسط SEM مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که ماکزیمم سختی بعد از ۵ ساعت پیرسازی در دمای ۱۷۰°C حاصل می شود و این زمان تحت تاثیر حضور گرافیت و درصد گرافیت نمی باشد. بررسی ها نشان دادند که حضور گرافیت در زمینه ای از آلیاژ آلومینیم باعث کاهش استحکام خمشی آلیاژ زمینه شده و با افزایش مقدار گرافیت، استحکام خمشی کاهش می یابد. مطالعات سطح مقطع شکست نمونه ها موید توزیع یکنواخت گرافیت در داخل نمونه های کامپوزیتی بودند.

واژه های کلیدی: کامپوزیت آلومینیم، گرافیت، روش متالورژی پودردرجا، عملیات حرارتی، توزیع گرافیت، استحکام

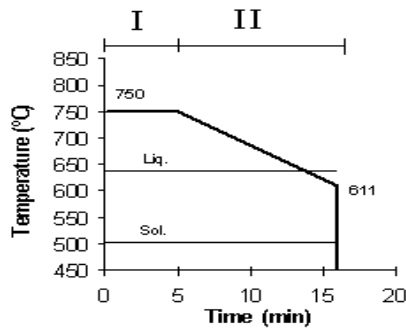
مقدمه

آلیاژ آلومینیم عموماً باعث کاهش خواص مکانیکی کامپوزیت نسبت به زمینه می شود [۱۶ و ۱]. تحقیقات انجام گرفته عموماً کاهش سختی کامپوزیت های Al/Gr را با افزایش درصد گرافیت نشان می دهند [۱۷ و ۱]. خواص کششی کامپوزیت های Al/Gr تحت تاثیر مقدار گرافیت می باشد به طوری که معمولاً با افزایش درصد گرافیت خواص کششی کامپوزیت کاهش می یابد [۹ و ۱۸]. چقرمگی شکست کامپوزیت های هیبرید Al/SiC/Gr با افزایش مقدار گرافیت کاهش می یابد [۱۶]. مطالعات انجام گرفته بر روی کامپوزیت های Al/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 [۱۷ و ۱۸ و ۱۹]. در کامپوزیت های Al-Si(LM6)-Al-Si(LM6) 3%VolGr تشکیل فیلم روانکار گرافیتی در سطح فقط در نمونه های عملیات حرارتی شده مشاهده می شود [۱۸]. در کامپوزیت های زمینه آلومینیمی حاوی فاز دوم ذره ای تسریع فرایند پیرسازی و کاهش زمان رسیدن به ماکزیمم سختی در مقایسه با آلیاژ زمینه مشاهده می شود که علت

از جمله محدودیت های آلیاژهای آلومینیم در کاربردهای تریبولوژیکی به ویژه تحت شرایط سایشی خشک، مقاومت ضعیف آنها به چسبندگی می باشد. جهت بهبود خواص تریبولوژیکی در آلیاژهای آلومینیم معمولاً از توزیع یک فاز جامد روانکار مثل گرافیت در زمینه ای از آلیاژ آلومینیم استفاده می شود [۱-۴]. کامپوزیت های Al/Gr به واسطه خاصیت خودروانکاری و خواص سایشی مطلوب به دلیل تشکیل فیلم روانکار بر سطح [۹-۴]، سبک بودن [۲ و ۴]، قابلیت ماشین کاری بهتر نسبت به زمینه [۱۰]، ضریب انبساط حرارتی کم و قابلیت جذب ارتعاش [۱۱-۱۳]، پتانسیل بالایی را برای ساخت آستر سیلندر، پیستون، یاتاقانها و کاربردهای عمومی مهندسی دارا می باشند [۱۴ و ۱].

از جمله روش های اقتصادی جهت ساخت کامپوزیت های Al/Gr روش متالورژی پودر می باشد [۱۵ و ۴]. مراحل اصلی تولید در این روش شامل مخلوط سازی، متراکم سازی و تف جوشی مخلوط پودری آلومینیم و گرافیت است [۴]. حضور گرافیت در زمینه ای از

با روش انحلال شیمیایی توسط اسیدکلریدریک ۳۶ درصد اندازه‌گیری شد [۱].



