



بررسی اثر دما بر رفتار سایشی نانو کامپوزیت Al/SiCp تولید شده به روش متالورژی پودر در آسیاب پر انرژی

حسن شریفی^۱، مهدی علینزاده^۲، دانیال داودی^۳

^۱ استادیار - دانشگاه شهرکرد - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی مواد و متالورژی

^۲ استادیار - پژوهشگاه مواد و انرژی کرج

^۳ کارشناسی ارشد - دانشگاه شهرکرد - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی مواد و متالورژی

چکیده

در این پژوهش به بررسی اثر دما و کسر حجمی از مقاوم ساز بر رفتار سایشی نانو کامپوزیت Al/x vol% SiC_p (x = ۰, ۱, ۳ and ۵) پرداخته شد. نتایج نشان داد افزودن ذرات تقویت کننده باعث بالا رفتن دمای انتقال به سایش شدید نمونه‌ها می‌شود، به گونه‌ای که برای آلومینیوم تقویت نشده، دمای انتقال به سایش شدید ۱۲۵ درجه سانتی گراد، برای کامپوزیت Al-۱٪SiC، ۱۵۰ درجه سانتی گراد و برای نمونه‌های Al-۳٪SiC و Al-۵٪SiC، ۱۷۵ درجه سانتی گراد حاصل گردید. همچنین نمونه‌های کامپوزیتی از نرخ سایش و ضریب اصطکاک کمتری در مقایسه با آلومینیوم تقویت نشده برخوردار می‌باشند، که با افزایش کسر حجمی نانو ذرات SiC، نمونه‌ها از مقاومت به سایش بهتری برخوردار می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: نانو کامپوزیت، SiC، سایش دمای بالا، SEM

مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی به عنوان مواد با ویژگی‌هایی از جمله مقاوم به سایش و نسبت استحکام به وزن بالا مطرح شده‌اند که علت آن، حفاظت سطح تماس کامپوزیت به وسیله تقویت کننده‌های سخت گزارش شده است [۱-۴]. انواع متنوعی از سرامیک‌ها به سبب خواص ویژه‌ای چون سختی بالا، مقاومت فشاری بالا و مقاومت به سایش خوب به عنوان تقویت کننده برای زمینه آلومینیوم به کار می‌روند که از مهمترین و پر کاربردترین آنها می‌توان به نانو ذرات SiC و Al_2O_3 اشاره کرد [۵-۶]. مقاومت سایشی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم توسط بسیاری از محققین مورد بررسی قرار گرفته است، اما قیاس بین نتایج آنها ممکن نیست. علت این مسئله آن است که مقاومت در برابر اصطکاک و سایش جز خواص ذاتی ماده نبوده و بسته به شرایط از جمله بار اعمالی، دمای محیط، سرعت لغزش، نوع و درصد حجمی تقویت کننده تغییر می‌کند. اگر تقویت کننده به خوبی با زمینه پیوند داشته باشد، نرخ سایش توسط نرخ سایش تقویت کننده کنترل می‌شود. که در بیشتر مواقع افزایش کسر حجمی تقویت کننده باعث کاهش نرخ سایش کامپوزیت می‌گردد [۷]. باوری و همکارانش [۸] در بررسی نرخ سایش به صورت متغیری از بار، متوجه شدند که نرخ سایش پس از رسیدن بار به یک حد معین به شدت افزایش می‌یابد. آن‌ها افزایش ناگهانی ضریب اصطکاک و نرخ سایش با افزایش بار، از یک بار بحرانی را به گذار از سایش ملایم به سایش شدید مرتبط دانسته‌اند. وراتگلو و همکارانش [۹] اثر دما (در محدوده $20^{\circ}C$ - $200^{\circ}C$) را بر رفتار سایش لغزنده یک کامپوزیت با زمینه Al_2O_3/SiC تقویت شده با ذرات SiC که به روش متالورژی پودر تولید شده بود را مورد بررسی قرار دادند. به منظور بررسی اثر عملیات پیرسازی، تعدادی از نمونه‌ها تحت عملیات پیرسازی مصنوعی قرار گرفتند. سرعت سایش نمونه‌های کامپوزیتی پیر شده در تمامی دماها کمتر از سرعت سایش نمونه‌های پیر نشده است. کمترین میزان سایش مربوط به دمای اتاق و بیشترین میزان سایش در دمای $200^{\circ}C$ مشاهده شد. در این پژوهش به بررسی اثر دما بر سایش نانو کامپوزیت Al/SiC_p در کسر حجمی مختلف از فاز تقویت کننده پرداخته می‌شود.

مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از پودر آلومینیوم با خلوص ۹۹/۷ درصد با متوسط اندازه ذرات $45\mu m$ ساخت شرکت متالورژی پودر خراسان به عنوان زمینه و از نانو پودر $\beta-SiC$ با ساختار مکعبی و با خلوص ۹۹/۹۹ درصد با متوسط اندازه ذرات $45nm$ ساخت شرکت USnano به عنوان فاز تقویت کننده استفاده شد. شکل (۱) و (۲) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به همراه آنالیز EDX آلومینیوم و SiC را نشان می‌دهد. نمونه‌های کامپوزیتی در کسر حجمی های ۰، ۱، ۳ و ۵ درصد نانو کاربرد سیلیسیم به روش متالورژی پودر در آسیاب پرانرژی تهیه گردیدند. آسیاب کاری نمونه‌ها در یک آسیاب سیاره ای پرانرژی مدل $4*350-MPM$ با 250 دور در دقیقه و نسبت وزنی پودر به گلوله ۱:۱۰ با گلوله‌های فولادی زنگ نزن ضد سایش و تحت آتمسفر گاز خنثی آرگون با خلوص ۹۹/۹۹ به مدت ۱ ساعت انجام شد. همچنین به دلیل چسبندگی ذرات آلومینیوم به گلوله‌ها از اسید

استثاریک به میزان ۱ درصد استفاده گردید. بررسی ساختار محصولات نیز به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل (Philips- XLS) انجام گرفت. نمونه‌ها در یک قالب یک‌طرفه و تحت فشار ۵۰۰ مگاپاسکال فشرده شده و در یک کوره‌ی لوله‌ای تحت آتمسفر آرگون مدل ۱۵۰۰-۴۰/۴۰ ساخت شرکت آذر کوره ایران به مدت ۲ ساعت در دمای 610°C تف جوشی شدند. جهت بررسی و اندازه‌گیری سختی نمونه‌های کامپوزیتی، از دستگاه سختی‌سنج Universal شرکت البرز کوشا استفاده گردید. رفتار سایشی نمونه‌ها، با استفاده از آزمون سایش و با دستگاه پین روی دیسک متحرک با قابلیت اعمال دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. این آزمون با نمونه‌های دیسکی شکل به ضخامت ۵ میلی‌متر و قطر ۴۰ میلی‌متر با پین ساینده به ارتفاع ۵۰ میلی‌متر و قطر ۵ میلی‌متر با سطح تماس ۳ میلی‌متر از جنس فولاد ۵۲۱۰۰ با سختی 64RC انجام شد. به منظور بررسی اثر دما بر رفتار سایشی نمونه‌ها، این آزمون در محدوده دمایی $200-25^{\circ}\text{C}$ و در دماهای ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۲۵، ۱۵۰، ۱۷۵ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. جدول (۱) شرایط تست سایش نمونه‌ها را نشان می‌دهد. برای انجام این آزمون مسافت سایش ۱۰۰۰ متر در نظر گرفته شد که نمونه‌ها در پایان هر ۲۰۰ متر توزین شده و کاهش وزن نمونه‌ها حاصل و نرخ سایش آن‌ها طبق رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$(1) \quad (\text{مسافت شده طی}) / (\text{کاهش وزن})$$

