



بررسی خواص فیزیکی و سطحی نانوکامپوزیت Al/SiC_p تولید شده به روش متالورژی پودر در دمای بالا

حسن شریفی^{۱*}، دانیال داودی^۲، حمید غیور^۳

۱- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

۲- کارشناس ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

۳- استادیار، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، اصفهان

*شهرکرد، صندوق پستی ۸۸۱۸۶/۳۴۱۴۱، Sharifi@eng.sku.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این پژوهش اثر دما و کسر حجمی تقویت کننده بر رفتار سایشی نانو کامپوزیت $Al/x vol\% SiC_p$ ($x=0, 1, 3, 5$) بررسی شده است. نتایج نشان داد افزودن ذرات تقویت کننده موجب بالا رفتن دمای انتقال به سایش شدید نمونه‌ها می‌شود، به گونه‌ای که برای آلومینیم تقویت نشده، دمای انتقال به سایش شدید ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد، برای کامپوزیت $Al-1\%SiC$ ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و برای نمونه‌های $Al-3\%SiC$ و $Al-5\%SiC$ ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد بود. بررسی‌ها نشان داد که نمونه‌های کامپوزیتی در مقایسه با آلومینیم تقویت نشده دارای نرخ سایش و ضریب اصطکاک کمتری بوده و با افزایش کسر حجمی نانو ذرات SiC ، مقاومت به سایش بهبود یافته است. بررسی تصاویر از سطح نمونه‌های ساییده شده در دماهای مختلف نشان داد نوع سایش در منطقه سایش ملایم برای تمامی نمونه‌ها از نوع خراشان بوده که با افزایش دما و ورود سایش به منطقه سایش شدید، نوع سایش تمامی نمونه‌ها به جز نمونه $Al-5\%SiC$ چسبان است. ولی نمونه $Al-5\%SiC$ هنوز دارای سایش خراشان است که نشان از اثر مثبت فاز تقویت کننده دارد.

دریافت: اردیبهشت ۹۴

پذیرش: خرداد ۹۴

کلیدواژگان:

نانو کامپوزیت

$Al-SiC_p$

سایش دمای بالا

FESEM

Investigating the physical and surface properties at high temperature of the Al/SiC nanocomposite produced by powder metallurgy

Hassan Sharifi^{1*}, Danial Davoodi², Hamid Ghayour³

1- Department of Engineering University of Shahrekord, Shahrekord, Iran

2- Department of Materials Engineering, Najafabad Islamic Azad University, Najafabad, Isfahan, Iran.

3- Advanced Materials Research Center, Department of Materials Engineering, Najafabad Islamic Azad University, Najafabad, Isfahan, Iran.

* P.O.B. 88186-34141, Shahrekord, Iran, sharifi@eng.sku.ac.ir

Keywords

Nanocomposite
 $Al-SiC_p$
high temperature wear,
FE SEM

Abstract

In this research the effect of temperature and volume fraction of reinforcement on wear behavior of the $Al/x vol\% SiC_p$ ($x=0, 1, 3, 5$) nanocomposite was investigated. Results revealed that addition of reinforcement particles increases transition to severe wear temperature of the samples, so that the temperature of transition to severe wear for the un-reinforced aluminum, $Al-1\%SiC$, and $Al-3\%SiC$ and $Al-5\%SiC$ samples is 125°C, 150°C, and 175°C, respectively. Also, the composite samples showed lower wear rate and friction coefficient compared to the un-enforced aluminum, and with increase of volume fraction of SiC particles, wear resistance of the samples was improved. FESEM images from the surface of the samples worn at different temperatures revealed that wear mechanism in the mild wear area of all samples is the abrasive mode, but with increase of temperature and transition to severe wear area, wear mechanism of all samples except $Al-5\%SiC$ is the adhesive mode. The $Al-5\%SiC$ sample still shows the abrasive mode, which indicates the positive effect of the reinforcement phase.

۱- مقدمه

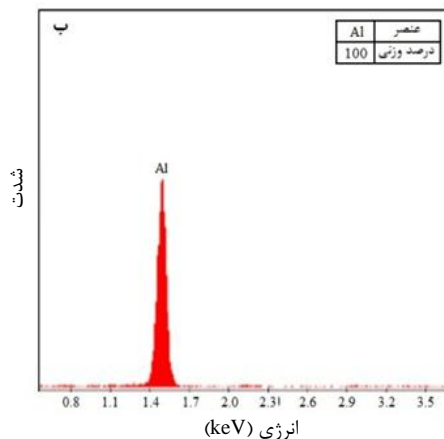
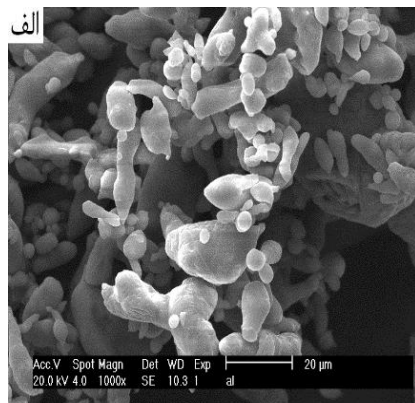
به‌عنوان مواد با ویژگی‌هایی از جمله مقاوم به سایش و نسبت استحکام به وزن بالا مطرح شده‌اند که علت آن، حفاظت سطح تماس کامپوزیت توسط تقویت کننده‌های سخت گزارش شده است [۱-۴]. انواع متنوعی از سرامیک‌ها

فلز آلومینیم با وجود چگالی کم، دمای ذوب نسبتاً پایین و شکل پذیری بالا از مقاومت به سایش پایینی برخوردار است. کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی

Please cite this article using:

Sharifi, H. Davoodi, D. and Ghayour, H., "Investigating the physical and surface properties at high temperature of the Al/SiC nanocomposite produced by powder metallurgy" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 1, pp. 33-40, 2015.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:



شکل ۱ الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودر آلومینیم ب) آنالیز EDS از پودر آلومینیم.

