

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

تأثیر گرافیت بر خواص مکانیکی و رفتار سایشی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم

الهام بخشی‌زاده^۱، علی شکوه‌فر^۲، اشکان ذوالریاستین^۳، مهدی خدایی^{۴*}

مقاله پژوهشی

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مواد، آزمایشگاه مواد پیشرفته و نانوتکنولوژی، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران.

۲- استاد، مهندسی مواد، آزمایشگاه مواد پیشرفته و نانوتکنولوژی، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران.

۳- استادیار، گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران.

۴- استادیار، مهندسی مواد، آزمایشگاه مواد پیشرفته و نانوتکنولوژی، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران.

khodaei@kntu.ac.ir*

چکیده

هدف از این پژوهش، مقایسه اثر درصد گرافیت (۰-۵ درصد وزنی) بر خواص مکانیکی و سایشی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم است. ساخت نمونه‌های بالک به روش آسیاکاری/ پرس گرم (دمای ۴۲۰ °C، فشار ۴۰۰ MPa، زمان ۱ h) انجام شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، افزودن گرافیت به زمینه آلومینیوم تأثیر چشمگیری در بهبود خواص سایشی زمینه آلومینیوم ایجاد کرده است. بهترین عملکرد سایشی مربوط به نمونه کامپوزیت حاوی ۵ درصد وزنی گرافیت بود که به میزان ۶۲ درصد کاهش در نرخ سایش و ۲/۵ مرتبه کاهش در ضریب اصطکاک را نسبت به نمونه آلومینیوم تقویت نشده نشان داد. با وجود اینکه افزایش درصد گرافیت در محدوده ۰-۵ درصد وزنی به‌صورت پیوسته باعث بهبود در رفتار سایشی کامپوزیت می‌شود، ولی افت هم‌زمان خواص مکانیکی (سختی و استحکام فشاری) و چگالی کامپوزیت در نمونه‌های حاوی گرافیت مشاهده شد.

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۹

کلید واژگان:

کامپوزیت زمینه آلومینیوم

گرافیت

سایش

خواص مکانیکی

Effect of Graphite on the Mechanical Properties and Tribological Behavior of Aluminum Matrix Nanocomposite

Elham Bakhshizade¹, Ali Shokuhfar², Ashkan Zolriasatein³, Mehdi khodaei^{4*}

1-Ph.D Student, Advanced Materials and Nanotechnology Research Laboratory, Faculty of Materials Science and Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Iran.

2- Professor, Advanced Materials and Nanotechnology Research Laboratory, Faculty of Materials Science and Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Iran.

3- Assistant Professor, Non-metallic Materials Research Group, Niroo Research Institute, Iran.

4- Assistant Professor, Advanced Materials and Nanotechnology Research Laboratory, Faculty of Materials Science and Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Iran.

* khodaei@kntu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Doi:

Keywords:

Aluminum Matrix Composite

Graphite

Wear

Mechanical Properties

Abstract

This study aims to compare the effect of graphite content (0–5 wt.%) on the mechanical and tribological properties of aluminum matrix nanocomposites. The bulk samples were prepared by the mechanical milling/hot pressing (temperature 420 °C/ pressure 400 MPa/ time 1h) process. According to the obtained results in this work, the addition of graphite to an aluminum matrix significantly improves the wear properties of aluminum (wear rate and coefficient of friction). The best wear performance was obtained with the sample containing 5wt.% graphite, which showed a 62% reduction in the wear rate and a 2.5-fold reduction in coefficient of friction compared to the unreinforced aluminum sample. Although increasing the amount of graphite in the range of 0-5 wt.% leads to a continuous improvement in the wear behavior of the composite material, it results in a simultaneous deterioration of the mechanical properties (hardness and compressive strength) and the density of the Aluminum-Graphite composites.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Elham Bakhshizade, Ali Shokuhfar, Ashkan Zolriasatein, Mehdi khodaei, Effect of Graphite on the Mechanical Properties and Tribological Behavior of Aluminum Matrix Nanocomposite, New Process in Material Engineering, 2024, 18(1), 39-49.

۱- مقدمه

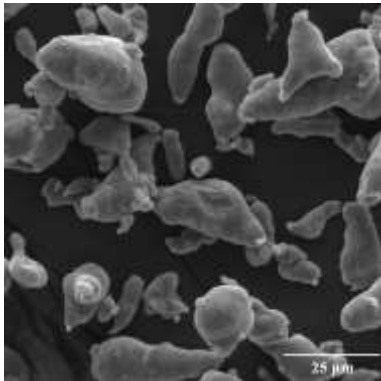
امروزه آلومینیوم پس از آهن پرکاربردترین فلز در جهان است. یکی از دلایل اصلی انتخاب آلومینیوم به عنوان یک فلز رایج در صنعت، فراوانی این ماده در پوسته زمین است به طوری که ۸ درصد جرم زمین را تشکیل می دهد. مدول یانگ ۷۰ GPa، سختی ۳۵۰-۱۶۰ MPa، نقطه ذوب °C ۶۶۰/۳ از ویژگی های فلز آلومینیوم است. شکل پذیری بالا، چگالی کم ($2/7 \text{ g/m}^3$) و هدایت حرارتی بالا (W/mK ۲۳۷) از دلایل کاربرد روزافزون این فلز و آلیاژهای آن بشمار می رود. صرف نظر از مزایای ذکر شده، تنش تسلیم آلومینیوم پایین است و سختی و مقاومت به سایش آن برای کاربردهای تریبولژیکی خاص کافی نیست و درخواستها برای بهبود هرچه بیشتر خواص آلیاژهای آلومینیوم روبه افزایش است [۱-۳].

ساخت کامپوزیت های زمینه فلزی به دلیل پتانسیل بهبود مشخصاتی همچون مدول الاستیک، سختی، استحکام، دمای کاری، مقاومت به خزش و خستگی حرارتی، مقاومت به سایش، کاهش وزن و هدایت الکتریکی و حرارتی، روشی مؤثر در بهبود خواص فلزات است. در این میان کامپوزیت های زمینه آلومینیومی به دلیل فراهم کردن خواص مطلوبی همچون مقاومت به سایش، چگالی کم و استحکام بالا، پایداری ابعادی و سفتی مطلوب در صنایع مختلف از جمله صنایع اتومبیل سازی و هوافضا کاربرد پیدا کرده اند [۴-۷].