=نرخ سایش

نتایج و بحث

شکل (۱) ریزساختار نانو کامپوزیت Al-5\%/SiC را نشان می‌دهد. یکی از مزایای کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تهیه شده به روش متالورژی پودر، توزیع پیوسته و یکنواخت فاز تقویت کننده در زمینه است، به ویژه در بحث نانو کامپوزیت‌ها که توزیع فاز تقویت کننده به صورت همگن مشکل است. با استفاده از روش متالورژی پودر می‌توان به توزیع یکنواختی از فاز تقویت کننده دست یافت. این توزیع یکنواخت و پیوسته از فاز تقویت کننده می‌تواند بر بهبود خواص مکانیکی حاصل شده، موثر واقع شود [۴]. تصویر مربوط به ریزساختار کامپوزیت با ۵ درصد SiC ، گویای آن است که نانوذرات SiC توزیع یکنواخت و تقریباً همگنی را در بین ذرات آلومینیوم داشته و پدیده توده‌ای شدن نانوذرات SiC که در بحث فناوری نانو یک امر طبیعی و ناخواسته است در اینجا کمتر مشاهده می‌شود. البته باید به این موضوع نیز اشاره داشت که با افزایش کسر حجمی مقاوم ساز، میل به توده‌ای شدن نانوذرات SiC بیشتر می‌شود و همان‌طور که در تصویر (۱) مشخص است، کامپوزیت با ۵ درصد نانو SiC ، دارای نواحی توده‌ای است. قابل ذکر است که فاز مضر Al_4C_3 در نمونه‌ها وجود ندارد، چرا که حداقل دما برای تشکیل این فاز $727/8^{\circ}\text{C}$ است [۱۰] و با توجه به دمای تف جوشی نمونه‌ها (610°C)، تشکیل این فاز از نظر ترمودینامیکی غیر ممکن است.

شکل (۲) تغییرات نرخ سایش نمونه‌ها بر حسب دما را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نمودار سایش نمونه‌ها از دو منطقه شامل سایش ملایم و سایش شدید تشکیل شده است و یک دمای انتقال بحرانی از ناحیه سایش ملایم به ناحیه سایش شدید وجود دارد که در دماهای بالاتر از این دما، افزایش قابل توجهی در نرخ سایش رخ می‌دهد. برای نمونه آلومینیوم تقویت‌نشده، افزایش دما از 125°C تا 250°C تقریباً موجب کاهش نرخ سایش شده که نشان از وجود سایش ملایم است. اما افزایش دما از 125°C به بالا، سبب تغییر شیب نرخ سایش بر حسب دما شده است به گونه‌ای که نرخ سایش نمونه آلومینیوم تقویت‌نشده به شدت افزایش می‌یابد. این تغییر شیب و افزایش نرخ سایش، نشان از تغییر مکانیزم سایش از نوع ملایم به شدید است و بیان‌گر این است که دمای انتقال سایش ملایم به شدید آلومینیوم تقویت‌نشده 125°C است. افزودن نانو ذرات SiC به آلومینیوم و ساخت کامپوزیت، باعث شده است که نرخ سایش در منطقه سایش ملایم با کاهش شیب بسیار کم و مقدار سایش کمتری نسبت به آلومینیوم تقویت‌نشده تغییر کند که این مورد در کامپوزیت با ۵ درصد کسر حجمی SiC بیشتر مشاهده می‌شود. با توجه به نمودار شکل (۲) مشخص می‌شود که در منطقه سایش ملایم، افزایش دما تاثیر زیادی بر نرخ سایش نمونه‌ها ندارد و حتی باعث کم شدن نرخ سایش به میزان کم شده است. این رفتار را می‌توان به تشکیل یک لایه اکسیدی محافظ بر روی سطوح تماس نمونه‌ها در حین سایش نسبت داد [۱۱]. زمانی که سایش در دمای بالا صورت می‌گیرد، اکسید شدن مواد تاثیر قابل توجهی بر رفتار سایشی دارد. در کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی، سطوح سایش می‌توانند با اکسیژن محیط واکنش داده و ایجاد یک لایه اکسیدی نمایند. این لایه اکسیدی می‌تواند به عنوان روان‌ساز عمل نماید و منجر به کاهش ضریب اصطکاک و نرخ سایش گردد. سایش لغزشی با ایجاد یک لایه اتمسفری در سطح خراشیده شده آغاز می‌شود و در ابتدای سایش این لایه اتمسفری نازک میان مواد در حال تماس (پین و نمونه مورد آزمایش) به عنوان روان‌ساز جامد عمل می‌کند [۱۲]. به همین دلیل در ابتدای سایش رفتار نمونه‌ها تقریباً مشابه است. در مرحله دوم (سایش شدید) لایه اتمسفری دیگر قادر نیست در برابر افزایش دما و سایش ناشی از آن مقاومت کند و لذا نرخ سایش افزایش چشم‌گیری می‌یابد. با بررسی سطح سایش نمونه‌های کامپوزیتی شکل (۳-الف) توسط آنالیز EDS، مطابق طیفی که در شکل (۳-ب) دیده می‌شود، حضور عنصر اکسیژن تایید می‌گردد. وجود عنصر اکسیژن می‌تواند حضور لایه اکسیدی Al_2O_3 را نشان دهد [۱۱]. مطابق شکل (۳-الف) این لایه اکسیدی به صورت لایه‌های روشن روی سطوح سایش نمونه‌های کامپوزیتی قابل رویت است. با افزایش دما، این لایه‌های اکسیدی می‌توانند ضخیم شوند و اثر روان‌سازی آنها افزایش یابد. بنابراین همان‌گونه که در شکل (۲) دیده می‌شود، نرخ سایش نمونه‌ها در ناحیه سایش ملایم، با افزایش دما تقریباً کاهش یافته است. اما با افزایش بیشتر دما (ناحیه سایش شدید)، نرخ سایش نمونه‌ها شدیداً افزایش یافته است که این افزایش برای نمونه آلومینیوم تقویت‌نشده بیشتر نمایان است. این رفتار به این علت است که در دماهای بالا (بالاتر از دمای انتقال به سایش شدید)، فاز زمینه به تدریج نرم‌تر می‌شود و نمونه از استحکام کافی در برابر سایش برخوردار نیست و در نتیجه چسبندگی و انتقال آن به پین فولادی افزایش می‌یابد که این موضوع باعث افزایش ضریب اصطکاک و نرخ سایش خواهد شد. بنابراین در مورد تمامی نمونه‌ها یک