نمونه‌های کامپوزیتی در کسرهای حجمی ۰،۱، ۳ و ۵ درصد نانو کاربرد سیلیسیم به روش متالورژی پودر در آسیا پر انرژی تهیه شدند. آسیا کاری نمونه‌ها در یک آسیا سیاره‌ای پر انرژی مدل MPM-4*350 با ۲۵۰ دور در دقیقه و نسبت وزنی پودر به گلوله ۱:۱۰ با گلوله‌های فولادی زنگ‌نزن ضد سایش و تحت اتمسفر گاز خنثی آرگون با خلوص ۹۹/۹۹ به مدت ۱ ساعت انجام شد. همچنین به دلیل چسبندگی ذرات آلومینیم به گلوله‌ها از اسید استئاریک به میزان ۱ درصد وزنی استفاده شد. جهت بررسی ساختار محصولات و نیز بررسی نوع سایش سطوح نمونه‌های ساییده شده، از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل (Philips-XLS) استفاده شد. نمونه‌ها در یک قالب یک‌طرفه و تحت فشار ۵۰۰ MPa فشرده شده و در یک کوره لوله‌ای تحت اتمسفر آرگون مدل TF5/40-1500 ساخت شرکت آذر کوره ایران به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۱۰ °C تفجوشی شد. اندازه‌گیری چگالی و تخلخل ظاهری نمونه‌های خام و تفجوشی شده به روش ارشمیدس و بر اساس استاندارد BSI1902A انجام شد.

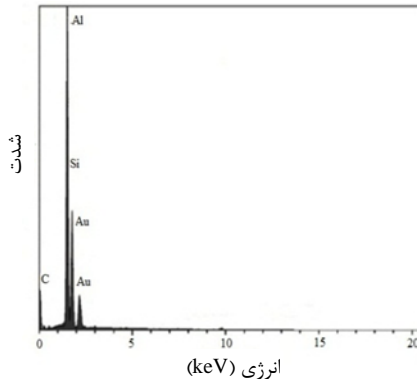
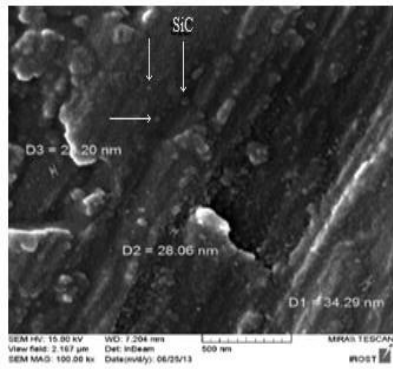
رفتار سایشی نمونه‌ها، با استفاده از آزمون سایش و با دستگاه پین روی دیسک متحرک با قابلیت اعمال دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. این آزمون با نمونه‌های دیسکی شکل به ضخامت ۵ میلی‌متر و قطر ۴۰ میلی‌متر با پین ساییده به ارتفاع ۵۰ mm و قطر ۵ mm با سطح تماس ۳ mm و از جنس فولاد ۵۲۱۰۰ با سختی Rc ۶۴ انجام شد. به منظور بررسی اثر دما بر رفتار سایشی نمونه‌ها، این آزمون در محدوده دمایی ۲۰۰-۲۵ °C و به ترتیب در دماهای ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۲۵، ۱۵۰، ۱۷۵ و ۲۰۰ °C انجام شد.

به سبب خواص ویژه‌ای چون سختی بالا، مقاومت فشاری بالا و مقاومت به سایش خوب به‌عنوان تقویت کننده برای زمینه آلومینیم به کار می‌روند، که در این میان از نانو ذرات SiC و Al₂O₃ به وفور استفاده شده است [۵]. متالورژی پودر یکی از روش‌هایی است که در ساخت نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از جمله مزایای این روش می‌توان به استفاده از دماهای کمتر در مرحله ساخت نانوکامپوزیت اشاره کرد که این موضوع، احتمال واکنش بین زمینه و فاز تقویت کننده را کاهش می‌دهد. همچنین توزیع یکنواخت و همگن ذرات تقویت کننده، از مزایای ویژه این روش می‌باشد [۶]. مقاومت سایشی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم توسط بسیاری از محققین مورد بررسی قرار گرفته است، اما قیاس بین نتایج آن‌ها ممکن نیست. چون مقاومت در برابر اصطکاک و سایش تنها جزء خواص ذاتی ماده نبوده و بسته به شرایطی از جمله: بار اعمالی، دمای محیط، سرعت لغزش، نوع و درصد حجمی تقویت کننده تغییر می‌کند. در تقویت نمودن آلیاژهای آلومینیم با ذرات سرامیکی، مشاهده شده که معمولاً رفتار سایشی ماده بهبود می‌یابد. اگر تقویت کننده به خوبی با زمینه پیوند داشته باشد، نرخ سایش توسط میزان سایش تقویت کننده کنترل شده و در بیشتر مواقع افزایش کسر حجمی تقویت کننده باعث کاهش نرخ سایش کامپوزیت می‌شود [۷]. باوری و همکاران [۸] در بررسی نرخ سایش به صورت متغیری از بار اعمالی، نشان شدند که نرخ سایش پس از رسیدن نیروی اعمالی 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. رامش و همکاران [۹] نیز خواص سایشی کامپوزیت آلیاژ Al6061 را با فاز تقویت کننده SiC و Al₂O₃ تهیه شده به روش اکستروژن داغ را بررسی کردند. آن‌ها بهبود خواص سایشی را در تمامی کامپوزیت‌های تولید شده گزارش کردند. موراتنگلو و همکاران [۱۰] اثر دما (در محدوده ۲۰-۲۰۰ °C) را بر رفتار سایش لغزنده یک کامپوزیت با زمینه Al2124 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 پیرشده در تمامی دماها کمتر از سرعت سایش نمونه‌های پیرنشده است. کمترین میزان سایش مربوط به دمای اتاق و بیشترین میزان سایش در دمای ۵۰ °C مشاهده شد.

