

تأثیر مقدار نانوذرات کاربید سیلیسیم (SiC) بر خواص مکانیکی و رفتار سایشی نانوکامپوزیت آلیاژ آلومینیوم A380 تولید شده به روش متالورژی پودر

علی محمدی* و محمد علی پور

مهندسی مواد، دانشگاه تبریز، تبریز

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۱۶)

چکیده: در این کار تحقیقاتی اثر افزودن نانوذرات کاربید سیلیسیم بر روی سختی و مقاومت به سایش آلیاژ آلومینیوم A380 مورد بررسی قرار گرفت. پودر آلومینیوم A380 و نانوذرات SiC با مقادیر (۰، ۵/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی) در یک دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای در اتمسفر آرگون به مدت ۱۰ ساعت آسیاب شدند. نسبت وزن گلوله به پودر ۱:۱۰ و سرعت چرخش روی ۲۵۰ دور در دقیقه تعیین شد. پس از فرآیند آسیاب، از پرس گرم برای تولید نمونه‌ها استفاده شد. محصولات از طریق قالب گرافیتی به قطر ۱۵ میلی‌متر همزمان با سرعت گرمایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه تا دمای پخت نهایی ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد با زمان نگهداری ۳۰ دقیقه تحت خلأ در فشار ۵۰ مگاپاسکال در دستگاه پرس گرم قرار گرفت. ریز ساختار و سختی نمونه‌های تولید شده با استفاده از میکروسکوپ نوری و دستگاه سختی‌سنجی ویکرز مورد بررسی قرار گرفت. برای تست سایش از روش پین روی دیسک استفاده شد. بهترین سختی نمونه‌ها مربوط به آلیاژ آلومینیوم با ۵/۵ درصد وزنی نانوذرات SiC بود. نانو کامپوزیت حاوی دو درصد وزنی نانوذرات SiC بیشترین مقاومت به سایش را در مقایسه با سایر نمونه‌های تست شده نشان داد.

واژه‌های کلیدی: آلیاژ آلومینیوم، سختی، سایش، متالورژی پودر، SiC.

The Effect of SiC Nanoparticles' content on Mechanical Properties and Wear Behavior of A380 Aluminum Alloy Nanocomposite Produced by Powder Metallurgy Method

A. Mohammadi* and M. Alipour

Department of Materials Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: alim7598678@gmail.com

ABSTRACT

In this research, the effect of adding SiC nanoparticles on the hardness and wear behavior of A380 aluminum alloy was investigated. A380 aluminum powder and SiC nanoparticles with values of 0, 0.5, 1, and 2 wt.% were ground in a planetary ball mill in argon atmosphere for 10 hours. The weight ratio of ball to powder and the rotation speed was adjusted at 1:10 and 250 rpm, respectively. After the milling process, a hot press was used to produce the samples. The products were produced through a graphite mold with a diameter of 15 mm at a heating rate of 10 °C/min to a final sintering temperature of 520 °C and a holding time of 30 minutes in vacuum under pressure of 50 MPa and were placed in the hot press machine. The microstructure and hardness of the samples were examined using an optical microscope and Vickers hardness tester apparatus, respectively. The wear resistance was evaluated by pin-on-disk method. The greatest hardness of the samples was related to the aluminum alloy containing 0.5 wt.% SiC nanoparticles. AlA380-2 wt.% SiC nanocomposite represented the highest wear resistance compared to the other experimented samples.

Keywords: Aluminum alloy, Hardness, Wear, Powder metallurgy, SiC.

۱- مقدمه

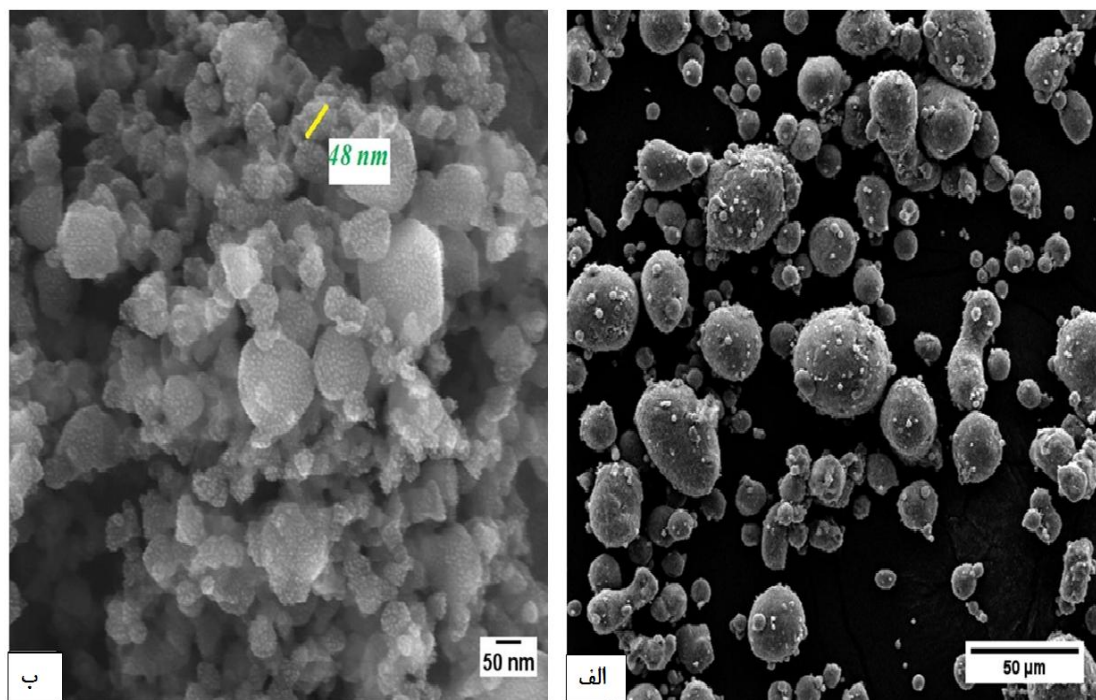
آلیاژهای آلومینیوم معمولاً در صنعت برای کاربردهای مختلف مهندسی استفاده می‌شود. به‌طور گسترده در صنعت خودرو و هوا فضا و الکترونیک مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱). آلیاژ آلومینیوم A380 به دلیل وزن سبک، استحکام ویژه بالا و مقاومت در برابر خوردگی، به‌طور گسترده در صنعت خودرو برای تولید سرسیلندر و بلوک موتور استفاده می‌شود (۲-۴). با این‌حال، مقاومت در برابر سایش از نقاط ضعف اصلی آلیاژهای آلومینیوم هستند. برای غلبه بر این مشکلات، آلیاژهای آلومینیوم تقویت شده توسط ذرات سرامیکی، معروف به کامپوزیت‌های زمینه فلزی^۱ توسعه یافته‌اند (۴ و ۵). اضافه کردن عوامل تقویت‌کننده سرامیکی به آلیاژهای آلومینیوم موجب افزایش خواص مکانیکی از جمله سختی و مقاومت به سایش می‌شود. عمده ذرات تقویت‌کننده که به آلیاژهای آلومینیوم اضافه می‌شوند بوریدها، کاربیدها، اکسیدها و نیتريد‌ها می‌باشند. کاربید سیلیسیم به‌دلیل برخورداری از خواص فیزیکی و شیمیایی خاص و ویژه از جمله سختی بسیار زیاد و مقاومت بسیار زیاد در برابر دمای بالا و مقاومت بالا در برابر خوردگی به‌عنوان محبوب‌ترین افزودنی‌ها در بین تقویت‌کننده‌های ذرات سرامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۶ و ۷). چنانچه کاربید سیلیسیم در ابعاد نانومتری به زمینه آلیاژ آلومینیومی اضافه شود انتظار می‌رود خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیوم را نسبت به تقویت‌کننده با ابعاد میکرون به میزان قابل توجهی بهبود دهد (۸). البته این موضوع نیازمند آن است که نانو ذرات تقویت‌کننده