دمای بحرانی وجود دارد به طوری که در این دما کمترین مقدار نرخ سایش حاصل می‌شود. نکته مهم و قابل بحث در نمودار شکل (۲) این است که دمای انتقال به سایش شدید نمونه‌های کامپوزیتی بیشتر از آلومینیوم تقویت‌نشده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نمونه $Al-1\%/SiC$ در دمای $150^{\circ}C$ ، نمونه $Al-3\%/SiC$ و $Al-SiC$ در دمای $175^{\circ}C$ دچار تغییر شیب سایش و انتقال سایش ملایم به شدید شده است که نشان از اثر مثبت ذرات تقویت‌کننده در بالا بردن دمای انتقال به سایش شدید و بهبود رفتار سایشی دما بالای نمونه‌ها دارد، به گونه‌ای که افزودن یک و سه درصد نانو SiC به ترتیب باعث افزایش $25^{\circ}C$ و $50^{\circ}C$ دمای انتقال به سایش شدید شده است. افزایش کسر حجمی نانو ذرات SiC به پنج درصد باعث افزایش دمای انتقال به سایش شدید نسبت به نمونه $Al-3\%/SiC$ نگردیده است. باید به این نکته توجه داشت که اگر چه افزایش کسر حجمی ذرات تقویت‌کننده از ۳ به ۵ درصد نتوانسته دمای انتقال به سایش شدید را افزایش دهد اما میزان نرخ سایش نمونه $Al-5\%/SiC$ کمتر از نمونه $Al-3\%/SiC$ است و رفتار سایشی بهتری دارد. نکته دیگری که در مورد اثر مثبت ذرات تقویت‌کننده می‌توان مشاهده کرد این است که پس از انتقال سایش ملایم به شدید، با افزایش دما نمودار نرخ سایش نمونه‌های کامپوزیتی در مقایسه با آلومینیوم تقویت‌نشده با شیب کمتری افزایش می‌یابد و نمونه‌ها از نرخ سایش کمتری برخوردار هستند که این موضوع در مورد نمونه $Al-5\%/SiC$ نمود بیشتری دارد و باعث کنترل بیشتر نرخ سایش شده است. شکل (۴) نمودار ضریب اصطکاک متوسط بر حسب دما را برای نمونه‌های کامپوزیتی و آلومینیوم تقویت‌نشده نشان می‌دهد. با مقایسه نمودار شکل‌های (۲) و (۴) می‌توان به این نتیجه رسید که نمودار ضریب اصطکاک نمونه‌ها تقریباً شبیه نمودار نرخ سایش بر حسب دما است به گونه‌ای که برای تمامی نمونه‌ها، در منطقه سایش ملایم، افزایش دما تاثیر چندانی بر ضریب اصطکاک نمونه‌ها نداشته و شیب نمودار به مقدار کمی کاهش داشته است. اما با افزایش دما و عبور از دمای انتقال به سایش شدید، ضریب اصطکاک نمونه‌ها با شیب قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا کرده است. طبیعی است که با افزایش دما و با عبور از منطقه سایش ملایم، با تشدید میزان سایش نمونه‌ها، ناهمواری‌های سطحی افزایش پیدا کرده و باعث افزایش ضریب اصطکاک می‌شود. نکته قابل ملاحظه، کمتر بودن میزان ضریب اصطکاک متوسط نمونه‌های کامپوزیتی در مقایسه با آلومینیوم تقویت‌نشده است. همچنین در اینجا نقش مثبت افزایش کسر حجمی نانو ذرات SiC در کمتر کردن میزان ضریب اصطکاک قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب اصطکاک نمونه $Al-5\%/SiC$ کمتر از $Al-SiC$ و $Al-1\%/SiC$ می‌باشد. افزایش کسر حجمی ذرات تقویت‌کننده سبب افزایش استحکام و همچنین بهبود مقاومت به سایش نمونه‌ها در دماهای بالا شده است.