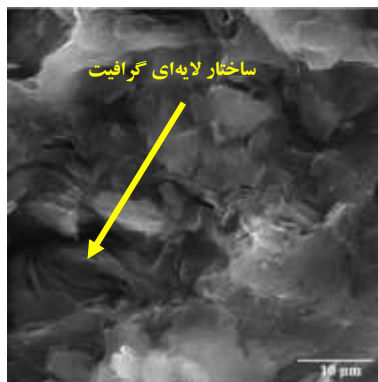
مطالعات زیادی برای بررسی اثر تقویت کننده های مختلف با مشخصات متفاوت بر خواص کامپوزیت های زمینه آلومینیومی انجام شده است [۸-۹]. ساختارهای کربنی از جمله گرافیت، تقویت کننده های مناسبی برای بهبود خواص کامپوزیت های زمینه آلومینیومی از جمله خواص سایشی آنها می باشد. گرافیت از نظر شیمیایی خنثی، هادی جریان برق و مقاوم به خوردگی است. آلومینیوم تقویت شده با گرافیت به عنوان گزینه ای امیدبخش در کاربردهای مهندسی توسعه یافته است و تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. از جمله مشکلات تولید این کامپوزیت ها به روش

ریخته گری، عدم ترشوندگی کربن توسط مذاب آلومینیوم، اختلاف چگالی کربن و آلیاژ و همچنین رخ دادن واکنش های ناخواسته در فصل مشترک مذاب و گرافیت است. از طرفی انحلال پذیری کربن در آلومینیوم در حالت تعادلی حدود ۰/۰۳ درصد اتمی است و گرافیت در دمای کم تر از ۱۱۰۰ °C ترشوندگی خوبی توسط مذاب آلومینیوم ندارد. از این رو تولید کامپوزیت های آلومینیوم با غلظت کربن بیشتر از حد تعادلی یک چالش جدی است. با توجه به محدودیت های ذکر شده، استفاده از روش متالورژی پودر به دلیل کنترل ریزساختار فازها و دمای پایین فرآیند ترجیح داده می شود. از مزایای تولید نانوکامپوزیت ها در حالت جامد امکان افزودن حجم زیاد فاز تقویت کننده با توزیع یکنواخت در فاز زمینه است. گرافیت می تواند به عنوان یک عامل روانکار عالی در شرایط اصطکاکی عمل کند. همچنین می تواند یک فاز تقویت کننده مناسب برای بهبود خواص مکانیکی و سایشی در کامپوزیت های سنتز شده به روش آسیاکاری مکانیکی باشد [۱۰-۱۲]. مطابق پژوهش انجام شده توسط لین و همکارانش^۱، کامپوزیت آلومینیوم-گرافیت (در محدوده ۶-۰ درصد وزنی گرافیت) مقاومت به سایش بسیار خوبی از خود نشان داد و دلیل آن تشکیل لایه سطحی گرافیت و جلوگیری از تماس مستقیم سطح کامپوزیت و پین سایش بیان شد [۱۳]. در یک پژوهش دیگر انجام شده آلومینیوم تقویت شده با ذرات گرافیت پراکنده شده به روش متالورژی پودر تولید شد. نتایج نشان داد که افزودن ۱ درصد وزنی گرافیت به زمینه آلومینیومی باعث افزایش سختی و مقاومت به سایش کامپوزیت شده است [۱۴]. افزایش ۱۰ برابری مقاومت به سایش کامپوزیت زمینه A6061 تقویت شده با ۲۰ درصد وزنی گرافیت تولید شده به روش پرس سرد/تف جوشی و اکستروژن داغ از نتایج قابل توجه ارائه شده توسط سلمان و همکارانش^۲ بود. مقدار، شکل و اندازه ذرات و همچنین نحوه توزیع فاز تقویت کننده از عوامل مهم تعیین کننده رفتار مکانیکی و تریبولژیکی کامپوزیت هاست [۱۵]. نتایج نشان

استفاده شد. تصاویر پودرهای آلومینیوم و گرافیت اولیه در شکل (۱) آورده شده است. همان‌طور که از شکل (الف) قابل مشاهده است، ذرات پودر آلومینیوم اولیه مورفولوژی شبه کروی دارند. در شکل (ب) نیز ساختار لایه‌ای گرافیت مشاهده می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل (۱): تصاویر میکروسکوپ الکترونی: (الف) پودر آلومینیوم و (ب) پودر گرافیت.

۲-۲- فرآیند آماده‌سازی و ساخت

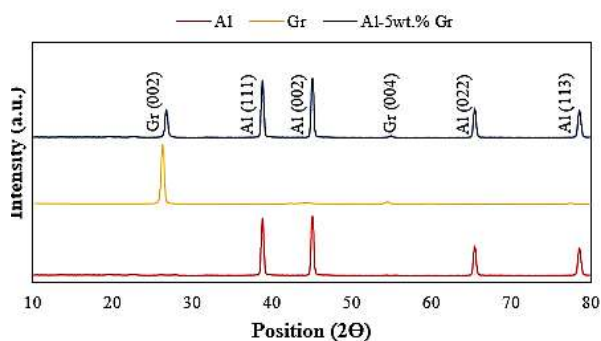
برای ساخت نانوکامپوزیت Al-Gr پودر گرافیت در مقادیر ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی، توزین و به پودر آلومینیوم اضافه شد. فرآیند آسیاکاری مخلوط پودرها در آسیاب پرنرزی اسپکس 8000M^۴ انجام شد. نسبت گلوله به پودر ۱۰ به ۱ و جنس گلوله و کاپ فولادی در نظر گرفته شد. مقدار ۲ درصد وزنی استتاریک اسید نیز به‌عنوان عامل کنترل فرآیند به مخلوط پودرها اضافه شد. در نهایت مخلوط پودرهای آسیاب شده توسط فرآیند پرس گرم به نمونه‌های بالک استوانه‌ای شکل با نسبت ارتفاع به قطر ۱/۵ تبدیل شد.