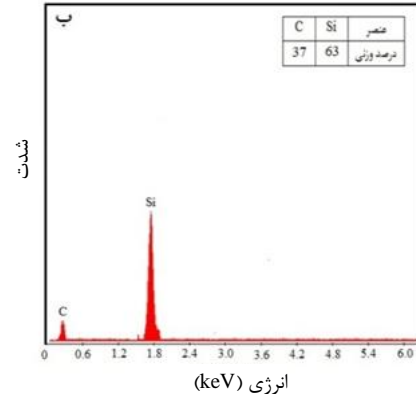
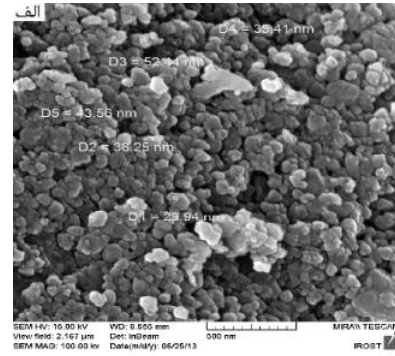
بررسی‌ها نشان داد که اکثر مطالعات انجام شده در مورد رفتار سایشی کامپوزیت آلومینیم تقویت شده با نانو ذرات SiC مربوط به دمای محیط بوده و مطالعات بسیار محدودی در دماهای بالا انجام شده است. با عنایت به اینکه در برخی از موارد این گروه از کامپوزیت‌ها در دماهای بالا و تحت سایش قرار می‌گیرند، لذا در این پژوهش به بررسی رفتار سایشی دمای بالا نانو کامپوزیت Al/SiC_p در کسرهای حجمی مختلف از فاز تقویت کننده SiC پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

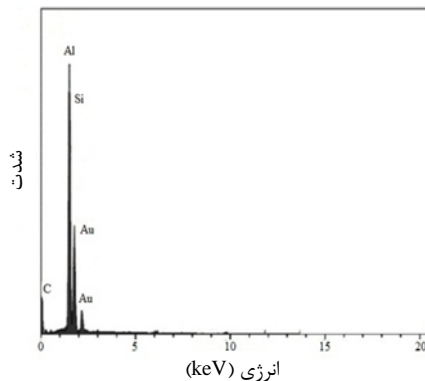
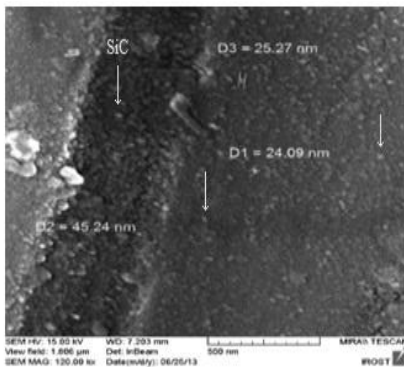
در این پژوهش از پودر آلومینیم با خلوص ۹۹/۷ درصد با متوسط اندازه ذرات ۴۵ μm ساخت شرکت متالورژی پودر خراسان به‌عنوان زمینه و از نانو پودر β-SiC با ساختار مکعبی و با خلوص ۹۹/۹۹ درصد با متوسط اندازه ذرات ۴۵ nm ساخت شرکت USnano به‌عنوان فاز تقویت کننده استفاده شد. شکل ۱ و ۲ به ترتیب تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به همراه آنالیز EDX را برای آلومینیم و SiC نشان می‌دهد.



شکل ۳ تصویر ریزساختار کامپوزیت Al-1%SiC به همراه آنالیز EDS.



شکل ۲ الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ب) آنالیز EDS از پودر SiC.



شکل ۴ تصویر ریزساختار کامپوزیت Al-3%SiC به همراه آنالیز EDS.

با توجه به آنالیز EDS که برای نانوکامپوزیت‌های در کسرجمعی‌های مختلف نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که نمونه‌ها آنالیز تقریباً ثابتی داشته و دارای پیک‌های یکسانی هستند.

برای انجام این آزمون مسافت سایش ۱۰۰۰ m و نیروی ۸ N با سرعت خطی ۰/۱۱ m/s در نظر گرفته شد که نمونه‌ها در پایان هر ۲۰۰ m توزین شده و کاهش وزن نمونه‌ها حاصل و نرخ سایش آن‌ها طبق رابطه (۱) محاسبه شد.

