

بررسی رفتار سایشی و مکانیکی نانوکامپوزیت هیبریدی آلومینیوم A380 تقویت شده با نانوصفحات گرافن و نانوذرات SiC

چکیده

هدف از این تحقیق بررسی ریزساختار و رفتار سایشی نانوکامپوزیت آلایژ آلومینیوم A1A380 تقویت شده با نانوصفحات گرافن (GNPs) و نانوذرات SiC تولید شده به روش آسیاب گلوله‌ای و کوره تف جوشی پلاسمای جرقه‌ای (SPS) است. درصد نانوذرات SiC ثابت و درصد نانوصفحات گرافن متغییر در نظر گرفته شد. نانوصفحات گرافن با درصدهای ۰,۲۵، ۰,۵، ۰,۷۵ و ۱ درصد وزنی و نانوذرات SiC در ۰,۵ درصد وزنی به نانوکامپوزیت اضافه شدند. وجود GNP های پراکنده با سطح ویژه بالا به طور قابل توجهی استحکام و سختی کامپوزیت ها را افزایش می دهد. مطالعات ریزساختاری آلیاژ نشان داد که افزودن GNPs تا ۰,۵ درصد وزنی اندازه دانه را کاهش می دهد، اما افزودن مقدار GNP بیشتر (۱ درصد وزنی GNPs) اندازه دانه را به طور قابل توجهی تغییر نمی دهد. در مقادیر بالاتر GNP، وجود آگلومره گرافن در مرزهای دانه ها مسیر مطلوبی برای رشد ترک است. مقدار بهینه نانوصفحات ۰,۵ درصد وزنی بدست آمد. مقاومت در برابر سایش نانوکامپوزیت های تولید شده نسبت به نمونه پایه بیشتر بوده و کاهش وزن نمونه پایه نسبت به نمونه بهینه ۳ برابر می باشد. ضریب اصطکاک به دلیل ماهیت خود روان کننده گرافن برای نمونه پایه و نانوکامپوزیت حاوی ۰,۵ درصد وزنی گرافن به ترتیب برابر است با ۰,۶۸۹ و ۰,۴۵۵ که نشان دهنده کاهش ضریب اصطکاک می باشد. همچنین سختی نمونه ها از ۱۰۵ ویکرز برای نمونه پایه به ۱۷۵ ویکرز برای نمونه حاوی ۰,۵ درصد وزنی گرافن افزایش می یابد.

کلیدواژگان

نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم؛ رفتار سایشی؛ خواص مکانیکی؛ ریزساختار، گرافن، کاربید سیلیسیم

Investigating wear and mechanical behavior of A380 aluminum hybrid nanocomposite reinforced with graphene nanosheets and SiC nanoparticles

Abstract

The purpose of this research is to investigate the microstructure and wear behavior of A1A380 alloy nanocomposite reinforced with graphene nanosheets (GNPs) and SiC nanoparticles produced by ball milling and spark plasma sintering furnace (SPS). The percentage of SiC nanoparticles was fixed and the percentage of graphene nanosheets was considered variable. Graphene nanosheets with percentages of 0.25, 0.5, 0.75 and 1% by weight and SiC nanoparticles at 0.5% by weight were added to the nanocomposite. The presence of dispersed GNPs with high specific surface area significantly increases the strength and hardness of composites. Microstructural studies of the alloy showed that the addition of GNPs up to 0.5 wt% reduced the grain size, but the addition of a higher amount of GNPs (1 wt%) did not significantly change the grain size. At higher GNP values, the presence of graphene agglomerates at the grain boundaries is a favorable path for crack growth. The optimal amount of nanosheets was 0.5% by weight. The wear resistance of the produced nanocomposites is higher than the base sample and the weight reduction of the base sample is 3 times compared to the optimal sample. Due to the self-lubricating nature of graphene, the friction coefficient for the base sample and the nanocomposite containing 0.5% by weight of graphene is 0.689 and 0.455, respectively, which indicates a reduction in the friction coefficient. Also, the hardness of the samples increases from 105 Vickers for the base sample to 175 Vickers for the sample containing 0.5% by weight of graphene.

Keywords: Aluminum-based nanocomposite; wear behavior; mechanical properties; Microstructure, graphene, silicon carbide

Table 1. Chemical composition of 380 Al alloy as base material.

Substance	Al	Si	Cu	Fe	Zn	Mn
Wt. %	Bal	8.5	3.5	1.3	3.0	0.5

۲-۲- آماده سازی Al A380/SiCnp-GNPs

درصدهای مختلف نانوصفحات گرافن (۰,۰۰, ۰,۲۵, ۰,۵۰, ۰,۷۵, ۱,۰۰ درصد) و درصد ثابت نانوذرات SiC (۰,۵ درصد وزنی) به پودر آلایز آلومینیوم A380 اضافه شد. مخلوط Al A380 و GNPs-SiCnp سپس در یک آسیاب گلوله ای پر انرژی به مدت ۱۰ ساعت در ۲۵۰ دور در دقیقه با نسبت جرم توپ به پودر ۱:۱۰ در اتمسفر آرگون آسیاب شد. تکه های اسید استئاریک (۲ درصد وزنی) به عنوان یک عامل کنترل فرآیند اضافه شد. برای جلوگیری از گرم شدن بیش از حد و چسبیدن مخلوط پودر، هر ۳۰ دقیقه آسیاب گلوله ای با ۱۵ دقیقه استراحت در هر چرخه آسیاب ادامه پیدا کرد. نمونه ها در دمای ۵۴۰ درجه سانتی گراد با سرعت حرارت ۵۰ درجه سانتی گراد در دقیقه و فشار ۴۰ مگاپاسکال برای مدت زمان نگهداری ۱۰ دقیقه تحت فرآیند SPS قرار گرفتند سپس توسط سیستم گردش آب در کوره خنک شدند. اندازه قالب استفاده شده برای تف جوشی نمونه ها ۱۵ mm میلی متر × ۱۰ میلی متر بود. سه نمونه برای هر درصد با استفاده از فرآیند توضیح داده شده در بالا تهیه شد.