می‌دهد با اینکه افزایش درصد گرافیت باعث بهبود مقاومت به سایش کامپوزیت‌های زمینه فلزی می‌شود ولی استفاده از ذرات درشت گرافیت و همچنین مقادیر بالای آن، منجر به تضعیف رفتار مکانیکی از جمله سختی، استحکام تسلیم و استحکام نهایی کامپوزیت خواهد شد [۱۸-۱۶]. برای مثال در پژوهش انجام شده توسط فلورس و همکارانش^۳، با افزایش درصد گرافیت تا ۱ درصد وزنی، استحکام تسلیم و استحکام کششی زمینه آلومینیوم به ترتیب ۲۵ و ۳۰ درصد افزایش نشان داد [۱۹]. طور مشابه در یک پژوهش دیگر نیز افزودن ۱/۵ درصد وزنی گرافیت به زمینه A7075 بهبود سختی، استحکام تسلیم و همچنین استحکام نهایی آلومینیوم مشاهده شد [۲۰]. این در حالی است که با توجه به نتایج مربوط به پژوهش انجام شده در سال ۲۰۱۸ استفاده از مقادیر بالای گرافیت (۲۰ درصد وزنی) به‌عنوان فاز تقویت‌کننده، با اینکه بهبود مقاومت به سایش کامپوزیت مشاهده می‌شود اما کاهش قابل توجه استحکام کششی و استحکام شکست را در پی خواهد داشت [۱۵]. در این تحقیق سعی شده است که تأثیر درصد گرافیت بر خواص مکانیکی و تریبولوژیکی به‌صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرد. در این مقاله تأثیر افزودن ذرات گرافیت بر مشخصات کامپوزیت زمینه آلومینیومی در مقادیر ۰، ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی مورد بررسی قرار گرفت. برای سنتز کامپوزیت مورد نظر از پودر آلومینیوم و گرافیت با درصد خلوص بالا و روش آسیاکاری/پرس گرم استفاده شد. مطابق نتایج به‌دست آمده وجود ذرات گرافیت در بهبود رفتار سایشی آلومینیوم تأثیر بسزایی دارد. ۶۲ درصد کاهش در نرخ سایش و ۲/۵ مرتبه کاهش در ضریب اصطکاک آلومینیوم از نتایج به‌دست آمده در این پژوهش بود.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد اولیه

در این پژوهش از پودرهای آلومینیوم (اندازه ذرات $> 5 \mu\text{m}$ ، ۶۳ درصد خلوص $< 99/9$ درصد، خریداری شده از شرکت مرک) و گرافیت (اندازه ذرات $> 100 \mu\text{m}$ ، ۹۹ درصد خلوص < 99 درصد، خریداری شده از شرکت استیفن)



شکل (۲): الگوی پراش اشعه ایکس آلومینیوم، گرافیت و کامپوزیت بالک حاوی ۵ درصد وزنی گرافیت.

۳-۲- تغییرات چگالی

نمودار نشان داده شده در شکل (۳) تغییرات چگالی نمونه تقویت نشده و نمونه‌های کامپوزیتی با درصد‌های مختلف گرافیت را نشان می‌دهد. برای محاسبه چگالی ارشمیدسی و چگالی نسبی از روابط ۱ تا ۳ استفاده شده است:

$$\rho_c = X_r \rho_r + (1 - X_r) \rho_m \quad (1)$$

$$\rho_a = \left(\frac{W_a}{W_a - W_b} \right) \rho_o \quad (2)$$

$$\rho_r = (\rho_a / \rho_c) \times 100 \quad (3)$$

در روابط فوق ρ_c و ρ_a و ρ_r به ترتیب چگالی تئوری، چگالی ارشمیدسی و چگالی نسبی کامپوزیت است. X_r کسر حجمی تقویت کننده و ρ_o چگالی آب مقطر در دمای محیط است. W_a و W_b نیز به ترتیب وزن نمونه معلق در هوا و آب مقطر را نشان می‌دهد. برای به دست آوردن مقادیر چگالی نسبی ابتدا مطابق روابط ۱ و ۲ مقادیر چگالی تئوری و چگالی ارشمیدسی را محاسبه کرده و در نهایت به کمک رابطه ۳ مقدار چگالی نسبی به دست می‌آید. همان گونه که از رابطه ۱ نیز انتظار می‌رود با افزایش درصد گرافیت چگالی کامپوزیت کاهش پیدا می‌کند (به دلیل کم تر بودن چگالی گرافیت نسبت به چگالی آلومینیوم). علاوه بر کمتر بودن چگالی گرافیت نسبت به فلز آلومینیوم، به دلیل اختلاف زیاد نقطه ذوب گرافیت و آلومینیوم، افزایش درصد فاز تقویت کننده قابلیت زینتر شدن مخلوط پودری را کاهش می‌دهد. در نتایج به دست آمده در شکل (۳) نیز این روند با افزایش درصد گرافیت مشاهده می‌شود. در

فرآیند پرس گرم توسط دستگاه پرس تک محوره با ظرفیت ۴۰ ton تحت فشار ۴۰۰ MPa شد. جهت کاهش اثر اکسیژن در محیط، تمامی مراحل ساخت کامپوزیت تحت اتمسفر محافظ گاز آرگون انجام شد.

۳-۲- آزمون‌ها و روش‌های مشخصه‌یابی

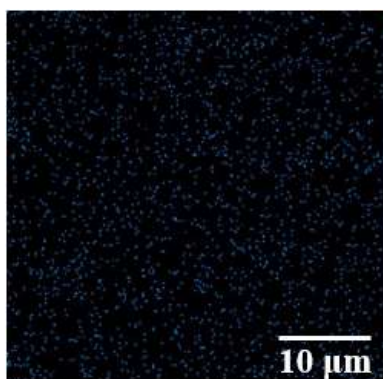
بررسی مورفولوژی ذرات پودر و تعیین آنالیز شیمیایی آن‌ها توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی FESEM- TESCAN مدل MIRA3 مجهز به ایدکس انجام شد. به منظور بررسی فازی نمونه‌ها از آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) مجهز به لامپ مس استفاده شد. چگالی نمونه‌ها به روش ارشمیدسی و به وسیله ترازو با دقت ۰/۰۰۱ گرم تعیین شد. میکروسختی سنجی به روش ویکرز با نیروی ۵۰ gf و زمان اعمال بار ۱۰ s مطابق با استاندارد ASTM E384-99 توسط دستگاه سختی سنج بوهرلر مدل Micromet II انجام شد. آزمون فشار با نرخ کرنش ۰/۵ mm/min مطابق با استاندارد ASTM E9-09 انجام شد. آزمون سایش به روش پین روی دیسک در فاصله ۱۰۰۰ m و سرعت ۰/۲ m/s توسط پین فولادی با سختی RC ۵۴ انجام شد.