شکل ۱: سیکل مورد استفاده جهت تولید مخلوط پودری Al₂O₃·۲۴/Gr.

پودر فاقد گرافیت و مخلوط های پودری حاوی درصد های مختلف گرافیت (با اندازه ذرات کوچک تر از ۵۰۰ میکرون) تحت فشار های مختلف، در یک قالب فولادی به صورت یک طرفه با سرعت ۳۰۰ mm/min (فشار متراکم سازی شده و فشار رسیدن به حداکثر تراکم) (فشار بهینه متراکم سازی) که تابعی از محتوای گرافیت نمونه ها می باشد تعیین شد. با توجه به بررسی های انجام شده فشار بهینه برای متراکم سازی نمونه های فاقد گرافیت و حاوی ۵ درصد وزنی گرافیت برابر ۶۵۰ MPa و برای نمونه های حاوی مقادیر بیشتر گرافیت برابر ۵۹۴ MPa می باشد. نمونه هایی به قطر ۲۵ mm و ارتفاع ۱۵ mm حاوی مقادیر مختلف گرافیت (۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ درصد وزنی) تحت فشار بهینه تهیه شدند. بر اساس تحقیقات انجام گرفته در خصوص بهینه سازی رفتار سینترینگ این مواد نمونه های حاوی صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد گرافیت در دمای ۶۰۰°C به مدت ۳۰ دقیقه و نمونه حاوی ۲۰ درصد گرافیت در دمای ۶۱۰°C به مدت یک ساعت تحت اتمسفر نیتروژن سینتر شدند.

به منظور عملیات محلولی کلیه نمونه ها با سرعت ۵°C/min تحت اتمسفر نیتروژن تا دمای ۴۹۵°C گرم شده و پس از ۳ ساعت نگهداری در این دما از کوره خارج و در آب کوئنچ شدند. نمونه های کوئنچ شده در دمای ۱۷۰°C تحت اتمسفر نیتروژن توسط کوره تیوبی تحت عملیات پیرسازی قرار گرفتند [۲۳ و ۲۴ و ۲۵]. جهت تعیین زمان رسیدن به ماکزیمم سختی نمونه ها در بازه های زمانی یک ساعته از کوره خارج و سختی نمونه ها با روش برینل تحت

آن تفاوت بین ضریب انبساط حرارتی زمینه و فاز دوم و افزایش چگالی نا به جایی ها در اثر تنش های حاصل از این اختلاف می باشد [۲۱ و ۲۰].

در این تحقیق کامپوزیت های Al₂O₃·۲۴/Gr حاوی درصد های وزنی مختلف گرافیت (۲۰-۵ درصد وزنی) با روش متالورژی پودر درجا [۲۲] تولید شدند. جهت تولید این کامپوزیت ها ابتدا مخلوط پودری Al₂O₃·۲۴/Gr تولید و سپس تحت عملیات متراکم سازی و سینترینگ قرار گرفتند. نمونه های کامپوزیتی حاوی درصد های مختلف گرافیت و نمونه های فاقد گرافیت تحت عملیات محلولی و پیرسازی قرار گرفته و زمان رسیدن به پیک سختی برای این نمونه ها تعیین شد. پس از تعیین شرایط بهینه پیرسازی نمونه های حاوی درصد های مختلف گرافیت تحت تست خمش سه نقطه ای قرار گرفته و اثر حضور گرافیت بر استحکام خمشی نمونه ها بررسی گردید. سطح مقطع شکست نمونه های کامپوزیتی جهت بررسی نحوه توزیع گرافیت توسط SEM نیز مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش تحقیق