شکل (۵) تصاویر SEM از سطوح سایش نمونه‌ها را در دمای $75^{\circ}C$ (منطقه سایش ملایم) نشان می‌دهد. از مقایسه این تصاویر با یکدیگر، مشخص می‌شود که تمامی نمونه‌ها از شرایط سطحی مناسبی برخوردار هستند و تغییر شکل‌های پلاستیک بسیار کمی در آنها مشاهده می‌شود. وجود خطوط ممتد و موازی نشان از مشخصه سایش خراشان برای تمامی نمونه‌ها دارد و نشان می‌دهد که مکانیزم غالب در منطقه سایش ملایم برای تمامی نمونه‌ها، مکانیزم سایش خراشان است. این موضوع را نیز می‌توان از میزان نرخ سایش نمونه‌ها نیز تایید کرد. با

نگاهی به نمودار شکل (۲) مشخص می‌شود که تمامی نمونه‌ها از نرخ سایس کمی برخوردار هستند و نمونه‌ها از مقاومت خوبی در برابر سایس دارند. با نگاهی دقیق‌تر به تصاویر شکل (۵) نمایان می‌شود که میزان آشفستگی و تغییر شکل پلاستیک نمونه‌های کامپوزیتی در مقایسه با نمونه آلومینیوم تقویت‌نشده کمتر است، یعنی افزودن نانوذرات SiC باعث افزایش مقاومت به سایس و کاهش تغییر شکل‌های پلاستیک شده است که این موضوع با افزایش کسر حجمی نانوذرات SiC نمود بیشتری پیدا می‌کند و مکانیزم سایس خراشان برای نمونه Al-۵/SiC به خوبی نمایان است. نمودار شکل (۲) نیز تایید کننده این موضوع است که در منطقه سایس ملایم، افزودن نانوذرات SiC باعث کاهش میزان نرخ سایس می‌شود.

شکل (۶) تصاویر SEM از سطوح سایس نمونه‌ها را در دمای 200°C (منطقه سایس شدید) نشان می‌دهد. از مقایسه این تصاویر با تصاویر شکل (۵) مشخص می‌شود که نمونه‌ها دچار سایس شدید و تغییر شکل‌های پلاستیک آنها بسیار زیاد شده است. تغییر شکل‌های پلاستیک زیاد و وجود ترک‌های عرضی در سطح سایس نمونه‌ها از مشخصه‌های اصلی مکانیزم سایس چسبان است. همچنین سایس بالای نمونه‌ها (نمودار شکل ۲)، وجود مکانیزم سایس چسبان را تایید می‌کند. در واقع افزایش دما باعث می‌شود که زمینه نرم‌تر شود و مقاومت خود را در برابر سایس از دست بدهد. این موضوع باعث چسبیدن پین سایس به سطح نمونه و جدا شدن تکه-هایی از سطح نمونه در حین سایس شود که این خود باعث افزایش تغییر شکل‌های پلاستیک در سطح سایس و افزایش میزان وزن کاسته شده گردد.