را بتوان به‌طور همگن و بدون آگلومره شدن در زمینه پخش کرد. چندین روش برای تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی وجود دارد که متالورژی پودر به‌عنوان یک روش خوب در تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی در نظر گرفته می‌شود. برتری مهم این روش دمای پایین تولید آن در مقایسه با روش‌های ذوب است. بنابراین از واکنش بین ماتریس و فازهای تقویت‌کننده جلوگیری می‌شود. از سوی دیگر، توزیع خوبی از ذرات تقویت‌کننده را می‌توان به‌دست آورد (۹). رحمان و همکارانش (۱۰)، کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با کاربید سیلیسیم را با درصد‌های وزنی ۵، ۱۰ و ۲۰ به روش ریخته‌گری تولید نموده و خواص مکانیکی و سایشی آن را بررسی نمودند و نتایج نشان داد که کامپوزیت تهیه شده با ۲۰ درصد وزنی کاربید سیلیسیم، دارای بیشترین سختی، استحکام کششی و مقاومت سایشی پین بر دیسک است. در مطالعه دیگری توسط کاراز و همکارانش (۱۱)، کامپوزیت آلومینیوم تقویت شده با ۱۰٪ و ۵۰٪ حجمی کاربید سیلیسیم، با روش پرس گرم تحت فشار ۲۵ مگاپاسکال و دمای ۵۲۵ و ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد تهیه شده است. سختی اندازه‌گیری شده برای نمونه‌ها، با افزایش میزان تقویت‌کننده از ۵۴ برینل برای آلیاژ زمینه به ۱۴۸ برینل برای ۵۰٪ تقویت‌کننده، افزایش یافته است و همچنین استحکام تسلیم و مدول الاستیک کامپوزیت با افزایش کاربید سیلیسیم افزایش می‌یابد.

در این کار تحقیقاتی از پرس گرم برای تولید نمونه نانو کامپوزیت زمینه A380 Al با نانو ذرات SiC استفاده شد که

جدول ۱- ترکیب شیمیایی Al A380

عنصر	Al	Fe	Si	Cu	Zn	Mn	Ni	Sn	Mg
مقدار (درصد وزنی)	بقیه	۱/۳	۸/۵	۳/۵	۳	۰/۵	۰/۵	۰/۳۵	۰/۵



شکل ۱- تصاویر SEM مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق: الف) پودر Al A380 و ب) نانوذرات SiC.

شده است. نانوذرات SiC به اندازه ۱۰۰-۴۰ نانومتر و خلوص ۹۹٪ به عنوان تقویت کننده خریداری و استفاده شدند. شکل (۱) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی^۲ پودرهای آلیاژ آلومینیوم A380 و نانوذرات SiC است.

۲-۲- ساخت نانوکامپوزیت های Al A380-SiC با پرس گرم
پودر Al A380 و نانوذرات SiC با مقادیر (۰، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی) در یک دستگاه آسیاب گلوله ای سیاره ای با استفاده از گلوله های فولادی سخت شده با قطرهای مختلف (۴ تا ۱۰ میلی متر) در اتمسفر آرگون به مدت ۱۰ ساعت آسیاب شدند. برای محافظت از پودر در برابر آگلومره شدن و جوش سرد، ۲ درصد وزنی اسید استئاریک به عنوان یک عامل کنترل فرآیند به مخلوطها اضافه شد. نسبت وزن گلوله به پودر ۱۰ به

تا به حال هیچ تحقیقی در مورد تولید کامپوزیت آلیاژ آلومینیوم A380 با درصد های مختلف نانوذرات SiC به صورت متالورژی پودر انجام نشده است. در این پروژه تأثیر درصد وزنی نانوذرات تقویت کننده بر سختی و مقاومت به سایش نمونه ها مورد بررسی قرار گرفت. شرایط بهینه پارامترهای پردازش و مکانیسم های تقویت کننده را می توان از این مطالعه استخراج کرد.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد اولیه

پودر آلیاژ آلومینیوم (Al A380) در محدوده اندازه ~ ۵۰-۳۰ میکرومتر و خلوص ۹۹/۹۵٪ خریداری و برای زمینه استفاده شد. ترکیب شیمیایی پودر Al A380 در جدول (۱) نشان داده

در برابر فرورونده هر می شکل از جنس الماس سختی آن ها را تعیین می کند. فرورونده به کار رفته در این روش، الماس هر می با قاعده مربع شکل است که سطوح مقابل آن با زاویه ۱۳۶ درجه به یکدیگر می رسند.

مقدار سختی ماده پس از آزمایش توسط رابطه (۳) به دست می آید (۱۳):

$$VH = \frac{2F \sin(136^\circ / 2)}{d^2} \approx \frac{1.854 F}{d^2} \quad (3)$$

برای اندازه گیری سختی از هر نمونه حداقل ۵ مرتبه از نقاط مختلف سختی گرفته شد و میانگین سختی ها به صورت عدد سختی ارائه شد. در این پژوهش برای اندازه گیری سختی نمونه ها از دستگاه سختی سنجی میکرو ویکرز مدل MHV-1000Z با نیرو ۲۵ گرم- نیرو به مدت ۱۵ ثانیه استفاده شد.

۲-۵- آزمون سایش

خواص سایشی نمونه های تولید شده به روش پین روی دیسک طبق استاندارد ASTM G99 در اتمسفر و دمای اتاق (۲۳ درجه سانتی گراد)، دامنه رطوبت بین ۳۰-۴۰٪ و پین فولاد کروم دار با در نظر گرفتن پارامترهای نیروی اعمالی ۲ نیوتون، مسافت لغزش ۵۰۰ متر و سرعت چرخش ۱۹۱ دور بر دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. علت انتخاب مقدار نیروی اعمالی ۲ نیوتون به این دلیل است که نمونه ها در نیروهای بالا تخریب شدند و مقدار ۲ نیوتون نیروی بهینه انتخاب شد. قطر نمونه های مورد آزمایش ۱/۵ سانتی متر و ضخامت آن ها ۱ سانتی متر بود.