۳-۲- مشخصه یابی

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای انجام تصاویر SEM و آنالیز EDS از پودرها و نمونه های نانوکامپوزیت (مدل: TEScan Mira 3- Czech) استفاده شد. آزمون سختی بر اساس استاندارد ASTM E10 برای بررسی مقاومت نانوکامپوزیت در برابر تغییر شکل پلاستیک (ESEWAY 7500) نیروی ۳۰ کیلوگرم و فرورفتگی قطر ۲,۵ میلی متر) استفاده شد. آزمون های سایش لغزشی خشک مطابق با استاندارد ASTM G99 با استفاده از یک پین روی دیسک تنظیم شده در دمای اتاق انجام شد. صفحه مقابل استفاده شده، دیسک فولادی 100Cr6 با سختی ۶۲ راکول سی بود. پین ها به قطر ۵ میلی متر و طول ۱۰ میلی متر در تماس با دیسک فولادی بودند. همه نمونه ها با سرعت چرخشی ۲۵۰ دور در دقیقه، که مربوط به سرعت ۰,۵ متر بر ثانیه است، تحت بارهای اسمی ۱۰ نیوتن مورد آزمایش قرار گرفتند. فاصله لغزشی ثابت ۱۰۰۰ متر برای آزمایش همه نمونه ها انتخاب شد. جرم تمام نمونه ها قبل و بعد از آزمون سایش با استفاده از ترازوی الکترونیکی (Make: GR200- AND) با دقت ۰,۱ میلی گرم ثبت شد.

۳-۲- نتایج و بحث

۳-۱- مطالعات ریزساختاری

ذرات آلومینیوم آلایز A380 اولیه، که در شکل ۱ الف نشان داده شده اند، کروی شکل هستند و قطری در حدود ۴۰ میکرومتر دارند و ذرات آلومینیوم در شکل ۱ ب پس از ۱۰ ساعت آسیاب گلوله ای به صورت ورقه ای صاف درآمده اند. شکل ۱ ج و د-۱ نیز نانوذرات کاربید سیلیسیم و نانوصفحات گرافن را بروی پودر آلومینیوم بعد از ۱۰ ساعت آسیاب نشان می دهد. توزیع فاز تقویت کننده در نمونه ها با استفاده از نقشه برداری اشعه ایکس تعیین شد. شکل ۲، توزیع عناصر C و Si در نمونه ها که بصورت توزیع یکنواخت در زمینه آلومینیوم A380 را پس از تف جوشی نشان می دهد. نشان می دهد. در حالی

تقاضا برای کاهش هزینه در حوزه حمل و نقل مانند صنایع خودرو یا هوافضا، کاهش مصرف سوخت را می طلبد که به نوبه خود با کاهش وزن قابل دستیابی است. از این نظر آلومینیوم و آلایزهای آن به دلیل چگالی کم، استحکام بالا و شکل پذیری خوب کاندیدای اصلی برای این نوع کاربردها هستند. گرافن به عنوان یک کلاس نوظهور از نانوساختارهای کربنی به دلیل ویژگی های مکانیکی برجسته اش مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۱، ۲]. به دلیل نانوساختار دو بعدی (۲ بعدی) و سطح ویژه بالاتر، نانوصفحات گرافن (GNPs) از نظر استحکام بهتر از نانولوله های کربنی (CNTs) عمل می کنند [۳-۶]. در نتیجه، GNPs با عنوان یک گزینه نانو تقویت کننده موثر برای کامپوزیت های سبک قوی، به ویژه در صنایع هوانوردی و فضانوردی ظاهر شده اند [۷]. آلومینیوم و آلایزهای آن به عنوان پرمصرف ترین فلز ساختاری سبک وزن، دارای ویژگی هایی مانند استحکام ویژه بالا، قابلیت بازیافت خوب، ماشین کاری عالی و هزینه کم هستند. با این حال، سختی پایین تر و مقاومت ضعیف در برابر سایش Al و آلایزهای آن به شدت کاربرد آتی آن را در شرایط خدمات غیرقابل پیش بینی و تقاضا در زمینه فناوری پیشرفته با مشکل مواجه کرده است [۸، ۹]. اگرچه روش های مقاوم سازی سنتی مانند عملیات حرارتی و کار سرد می توانند خواص مکانیکی Al و آلایزهای آن را تا حدی افزایش دهند، اما برای افزایش مقاومت سایشی مناسب نیستند [۱۰]. در نتیجه، به منظور دستیابی به هدف بهبود قابل توجه خواص مکانیکی و سایشی Al و آلایزهای آن، چندین محقق مطالعه خود را بر روی کامپوزیت های زمینه Al (AMCs) متمرکز کرده اند [۹، ۱۱-۱۳]. بارتولوچی و همکاران [۱۴] جزو اولین کسانی بودند که در سال ۲۰۱۱ از آسیاب گلوله ای برای ترکیب گرافن در نانوکامپوزیت های زمینه آلومینیوم استفاده کردند.

تحقیقات زیادی در مورد خواص مکانیکی و رفتار سایش نانوکامپوزیت های مبتنی بر آلومینیوم انجام شده است. بر اساس این تحقیق، با افزودن فاز تقویت کننده، رفتار سایشی و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت بهبود می یابد [۱۵-۲۲]. در این تحقیق هدف تولید نانوکامپوزیت های هیبریدی با زمینه AIA380 تقویت شده با نانوصفحات گرافن (۰,۲۵, ۰,۵, ۰,۷۵, ۱ درصد و ۱ درصد وزنی) و نانوذرات کاربید سیلیسیم (۰,۵ درصد وزنی) می باشد. آلایز AIA380 به دلیل سختی و خواص سایش خوب به عنوان ماده زمینه انتخاب می شود. علاوه بر این، این یک آلایز سبک در مقایسه با آلایز برنج، مس و فولاد است. نانوکامپوزیت های AIA380-GNPs-SiCnp با ترکیبی از متالورژی پودر و کوره تف جوشی پلاسمای جرقه ای (SPS) تولید شدند. AIA380 با بدون نانوصفحات گرافن و نانوذرات کاربید سیلیسیم تحت آزمایش سایش برای ارزیابی مقاومت به سایش قرار خواهند گرفتند.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد و روشها

پودر آلومینیوم AIA380 با اندازه ذرات متوسط ۲۰ میکرومتر به دست آمد. شکل پودر آلومینیوم خام AIA380 کروی است. جدول ۱ ترکیبات شیمیایی AIA380 را فهرست می کند. GNP با خلوص ۹۹,۹ درصد در ۵-۱۲ لایه و صفحات با قطر ۱-۲۰ میکرون تهیه شد. نانوذرات SiC با خلوص ۹۹,۹ درصد با قطر ۷۰ نانومتر تهیه شد.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلایز Al 380 به عنوان ماده پایه.