۳- نتایج و بحث

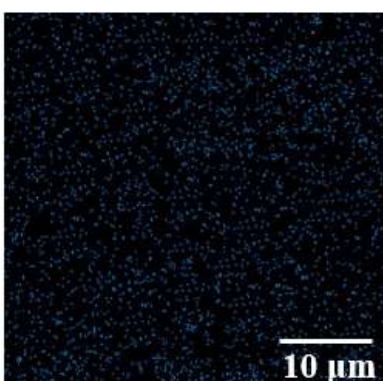
۳-۱- بررسی ساختاری و فازی

شکل (۲) الگوی پراش اشعه ایکس برای پودرهای اولیه و نمونه بالک پرس شده با ۵ درصد وزنی گرافیت را نشان می‌دهد. با توجه به الگوی پراش، تمامی پیک‌ها در نمونه‌های کامپوزیتی مربوط به اجزای اولیه کامپوزیت است و واکنشی بین اجزای مخلوط رخ نداده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، پیک اضافه‌ای که نشان دهنده واکنش بین اجزا و یا وجود ناخالصی ناشی از آسیاب و اتمسفر باشد، تشکیل نشده است.

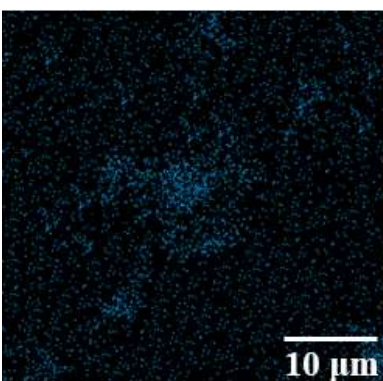
پژوهش‌های مشابه انجام شده کاهش چگالی کامپوزیت آلومینیوم با افزایش درصد گرافیت گزارش شده است [۱۵].



(الف)

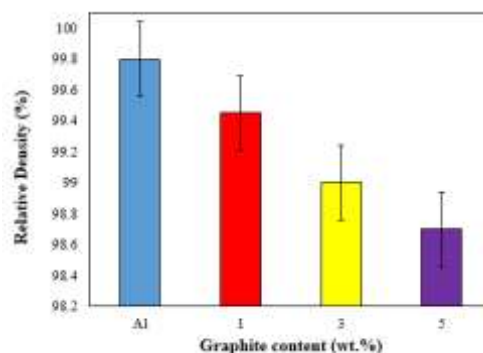


(ب)



(ج)

شکل (۴): نقشه توزیع عنصر کربن در کامپوزیت‌های آلومینیوم-گرافیت حاوی الف) ۱ درصد وزنی گرافیت، ب) ۳ درصد وزنی گرافیت و ج) ۵ درصد وزنی گرافیت.



شکل (۳): تغییرات چگالی نسبی آلومینیوم تقویت نشده و کامپوزیت‌های حاوی گرافیت با درصد وزنی متفاوت.

رابطه ۴ کسر حجمی تخلخل‌های موجود در یک نمونه کامپوزیتی را نشان می‌دهد. در این رابطه ρ میانگین چگالی ارشمیدسی و چگالی ظاهری نمونه کامپوزیتی است و X کسر حجمی فاز تقویت‌کننده را نشان می‌دهد [۲۱]. مطابق این رابطه با افزایش درصد ذرات تقویت‌کننده، چگالی نمونه کامپوزیتی کاهش پیدا می‌کند.

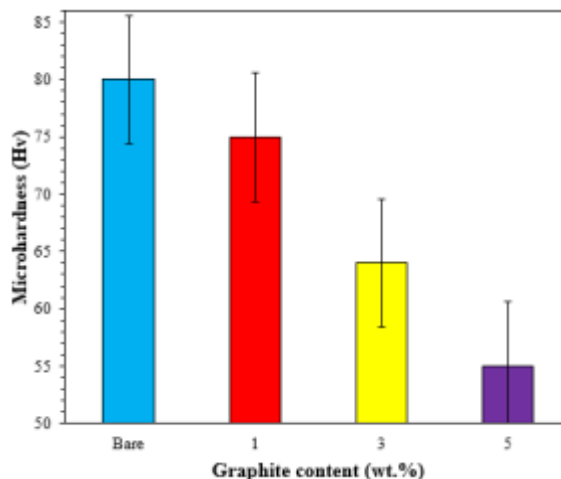
$$\rho_c = X_r \rho_r + (1 - X_r) \rho_m \quad (4)$$

شکل (۴) نقشه توزیع عنصر کربن را در کامپوزیت‌های حاوی ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی گرافیت توسط آنالیز شیمیایی ایدکس نشان می‌دهد. نقشه توزیع عنصر کربن به خوبی نشان می‌دهد که با افزایش درصد کربن، توزیع کاملاً غیریکنواختی از اتم‌های کربن ایجاد می‌شود. کلوخه شدن ذرات تقویت‌کننده در مقادیر بالا به دلایل ترمودینامیکی و جهت کاهش انرژی آزاد سطحی رخ می‌دهد [۲۲].

۳-۳- بررسی خواص مکانیکی

۳-۳-۱- تغییرات میکروسختی

تغییرات میکروسختی نمونه‌های بالک بر حسب درصد وزنی گرافیت در شکل (۵) نشان داده شده است.

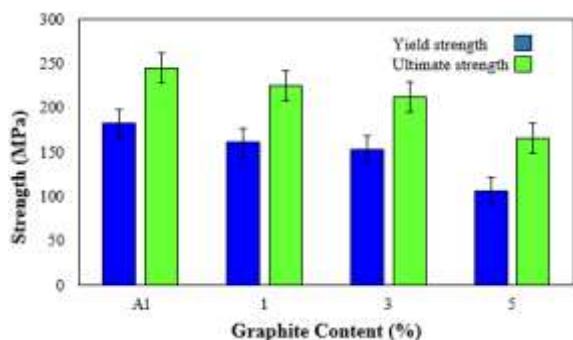


شکل (۵): تأثیر درصد وزنی گرافیت بر میکروسختی کامپوزیت‌های بالک آلومینیوم-گرافیت.

درصد گرافیت افت سختی مشاهده شد. در این پژوهش عنوان شد که در مقادیر کم گرافیت (تا ۱ درصد وزنی) توزیع یکنواخت و مطلوب گرافیت در زمینه آلومینیوم وجود دارد و ذرات گرافیت به‌عنوان مانعی در برابر رشد دانه‌ها در مرحله زینترینگ عمل کرده و از این رو سختی افزایش پیدا می‌کند. در مقادیر بالاتر گرافیت (۵-۱ درصد وزنی) آگلومره شدن ذرات گرافیت هم‌زمان با کاهش چگالی عامل افت سختی بیان شد [۱۴].