۲-۶- متالوگرافی

برای مطالعه ریز ساختار، روی سطح نمونه ها عملیات سمباده زنی و پولیش کاری انجام شد. سپس نمونه ها بر طبق استاندارد ASTM E 407-2015 با محلول (۱۹۰ میلی لیتر آب، ۱ میلی لیتر HF، ۳ میلی لیتر HCl، ۵ میلی لیتر HNO₃) به مدت ۲۰-۱۰ ثانیه اچ شده و با میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفتند.

۱ و سرعت چرخش ۲۵۰ دور در دقیقه تعیین شد. پس از فرآیند آسیاب، از پرس گرم برای تولید نمونه ها استفاده شد، ۵ گرم پودر از طریق قالب گرافیتی به قطر ۱۵ میلی متر همزمان با سرعت گرمایش ۱۰ درجه سانتی گراد در دقیقه تا دمای پخت نهایی ۵۲۰ درجه سانتی گراد با زمان نگهداری ۳۰ دقیقه تحت خلأ در فشار ۵۰ مگاپاسکال در دستگاه پرس گرم قرار گرفت. نمونه ها به ضخامت ۱ سانتی متر تولید شد. سپس نمونه های کامپوزیتی، توسط آزمایش های مختلف خواص فیزیکی، مکانیکی و بررسی های ریزساختاری مورد مطالعه قرار گرفتند.

۲-۳- چگالی

مورفولوژی و خصوصیات ذاتی پودرها، اندازه و چگونگی توزیع ذرات تقویت کننده و فشار پرس عوامل مؤثر بر چگالی نمونه ها است. چگالی کامپوزیت های زیتتر شده با استفاده از روش استاندارد ذکر شده در ASTM-C373-88 و بر اساس اصل ارشمیدس تعیین گردید در این روش ابتدا وزن نمونه ها (D) اندازه گیری شد. در مرحله بعد نمونه ها به مدت ۱ ساعت در ظرفی از آب مقطر جوشانیده شده بعد از این مرحله نمونه طی دو نوبت توزین شد که یکی تعیین وزن نمونه در حالت اشباع (M) و دیگری تعیین وزن آن در حالت تعلیق درون آب (S) است. در تمام این موارد لازم است توزین با دقت ۰/۰۱ گرم انجام شد. حجم ظاهری نمونه (V) بر حسب سانتی متر مکعب از رابطه (۱) به دست می آید (۱۲):

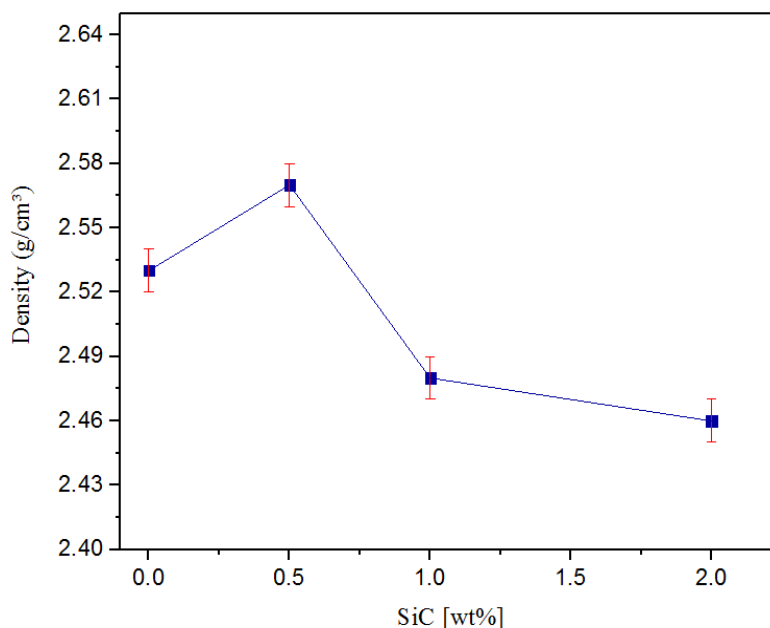
$$V = M - S \quad (1)$$

چگالی نمونه ها (B) بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب از تقسیم جرم خشک (D) بر حجم ظاهری نمونه (V) طبق رابطه (۲) تعیین می شود (۱۲).

$$B = \frac{D}{V} = \frac{D}{M - S} \quad (2)$$

۲-۴- آزمون سختی سنجی میکرو ویکرز

برای تعیین سختی نمونه ها، از روش ویکرز استفاده شد. سختی ویکرز یکی از معیارهای سختی است که بر اساس مقاومت مواد



شکل ۲- نمودار تغییرات چگالی با افزایش کاربید سیلیسیم.