که افزایش درصد وزنی به بیش از ۰.۵ درصد نانوصفحات گرافن باعث آگلومره شدن نانوصفحات می شود. دلیل توزیع یکنواخت استفاده از روش آسیاب گلوله ای برای پخش نانوصفحات گرافن در زمینه آلیاژ آلومینیوم است.

در شکل ۳ ریزساختار نانوکامپوزیت در درصد های مختلف گرافن نشان داده شده است. در این شکل فاز خاکستری آلومینیوم است. تخلخل ها و تراکم فاز تقویتی در مرزهای دانه Al به صورت مناطق سیاه رنگ دیده می شوند، همانطور که در شکل ۳ د و ه نشان داده شده است. در آلومینیوم تقویت شده با گرافن که می توان آن را در تصاویر SEM به عنوان مناطق تاریک تشخیص داد که در امتداد مرزهای دانه Al نفوذ کرده و باعث تراکم قابل توجهی می شود.

جدول ۲ تأثیر مقادیر مختلف نانوصفحات گرافن را بر میانگین اندازه دانه نمونه ها بعد از تف جوشی را نشان می دهد. مطالعه نمونه ها وجود ویژگی های ریزساختاری متفاوتی را نشان داد که ممکن است منجر به خواص مکانیکی متفاوتی شود. از جدول ۲، مقادیر بهینه نانوصفحات گرافن ۰.۵ درصد وزنی تعیین شد. چندین مکانیسم برای فرآیند اصلاح دانه پیشنهاد شده است. در برخی مکانیسم ها وجود مقداری ذره به عنوان موثر در فرآیند اصلاح دانه شناخته شده است.

جدول ۲. اندازه دانه در درصد های مختلف نانوصفحات گرافن

Table 2. Grain size of with various graphene nano plates contents.

Sample	Grain size (micron)
A380	150±30
Al A380-0.5%SiC-0.5% GNPs	70±15
Al A380-0.5%SiC-0.75% GNPs	72±13
Al A380-0.5%SiC-1% GNPs	83±15

۳-۲- سختی

جدول ۳ نتایج سختی نمونه های اصلاح نشده و نمونه های نانوکامپوزیت را نشان می دهد. بهبود جزئی در سختی نمونه های نانوکامپوزیت می تواند نتیجه پراکندگی مؤثر نانو صفحات گرافن و نانوذرات SiC در زمینه باشد. همانطور که انتظار می رفت، مقادیر سختی نمونه های نانوکامپوزیت بالاتر از نمونه های اصلاح نشده است.

جدول ۳. نتایج سختی نمونه های مختلف نانوکامپوزیت.

Table ۳. Hardness results of different nanocomposite samples.

Sample	Hardness (Hv)
A380	105
Al A380-0.5%SiC-0.25% GNPs	141
Al A380-0.5%SiC-0.5% GNPs	175
Al A380-0.5%SiC-0.75% GNPs	121
Al A380-0.5%SiC-1% GNPs	115

۳-۳- رفتار سایشی

ضرایب اصطکاک (COF) تحت شرایط بارگذاری ۱۰ نیوتن برای نانوکامپوزیت های مختلف با درصد های وزنی مختلف نانوصفحات گرافن و درصد ثابت نانوذرات کاربید سیلسیم در جدول ۴ نشان داده شده است. مشاهده شده است که در یک بار اعمال شده معین، ضرایب اصطکاک برای نانوکامپوزیت های تقویت نشده بیشترین مقدار است. ضرایب اصطکاک با افزایش درصد وزنی GNP کاهش می یابد. این به دلیل وجود نانوذرات تقویت شده در نانوکامپوزیت است. بیشترین مقدار آسیب نمونه برای حالتی می باشد که هیچ تقویت کننده ای استفاده نشده است. از این رو، مقدار محصولات سایش باقیمانده باید دلیل اصلی بزرگ بودن COF باشد. تقویت کننده نانوصفحات گرافن به دلیل خاصیت خود روانکاری COF را کاهش داده است.

در حین سایش، نانوصفحات گرافن از نانوکامپوزیت جدا می شود و یک لایه روان کننده روی سطح بین دو ماده ایجاد می کند که ضریب اصطکاک را کاهش می دهد. هرچه نانو صفحات گرافن به طور یکنواخت در داخل زمینه پخش شوند، سختی نانوکامپوزیت را بیشتر بهبود می بخشد و ضریب اصطکاک را کاهش می دهد و مقدار سایش را کاهش می دهد. علاوه بر این، برای نانوکامپوزیت ها، به دلیل خواص مکانیکی بالاتر آنها، حفظ پایداری لایه اکسید سطحی آسان تر است و بنابراین منجر به نوسان نسبتاً کمتری می شود [۲۳].