در این تحقیق کامپوزیت های Al₂O₃·۲۴/Gr حاوی درصد های وزنی مختلف گرافیت (۲۰-۵ درصد وزنی) با روش متالورژی پودر درجا [۲۲] تولید شدند. بدین منظور آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ با دمای لیکوئیدوس ۶۳۸°C و دمای سالییدوس ۵۰۲°C در بوته گرافیتی ذوب شده و پس از رسیدن به ۱۱۰°C فوق گداز، پودر گرافیت (با ماکزیمم اندازه ذرات ۱۶۰ میکرون و متوسط اندازه ذرات ۵۵ میکرون) در مقادیر مختلف ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی به مذاب اضافه می شود. سپس مخلوط حاصل مطابق سیکل دما-زمان نشان داده شده در شکل (۱)، ابتدا در مرحله I در داخل کوره به مدت ۵ دقیقه توسط همزن گرافیتی با سرعت ۴۰۰ دور بر دقیقه همزده شد سپس بوته از کوره خارج و عمل همزدن تا رسیدن دمای مخلوط به ۶۱۱°C در خارج از کوره (مرحله II) انجام می گیرد. جهت تهیه نمونه شاهد (نمونه فاقد گرافیت)، پودر آلومینیم ۲۰۲۴ با استفاده از ذرات آلومینا با ابعاد بزرگتر از ۷۰۰ میکرون و با استفاده از سیکل مذکور تهیه شد [۱۷]. درصد وزنی گرافیت در مخلوط های پودری تولید شده با درصد های مختلف گرافیت و با اندازه ذرات کوچکتر از ۵۰۰ میکرون

تغییرات سختی بر حسب زمان پیرسازی در دمای 170°C برای نمونه فاقد گرافیت و نمونه‌های کامپوزیتی حاوی درصد‌های مختلف گرافیت در شکل (۲) نشان داده شده است. در فرایند پیرسازی آلیاژهای $\text{Al}_{20}\text{Cu}_{24}$ به واسطه تشکیل فازهای نیمه پایدار از زمینه فوق اشباع سختی افزایش می‌یابد. توالی تشکیل رسوبات در این آلیاژ به این صورت است که ابتدا مناطق GP تشکیل شده و سپس با گذشت زمان فازهای θ' و θ'' و در نهایت θ با ترکیب شیمیایی Al_4Cu تشکیل می‌شود. مناطق GP به صورت همگن و به صورت یکنواخت جوانه می‌زنند و سپس فازهای واسطه تشکیل [۲۶ و ۲۷] می‌شود. با توجه به شکل (۲) مشاهده می‌شود که تغییرات درصد گرافیت تأثیری بر سینتیک پیرسختی نداشته و نمونه‌های فاقد گرافیت و با درصد‌های مختلف گرافیت پس از ۵ ساعت پیرسازی در این دما به ماکزیمم سختی رسیده‌اند. این مشاهدات بر خلاف نتایج به دست آمده در مورد برخی از کامپوزیت های زمینه آلومینیمی می‌باشد [۲۸] که وجود ذرات سرامیکی سبب تسریع فرایند پیرسازی (پیری شتاب یافته) می‌شود. دلیل این تناقضات در ارتباط با روش تهیه نمونه‌های کامپوزیتی می‌باشد. در روش های ذوبی در دوغاب کامپوزیتی ذرات سرامیکی در مجاورت مذاب قرار می‌گیرند و در هنگام انجماد فلز، به دلیل تفاوت ضریب انبساط حرارتی فاز زمینه و ذرات سرامیکی، دانسیته نابجاییها در مجاورت ذرات سرامیکی افزایش می‌یابد که این امر سبب تسریع در جوانه‌زنی فازهای رسوبی و نیز سرعت بیشتر نفوذ عناصر می‌گردد که خود سینتیک پیرسازی را تسریع می‌کند. در روش متالورژی پودر درجا به دلیل این که ذرات سرامیکی فقط در سطح ذرات پودری قرار می‌گیرند و در ضمن دمای فرایند نیز نسبتاً پایین است، لذا افزایش دانسیته نا به جایی‌ها به حد کافی نبوده و لذا پیری شتاب یافته رخ نمی‌دهد.

مقادیر ماکزیمم سختی نمونه‌های کامپوزیتی در شکل (۳) نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود با افزایش درصد گرافیت به دلیل نرم بودن این فاز، سختی نمونه‌های کامپوزیتی کاهش می‌یابد. این نتایج با گزارش های ارائه شده توسط سایر محققین مطابقت دارد [۲۹ و ۹].