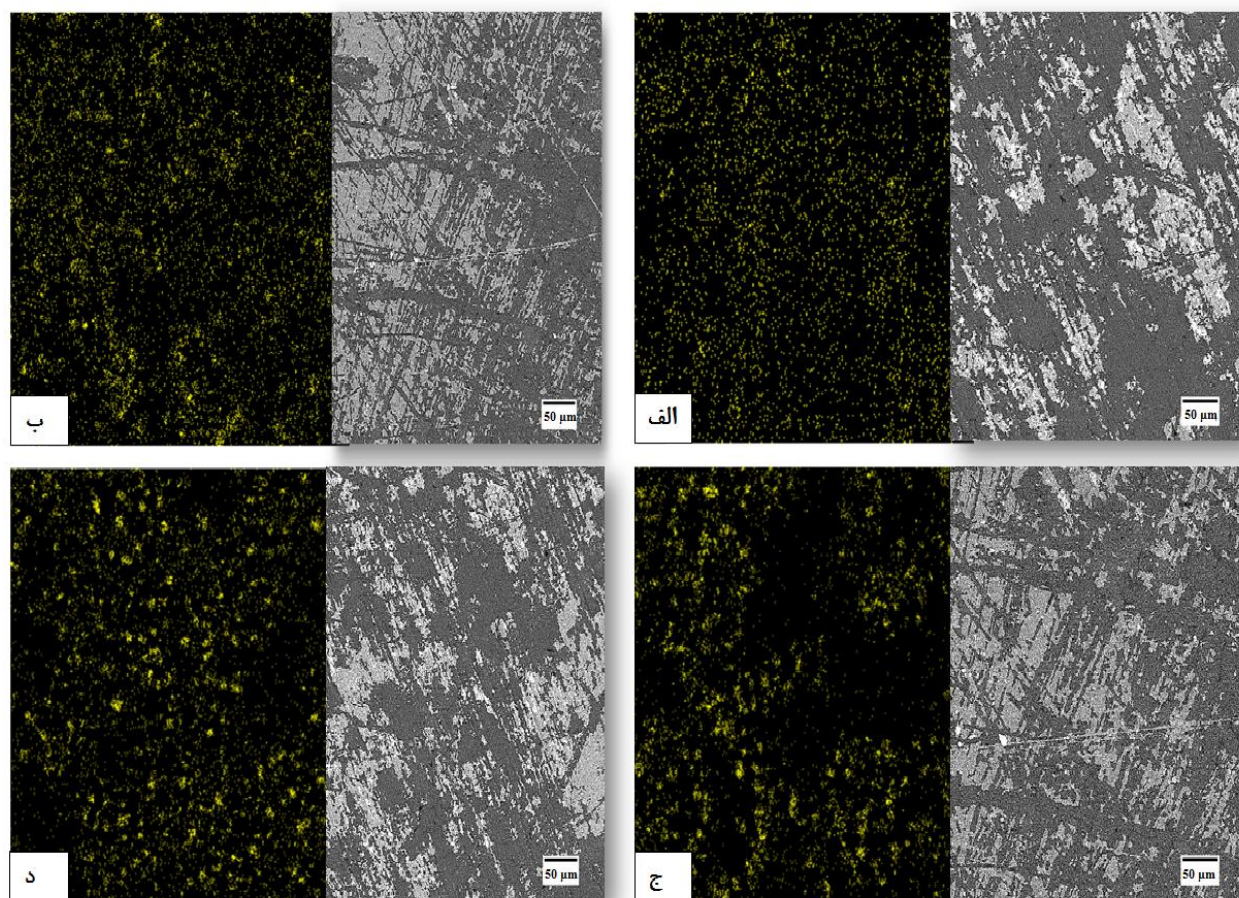
۳- نتایج و بحث

۳-۱- چگالی و سختی

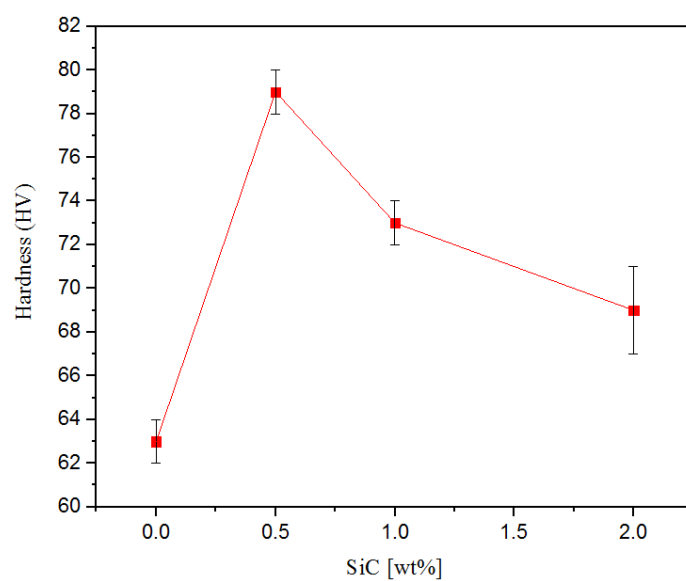
شکل (۲) نمودار تغییرات چگالی با افزایش درصد نانو ذرات کاربید سیلیسیم است همین طور که مشاهده می شود چگالی نمونه ها با افزایش نانو ذرات کاربید سیلیسیم به ۵ درصد وزنی افزایش پیدا کرد اما در ادامه با افزایش نانو ذرات کاربید سیلیسیم به مقدارهای ۱ و ۲ درصد وزنی باعث کاهش چگالی نمونه ها شد. در ابتدا نانو ذرات تقویت کننده که دارای اندازه کوچک تری نسبت به ذرات زمینه هستند در بین ذرات زمینه قرار می گیرند و باعث پر شدن تخلخل ها می شوند و چون چگالی نانو ذرات بیشتر است باعث افزایش چگالی می شود اما با افزایش مقدار نانو ذرات کاربید سیلیسیم باعث آگلومره شدن نانو ذرات می شود و باعث می شود نانو ذرات به صورت همگن در پودرهای آلیاژی پخش نشوند برای نشان دادن نحوه پخش نانو ذرات SiC از آنالیز نقشه^۳ عنصر سیلیسیم استفاده می کنیم چون کربن نسبت به سیلیسیم سبک وزن هست و از محدودیت های آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^۴ و نقشه نشان دادن عناصر سبک وزن هست و دقت کمی دارد به همین دلیل از آنالیز نقشه

عنصر سیلیسیم استفاده می کنیم (شکل ۳). همان طور که مشاهده می شود با افزایش مقدار نانو ذرات SiC تجمع عناصر سیلیسیم بیشتر می شود که دلیل بر آگلومره شده نانو ذرات SiC است همچنین به دلیل اینکه ذرات آلومینیوم نرم هستند و تحت فشار به راحتی تغییر شکل می دهد اما ذرات سخت نانو ذرات کاربید سیلیسیم در اثر فشار تغییر شکل ندارند. لذا چگالی نمونه های کامپوزیتی با افزایش مقدار بهینه نانو ذرات کاربید سیلیسیم کاهش پیدا می کند.