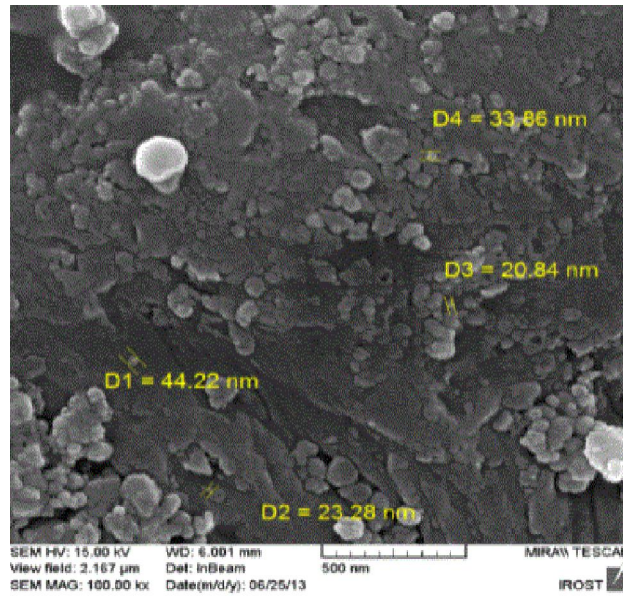
نکته مهمی که باید به آن اشاره کرد این است که میزان آسیب‌های سطحی و تغییر شکل‌های نمونه‌های کامپوزیتی Al-۳/SiC و Al-۵/SiC نسبت به نمونه آلومینیوم تقویت‌نشده کمتر است و اگر چه تمامی نمونه‌ها (به جز Al-۵/SiC) دارای مکانیزم سایس چسبان هستند اما این مکانیزم برای نمونه آلومینیوم تقویت‌نشده بیشتر نمایان است. در توجیه این موضوع باید اشاره داشت که همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، آلومینیوم تقویت‌نشده در دمای 125°C و نمونه‌های Al-۳/SiC و Al-۵/SiC در دمای 175°C دارای دمای انتقال به سایس شدید هستند. طبیعتاً در این دما (200°C)، نمونه آلومینیوم تقویت‌نشده از میزان نرخ سایس بیشتری در مقایسه با نمونه‌های کامپوزیتی برخوردار است و به همین دلیل میزان تغییر شکل پلاستیک و آشفستگی‌های سطحی آن نیز بیشتر است. در واقع، حضور نانوذرات SiC باعث افزایش استحکام و پایداری فاز زمینه گشته و مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیکی فاز زمینه را افزایش می‌دهد. کلیه این عوامل باعث کاهش از بین رفتن ماده در اثر سایس می‌گردد. بنابراین می‌توان گفت که به دلیل نقش موثر نانوذرات SiC در داخل زمینه کامپوزیت، نه تنها سایس شدید در کامپوزیت نسبت به آلومینیوم تقویت‌نشده در دماهای بالاتری رخ می‌دهد بلکه باعث کاهش تغییر شکل پلاستیک و ترک‌های عرضی شده است. ذکر این نکته لازم است که اگر چه برای نمونه Al-۵/SiC نشانه‌هایی از مکانیزم چسبان مشاهده می‌شود اما مکانیزم غالب سایس همچنان خراشان است.

نتیجه گیری

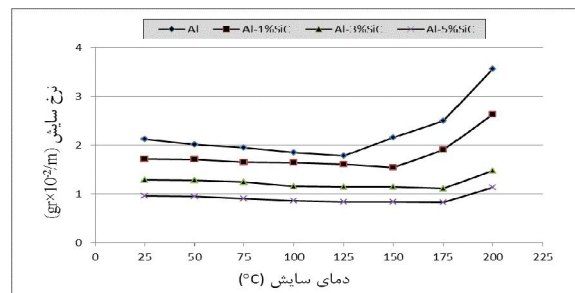
- ۱) بررسی های میکروسکوپی و همچنین آنالیزهای EDS نشان می دهد که نمونه های کامپوزیتی ساخته شده به روش متالورژی پودر از توزیع مناسب ذرات تقویت کننده و عدم وجود فازهای ناخواسته برخوردارند.
- ۲) دمای انتقال از ناحیه سایش ملایم به ناحیه سایش شدید برای نمونه آلومینیوم تقویت نشده 125°C می باشد. افزودن ۱ و ۳ و ۵ درصد نانوذرات SiC به آلومینیوم به ترتیب باعث افزایش دمای انتقال به سایش شدید به میزان ۲۵ و ۵۰ و ۵۰ درجه سانتی گراد می گردد.
- ۳) در تمامی دماها، نرخ سایش و ضریب اصطکاک نمونه های کامپوزیتی کمتر از آلومینیوم تقویت نشده می باشد و افزایش کسر حجمی فاز تقویت کننده باعث کاهش نرخ سایش و ضریب اصطکاک می گردد.
- ۴) مکانیزم سایش غالب در ناحیه سایش ملایم، مکانیزم خراشان می باشد، در حالی که با افزایش دما و در منطقه سایش شدید مکانیزم تمامی نمونه ها به جز نمونه Al-5/SiC به چسبان تغییر می یابند.