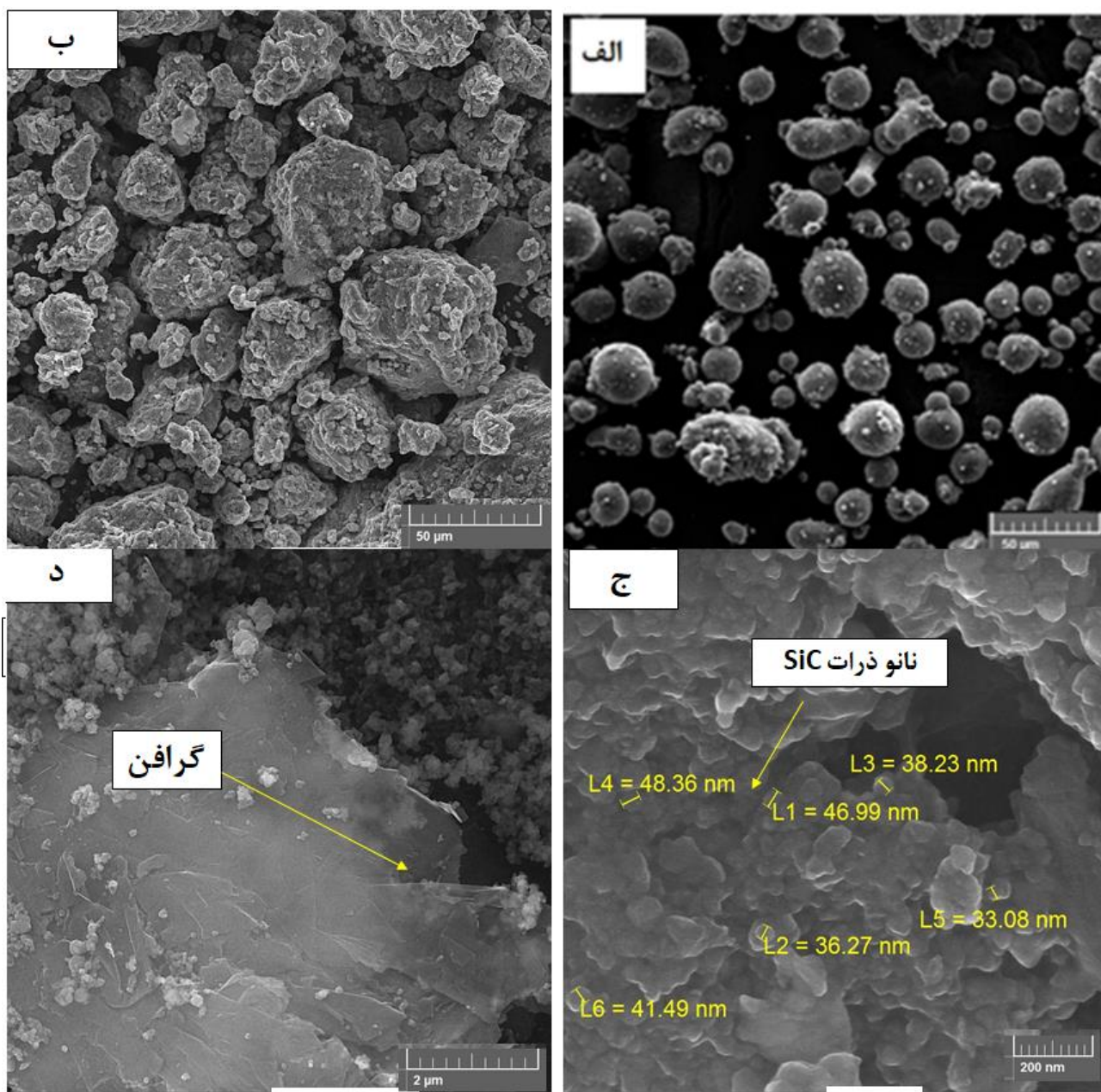


Figure 1 SEM morphology of (a) primary aluminum powder, (b) ball milled alloy powders at 10 h with SiC nanoparticles and graphene nanosheets, (c) SiC nanoparticles, (d) graphene nanosheets.

شکل ۱ مورفولوژی SEM (الف) پودر آلومینیوم اولیه، (ب) پودرهای آلیاژ گلوله ای آسیاب شده در ۱۰ ساعت به همراه نانوذرات SiC و نانوصفحات گرافن، (ج) نانوذرات SiC، (د) نانوصفحات گرافن.

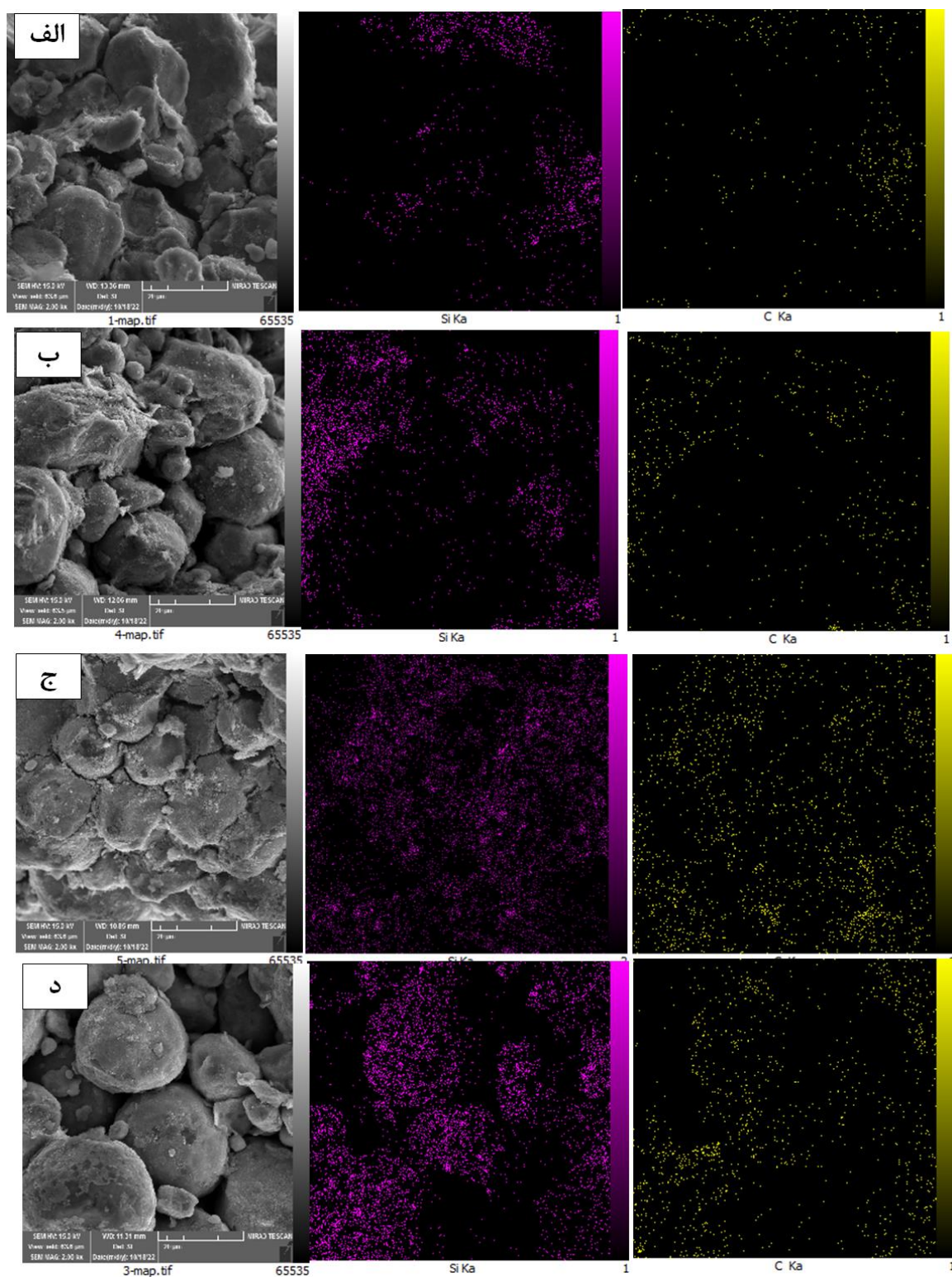


Fig. 2 SEM images from bulk nanocomposite produced from (a) 0.25 wt.%, (b) 0.5 wt.%, (c) 0.75 wt.%, (d) 1.0 wt.% graphene nanosheets (0.5 wt.% SiC for all samples).