$$\text{نرخ سایش} = \frac{\text{کاهش وزن}}{\text{مسافت طی شده}} \quad (۱)$$

۳- بحث و نتایج

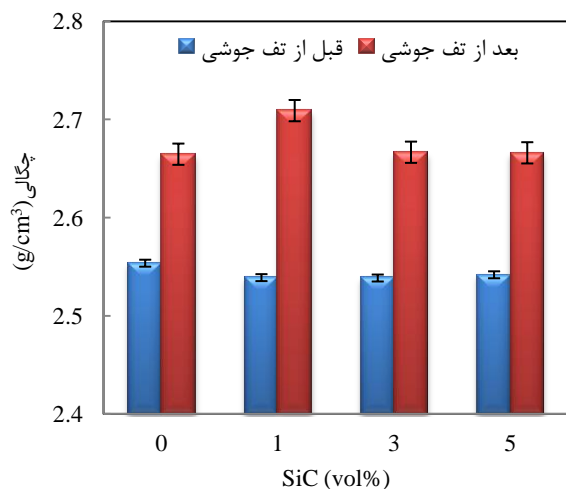
۳-۱- بررسی ریز ساختار

شکل‌های ۳ تا ۵ به ترتیب ریزساختار نانوکامپوزیت‌های Al-1%SiC، Al-3%SiC و 3%SiC را به همراه آنالیز EDS آن‌ها را نشان می‌دهد. یکی از مزایای کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی ویژه در بحث نانوکامپوزیت‌های تهیه شده به روش متالورژی پودر، توزیع پیوسته و یکنواخت فاز تقویت‌کننده در زمینه است. این توزیع یکنواخت و پیوسته از فاز تقویت‌کننده می‌تواند بر بهبود خواص مکانیکی حاصل شده، موثر واقع شود [۴]. تصاویر مربوط به ریزساختار کامپوزیت‌های ساخته شده، گویای آن است که نانوذرات SiC توزیع یکنواخت و تقریباً همگنی را در بین ذرات آلومینیم داشته و پدیده توده‌ای شدن نانوذرات SiC که در بحث فناوری نانو یک امر طبیعی و ناخواسته بوده در اینجا کمتر مشاهده می‌شود. البته باید به این موضوع نیز اشاره داشت که با افزایش کسرجمعی نانو ذرات SiC، میل به توده‌ای شدن نانوذرات SiC بیشتر می‌شود و همان‌طور که در تصاویر ریزساختاری کامپوزیت‌ها مشخص است، کامپوزیت با ۵ درصد نانو SiC، دارای نواحی توده‌ای شده بیشتری است.

همان گونه که در شکل مشخص است، ذرات پودر آلومینیم اتصال نسبتاً خوبی با یکدیگر داشته و به نظر می‌رسد که فشار پرس، دما و زمان تف‌جوشی در حین فرآیند ساخت مناسب بوده است. وجود حفره و تخلخل که در روش متالورژی پودر یک امر طبیعی است نیز در این شکل قابل مشاهده می‌باشد. باید به این نکته اشاره داشت که حذف کامل تخلخل‌ها و حفرات در نمونه‌های ساخته شده به روش متالورژی پودر بسیار مشکل است و بیشتر سعی بر کم کردن تخلخل‌ها و افزایش درصد تراکم نمونه‌هاست.

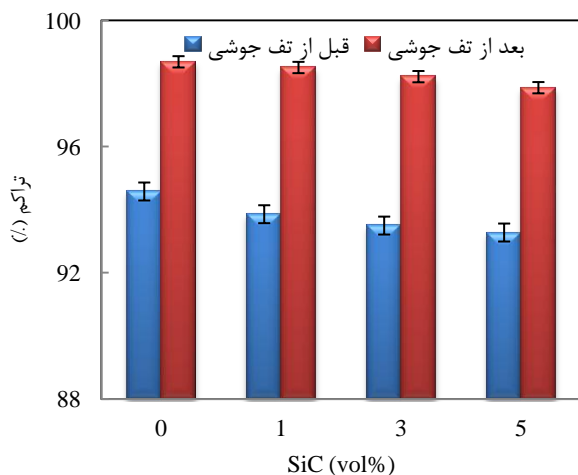
۲-۳- دانسیته و درصد تخلخل

شکل‌های ۷ تا ۹ به ترتیب چگالی اندازه‌گیری شده، درصد تراکم و درصد تخلخل نمونه‌ها را قبل و بعد از فرآیند تف‌جوشی را نشان می‌دهد.



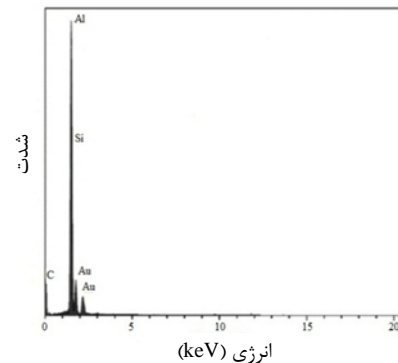
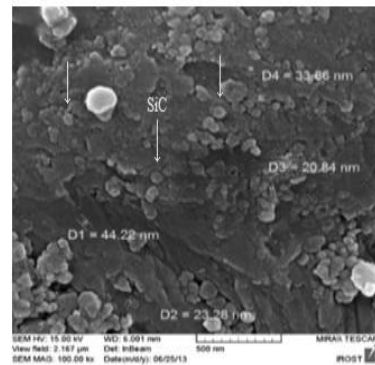
شکل ۷ تغییرات چگالی قبل و بعد از فرآیند تف جوشی.

همان گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، چگالی تمامی نمونه‌ها بعد از فرآیند تف‌جوشی افزایش و درصد تخلخل‌ها کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است.



شکل ۸ تغییرات میزان تراکم قبل و بعد از فرآیند تف جوشی.

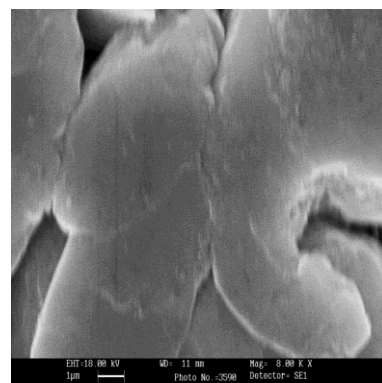
این موضوع نشان می‌دهد که در مراحل ساخت و آماده‌سازی نمونه‌ها، تف‌جوشی یک فرآیند مهم بوده و سهم زیادی در افزایش چگالی و کاهش درصد تخلخل داشته است و طبیعتاً باعث بهبود خواص مکانیکی نمونه‌ها



شکل ۵ تصویر ریزساختار کامپوزیت Al-5%SiC به همراه آنالیز EDS.

پیک Al گویای وجود فاز آلومینیم و پیک‌های Si و C نشان دهنده وجود نانوذرات SiC است. نکته قابل توجه این آنالیزها، نشان دهنده عدم وجود عناصر ناخواسته به ویژه اکسیژن و عدم حضور فاز اکسید آلومینیم است. بنابراین کامپوزیت از شرایط ترکیبی بسیار مناسبی برخوردار بوده، چرا که جلوگیری از اکسید شدن کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی در حین فرآیند ساخت، یک امر بسیار دشوار می‌باشد. شایان ذکر است که فاز مضر Al₄C₃ در نمونه‌ها وجود ندارد، چون حداقل دما برای تشکیل این فاز ۷۲۷/۸ °C است [۱۱] و با توجه با دمای تف‌جوشی نمونه‌ها (۶۱۰ °C)، تشکیل این فاز از نظر ترمودینامیکی غیر ممکن می‌باشد.