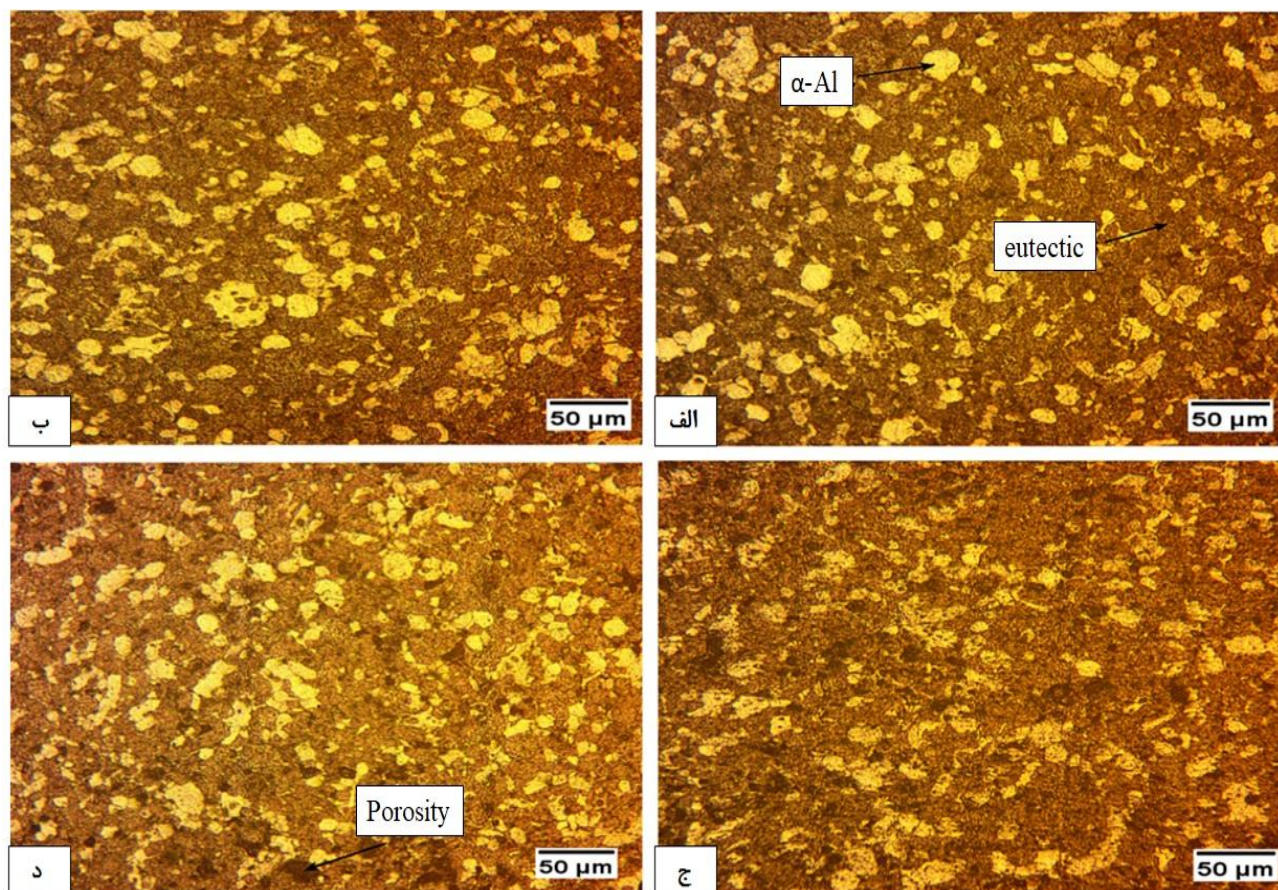
شکل (۴) نمودار تغییرات سختی با افزایش درصد نانو ذرات کاربید سیلیسیم است. همین طور که مشاهده می شود با افزایش مقدار تقویت کننده به ۵ درصد وزنی سختی نمونه ها افزایش می یابد زیرا نانو ذرات کاربید سیلیسیم همانند موانعی در برابر حرکت نابجایی در زمینه عمل می کنند اما افزایش مقدار تقویت کننده به مقدارهای ۱ و ۲ درصد وزنی باعث کاهش سختی نمونه ها می شود. با اضافه کردن مقادیر بیشتری از کاربید سیلیسیم دو مکانیزم مختلف به وجود می آید. مکانیزم اول به علت وجود نانو ذرات کاربید سیلیسیم که سخت هستند طبق تعریف سختی مانع از نفوذ یک نفوذ کننده و تغییر شکل می شود.



شکل ۳- آنالیز نقشه عناصر سیلیسیم از روی سطح نمونه‌ها: الف) آلیاژ آلومینیوم ب) آلیاژ آلومینیوم با نیم درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم ج) آلیاژ آلومینیوم با یک درصد نانوذرات کاربید سیلیسیم و د) آلیاژ آلومینیوم با دو درصد نانوذرات کاربید سیلیسیم.



شکل ۴- نمودار تغییرات سختی ویکرز^۵ با افزایش کاربید سیلیسیم.



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی نوری: الف) آلیاژ آلومینیوم ب) آلیاژ آلومینیوم با نیم درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم ج) آلیاژ آلومینیوم با یک درصد نانوذرات کاربید سیلیسیم د) آلیاژ آلومینیوم با دو درصد نانوذرات کاربید سیلیسیم.

همچنین مشاهده می شود با افزایش مقدار نانوذرات SiC، باعث افزایش تخلخل در نمونه ها شده است همچنین طبق بررسی با نرم افزار ImageJ باعث شده است دانه ها ریزتر شود.

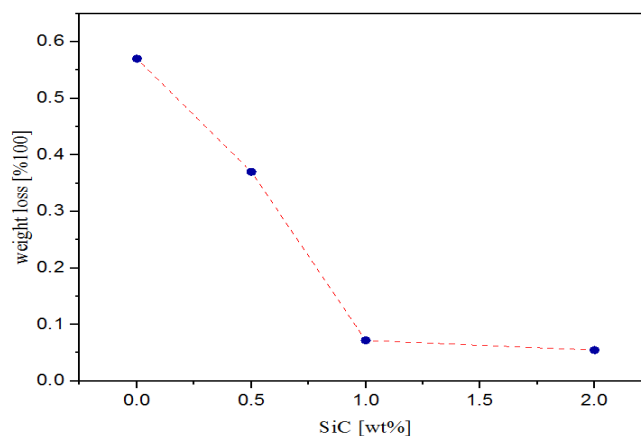
۳-۳- سایش

شکل (۶) نمودار کاهش وزن نمونه ها تحت آزمون سایش را نشان می دهد همان طور که مشاهده می شود با افزایش مقدار نانوذرات کاربید سیلیسیم کاهش وزن نمونه ها کمتر شده است. شکل (۷) تصاویر SEM سطح سایش نمونه ها با درصد های مختلف تقویت کننده را نشان می دهد. طبق شکل (۶) آلیاژ بدون نانوذرات تقویت کننده به دلیل سختی کم مقدار کاهش وزن بالایی داشته است. همچنین به دلیل تغییر شکل پلاستیکی شدید

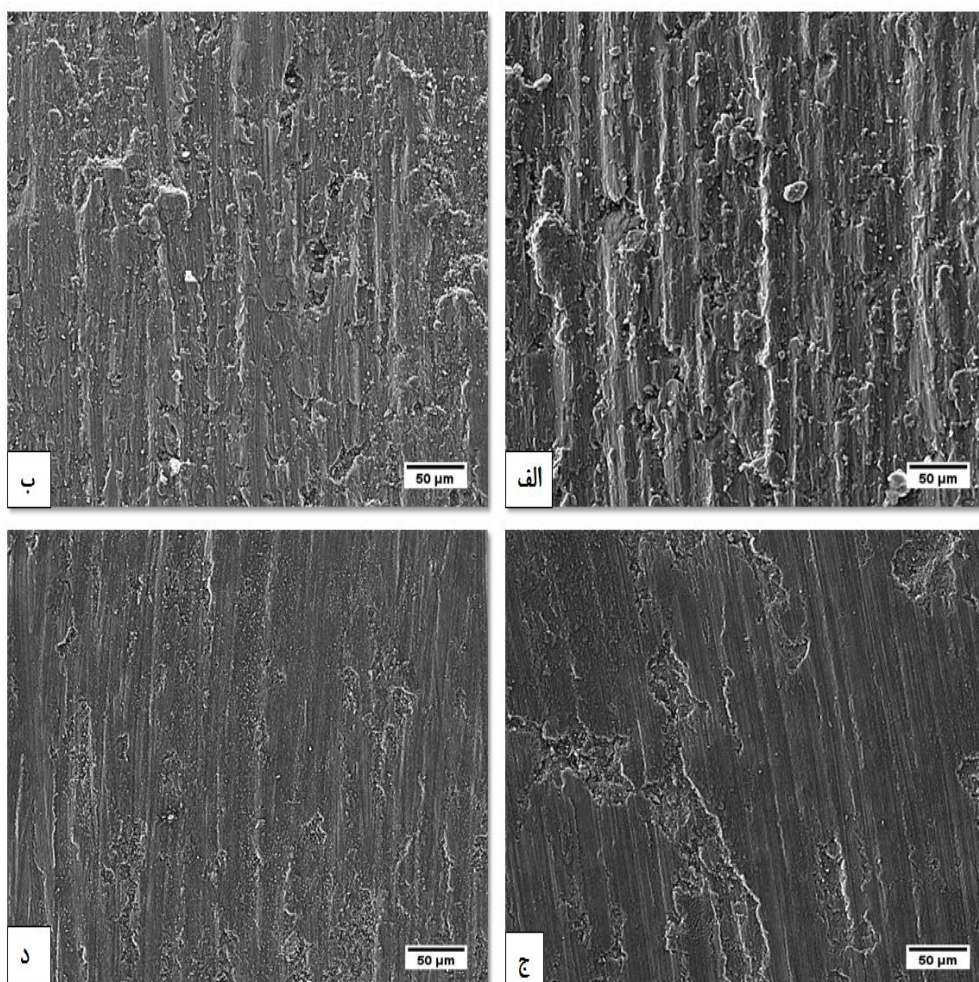
مکانیزم دوم مربوط به چگالی است که با افزایش نانوذرات کاربید سیلیسیم تا نیم درصد وزنی افزایش پیدا می کند ولی با افزایش بیشتر نانوذرات کاربید سیلیسیم باعث کاهش چگالی و در نتیجه باعث کاهش سختی می شود هر چه در یک ماده چگالی کاهش پیدا کند به علت افزایش تخلخل در مقابل نیرو خارجی تغییر شکل بیشتر می دهد که نشان از سختی کمتر دارد (۱۴ و ۱۵).