شکل ۲ تصاویر SEM از نانوکامپوزیت تولید شده از (الف) ۰.۲۵ وزنی، (ب) ۰.۵ وزنی، (ج) ۰.۷۵ وزنی، (د) ۱ درصد وزنی نانوصفحات گرافن (۰.۵ درصد وزنی SiC برای همه نمونه ها).

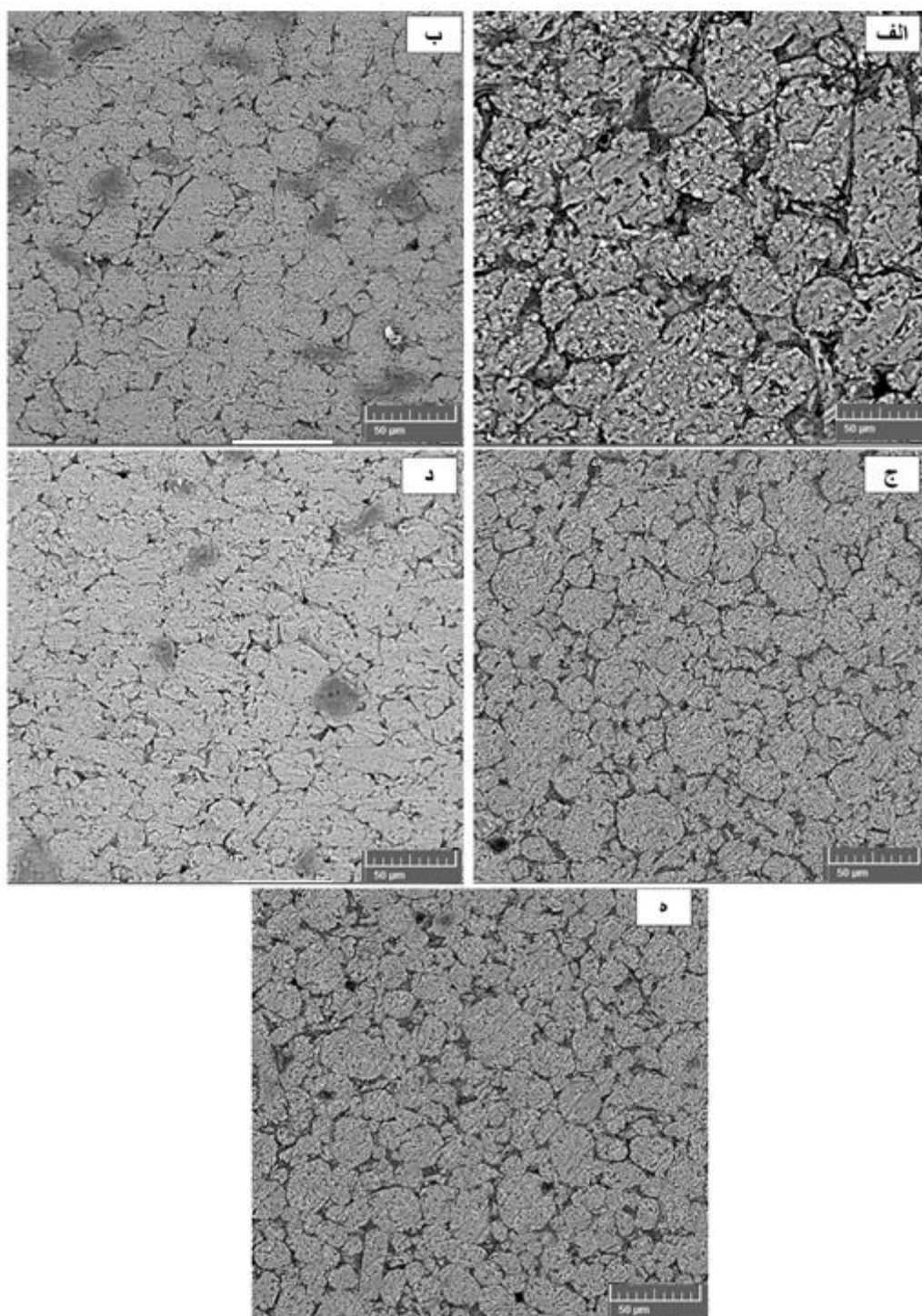


Fig. 3 Back scattered SEM images from the polished surfaces of the (a) pure Al alloy and nanocomposites for different weight percentages of graphene, (b) 0.25 wt.%, (c) 0.5 wt.%, (d) 0.75 wt.% and (e) 1.0 wt.%

شکل ۳ تصاویر SEM الکترون برگشتی از سطوح (الف) آلیاژ آلومینیوم خالص و نانوکامپوزیت ها برای درصدهای وزنی مختلف گرافن، (ب) ۰,۲۵ وزنی، (ج) ۰,۵ وزنی، (د) ۰,۷۵ وزنی و (ه) ۱ درصد وزنی.

صاف و فشرده است که با تغییر شکل جزئی و شیارهای کم عمق همراه است، که در آن سایش چسبان تقریباً وجود ندارد (شکل ۴ ج). با این وجود، مقداری خیلی کمی محصولات سایش را می توان به وضوح در شکل ۴ ج یافت که وقوع سایش ساینده را در نانوکامپوزیت های تقویت شده با ۰.۵ درصد وزنی گرافن نشان می دهد.

جدول ۴. ضریب اصطکاک برای آلیاژ AlA380 و نانوکامپوزیت ها برای درصد های وزنی مختلف گرافن.

Table ۴. Coefficient of friction for AlA380 alloy and nanocomposites for different weight percentages of graphene.