یکی از موارد مهم در ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی به روش متالورژی پودر، اتصال و پیوند ذرات آلومینیم و ایجاد زمینه یکنواخت و یکپارچه است. شکل ۶ تصویر میکروسکوپی از اتصال ذرات آلومینیم به یکدیگر را برای نمونه Al-5%SiC را نشان می‌دهد.



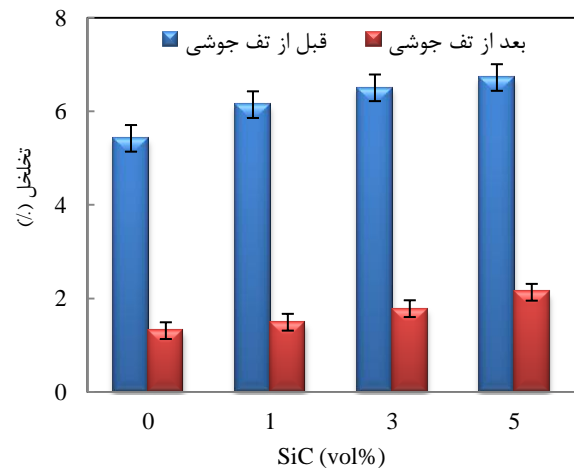
شکل ۶ تصویر میکروسکوپی از ذرات آلومینیم در کامپوزیت Al-5%SiC.

نمونه آلومینیم تقویت نشده به شدت افزایش می‌یابد. این تغییر شیب و افزایش نرخ سایش، نشان از تغییر نوع سایش از نوع ملایم به شدید است و بیان‌گر این است که دمای انتقال سایش ملایم به شدید آلومینیم تقویت‌نشده ۱۲۵ °C است. افزودن نانو ذرات SiC به آلومینیم و ساخت کامپوزیت، باعث شده است که نرخ سایش در منطقه سایش ملایم با کاهش شیب بسیار کم و مقدار سایش کمتری نسبت به آلومینیم تقویت نشده تغییر کند که این مورد در کامپوزیت با ۵ درصد کسر حجمی SiC بیشتر مشاهده می‌شود. با عنایت به شکل ۱۰ می‌توان انتظار داشت که با افزایش فاز تقویت‌کننده در نانوکامپوزیت Al-SiC مقاومت به سایش بهبود یابد، در حالی که شدت کاهش نرخ سایش در درصدهای کم SiC مشهودتر می‌باشد. به عنوان نمونه افزودن ۱ درصد SiC به آلومینیم در دمای ۲۵۰°C موجب کاهش نرخ سایش به میزان ۳۱ درصد شده در حالی که این میزان کاهش برای افزایش فاز تقویت‌کننده از ۳ به ۵ درصد به میزان ۲۰/۳ درصد می‌باشد. که این موضوع با توجه به شکل‌های ۷ و ۹ می‌تواند در ارتباط با کاهش دانسیته و افزایش تخلخل کامپوزیت در اثر افزایش SiC باشد. بنابراین مراحل ساخت، آماده‌سازی نمونه‌ها و تف‌جوشی یک فرآیند مهم در تولید نانوکامپوزیت بوده و سهم زیادی در کیفیت محصول و خواص سایشی آن خواهد داشت. با توجه به نمودار شکل ۱۰ 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 [۱۲].

زمانی که سایش در دمای بالا صورت می‌گیرد، اکسید شدن مواد تاثیر قابل توجهی بر رفتار سایشی دارد. در کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی، 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 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) به‌عنوان روان‌ساز جامد عمل می‌کند [۱۳]. 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 ۱۱-الف توسط آنالیز EDS، مطابق طیفی که در شکل ۱۱-ب دیده می‌شود، حضور عنصر اکسیژن تایید می‌گردد. وجود عنصر اکسیژن می‌تواند حضور لایه اکسیدی Al₂O₃ را نشان دهد [۱۲].

مطابق شکل ۱۱-الف این لایه اکسیدی به صورت لایه‌های روشن روی سطوح سایش نمونه‌های کامپوزیتی قابل رؤیت است. با افزایش دما این لایه اکسیدی می‌تواند ضخیم شود و اثر روان‌سازی آنها افزایش می‌یابد و بنابراین همان‌گونه که در شکل ۱۰ 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 آلومینیم تقویت نشده بیشتر نمایان است. این رفتار به این علت است که در دماهای بالا (بالتر 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.

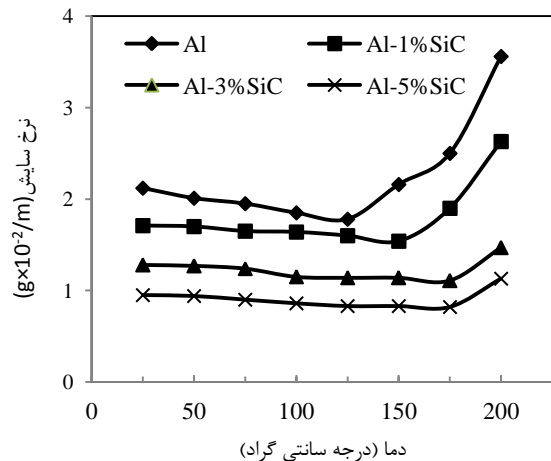
می‌شود. با نگاهی دقیق‌تر به نتایج بدست آمده، مشاهده می‌شود که نمونه‌های کامپوزیتی نسبت به نمونه‌های آلومینیم تقویت‌نشده، دارای تخلخل بیشتری می‌باشد. علت این امر را می‌توان به مرحله مخلوط کردن و فشرده‌سازی اولیه پودرها در فرآیند تولید نسبت داد. در پودرهای حاوی نانو ذرات SiC، با توجه به دانسیته بالک پایین پودر نانو SiC (۰/۰۶۹ g/cm³) از تراکم مناسبی برخوردار نیست و ممکن است در مناطقی نانو ذرات SiC توده‌ای و باعث افزایش میزان تخلخل در نمونه‌های کامپوزیتی شده باشد.