در شکل (۴) نمونه ای از منحنی های خمش مربوط به نمونه های فاقد گرافیت و حاوی ۵ درصد وزنی

با 300N اندازه‌گیری شد و میانگین مقادیر ۵ اندازه‌گیری سختی از هر نمونه به عنوان سختی نمونه در نظر گرفته شد.

جهت بررسی و مقایسه خواص مکانیکی کامپوزیت‌های آلومینیم-گرافیت از تست خمش سه نقطه‌ای طبق استاندارد ASTM C1161-94 استفاده شد. بر اساس این استاندارد نمونه‌های کامپوزیتی حاوی درصد‌های مختلف گرافیت با ابعاد $3 \times 4 \times 45$ میلی متر تهیه شدند. بعد از تفجوشی و عملیات حرارتی تحت شرایط بهینه، تست خمش بر روی نمونه‌ای مذکور انجام گرفت. با رسم نمودار تغییرات بار بر حسب میزان خمش توسط دستگاه و مشخص نمودن لحظه افت ناگهانی در نیرو (شکسته شدن نمونه)، باری که در آن نمونه شکسته می‌شود تعیین و توسط رابطه (۱)

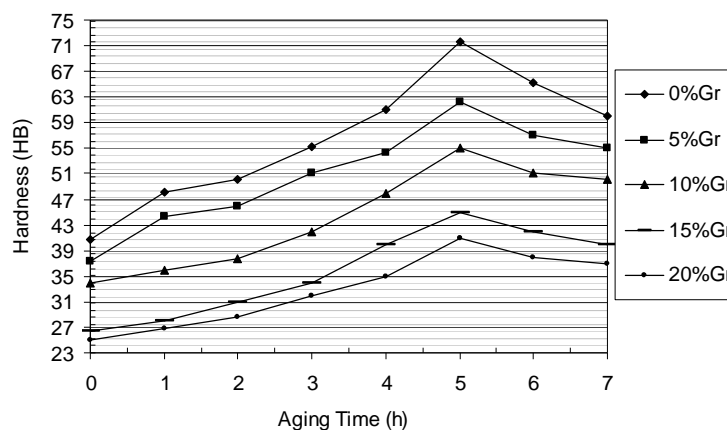
(۱)
$$\sigma = 3PL/2bd^2$$
 استحکام خمشی نمونه‌ها محاسبه شد. در این رابطه σ استحکام خمشی، P نیروی شکست (نیوتن) بوده و مقادیر L ، d ، b به ترتیب طول، عرض و ضخامت نمونه با مقادیر 3 و 4 و 45 میلی متر می‌باشند. مقادیر اعلام شده به عنوان استحکام خمشی، متوسط ۳ تا ۵ تست خمش از هر نمونه می‌باشد. به دلیل نرم بودن ذرات گرافیت و عدم وجود پیوند قوی بین این ذرات و زمینه آلومینیمی مطالعه این نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری از نظر چگونگی توزیع ذرات گرافیت امکان‌پذیر نیست، لذا به منظور بررسی نحوه توزیع ذرات گرافیت در کامپوزیت، سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد مطالعه قرار گرفتند.

نتایج و بحث

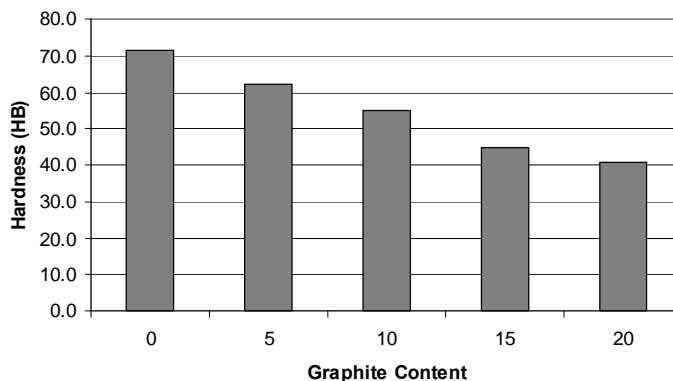
در روش متالورژی پودر درجا بعد از اضافه نمودن پودر گرافیت به مذاب آلومینیم به دلیل عدم ترشوندگی ذرات گرافیت توسط مذاب و اعمال نیروی برشی در اثر همزدن، فرایند از هم گسیختگی مذاب و تبدیل آن به قطرات فلزی در جهت تولید مخلوط پودری آلومینیم-گرافیت انجام شده و در حین سرد شدن مخلوط پودری آلومینیم-گرافیت با توزیع نسبتاً یکنواخت حاصل می‌شود. نکته قابل توجه در این روش متصل بودن ورقه‌های گرافیت به سطح ذرات Al در مخلوط پودری می‌باشد که باعث توزیع یکنواخت گرافیت در کامپوزیت نهایی می‌شود [۲۲].