Sample	Coefficient of friction
A380	0.689
Al A380-0.5%SiC-0.25% GNPs	0.521
Al A380-0.5%SiC-0.5% GNPs	0.455
Al A380-0.5%SiC-0.75% GNPs	0.561
Al A380-0.5%SiC-1% GNPs	0.571

با توجه به سطوح سائیده شده نسبتاً سالم و صاف در نانوکامپوزیت حاوی ۰.۵ درصد وزنی نانوصفحات گرافن، می توان استنباط کرد که اکسیداسیون سطح می تواند منجر به یک لایه اکسیداسیون متراکم و پایدار شود که نقش مثبتی در محافظت از سطح ایفا می کند و منجر به آسیب سایش نسبتاً خفیف می شود. علاوه بر این، وجود آهن نشان دهنده انتقال مواد از دیسک فولادی به نمونه نانوکامپوزیت است. بر اساس بررسی میکروسکوپی لایه سطحی و محصولات سایش در سیستم سایش لغزشی آلیاژ Al-Si در برابر فولاد M2، [25] Li et al. خاطر نشان کرد که انتقال مواد از سطح دیسک به سطح سایش کامپوزیت و تشکیل یک لایه مخلوط مکانیکی (MML) در سایش لغزشی خشک اتفاق می افتد. یک لایه MML در هنگام سایش لغزشی تشکیل می شود و از تقویت کننده ها، زمینه و اکسیدهای آن تشکیل شده است.

مقادیر میانگین COF برای نانوکامپوزیت ها و آلیاژ زمینه AlA380 در جدول ۴ نشان داده شده است، کاهش اندازه ذرات زمینه در مقایسه با تقویت کننده ها همچنین COF و نرخ سایش کامپوزیت را کاهش می دهد [۲۴]. در این تحقیق، کاهش اندازه ذرات زمینه از طریق آسیاب گلوله ای منجر به توزیع همگن تقویت کننده ها در زمینه می شود و در نتیجه مقاومت به سایش نانوکامپوزیت ها را افزایش می دهد.

علاوه بر این، نانوکامپوزیت های توسعه یافته توسط فرآیند آسیاب گلوله ای و به دنبال آن SPS با ۰.۵ درصد وزنی نانوصفحات گرافن و ۰.۵ درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم، حداکثر مقاومت در برابر سایش را ایجاد می کنند. در حالی که ضریب اصطکاک در مورد ۰.۷۵ درصد وزنی و ۱.۰ درصد وزنی محتوای گرافن نسبتاً بالا است. این ممکن است به دلیل تجمع گرافن باشد. GNP هایی که در داخل زمینه تجمع می یابند به عنوان مراکز تنش در هنگام سایش عمل می کنند و باعث می شوند که قطعه از آن نقطه شکسته شود. این امر باعث کاهش مقاومت به سایش و افزایش نرخ سایش در نمونه های حاوی ۰.۷۵٪ و ۱٪ نانوصفحات گرافن می شود.

شکل ۴ مورفولوژی سایش نانوکامپوزیت بررسی شده در شرایط بارگذاری ۱۰ نیوتن را نشان می دهد. درجه آسیب سطحی کامپوزیت گرافن/Al A380 با افزایش محتوای تقویت کننده تا ۰.۵ درصد وزنی کاهش می یابد. در این حالت، لایه های گرافن به سطح می آیند و در هنگام سایش به عنوان روان کننده عمل می کنند و نرخ سایش و ضریب اصطکاک را کاهش می دهند. بر اساس این نتایج، هر چه میزان گرافن بیشتر از ۰.۵ درصد وزنی گرافن باشد، میزان سایش ناشی از کاهش سختی و جدا شدن ذرات آگلومره شده که انرژی پیوند ضعیفی با سطح دارند، بیشتر می شود، بنابراین روانکاری به خوبی انجام نمی شود. به وضوح می توان مشاهده کرد که در نمونه های حاوی گرافن بیشتر از ۰.۵ درصد وزنی سایش شدیدتر می شود. مانند لایه برداری، شیارهای عمیق و تغییر شکل پلاستیک در AlA380 خالص انجام می شود. همچنین در مقایسه با نانوکامپوزیت آلومینیوم/گرافن، شیارهای سایش به طور قابل توجهی وسیع تر هستند. در مقایسه، تمام سطوح سایش یافته نانوکامپوزیت ها شیارهای کم عمق، لایه برداری کمتر و مسیر سایش باریک تر را نشان می دهند. برای نانوکامپوزیت های آلومینیوم-گرافن با ۰.۵ درصد وزنی، سطح سایش نسبتاً