شکل ۹ تغییرات میزان تخلخل قبل و بعد از فرآیند تف جوشی

۳-۳- بررسی اثر دما بر رفتار سایش

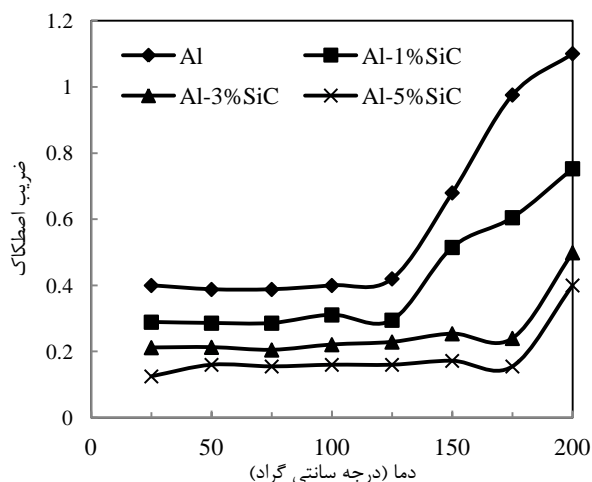
شکل ۱۰ تغییرات نرخ سایش نمونه‌ها را بر حسب دما نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ نمودار نرخ سایش نمونه‌ها بر حسب دما

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 آلومینیم تقویت‌نشده، افزایش دما از ۱۲۵-۲۵۰ °C تقریباً موجب کاهش نرخ سایش شده که نشان از وجود سایش ملایم است. اما افزایش دما از ۱۲۵ °C به بالا، سبب تغییر شیب نرخ سایش بر حسب دما شده است به گونه‌ای که نرخ سایش

تمامی نمونه‌ها، در منطقه سایس ملایم، افزایش دما تاثیر چندانی بر ضریب اصطکاک نمونه‌ها نداشته است.

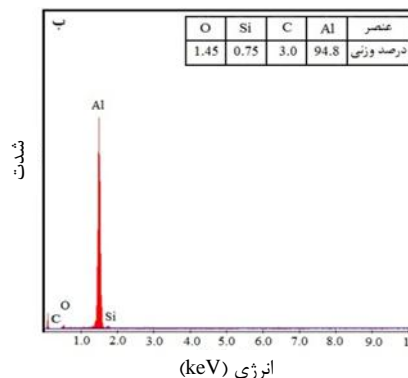
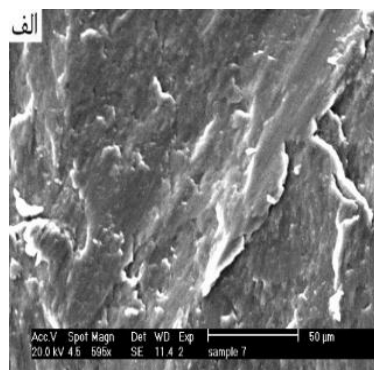


شکل ۱۲ نمودار ضریب اصطکاک نمونه‌ها بر حسب دما.

اما با افزایش دما و عبور از دمای انتقال به سایس شدید، ضریب اصطکاک نمونه‌ها با شیب قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا کرده است. طبیعی است که با افزایش دما و با عبور از منطقه سایس ملایم، با تشدید میزان سایس 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 آلومینیم تقویت نشده است. همچنین در اینجا نقش مثبت افزایش کسر حجمی نانوذرات SiC در کمتر کردن میزان ضریب اصطکاک قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب اصطکاک نمونه Al-5%SiC کمتر از Al-3%SiC و Al-1%SiC است. افزایش کسر حجمی ذرات تقویت‌کننده سبب افزایش استحکام و همچنین بهبود مقاومت به سایس نمونه‌ها در دماهای بالا شده است.

۲-۴- بررسی سطوح سایس

شکل ۱۳ تصاویر SEM از سطوح سایس نمونه‌ها را در دمای ۷۵ °C (منطقه سایس 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 سایس خراشان برای تمامی نمونه‌ها دارد و نشان می‌دهد که نوع غالب در منطقه سایس ملایم برای تمامی نمونه‌ها، نوع سایس خراشان است. این موضوع را نیز می‌توان از میزان نرخ سایس نمونه‌ها نیز تایید کرد. با نگاهی به نمودار شکل ۱۰ 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 ۱۳ نمایان می‌شود که میزان آشفستگی و تغییر شکل پلاستیک نمونه‌های کامپوزیتی در مقایسه با نمونه آلومینیم تقویت نشده 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 نوع سایس خراشان برای نمونه Al-5%SiC به خوبی نمایان است. نمودار شکل ۱۰ نیز تایید کننده این موضوع است که در منطقه سایس ملایم، افزودن نانوذرات SiC باعث کاهش میزان نرخ سایس می‌شود.