مراجع

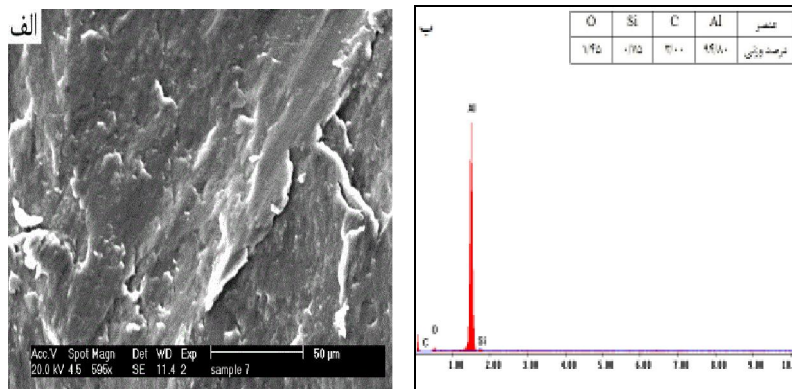
۱. S. Gopalakannan, T. Senthilvelan, "Application of response surface method on machining of Al-SiC Nano-composites", *Measurement*, Vol. ۴۶, ۲۰۱۳, ۲۷۰۵- ۲۷۱۵.
۲. R.N. Rao a, S. Das b "Effect of matrix alloy and influence of SiC particle on the sliding wear characteristics of aluminum alloy composites" *Materials and Design*, Vol. ۳۱, ۲۰۱۰, ۱۲۰۰-۱۲۰۷.
۳. Yusuf S-ahin, "Abrasive wear behavior of SiC/۲۰۱۴ aluminum composite", *Tribology International*, Vol. ۴۳, ۲۰۱۰, ۹۳۹- ۹۴۳.
۴. H. Ahlatci, T. Kocer, E.Candan, H. Cimenoglu, "Wear behavior of Al/ (Al₂O₃+SiC_p) hybrid composites", *Tribol.* Vol. ۳۹, ۲۰۰۶, ۲۱۳- ۲۲۰.
۵. Y. Sahin, "Preparation and some properties of SiC particle reinforced aluminum alloy composites", *Materials and Design*, Vol. ۲۴, ۲۰۰۳, ۶۷۱- ۶۷۹.
۶. K.D. Woo, D.L. Zhang, "Fabrication of Al-۷wt%Si-۰.۴wt%Mg/ SiC nanocomposite powders and bulk Nano composites by high energy ball milling and powder metallurgy", *Current Applied Physics*, Vol. ۴, ۲۰۰۴, ۱۷۵- ۱۷۸.
۷. Modi, O. P., Prasad, B. K., Vegneswaran, A. H., Vaidya, M. L, "Dry sliding wear behavior of squeeze cast aluminum alloy-silicon carbide composites", *Material Science and Engineering*, vol. ۱۵۱, ۱۹۹۲, ۲۳۵- ۲۴۵.
۸. R. Bauri; M.K. Surappab, "Sliding wear behavior of Al-Li-SiC_p composites", *Wear*, Vol. ۲۶۵, ۲۰۰۸, ۱۷۵۶-۱۷۶۶.
۹. M. Muratoglu, M. Aksoy, "Abrasive wear of ۲۱۲۴Al-SiC composites in the temperature range ۲۰-۲۰۰ C°", *J. Mater. Proc. Technol*, Vol. ۱۷۴, ۲۰۰۶, ۲۷۲-۲۷۶.
۱۰. B. Cantor, F. Dunne, I. Stone, "Metal and ceramic matrix composites", *IOP*, ۲۰۰۴.
۱۱. J. Singh, A.T. Alpas, "High-Temperature Wear and Deformation Processes in Metal Matrix Composites", *Metall. Mater. Trans.* Vol. ۲۷, ۱۹۹۶, ۳۱۳۵-۳۱۴۸.
۱۲. N. Saka, D. P. Karalekas, "Friction and wear of particle reinforced metal-ceramic composites", *Wear of Metals*, Vol. ۱۷۵, ۱۹۸۵, ۷۸۴-۷۹۳.