۳-۲- متالوگرافی

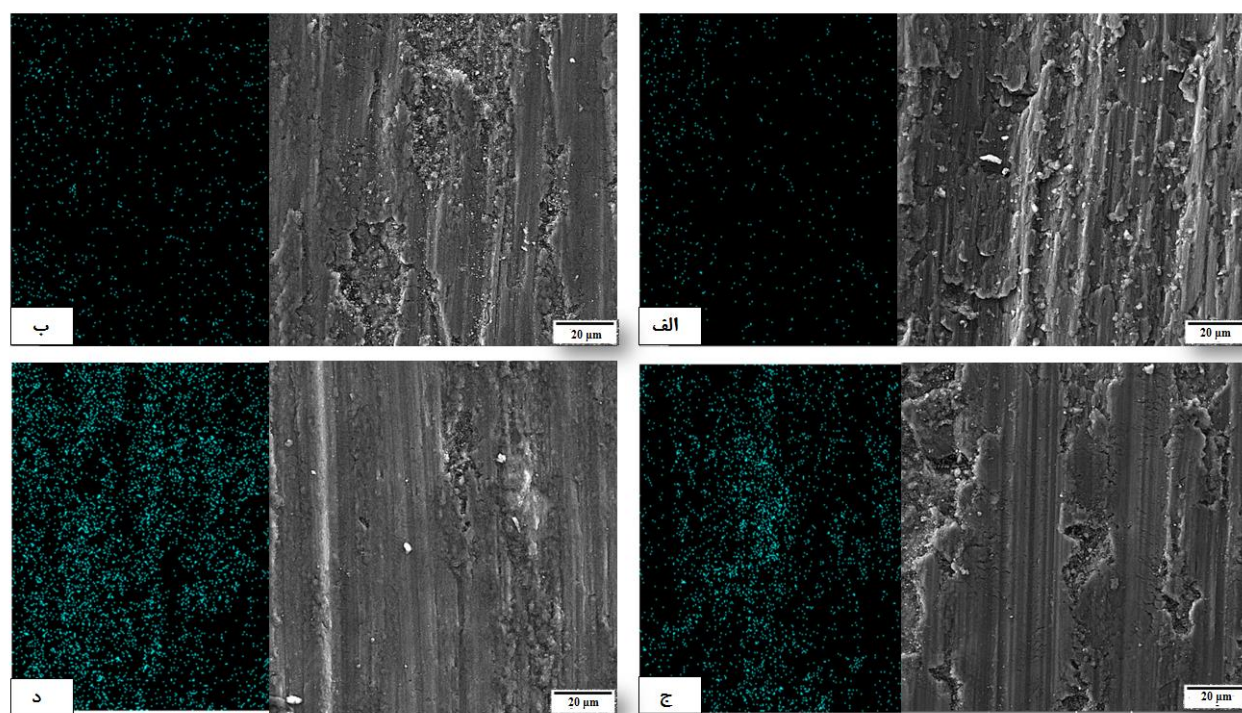
شکل (۵) تصاویر میکروسکوپی نوری نمونه ها با درصد های مختلف نانوذرات کاربید سیلیسیم است که ریزساختار نمونه ها را نشان می دهد. فازهای آلفا آلومینیوم و یوتکتیک دیده می شود.



شكل ٦- نمودار درصد كاهش وزن در آزمون سايش با افزايش كاربيد سيليسيم.



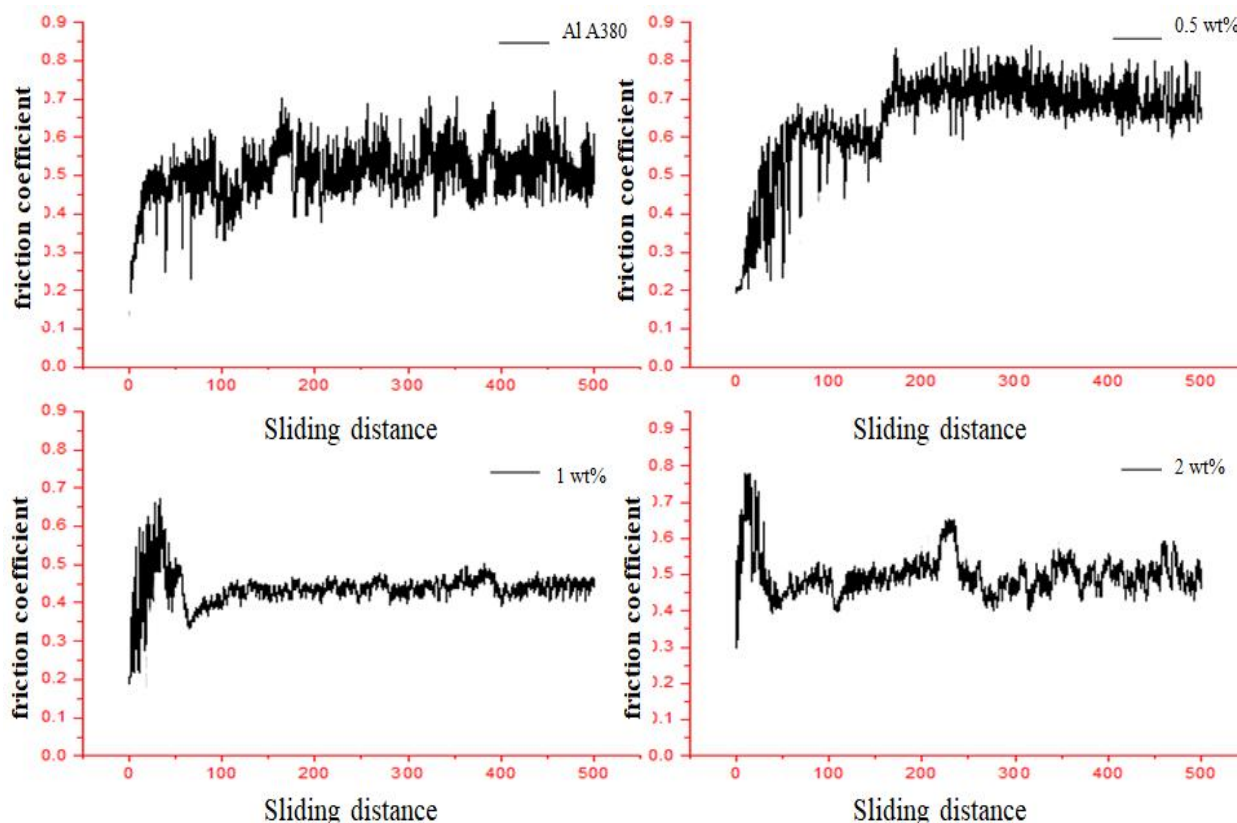
شكل ٧- تصاوير SEM سطح سايش: الف) آلياژ آلومينيوم ب) آلياژ آلومينيوم با نيم درصد وزني نانوذرات كاربيد سيليسيم ج) آلياژ آلومينيوم با يك درصد نانوذرات كاربيد سيليسيم د) آلياژ آلومينيوم با دو درصد نانوذرات كاربيد سيليسيم.