۳-۳-۲- بررسی رفتار فشاری

نمودار تغییرات استحکام تسلیم و استحکام فشاری نمونه‌های بالک در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۶): تغییرات استحکام تسلیم و استحکام نهایی آلومینیوم تقویت‌شده و کامپوزیت‌های آلومینیوم-گرافیت.

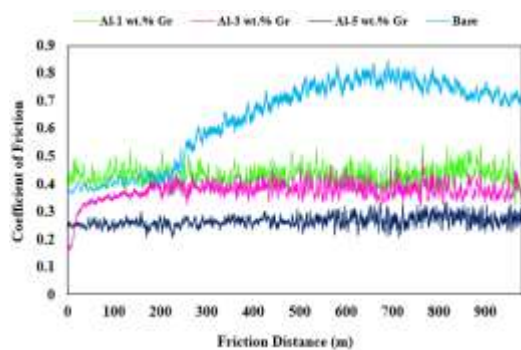
عوامل مختلفی در تعیین استحکام کامپوزیت‌ها مؤثر است. چگالی یکی از عوامل مؤثر بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌هاست [۲۴]. با کاهش چگالی افت استحکام در کامپوزیت‌ها مشاهده می‌شود. توزیع غیریکنواخت فاز تقویت‌کننده نیز از عوامل تضعیف خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها معرفی شده است [۱۴]. همان‌طور که از شکل (۶) نیز قابل مشاهده است، با افزایش درصد گرافیت افت استحکام تسلیم و استحکام نهایی مشاهده می‌شود. رفتار مشابه در تغییر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های حاوی گرافیت در مقالات مشابه نیز گزارش شده است [۲۵]. در یک پژوهش انجام شده دلیل افت استحکام فشاری کامپوزیت زمینه آلومینیوم حاوی گرافیت حتی با وجود افزایش سختی، تغییر در مد شکست ناشی از حضور گرافیت

با توجه به این نمودار، افزایش درصد گرافیت منجر به کاهش سختی کامپوزیت می‌شود. گرافیت ماهیتاً یک فاز نرم با سختی پایین است از این رو افزایش درصد گرافیت کاهش سختی کامپوزیت را در پی خواهد داشت. مطابق رابطه ۵ سختی کامپوزیت‌ها با افزایش درصد گرافیت با سختی کمتر از فاز زمینه کاهش پیدا می‌کند [۲۳]. با افزایش بیشتر درصد گرافیت و آگلومره شدن ذرات آن افت سختی مشهود خواهد بود. تغییرات سختی با نتایج مربوط به تغییرات چگالی نیز همخوانی دارد. با افزایش درصد گرافیت و کاهش چگالی کامپوزیت (افزایش درصد تخلخل) سختی کامپوزیت کاهش پیدا خواهد کرد.

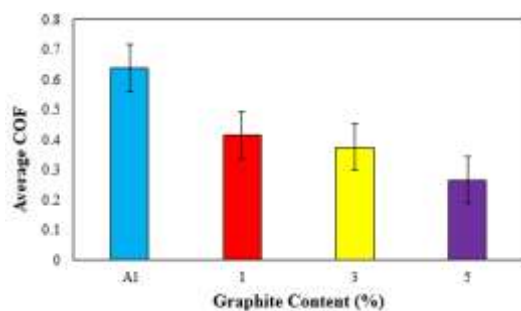
$$H_C = H_{mf} + H_{fr} \quad (5)$$

در پژوهش انجام شده توسط الم و همکارانش ۵ مشخصات کامپوزیت آلومینیوم-گرافیت در مقادیر ۵-۰ درصد وزنی گرافیت بررسی شد. مطابق نتایج ارائه شده سختی کامپوزیت، با افزایش مقدار گرافیت تا ۱ درصد وزنی افزایش نشان داد اما در مقادیر ۵-۱ درصد وزنی با افزایش

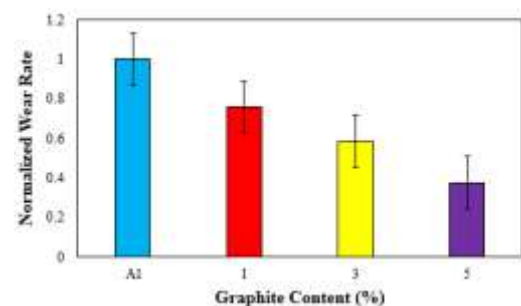
درصد وزنی گرافیت تقریباً ۶۲ درصد کمتر از نرخ سایش نمونه آلومینیوم تقویت نشده بود. در پژوهش‌های مشابه، تشکیل لایه محافظ سطحی گرافیت عامل اصلی بهبود رفتار سایشی کامپوزیت‌های تقویت شده با گرافیت عنوان شده است [۲۶].



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۷): (الف) تغییرات ضریب اصطکاک، (ب) مقادیر میانگین ضریب اصطکاک، (ج) نرخ سایش نرمالیزه شده نمونه‌های بالک به‌عنوان تابعی از درصد وزنی گرافیت در نیروی ۱ N.

سایش چسبان و خراشان دو مکانیزم رایج در سایش در نظر گرفته شده‌اند. وجود خطوط و شیارهای ناشی از حرکت پین روی سطح سایش نشان‌دهنده مکانیزم خراشان در شرایط آزمون سایش است. در سایش چسبان، تغییر شکل

بیان شده است [۱۵]. در برخی از پژوهش‌های مرتبط با کامپوزیت‌های آلومینیوم-کربن، گاهاً افزایش درصد تقویت‌کننده به صورت پیوسته منجر به افزایش سختی و استحکام نمونه‌ها شده است. در این پژوهش‌ها بسته به ترکیب شیمیایی زمینه و فرآیند تولید، تشکیل فازهای جدید از جمله Al_4C_3 یکی از عوامل بهبود خواص مکانیکی گزارش شده است [۱۵]. همان‌گونه که پیش‌تر نیز بیان شد، مطابق الگوی پراش اشعه ایکس، در این پژوهش فاز یا فازهای جدیدی در فرآیند ساخت نمونه‌های بالک تشکیل نشده است.