خواص مکانیکی نیز کاهش پیدا کند [۳۱ و ۳۰]. در شکل (۶) سطح مقطع شکست نمونه فاقد گرافیت و در شکل های (۷) و (۸) سطح مقطع شکست نمونه های کامپوزیتی نشان داده شده است. مشاهده می شود که توزیع تقریباً یکنواختی از گرافیت در سطح وجود دارد.

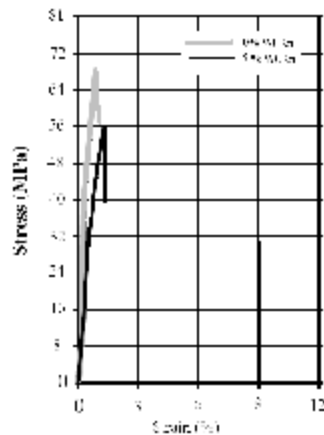
گرافیت نشان داده شده است. در شکل (۵) تغییرات استحکام خمشی کامپوزیت های $Al_{20}Zr_{24}/Gr$ بر حسب درصد گرافیت نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود با افزایش درصد گرافیت استحکام خمشی کاهش می یابد، زیرا گرافیت به عنوان یک نقص در ساختار باعث می شود که پیوستگی زمینه کاهش یافته و لذا



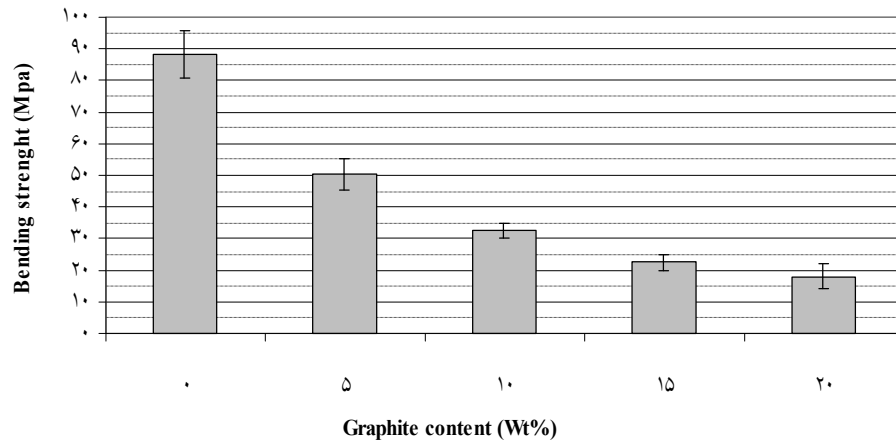
شکل ۲: تغییرات سختی بر حسب زمان پیرسازی در دمای $170^{\circ}C$ برای نمونه های کامپوزیتی $Al_{20}Zr_{24}/Gr$.