شکل ۸- آنالیز نقشه عناصر اکسیژن از روی سطح سایش: الف) آلیاژ آلومینیوم ب) آلیاژ آلومینیوم با نیم درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم ج) آلیاژ آلومینیوم با یک درصد نانوذرات کاربید سیلیسیم د) آلیاژ آلومینیوم با دو درصد نانوذرات کاربید سیلیسیم.

همچنین هنگام سایش دمای بین سطح تماس نمونه با پین افزایش پیدا می کند این افزایش دما باعث نرم شدن و تغییر شکل پلاستیکی سطح نمونه می شود و باعث می شود لایه محافظ اکسیدی سطح نمونه ها حین سایش از بین برود، وجود نانوذرات SiC باعث پایدار حرارتی نمونه ها می شود و از تغییر شکل جلوگیری می کند و باعث حفظ لایه محافظ اکسیدی حین سایش می شود این دلایل باعث می شود با وجود سختی کمتر کاهش وزن کمتری اتفاق بیفتد و طبق SEM شکل (۷) سایش خراشان اتفاق می افتد. شکل (۸) آنالیز نقشه عنصر اکسیژن با درصدهای مختلف SiC را نشان می دهد. با افزایش مقدار نانوذرات SiC غلظت و تجمع اکسیژن روی سطح افزایش پیدا می کند که نشان می دهد لایه اکسیدی روی سطح تشکیل می یابد کامپوزیت های بدون SiC یا با درصد کم نانوذرات SiC به علت تغییر شکل پلاستیکی شدید قادر به حفظ این لایه محافظ اکسیدی نیستند (۱۸).

و اتفاق افتادن سایش چسبان و ورقه ای شدن که در SEM شکل (۷) قابل مشاهده است، قادر به حفظ لایه محافظ اکسیدی حین سایش روی سطح نیست که وجود این لایه اکسیدی به عنوان محافظ از سایش عمل می کند به همین دلیل کاهش وزن بیشتری از خود نشان داده است (۱۶). با وجود اینکه سختی نمونه با نیم درصد وزنی نانوذرات SiC از همه بیشتر است نمونه آلیاژ آلومینیوم با ۲ درصد وزنی نانوذرات SiC با وجود سختی کمتر کاهش وزن کمتری نسبت به سایر نمونه ها داشته است. علت این موضوع این است، اگر درصد تقویت کننده ها کمتر باشد نانوذرات کاربید سیلیسیم نمی تواند به عنوان محافظ سطحی در مقابل حرکت سایش پین در مقابل سطح از خود نشان دهد ولی با افزایش مقدار تقویت کننده نانوذرات SiC حین سایش کنده می شوند و روی سطح تجمع پیدا می کنند این نانوذرات SiC به عنوان لایه محافظ بین پین و سطح نمونه ایجاد می شود و سایش از دو جزئی به سه جزئی تبدیل می شود (۱۷).



شکل ۹- نمودار ضریب اصطکاک با درصدهای مختلف نانوذرات کاربید سیلیسیم.

۳-۴- ضریب اصطکاک

شکل (۹) ضریب اصطکاک نمونه‌های کامپوزیتی با درصدهای مختلف نانوذرات کاربید سیلیسیم را نشان می‌دهد در نمودار ضریب اصطکاک نمونه‌ها با درصد وزنی ۱ و ۲ نانوذرات SiC ابتدا مقداری افزایش ضریب اصطکاک را نشان می‌دهد اما بعد مدتی ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد و به مقدار ثابتی می‌رسد. تشکیل لایه محافظ اکسیدی روی سطح باعث شده است ضریب اصطکاک کاهش یابد. نمونه فاقد نانوذرات SiC نوسان زیادی در نمودار ضریب اصطکاک از خود نشان داده است بوناچیو و همکاران (۱۹) این افت و خیزها را به عوامل متعدد مؤثر در ضریب اصطکاک مانند سایش چسبان، ریزخیش حاصل از زبری سطح و ریزخیش حاصل از ذرات سايشی مرتبط دانسته‌اند به نظر می‌رسد که این نمونه قابلیت تغییر شکل دارد و در نتیجه، احتمال وقوع برهمکنش‌های چسبندگی، خمش و

شکستن لایه محافظ اکسیدی ممکن است وجود داشته باشد. اتصال و جدا شدن مکرر بین از سطح نمونه منجر به افزایش ضریب اصطکاک و ارتعاشات آن شده است. البته سریناواسان و همکاران (۲۰) معتقدند که در اثر گرمای حاصل از ضریب اصطکاک، دمای محل تماس بین با سطح نمونه افزایش می‌یابد. افزایش دمای محل اتصال باعث نرم شدن و شکل‌پذیری بیشتر پوشش می‌شود. اما وجود نانوذرات SiC در نمونه‌ها پایداری حرارتی آن را افزایش می‌دهد و پدیده نرم شدن کمتر اتفاق می‌افتد. در نمودار ضریب اصطکاک نمونه‌های با ۱ و ۲ درصد وزنی نانوذرات SiC مشاهده می‌شود ضریب اصطکاک تقریباً یکنواخت و ثابت است. ولی ضریب اصطکاک در این نمونه نیز دارای نوساناتی است. یو وانگ و همکاران (۲۱)، جدا شدن ذرات تقویت‌کننده از زمینه و شکسته و کنده شدن لایه محافظ اکسیدی را دلیل این امر دانسته‌اند. اضافه کردن نانوذرات SiC

SiC است که با افزایش نانوذرات تقویت کننده به علت آلودگی شده سختی کاهش پیدا می کند.