۴-۳- بررسی ضریب اصطکاک و رفتار سایشی

شکل (۷) تغییرات خواص سایشی نمونه‌های بالک را در مقادیر مختلف گرافیت نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در شکل (۷الف)، تفاوت بارز نمودار تغییرات ضریب اصطکاک برای نمونه آلومینیوم تقویت نشده نسبت به سایر نمونه‌های کامپوزیتی حاوی گرافیت است. در شکل (۷الف) با پیشروی آزمون سایش، افزایش ناگهانی در ضریب اصطکاک نمونه تقویت نشده رخ می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تغییرات شدید در نمودار ضریب اصطکاک آلومینیوم خالص، حتی با افزودن تنها ۱ درصد وزنی گرافیت به صورت مشهود کم می‌شود. با توجه به شکل (۷ب)، با افزایش درصد گرافیت، ضریب اصطکاک میانگین نمونه‌های کامپوزیتی حاوی گرافیت کاهش یافته و از میزان نوسانات نمودارها در طول مسافت آزمون سایش کم می‌شود.

کوچک‌ترین ضریب اصطکاک مربوط به نمونه حاوی ۵ درصد وزنی گرافیت است که تقریباً ۲/۵ برابر کوچک‌تر از ضریب اصطکاک نمونه آلومینیوم تقویت نشده است. با افزایش درصد گرافیت، سطح تماس پین سایش و کامپوزیت کاهش پیدا کرده و منجر به کاهش ضریب اصطکاک می‌شود [۲۶]. همان‌گونه که از شکل (۷ج) نیز مشخص است، با افزایش درصد گرافیت، نرخ سایش نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند. بیشترین نرخ سایش مربوط به نمونه آلومینیوم تقویت نشده است. نرخ سایش نمونه حاوی ۵

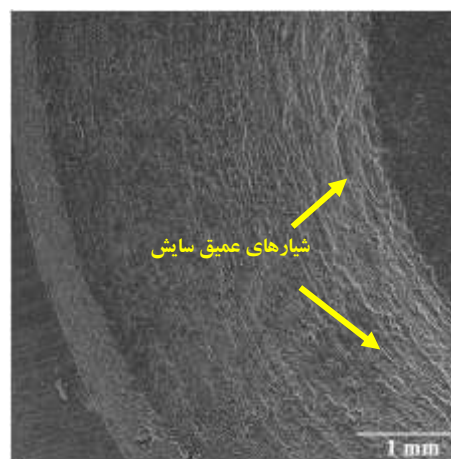
شکل (۷ الف) برای نمونه‌های حاوی گرافیت، ظاهراً در نمونه‌های کامپوزیتی مکانیزم چسبان مکانیزم غالب نیست و سایش خراشان مکانیزم اصلی در سایش است.

گرافیت یک ماده روانکار جامد است که می‌تواند در کاهش ضریب اصطکاک سطوح تحت سایش مؤثر باشد. ذرات گرافیت در اثر سایش بین روی سطح نمونه از سطح جدا شده و تشکیل لایه محافظ سطحی می‌دهند. این لایه از تماس مستقیم پین فولادی و سطح نمونه کاسته و از تغییرات پلاستیک شدید روی سطح نمونه کم می‌کند و از این طریق بر کاهش ضریب اصطکاک تأثیر می‌گذارد [۲۷-۲۸].

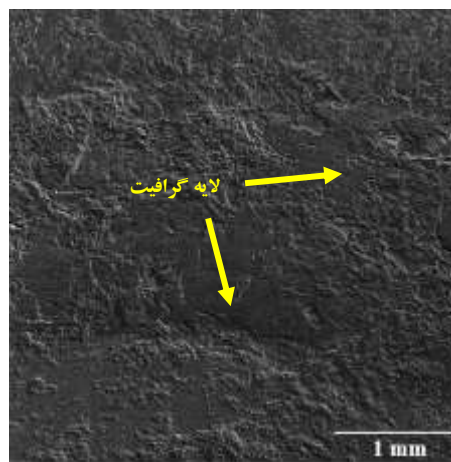
پوشش دهی سطح سایش توسط لایه‌ی محافظ گرافیت در شکل (۸ ب) مشاهده می‌شود. در این شکل اثری از شیارها و خطوط عمیق سایش ناشی از حرکت پین روی سطح دیده نمی‌شود. همان‌گونه که پیش‌تر نیز بیان شده، در صورت وجود گرافیت و تشکیل لایه محافظ سطحی، از اثر تخریبی ناشی از حرکت پین فولادی روی سطح سایش کاسته شده و طبیعتاً میزان کاهش وزن ایجاد شده در آزمون سایش کاهش پیدا خواهد کرد. از این رو با افزایش درصد گرافیت نرخ سایش محاسبه شده برای کامپوزیت‌های حاوی گرافیت کمتر خواهد شد. کاهش نرخ سایش ایجاد شده در اثر افزایش درصد گرافیت، در تطابق با کاهش ضریب اصطکاک نمونه‌های حاوی گرافیت در شکل (۷ ج) است.

شکل (۹) مورفولوژی ذرات دبریز حاصل از آزمون سایش برای نمونه آلومینیوم تقویت نشده و نمونه کامپوزیتی حاوی ۵ درصد وزنی گرافیت را نشان می‌دهد. غیریکنواختی در ابعاد دبریزهای مربوط به نمونه آلومینیوم تقویت نشده در شکل (۹ الف) نشان داده شده است. در این شکل ذرات دبریز با ابعاد بیشتر از ۱۰۰ و کمتر از ۱۰ μm وجود دارد. این در حالی است که دبریزهای سایش نمونه حاوی ۵ درصد گرافیت (با مقاومت به سایش بالاتر)، ابعاد کوچک‌تر با توزیع یکنواخت‌تری از اندازه ذرات نسبت به نمونه آلومینیوم تقویت نشده دارند.

پلاستیک ایجاد شده روی سطح سایش منجر به ایجاد اتصالات موضعی می‌شود. این اتصالات در اثر لغزش موضعی بین دو سطح سایش گسیخته شده و انتقال ماده از سطحی به سطح دیگر رخ می‌دهد. نوسانات موجود در نمودار آزمون سایش به وجود مکانیزم چسبان در سایش نسبت داده می‌شود [۱۴].