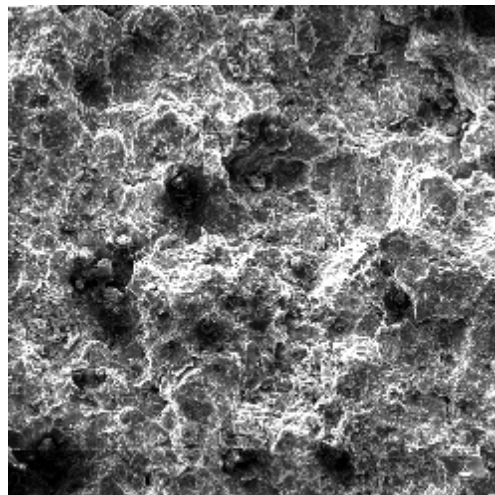
شکل ۳: تغییرات سختی نمونه های کامپوزیتی $Al_{20}Zr_{24}/Gr$ با تغییر محتوای گرافیت.



شکل ۴: منحنی های خمشی نمونه های فاقد گرافیت و حاوی ۵٪ وزنی گرافیت.

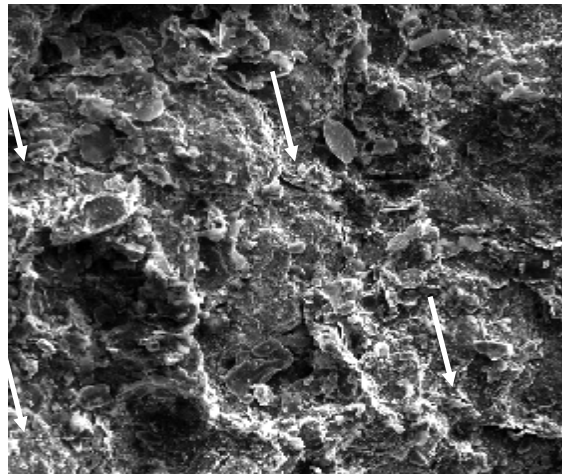


شکل ۵: تغییرات استحکام خمشی با درصد گرافیت در نمونه‌های Al_{2024}/Gr .



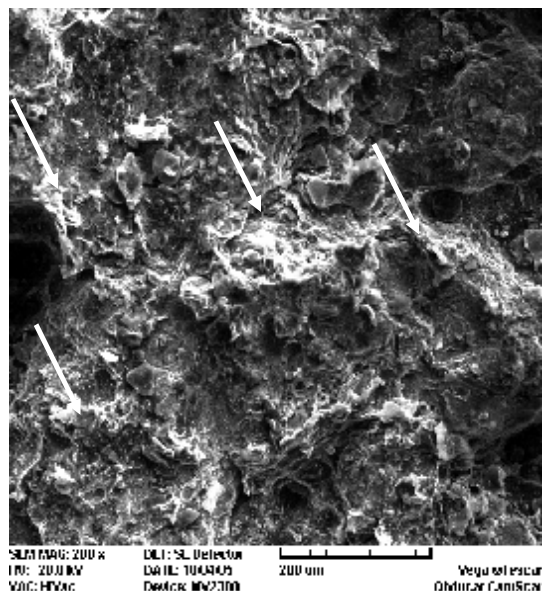
SEM Image Data:
 SEM MAG: 1000x | X: 1.50 | 500um | Vega 3 TESCAN
 HV: 20.0 kV | DATE: 10/04/15 | Optical Detection
 WAC: HVAc | Device: MV2300

شکل ۶: تصویر SEM از سطح مقطع شکست نمونه Al_{2024} عملیات حرارتی شده، (فشار متراکم‌سازی 650MPa، شرایط تفجوشی $600^{\circ}C$ ، 30min).



SEM Image Data:
 SEM MAG: 2000x | DEL: SE Detector | 200um | Vega 3 TESCAN
 HV: 20.0 kV | DATE: 10/04/15 | Optical CamScan
 WAC: HVAc | Device: MV2300

شکل ۷: تصویر SEM از سطح مقطع شکست نمونه Al_{2024}/Gr 15% عملیات حرارتی شده، فلش‌ها نشان دهنده گرافیت هستند (فشار متراکم‌سازی 481MPa، شرایط تفجوشی $600^{\circ}C$ ، 30min).



شکل ۸: تصویر SEM از سطح مقطع شکست نمونه $Al_{2024}/20Gr$ ، عملیات حرارتی شده، فلش‌ها نشان دهنده گرافیت هستند (فشار متراکم‌سازی $481MPa$ ، شرایط تف جوشی $30min, 610^{\circ}C$).