شکل ۱: تصویر ریزساختار کامپوزیت Al-۵٪SiC

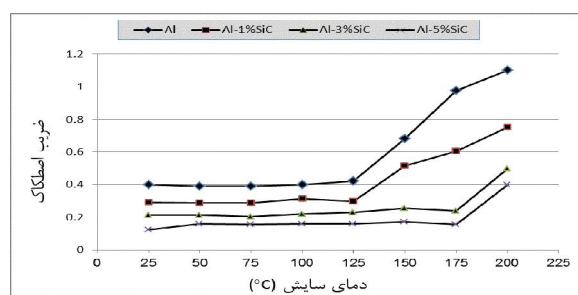


شکل ۲: نمودار نرخ سایش نمونه‌ها بر حسب دما

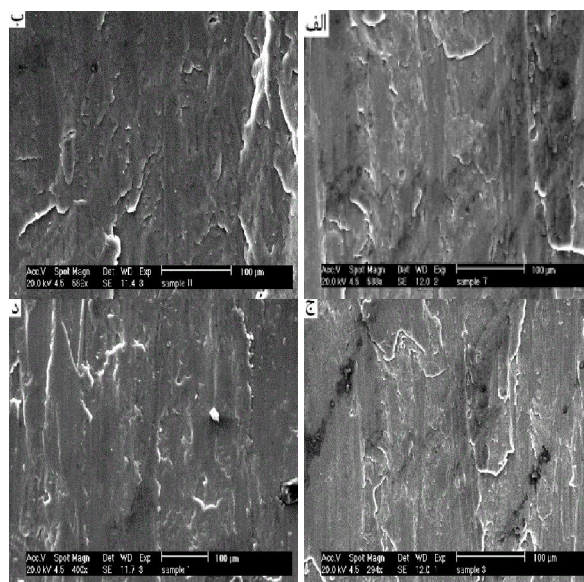


شکل ۳: الف) تصویر میکروسکوپی از سطح سایش یک نمونه کامپوزیتی

ب) آنالیز EDS مربوط به آن

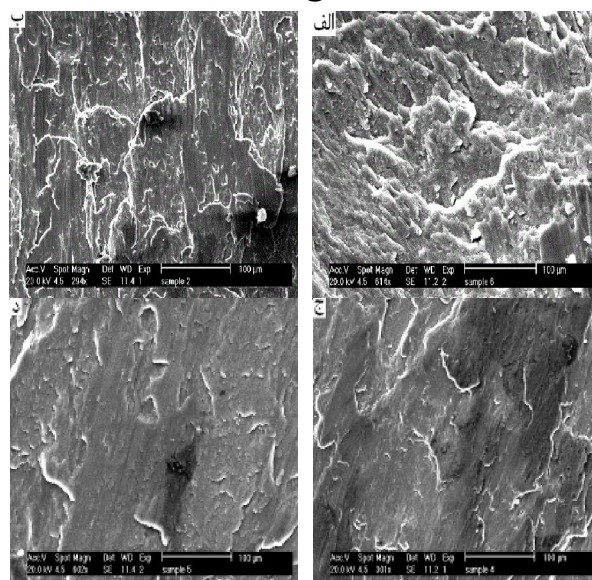


شکل ۴: نمودار ضریب اصطکاک نمونه‌ها بر حسب دما



شکل ۵: تصاویر SEM از سطح سایش نمونه‌ها در دمای 75°C (سایش ملایم)

الف) Al (ب) Al-۱٪SiC (ج) Al-۳٪SiC (د) Al-۵٪SiC



شکل ۶: تصاویر SEM از سطح سایش نمونه‌ها در دمای 200°C (سایش شدید) الف) Al (ب) Al-۱٪SiC (ج) Al-۳٪SiC (د) Al-۵٪SiC

د) Al-۵٪SiC