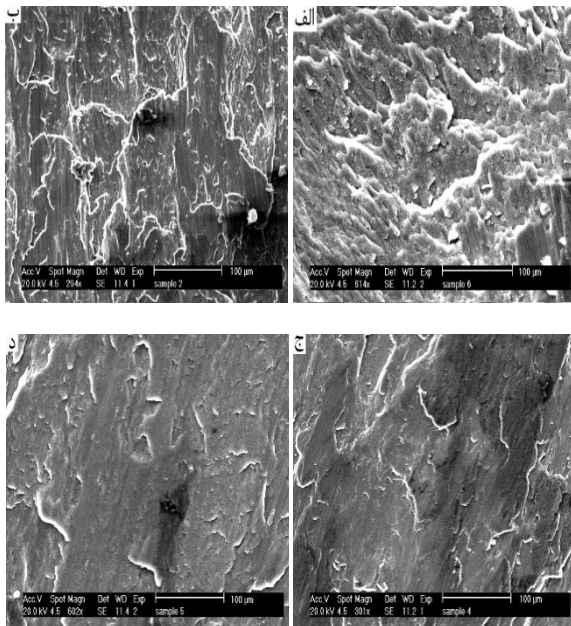


شکل ۱۱ الف) تصویر میکروسکوپی از سطح سایس یک نمونه کامپوزیتی (ب) آنالیز EDS مربوط به آن

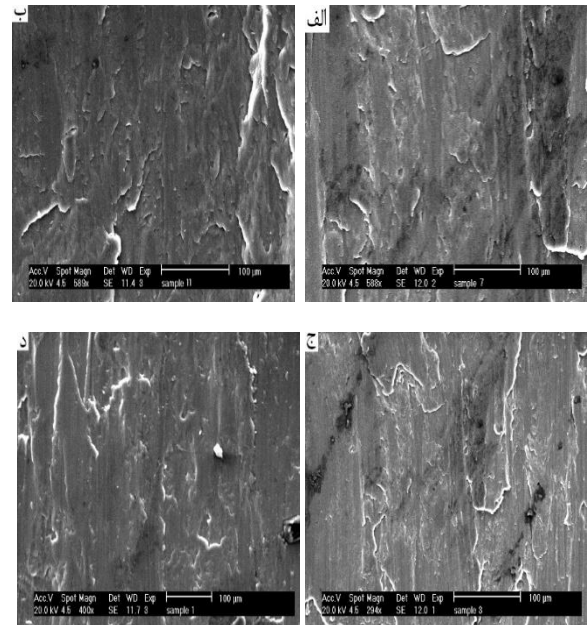
بنابراین در مورد تمامی نمونه‌ها یک دمای بحرانی وجود دارد به طوری که در این دما کمترین مقدار نرخ سایس حاصل می‌شود. نکته مهم و قابل بحث در نمودار شکل ۱۰ این است که دمای انتقال به سایس شدید نمونه‌های کامپوزیتی بیشتر از آلومینیم تقویت نشده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نمونه Al-1%SiC در دمای ۱۵۰ °C، نمونه Al-3%SiC در دمای ۱۷۵ °C دچار تغییر شیب سایس و انتقال سایس ملایم به شدید شده است که نشان از اثر مثبت ذرات تقویت‌کننده در بالا بردن دمای انتقال به سایس شدید و بهبود رفتار سایسی دما بالای نمونه‌ها دارد، به گونه‌ای که افزودن یک و سه درصد نانو SiC به ترتیب باعث افزایش ۲۵ °C و ۵۰ °C دمای انتقال به سایس شدید شده است. افزایش کسر حجمی نانوذرات SiC به پنج درصد باعث افزایش دمای انتقال به سایس 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 سایس شدید را افزایش دهد اما میزان نرخ سایس نمونه Al-5%SiC کمتر از نمونه Al-3%SiC است و رفتار سایسی بهتری دارد. نکته دیگری که در مورد اثر مثبت ذرات تقویت‌کننده می‌توان مشاهده کرد این است که پس از انتقال سایس ملایم به شدید، با افزایش دما نمودار نرخ سایس نمونه‌های کامپوزیتی در مقایسه با آلومینیم تقویت نشده با شیب کمتری افزایش می‌یابد و نمونه‌ها از نرخ سایس کمتری برخوردار بوده که این موضوع در مورد نمونه Al-5%SiC نمود بیشتری دارد و باعث کنترل بیشتر نرخ سایس شده است.

شکل ۱۲ نمودار ضریب اصطکاک متوسط بر حسب دما را برای نمونه‌های کامپوزیتی و آلومینیم تقویت نشده نشان می‌دهد. با مقایسه نمودار شکل‌های ۱۰ و ۱۲ می‌توان به این نتیجه رسید که نمودار ضریب اصطکاک نمونه‌ها تقریباً شبیه نمودار نرخ سایس بر حسب دما است به گونه‌ای که برای

است. ذکر این نکته لازم است که اگر چه برای نمونه $Al-5\%SiC$ نشانه‌هایی از سایش چسبان مشاهده می‌شود اما سایش غالب همچنان خراشان است.



شکل ۱۴ تصاویر SEM از سطح سایش نمونه‌ها در دمای $200^\circ C$ (سایش شدید) الف) $Al-5\%SiC$ ب) $Al-1\%SiC$ ج) $Al-3\%SiC$ د) $Al-5\%SiC$



شکل ۱۳ تصاویر SEM از سطح سایش نمونه‌ها در دمای $75^\circ C$ (سایش ملایم) الف) $Al-5\%SiC$ ب) $Al-1\%SiC$ ج) $Al-3\%SiC$ د) $Al-5\%SiC$

شکل ۱۴ تصاویر SEM از سطوح سایش نمونه‌ها را در دمای $200^\circ C$ (منطقه سایش شدید) نشان می‌دهد. از مقایسه این تصاویر با تصاویر شکل ۱۴ مشخص می‌شود که نمونه‌ها دچار سایش شدید و تغییر شکل‌های پلاستیک آن‌ها بسیار زیاد شده است. تغییر شکل‌های پلاستیک زیاد و وجود ترک‌های عرضی در سطح سایش نمونه‌ها از مشخصه‌های اصلی نوع سایش چسبان است. همچنین سایش بالای نمونه‌ها (نمودار شکل ۱۰)، وجود سایش چسبان را تایید می‌کند. در واقع افزایش دما باعث می‌شود که زمینه نرم‌تر شود و مقاومت خود را در برابر سایش از دست بدهد. این موضوع باعث چسبیدن پین سایش به سطح نمونه و جدا شدن تکه‌هایی از سطح نمونه در حین سایش شود که این خود باعث افزایش تغییر شکل‌های پلاستیک در سطح سایش و افزایش میزان وزن کاسته شده گردد.