نتیجه‌گیری

- توزیع گرافیت در نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده با این روش یکنواخت می‌باشد.
- استحکام خمشی نمونه‌های کامپوزیتی Al_{2024}/Gr با افزایش درصد گرافیت کاهش می‌یابد.
- حضور گرافیت در زمینه‌ای از آلومینیوم باعث کاهش سختی و استحکام خمشی آلیاژ زمینه می‌شود.

- زمان بهینه پیرسازی کامپوزیت‌های Al_{2024}/Gr در دماهای پیرسازی $170^{\circ}C$ ، ۵ ساعت است. این زمان تحت تاثیر حضور گرافیت و مقدار گرافیت نمی‌باشد.
- سختی کامپوزیت‌های Al_{2024}/Gr با افزایش درصد گرافیت به واسطه افزایش فاز نرمتر (گرافیت) کاهش می‌یابد.

مراجع

- 1 - Jha, A. K., Prasad, S. V. and Upadhyaya, G. S. (1989). "Preparation and properties of 6061 aluminium alloy/graphite composites by PM route." *Powder Metallurgy*, Vol. 32, PP. 309-313.
- 2 - Ibrahim, I., Mohamed, A. F. and Lavernia, A. E. J. (1991). "Particulate reinforced metal matrix composites-a review." *J. of Mater. Sci.*, Vol. 26, PP. 1137-1 156.
- 3 - Biswas, S. K. and Bia, B. N. (1981). "Dry wear of Al-graphite particle composites." *Wear*, Vol. 68, PP. 347-358.
- 4 - Lin, J. F., Shih, M. G. and Chen, Y. W. (1996). "The tribological performance of 6061 aluminum alloy/graphite composite materials in oil lubrication with EP additives." *Wear*, Vol. 198, PP. 58-70.
- 5 - Rohatgi, P. K., Liu, Y., Yin, M. and Barr, Ti. (1990). "A surface-analytical study of tribodeformed aluminum alloy319-%10Vol graphite particle composite." *Mater. Sci. and Eng.*, Vol. A123, PP. 213-218.
- 6 - Basavara Jappa, S., Chandramohan, G. and Paul Davim, J. (2006). "Application of Taguchi techniques to study dry sliding wear behavior of metal matrix composites." *Materials and Design*, Vol. 28, PP. 1393-1398.