۳- نمونه آلیاژ آلومینیوم با ۲ درصد وزنی نانوذرات SiC به علت تشکیل لایه محافظ کاهش وزن کمتری نسبت به سایر نمونه ها داشته است.

۴- نمونه با ۵/۵ درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم مرز انتقال سایش چسبان به خراشان هست و با افزایش مقدار تقویت کننده سایش چسبان کاهش پیدا می کند.

تشکر و سپاسگزاری

این تحقیق حمایت خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ نوع تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

باعث تغییر مکانیزم سایش از چسبان در نمونه بدون نانوذرات به سایش خراشان در نمونه های با درصد وزنی ۱ و ۲ نانوذرات تبدیل شده است. با توجه به شواهد ارائه شده پیش بینی می شود نمونه با ۵/۵ درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم مرز انتقال سایش چسبان به خراشان هست، یعنی سایش چسبان و خراشان همزمان اتفاق می افتد.

۴- نتیجه گیری

در این کار تحقیقاتی اثر افزودن نانوذرات کاربید سیلیسیم بر روی خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم A380 مورد بررسی قرار گرفت مهم ترین نتایج این تحقیق را می توان در موارد زیر خلاصه نمود:

۱- نمونه های تولید شده با روش پرس گرم سختی و دانسیته بالاتری نسبت به نمونه های تولید شده با روش پرس سرد و زینترینگ داشت.

۲- درصد بهینه سختی مربوط به ۵/۵ درصد وزنی نانوذرات

واژه نامه

1. metal matrix composite (MMC)
2. scanning electron microscope (SEM)
3. mapping analysis (Map)
4. energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX)
5. Vickers hardness (HV)

مراجع

1. El-Kady O, Fathy A. Effect of SiC particle size on the physical and mechanical properties of extruded Al matrix nanocomposites. *Materials & Design* (1980-2015). 2014;54:348-53.
2. Kim CS, Cho K, Manjili MH, Nezafati M. Mechanical performance of particulate-reinforced Al metal-matrix composites (MMCs) and Al metal-matrix nano-composites (MMNCs). *Journal of Materials Science*. 2017;52:13319-49.
3. Meignanamoorthy M, Ravichandran M, Mohanavel V, Afzal A, Sathish T, Alamri S, Khan SA, Saleel CA. Microstructure, mechanical properties, and corrosion behavior of boron carbide reinforced aluminum alloy (al-Fe-Si-Zn-Cu) matrix composites produced via powder metallurgy route. *Materials*. 2021 ;14(15):4315.
4. Kumar J, Singh D, Kalsi NS, Sharma S, Mia M, Singh J, Rahman MA, Khan AM, Rao KV. Investigation on the mechanical, tribological, morphological and machinability behavior of stir-casted Al/SiC/Mo reinforced MMCs. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021 ;12:930-46.
5. Zeng X, Yu J, Fu D, Zhang H, Teng J. Wear characteristics of hybrid aluminum-matrix composites reinforced with well-dispersed reduced graphene oxide nanosheets and silicon carbide particulates. *Vacuum*. 2018 1;155:364-75.
6. Garbiec D, Jurczyk M, Levitant-Zayonts N, Mościcki T. Properties of Al-Al₂O₃ composites synthesized by spark plasma sintering method. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2015 ;15(4):933-9.
7. Ye T, Xu Y, Ren J. Effects of SiC particle size on mechanical properties of SiC particle reinforced aluminum metal matrix composite. *Materials Science and Engineering: A*. 2019 ;753:146-55.

8. Bodukuri AK, Eswaraiiah K, Rajendar K, Sampath V. Fabrication of Al-SiC-B₄C metal matrix composite by powder metallurgy technique and evaluating mechanical properties. *Perspectives in Science*. 2016;8:428-31.
9. Li G, Xu T, Wang H, Zhao Y, Chen G, Kai X. Microstructure study of hot rolling nanosized in-situ Al₂O₃ particle reinforced A356 matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;855:157107.
10. Rahman MH, Al Rashed HM. Characterization of silicon carbide reinforced aluminum matrix composites. *Procedia Engineering*. 2014;90:103-9.
11. Kazaz A, Çamurlu HE, Dere MA, Kuyucu KE. Sic (p) reinforced aluminum matrix composites obtained by hot pressing and their mechanical properties. *Machines. Technologies. Materials..* 2017;11(2):74-6.
12. Marshall DB, Evans AG. Failure mechanisms in ceramic-fiber/ceramic-matrix composites. *Journal of the American Ceramic Society*. 1985;68(5):225-31.
13. Moazami-Goudarzi M, Akhlaghi F. Effect of SiC nanoparticles content and Mg addition on the characteristics of Al/SiC composite powders produced via in situ powder metallurgy method. *Particulate Science and Technology*. 2013;31(3):234-40.
14. Surya MS, Nilesh TV. Synthesis and mechanical behaviour of (Al/SiC) functionally graded material using powder metallurgy technique. *Materials Today: Proceedings*. 2019 ;18:3501-6.
15. Kazaz A, Çamurlu HE, Dere MA, Kuyucu KE. Sic (p) reinforced aluminum matrix composites obtained by hot pressing and their mechanical properties. *Machines. Technologies. Materials..* 2017;11(2):74-6.
16. adoun AM, Fathy A, Abu-Oqail A, Elmetwaly HT, Wagih A. Structural, mechanical and tribological properties of Cu-ZrO₂/GNPs hybrid nanocomposites. *Ceramics International*. 2020 ;46(6):7586-94.
17. Ravindran P, Manisekar K, Narayanasamy P, Selvakumar N, Narayanasamy R. Application of factorial techniques to study the wear of Al hybrid composites with graphite addition. *Materials & Design*. 2012 ;39:42-54.
18. Baradeswaran A, Perumal AE. Study on mechanical and wear properties of Al 7075/Al₂O₃/graphite hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*. 2014 ;56:464-71.
19. Bonache V, Salvador MD, García JC, Sánchez E, Bannier E. Influence of plasma intensity on wear and erosion resistance of conventional and nanometric WC-Co coatings deposited by APS. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2011 Mar;20:549-59.
20. Srinivasan M, Loganathan C, Kamaraj M, Nguyen QB, Gupta M, Narayanasamy R. Sliding wear behaviour of AZ31B magnesium alloy and nano-composite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2012 ;22(1):60-5.
21. Wang HY, Zuo DW, Wang MD, Sun GF, Hong MI, Sun YL. High temperature frictional wear behaviors of nano-particle reinforced NiCoCrAlY cladded coatings. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2011 ;21(6):1322-8.