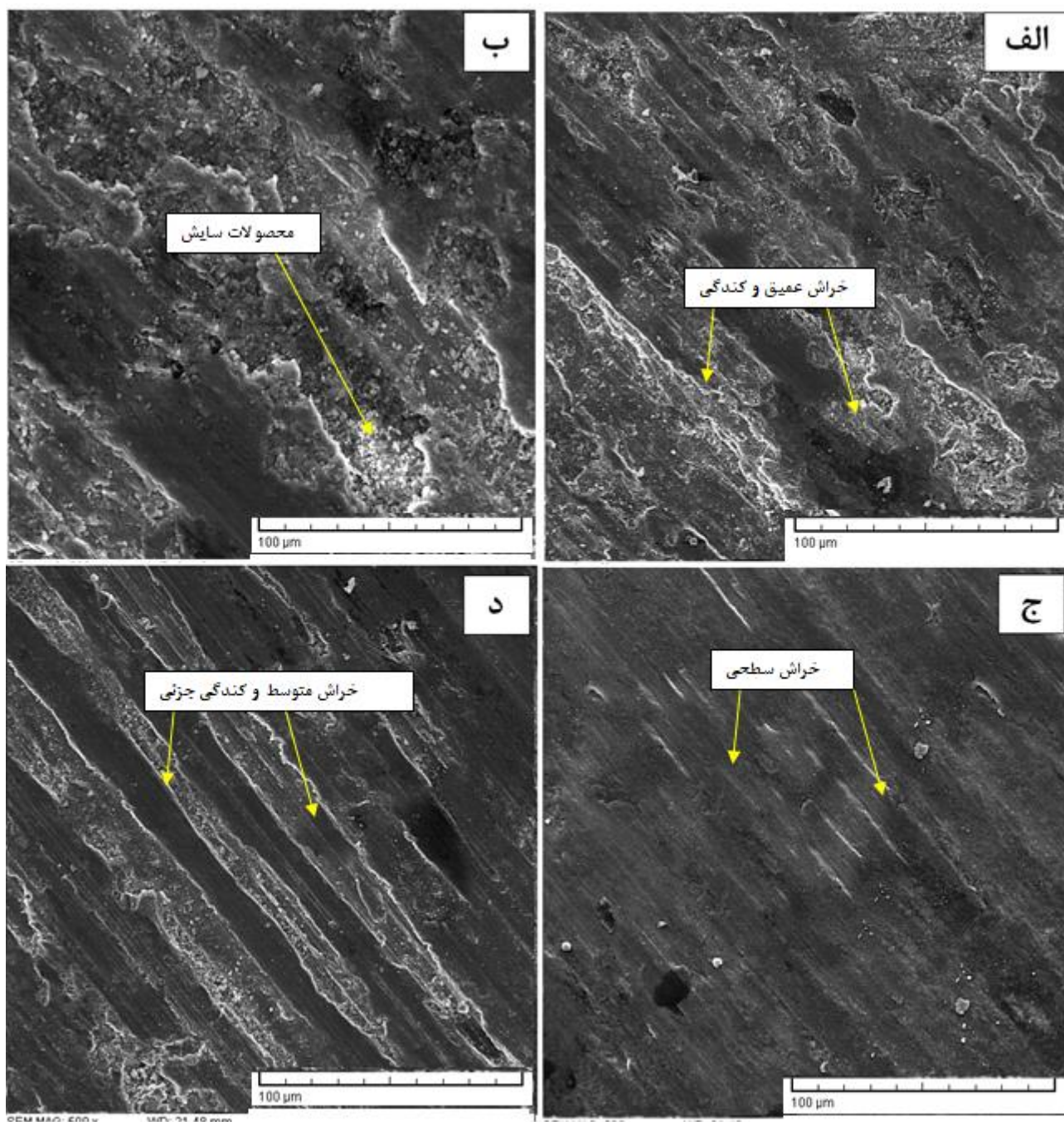


Fig. 4 SEM images of worn surfaces of (a) pure AIA380, (b) 0.25 wt.%GNP, (c) 0.5 wt.% GNP and (e) 1.0 wt.% GNP tested under 10 N applied load.

شکل ۴ تصاویر SEM از سطوح سائیده شده (الف) AIA380 خالص، (ب) ۰٫۲۵ درصد وزنی GNP، (ج) ۰٫۵ درصد وزنی GNP و (ه) ۱٫۰ درصد وزنی GNP تحت بار اعمال شده ۱۰ نیوتن.

را نشان می دهد. این نتایج در بار ثابت (۱۰ نیوتن) و سرعت چرخش ثابت دیسک (۲۵۰ دور در دقیقه) به دست آمد. مشاهده می شود که با افزایش میزان

نتایج سایش برای آلیاژ آلومینیوم A380 برای نمونه های اصلاح نشده و نانوکامپوزیت ها در جدول ۵ نشان داده شده است. جدول ۵ میزان کاهش وزن

- [1] S. Stankovich, D. A. Dikin, G. H. B. Dommett, K. M. Kohlhaas, E. J. Zimney, E. A. Stach, R. D. Piner, S. T. Nguyen, R. S. Ruoff, "Graphene-based composite materials," *Nature*, vol. 442, p. 282–286, 2006.
- [2] R. J. Young, I. A. Kinloch, L. Gong, K. S. Novoselov, "The mechanics of graphene nanocomposites: A review," *Composites Science and Technology*, vol. 72, p. 1459–1476, 2012.
- [3] F. Y. Chen, J. M. Ying, Y. F. Wang, S. Y. Du, Z. P. Liu, Q. Huang, "Effects of graphene content on the microstructure and properties of copper matrix composites," *Carbon*, vol. 96, p. 836-842, 2016.
- [4] L. Y. Chen, H. Konishi, A. Fehrenbacher, C. Ma, J. Q. Xu, H. Choi, H. F. Xu, F. E. Pfefferkorn, X. C. Li, "Novel nanoprocessing route for bulk graphene nanoplatelets reinforced metal matrix nanocomposites," *Scripta Materialia*, vol. 67, p. 29-32, 2012.
- [5] A. D. Moghadam, E. Omrani, P. L. Menezes, P. K. Rohatgi, "Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes and graphene -A review," *Composites Part B: Engineering*, vol. 77, p. 402-420, 2015.
- [6] P. K. Dinesh Kumar, S. Darius Gnanaraj, "Studies on Al-Si based hybrid aluminium metal matrix nanocomposites," *Materials Today Communications*, vol. 38, p. 108132, 2024.
- [7] S. Kiani, S. E. Mirsalehi, "Friction stir additive manufacturing of B4C and graphene reinforced aluminum matrix hybrid nanocomposites using consumable pins," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 28, p. 1094-1110, 2024.
- [8] S. S. Mirian Mehrian, F. Khodabakhshi, M. Rahsepar, M. Mohammadi, A. P. Gerlich, "Electrochemical corrosion characteristics of friction stir-reacted aluminum matrix hybrid nanocomposites," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 28, p. 1924-1940, 2024.
- [9] P. Raj, P. L. Biju, B. Deepanraj, N. Menachery, "A systematic review on characterization of hybrid aluminium nanocomposites," *Materials Today: Proceedings*, vol. 72, p. 2139-2150, 2023.

گرافن میزان کاهش وزن کاهش یافته است. از جدول ۵، مشخص است که افزودن نانو صفحات گرافن و نانوذرات SiC به آلیاژ آلومینیوم A380 کاهش وزن را در مقایسه با آلیاژ آلومینیوم اصلاح نشده کاهش داده است. این را می توان به توزیع یکنواخت و پراکندگی نانو صفحات گرافن و نانوذرات SiC در نانوکامپوزیت های اصلاح شده با ۰.۵ درصد وزنی گرافن توصیف کرد.

جدول ۵. کاهش وزن به عنوان تابعی از مقدار GNP برای انواع مختلف نانوکامپوزیت ها.