نکته مهم این است که میزان آسیب‌های سطحی و تغییر شکل‌های نمونه‌های کامپوزیتی $Al-5\%SiC$ و $Al-3\%SiC$ نسبت به نمونه آلومینیم تقویت نشده کمتر است و اگر چه تمامی نمونه‌ها (به جز $Al-5\%SiC$) دارای سایش چسبان بوده اما این نوع سایش برای نمونه آلومینیم تقویت نشده بیشتر نمایان است. در توجیه این موضوع باید اشاره داشت که همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، آلومینیم تقویت‌نشده در دمای $125^\circ C$ و نمونه‌های $Al-3\%SiC$ و $Al-5\%SiC$ در دمای $175^\circ C$ دارای دمای انتقال به سایش شدید هستند. طبیعتاً در این دما ($200^\circ C$)، نمونه آلومینیم تقویت‌نشده از میزان نرخ سایش 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 شده و مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیکی فاز زمینه را افزایش می‌دهد. کلیه این عوامل باعث کاهش از بین رفتن ماده در اثر سایش می‌گردد. بنابراین می‌توان گفت که به دلیل نقش موثر نانو ذرات SiC در داخل زمینه کامپوزیت، نه تنها سایش شدید در کامپوزیت نسبت به آلومینیم تقویت‌نشده در دماهای بالاتری رخ می‌دهد بلکه باعث کاهش تغییر شکل پلاستیک و ترک‌های عرضی شده

۴- نتیجه‌گیری

۱. بررسی‌های میکروسکوپی و هم‌چنین آنالیزهای EDS نشان داد که نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده به روش متالورژی پودر از توزیع مناسب ذرات تقویت‌کننده و عدم وجود فازهای ناخواسته برخوردارند.
۲. دمای انتقال از ناحیه سایش ملایم به ناحیه سایش شدید برای نمونه آلومینیم تقویت‌نشده $125^\circ C$ می‌باشد. افزودن ۱، ۳ و ۵ درصد نانوذرات SiC به آلومینیم به ترتیب باعث افزایش دمای انتقال به سایش شدید به میزان ۵۰، ۵۰ و $50^\circ C$ می‌شود.
۳. در تمامی دماها، نرخ سایش و ضریب اصطکاک نمونه‌های کامپوزیتی کمتر از آلومینیم تقویت‌نشده می‌باشد و افزایش کسر حجمی فاز تقویت‌کننده باعث کاهش نرخ سایش و ضریب اصطکاک می‌شود.
۴. نوع سایش غالب در ناحیه سایش ملایم، از نوع خراشان می‌باشد، در حالی که با افزایش دما و در منطقه سایش شدید نوع سایش تمامی نمونه‌ها به جز نمونه $Al-5\%SiC$ به چسبان تغییر می‌یابد.

۵- مراجع

- [1] Gopalakannan, S. and Senthilvelan, T., "Application of response surface method on machining of Al-SiC Nano-composites", Measurement, Vol. 46, pp. 2705-2715, 2013.
- [2] Raa, R.N. and Das b, S., "Effect of matrix alloy and influence of SiC particle on the sliding wear characteristics of aluminum alloy composites" Materials and Design, Vol. 31, pp. 1200-1207, 2010.
- [3] Sahin, Y., "Abrasive wear behavior of SiC/ 2014 aluminum composite", Tribology International, Vol. 43, pp. 939- 943, 2010.
- [4] Ahlatci, H. Kocer, T. Candan, E. and Cimenoglu, H., "Wear behavior of Al/ ($Al_2O_3+SiC_p$) hybrid composites", Tribol. Vol. 39, pp. 213- 220- 2006.
- [5] Sahin, Y., "Preparation and some properties of SiC particle reinforced aluminum alloy composites", Materials and Design, Vol. 24, pp. 671- 679, 2003.
- [6] Woo, K. D. and Zhang, D. L., "Fabrication of Al- 7wt%Si- 0.4wt%Mg/ SiC Nano composite powders and bulk Nano composites by high energy ball

- milling and powder metallurgy", Current Applied Physics, Vol. 4, pp. 175- 178, 2004.
- [7] Modi, O. P. Prasad, B. K. Vegneswaran, A. H. and Vaidya, M. L., "Dry sliding wear behavior of squeeze cast aluminum alloy-silicon carbide composites", Material Science and Engineering, Vol. 151, pp. 235- 245, 1992.
- [8] Bauri, R. and Surappab, M.K., "Sliding wear behavior of Al-Li-SiC_p composites", Wear, Vol. 265, pp. 1756- 1766, 2008.
- [9] Ramesh, C. S. and Ahamed, A., "Friction and wear behavior of cast Al 6063 based in sit metal matrix composites", Wear, Vol. 271, pp. 1928- 1939, 2011.
- [10] Muratoglu, M. and Aksoy, M., "Abrasive wear of 2124Al- SiC composites in the temperature range 20-200 C", J. Mater. Proc. Technol, Vol. 174, pp. 272-276, 2006.
- [11] Cantor, B. Dunne, F. and Stone, I., "Metal and ceramic matrix composites", IOP, 2004.
- [12] Singh, J. and Alpas, A.T., "High-Temperature Wear and Deformation Processes in Metal Matrix Composites", Metall. Mater.Trans. Vol. 27, pp. 3135- 3148, 1996.
- [13] Saka, N. and Karalekas, D. P., "Friction and wear of particle reinforced metal-ceramic composites", Wear of Metals, Vol. 175, pp. 784-793, 1985.