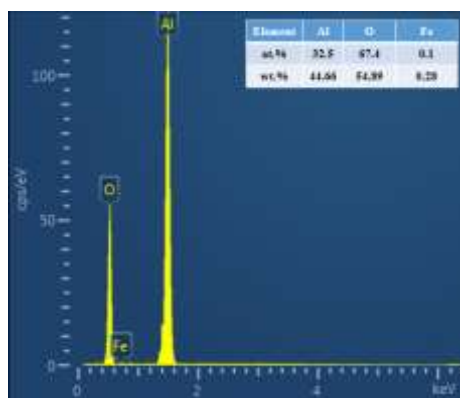
(الف)



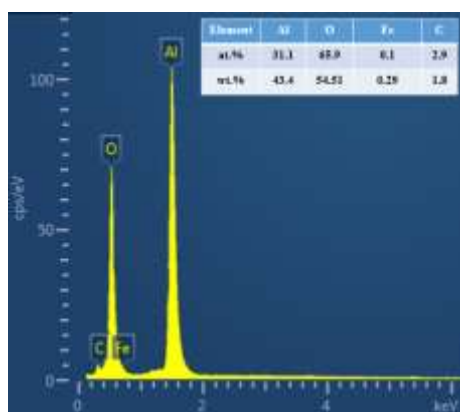
(ب)

شکل (۸): تصاویر الکترونی از سطوح سایش الف) سطح نمونه آلومینیوم تقویت نشده، ب) سطح کامپوزیت حاوی ۵ درصد وزنی گرافیت.

با توجه به نوسانات شدید در نمودار شکل (۷ الف) مربوط به نمونه آلومینیوم تقویت نشده و وجود شیارهای عمیق ناشی از حرکت پین روی سطح نمونه در شکل (۸ الف) می‌توان گفت در این نمونه هر دو مکانیزم سایش چسبان و خراشان وجود دارند. با توجه به کاهش نوسانات در نمودار

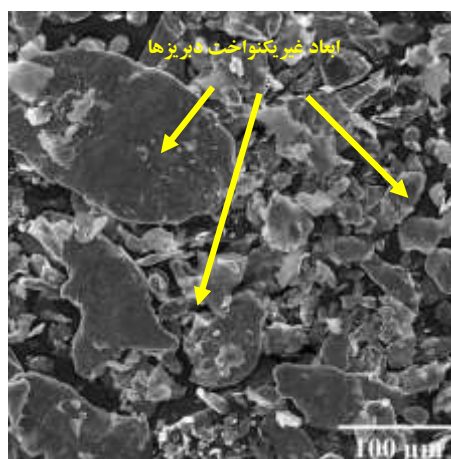


(الف)

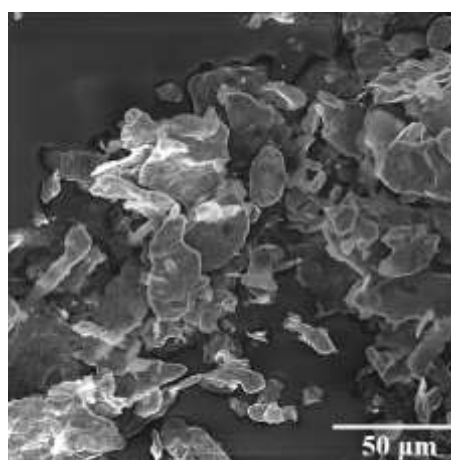


(ب)

شکل (۱۰): نتایج ایدکس از دبریز حاصل از آزمون سایش برای الف) نمونه آلومینیوم تقویت نشده، ب) کامپوزیت حاوی ۵ درصد وزنی گرافیت.



(الف)



(ب)

شکل (۹): تصاویر میکروسکوپ الکترونی از دبریزهای حاصل از آزمون سایش: الف) دبریز نمونه آلومینیوم تقویت نشده، ب) دبریز کامپوزیت حاوی ۵ درصد وزنی گرافیت.

۴- نتیجه گیری

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم حاوی مقادیر مختلف گرافیت به روش آسیاکاری/ پرس گرم تولید شد و نتایج زیر به صورت خلاصه حاصل شد:

۱- افزایش درصد گرافیت منجر به کاهش چگالی نسبی برای کامپوزیت زمینه آلومینیوم شد. این مسئله با توجه به اختلاف چگالی و همچنین اختلاف نقطه ذوب گرافیت و آلومینیوم قابل توجیه است.

۲- افزایش درصد گرافیت منجر به کاهش میکروسختی کامپوزیت زمینه آلومینیوم شده است زیرا گرافیت فازی نرم با سختی پایین است.

۳- افزودن گرافیت به زمینه آلومینیوم استحکام تسلیم و استحکام فشاری کامپوزیت را کاهش می‌دهد. با افزایش

با توجه به افزایش موضعی دمای سطح نمونه در آزمون سایش شرایط برای تشکیل Al_2O_3 فراهم می‌شود. نتایج ایدکس در شکل (۱۰) وجود اکسید آلومینیوم در ترکیب شیمیایی دبریزها را تأیید می‌کند. وجود مقادیر اندک آهن در ترکیب شیمیایی دبریز سایش می‌تواند مربوط به استفاده از پین فولادی و یا استفاده از مخزن و گلوله فولادی در مرحله آسیاکاری باشد.

[۸] ح. ص. وزیری، ع. شکوه‌فر و س. سیدافقهی، "بررسی خواص میکروساختاری و مکانیکی نانوکامپوزیت پایه آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات دی سولفید تنگستن"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱۴، شماره ۱، صفحه ۱۳-۱، ۱۳۹۹.

[۹] د. داوودی، ا. ح. امامی و ع. سعیدی، "تولید و بررسی خواص مکانیکی پودر نانوکامپوزیت آلومینیوم ۷۰۱۴ آلومینا به روش آلیاژسازی مکانیکی"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۹، شماره ۴، صفحه ۹۳-۱۰۶، ۱۳۹۴.

[10] T. F. Stephenson, Rohatgi & P. A. Khan, "Aluminum Hybrid Composites Containing Nickel-Coated Graphite Particulate". Processing Properties and Applications of Cast Metal Matrix Composites, vol. 337, pp. 776-785, 1996.

[11] S. W. Ip, R. Sridhar, J. M. Toguri, T. F. Stephenson & A. E. M. Warner, "Wettability of Nickel Coated Graphite by Aluminum". Materials Science and Engineering: A, vol. 244, no. 1, pp. 31-38, 1998.

[12] J. A. E. Bell, T. F. Stephenson, A. E. M. Warner & V. Song, "Physical Properties of Graphitic Silicon Carbide Aluminum Metal Matrix Composites". SAE transactions, vol. 244, pp. 777-785, 1997.