Table ۵. Weight loss as a function of GNPs content for unrefined and refined nanocomposites

Sample	Weight loss(mg)
A380	6
Al A380-0.5%SiC-0.25% GNPs	2.4
Al A380-0.5%SiC-0.5% GNPs	2
Al A380-0.5%SiC-0.75% GNPs	2.1
Al A380-0.5%SiC-1% GNPs	2.3

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، نانوکامپوزیت های زمینه آلومینیومی A380 تقویت شده توسط GNPs-SiC تولید شدند و رفتار ریزساختاری، مکانیکی و تریبولوژیکی این نانوکامپوزیت ها بررسی شد. یافته های تجربی به شرح زیر خلاصه می شود:

- ۱- مقدار بهینه نانوذرات ۰.۵ درصد وزنی GNP است.
- ۲- هنگامی که درصد وزنی نانوکامپوزیت به بیش از ۰.۱۵ درصد وزنی برسد. تجمع GNPs در مرز دانه باعث تردی، تخلخل، پیوند سطحی کمتر و در نتیجه کاهش خواص مکانیکی می شود.
- ۳- افزودن تقویت کننده نانویی مقاومت به سایش نانوکامپوزیت ها را به میزان قابل توجهی بهبود بخشید.
- ۴- با این حال، افزایش بیش از حد مقدار گرافن باعث تجمع و آگلومره شدن می شود، بنابراین COF و نرخ سایش افزایش می یابد.
- ۵- مقاومت در برابر سایش نانوکامپوزیت های تولید شده نسبت به نمونه پایه بیشتر بوده و کاهش وزن نمونه پایه نسبت به نمونه بهینه ۳ برابر می باشد. ضریب اصطکاک به دلیل ماهیت خود روان کننده گرافن برای نمونه پایه و نانوکامپوزیت حاوی ۰.۵ درصد وزنی گرافن به ترتیب برابر است با ۰.۶۸۹ و ۰.۴۵۵، که نشان دهنده کاهش ضریب اصطکاک می باشد. همچنین سختی نمونه ها از ۱۰۵ ویکرز برای نمونه پایه به ۱۷۵ ویکرز برای نمونه حاوی ۰.۵ درصد وزنی گرافن افزایش می یابد.
- ۶- انتقال مکانیزم سایش از ترکیب سایش لایه لایه، سایش چسبان و سایش ساییده به سایش خفیف ساییده با افزایش محتوای تقویت کننده نانوصفحات گرافن تا ۰.۵ درصد وزنی وجود داشت.
- ۷- افزایش محتوای گرافن برای تشکیل MML در طول فرآیند لغزش خشک مفید بود که نه تنها می تواند از سطح ساییده محافظت کند بلکه COF نانوکامپوزیت ها را نیز کاهش می دهد.

۵- مراجع

Journal of Physics: Conference Series, vol. 1455, p. 12-21, 2020.

[19] N. Puneeth, J. Satheesh, V. Koti, P. G. Koppad, M. R. Akbarpour, G. J. Naveen, "Application of Taguchi's method to study the effect of processing parameters of Al6082/B4C/Al₂SiO₅ hybrid composites on mechanical properties," *Materials Research Express*, vol. 6, p. 10-15, 2019.

[20] S. J. Niteesh Kumar, R. Keshavamurthy, M. R. Haseebuddin, P. G. Koppad, "Mechanical Properties of Aluminium-Graphene Composite Synthesized by Powder Metallurgy and Hot Extrusion," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 70, p. 605–613, 2017.

[21] A. C. Gowda, P. G. Koppad, D. Sethuram, R. Keshavamurthy, "Morphology Studies on Mechanically Milled Aluminium Reinforced with B₄C and CNTs," *Silicon*, vol. 11, p. 1089 – 1098, 2019.

[22] V. Koti, Mahesh, K. V. S. Murthy, P. G. Koppad, D. Sethuram, "Hardness and electrical conductivity of uncoated and silver coated carbon nanotubes reinforced copper nanocomposites," *Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences*, vol. 47, p. 179-187, 2022.

[23] A. O. Adegbenjo, B. A. Obadele, P. A. Olubambi, "Densification, hardness and tribological characteristics of MWCNTs reinforced Ti6Al4V compacts consolidated by spark plasma sintering". *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 749, p. 818-833, 2018.

[24] E. A. Diler, R. Ipek, "Main and interaction effects of matrix particle size, reinforcement particle size and volume fraction on wear characteristics of Al–SiCp composites using central composite design," *Composites Part B: Engineering*, vol. 50, p. 371-380, 2013.

[25] X. Y. Li, K. N. Tandon, "Mechanical mixing induced by sliding wear of an Al–Si alloy against M2 steel," *Wear*, vol. 225, p. 640-648, 1999.

[10] X. Li, Y. Yang, "Theoretical and experimental study on ultrasonic dispersion of nanoparticles for strengthening cast Aluminum Alloy A356," *Metals science and technology-JOM*, vol. 26, p. 12–20, 2008.

[11] R. Abedinzadeh, E. Norouzi, D. Toghraie, "Study on machining characteristics of SiC–Al₂O₃ reinforced aluminum hybrid nanocomposite in conventional and laser-assisted turning," *Ceramics International*, vol. 48, p. 29205-29216, 2022.

[12] M. M. H. Bastwros, A. M. K. Esawi, A. Wifi, "Friction and wear behavior of Al–CNT composites," *Wear*, vol. 307, p. 164–173, 2013.

[13] A. Nieto, H. Yang, L. Jiang, J. M. Schoenung, "Reinforcement size effects on the abrasive wear of boron carbide reinforced aluminum composites," *Wear*, vol. 390–391, p. 228–235, 2017.

[14] S. F. Bartolucci, J. Paras, M. A. Rafiee, J. Rafiee, S. Lee, D. Kapoor, N. Koratkar, "Graphene/aluminum nanocomposites," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, p. 7933–7937, 2011.

[15] A. El-Ghazaly, G. Anis, H. G. Salem, "Effect of graphene addition on the mechanical and tribological behavior of nanostructured AA2124 self-lubricating metal matrix composite," *Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 95, p. 325–336, 2017.

[16] G. Anil Kumar, J. Satheesh, K. V. Shivananda Murthy, H. M. Mallikarjuna, N. Puneeth, Praveennath G. Koppad, "Optimization of Wear Properties of B₄C Nanoparticle-Reinforced Al7075 Nanocomposites Using Taguchi Approach," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, vol. 22, p. 385-93, 2022.

[17] H. R. M. Naik, L. H. Manjunath, V. Koti, A. Lakshmikanthan, G. P. Koppad, P. Kumaran., "Al/Graphene/CNT Hybrid Composites: Hardness and Sliding Wear Studies," *FME Transactions*, vol. 49, p. 414-421, 2021.

[18] D. Sethurama, R. Keshavamurthy, S. Paljor, P. E. Rohit, P. G. Koppad, "Effect of multiple reinforcements (CNT/Si₃N₄) on hardness, electrical conductivity and friction coefficient of aluminium hybrid composites,"