- 7 - Das, S., Parasad, S. V. and Ramachandran, T. R. (1991). "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.
- 8 - Rohatgi, P. K., Liu, Y. and Barr, Ti. (1991). "Tribological behavior and surface analysis of tribodeformed Al alloy-50 pct graphite particle composites." *Metallurgical and Mater. Trans.*, Vol 22A, PP. 1435-1441.
- 9 - Yang, J. B., Lin, C. B., Wang, T.C. and Chu, H. Y. (2004). "The tribological characteristics of A356.2 Al alloy/Gr(p) composites." *Wear* 257, PP. 941-952.
10. Liu, H. and Rohatgi, P. K. (1993). "Tribological characteristics of aluminum-50 vol pct graphite composite." *Metallurgical Trans. A22*, PP. 151-159.
- 11 - Pillai, U. T. S., Pal, B. C., Satyanarayana, K. G. and Damodaran, A. D. (1995). "Fracture behaviour of pressure die-cast aluminium-graphite composites." *J. of mater. Sci.*, Vol. 30, PP. 1455-1461.
- 12 - Parasad, K. and Das, S. (1991). "The significance of the matrix microstructure on the solid lubrication characteristics of graphite in aluminium alloys." *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 144A, PP. 229-235.
- 13 - Wei, J. N., Cheng, H. F., Zhang, Y. F., Han, F. S., Zhou, Z. C. and .Shui, J. P. (2002). "Effects of macroscopic graphite particulates on the damping behavior of commercially pure aluminum." *Mater. Sci. and Eng.* 325A, PP. 444-453.
- 14 - Biswas, S., Srinivasa, U., Seshan, S. and Rohatgi, P. K. (1980). "Cast aluminum-graphite composites for industrial applications." *AFS Transactions*, Vol. 88, PP. 159-166.
- 15 - Torralba, J. M., Costa, A. E. and Velasco, F. (2003). "PM aluminum matrix composites: an overview." *J. of Mater. Processing Tech.*, Vol. 133, PP. 203-206.
- 16 - Ted Guo, M. L. and Tsao, C. Y. A. (2000). "Tribological behavior of self-lubricating Aluminum/SiC/Graphite hybrid composites synthesized by the semi-solid powder densification method." *Comp. Sci. and Tech.*, PP. 65-74.
- 17 - Chu, H., Liu, K. and Yeh, J. (2000). "An insitu composite of Al (graphite,Al4C3) produced by reciprocating extrusion." *Mater. Sci. and Eng.*, A277, PP. 25-32.
- 18 - Lin, C. B., Chang, R. J. and Wang, W. P. (1998). "A study on process and tribological behavior of Al alloy /Gr(p) composite." *Wear*, Vol. 217, PP. 167-174.
- 19 - Gupta, M., Lim, S. C. and Ng, W. B. (1997). "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.
- 20 - Bekheet, N. E., Gaderlab, R. M., Salah, M. F. and Abdel-Azim, A.N. (2002). "The effects of aging on the hardness and fatigue behavior of 2024 Al alloy/SiC composites." *Mater., and Design*, Vol. 23, PP. 153-159.
- 21- Ko, B. and Yoo, Y.C. (1999). "The effect of aging treatment on the microstructure and mechanical properties of Al2124 hybrid composites reinforced with both SiC whiskers and SiC particles." *Comp. Sci. and Tech.*, Vol. 59, PP. 775-779.
- 22 - Akhlaghi, F. and Pelaseyyed, S. A. (2004) "Charactrization of aluminium/graphite particulate composites synthesized using a novel method termed in-situ powder metallurgy." *Mater. Sci. and Eng.*, Vol. A385, PP. 258-266.
- 23 - Krishnan, B. P., Surappa, M. K. and Rohatgi, P. K. (1981). "The UPAL process: a direct method of preparing cast aluminum alloy-graphite particle composites." *J. of Mater. Sci.*, Vol. 16, PP. 1209-1216.

- 24 - Moustafa, S. F., El-Badry, S. A., Sanad, A. M. and Kieback, B. (2002). "Friction and wear of copper graphite composites made with Cu - coated and uncoated graphite powders." *Wear* 253, PP. 699-710.
- 25 - Rohatgi, P. K., Ray, S. and Liu, Y. (1992). "Tribological properties of metal matrix- graphite particle composites." *International Materials Reviews*, Vol. 37, No. 3, PP. 129-149.
- 26 - Albiter, A., Leon, C. A. and Drew, R. A. L. (2000). "Microstructure and heat treatment response of Al-2024/TiC composites." *Mater. Sci. and Eng.* A89, PP. 109-115.
- 27 - Prasad, B. K. and Dan, T. K. (1990). "Microstructure- and property - related changes in a pressure-die-cast graphitic aluminum-silicon alloy induced by heat treatment." *J. of Mater. Sci. Letters*, Vol. 9, PP. 951-952.
- 28 - Ted Guo, M. L. and Tsao, C. Y. A. (2002). "Tribological behavior of aluminum/SiC/nickel coated graphite hybrid composites." *Mater. Sci. and Eng.*, Vol. A333, PP. 134-145.
- 29 - Eustathopoulos, N., Joud, J. C., Desre, P. and Hichter, J. M. (1974). "The wettability of carbon by aluminum and aluminum alloys." *J. of Mater. Sci.*, Vol. 9, PP. 1233-1242.
- 30 - Majumadar, B. S., Yegneswaran, A. H. and Rohatgi, P. K. (1984). "Strength and fracture behavior of metal matrix particulate composites." *Mater. Sci. and Eng.*, Vol. 68, PP. 85-96.
- 31 - Surappa, M. K. and Rohatgi, P. K. (1978). "Technical note: production of aluminum-graphite particle composites using copper coated graphite particles." *Metals Technology*, Vol. 5, PP. 358-361.