[13] S. Suresh & B. Sridhara, "Wear Characteristics of Hybrid Aluminium Matrix Composites Reinforced with Graphite and Silicon Carbide Particulates". Composites Science and Technology, vol. 70, pp. 1652-1659, 2010.

[14] S. N. Alam & L. Kumar, "Mechanical Properties of Aluminium Based Metal Matrix Composites Reinforced with Graphite Nanoplatelets". Materials Science and Engineering: A, vol. 667, pp. 16-32, 2016.

[15] M. M. El-Sayed Seleman, M. M. Z. Ahmed & S. Ataya, "Microstructure and mechanical properties of hot extruded 6016 aluminum alloy/graphite composites". Journal of materials science & Technology, vol. 34, pp. 1580-1591, 2018.

[16] X. Zeng, J. Yu, D. Fu, H. Zhang & J. Teng, "Wear Characteristics of Hybrid Aluminum-Matrix Composites Reinforced with Well-Dispersed Reduced Graphene Oxide Nanosheets and Silicon Carbide Particulates". Vacuum, vol. 155, pp. 364-375, 2018.

مقدار گرافیت، کاهش چگالی و آگلومره شدن فاز تقویت‌کننده، افت خواص فشاری کامپوزیت مشاهده شد.

۴- افزودن گرافیت به زمینه آلومینیوم منجر به کاهش قابل توجه در ضریب اصطکاک شد.

۵- افزایش درصد گرافیت منجر به بهبود چشمگیر در مقاومت به سایش کامپوزیت شد.

۵- مراجع

[1] N. Greenwood & A. Earnshaw, "Chemistry of the Elements". Second ed, Pergamon Press. Pub, 1997.

[2] J. Praneeth & N. Naveen, "Aluminium Based Metal Matrix Composites: A Review of Reinforcement; Mechanical, Wear Properties". International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology, vol. 5, pp. 1232-1235, 2017.

[3] L. Yolshina, R. Muradymov & N. Molchanova, "Corrosion Behavior of Aluminum-Graphene and Aluminum-Graphite Composite Materials in a 3% NaCl Aqueous Solution". Russian Metallurgy (Metally), vol. 2, pp. 153-160, 2022.

[4] B. L. Dasari, M. Morshed, J. M. Nouri, D. Brabazon & S. Naher, "Mechanical Properties of Graphene Oxide Reinforced Aluminium Matrix Composites". Composites Part B: Engineering, vol. 145, pp. 136-144, 2018.

[5] M. Sambathkumar, R. Gukendran, T. Mohanraj, D. Karupannasamy, N. Natarajan & D. S. Christopher, "A Systematic Review on the Mechanical, Tribological, and Corrosion Properties of Al 7075 Metal Matrix Composites Fabricated through Stir Casting Process". Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2023, pp. 1-17, 2023.

[6] E. Ghasali, R. Yazdani-rad, K. Asadian & T. Ebadzadeh, "Production of Al-SiC-TiC Hybrid Composites Using Pure and 1056 Aluminum Powders Prepared Through Microwave and Conventional Heating Methods". Journal of Alloys and Compounds, vol. 690, pp. 512-518, 2017.

[7] G. Chen, Y. Jin, H. Zhang, F. Han, Q. Chen, J. Xu & Z. Zhao, "Microstructures and Mechanical Properties of In-Situ Al₃Ti/2024Al Composites After Solution and Subsequent Aging Treatment.". Materials Science and Engineering: A, vol. 724, pp. 181-188, 2018.

[26] E. Omrani, A. Dorri, P. L. Menezes & P. K. Rohatgi, "Influences of Graphite Reinforcement on the Tribological Properties of Self-Lubricating Aluminum Matrix Composites for Green Tribology, Sustainability, and Energy Efficiency—a Review". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 83, pp. 325-346, 2016.

[27] M. Tabandeh-Khorshid, E. Omrani, P. L. Menezes & P. K. Rohatgi, "Tribological Performance of Self-Lubricating Aluminium Matrix Nanocomposites: Role of Graphene Nanoplatelets". *Eng. Sci. Technol. Int J*, vol. 19, pp. 463-469, 2016.

۶- پی‌نوشت

- [1] Lin et al
- [2] Seleman et al
- [3] Flores et al
- [4] SPEX
- [5] Alam et al

[17] K. Naplocha & K. Granat, "Wear Performance of Aluminium/Al₂O₃/C Hybrid Composites". *Archives of Materials Science*, vol. 29, pp. 81-88, 2008.

[18] V. Mohanavela, K. Rajan, S. Suresh Kumar, G. Vijayan & M. S. Vijayanand, "Study on Mechanical Properties of Graphite Particulates Reinforced Aluminium Matrix Composite Fabricated by Stir Casting Technique". *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, pp. 2945-2950, 2018.

[19] M. I. Flores-Zamora, I. Estrada-Guel, J. Gonz'alez-Hern'andez, M. Miki-Yoshida & R. Mart'inez-S'anchez, "Aluminum-Graphite Composite Produced by Mechanical Milling and Hot Extrusion". *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 434, pp. 518-521, 2007.

[20] R. D. Lara, I. Estrada, G. Hinojosa, R. Flores, J. M. Herrera & R. Martinez, "Synthesis of Aluminum Alloy 7075-Graphite Composites by Milling Processes and Hot Extrusion". *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 509, pp. 284-289, 2011.

[21] T. Tayeh & et al., "Hardness and Young's modulus behavior of Al composites reinforced by nanometric TiB₂ elaborated by mechanosynthesis". *Materials Science and Engineering: A*, vol. 591, pp. 1-8, 2014.

[22] A. Wąsik, B. Leszczyńska-Madej & M. Madej, "Hot extruded Al₅SiC-graphite composites: Effect of graphite on microstructure, flexural, compressive and wear resistance behavior". *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 95, pp. 266-274, 2023.

[23] G. E. Dieter & D. Bacon, *Mechanical metallurgy*. Vol. 3. 1976: McGraw-hill New York.

[24] P. Senthilkumar, R. Manimaran & Y. Krishna Reddy, Evaluation of mechanical properties of hybrid Al7009 nanocomposite. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 43, pp. 216-224, 2021.

[25] H. P. Klug & L. E. Alexander, "X-ray Diffraction Procedures: for Polycrystalline and Amorphous Materials". 2nd Edition, Wiley Pub., 1974.

[26] H. Faleh, N. Muna & F. Ştefănescu, "Properties and applications of aluminium-graphite composites". *Advanced Materials Research*, vol. 1128, pp. 134-143, 2015.