

## مقایسه خواص تریبولوژیکی ترکیبات SiC و TiC-NiAl

مجتبی خلقی، محمد باقر رهائی و علی شفیمی

دانشکده مهندسی مواد - دانشگاه صنعتی اصفهان

### چکیده

در این پژوهش رفتار سایش و روانکاری کامپوزیت TiC-NiAl تولید شده به روش سنتز احتراقی و SiC تولید شده به روش سینترینگ به منظور کاربرد در پمپ (قسمت سطوح سخت آب بندهای مکانیکی) مورد مطالعه قرار گرفت. رفتار تریبولوژیکی SiC و TiC-NiAl از طریق آزمون پین روی دیسک تحت شرایط خشک در دمای اتاق بررسی شد. ضریب اصطکاک و کاهش وزن نمونه‌های SiC و TiC-NiAl به وسیله آزمون پین روی دیسک اندازه‌گیری شد و نوع سایش به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ نوری بررسی شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که نمونه TiC-NiAl ضریب اصطکاک و رفتار سایشی نزدیک به SiC دارد. نوع سایش برای نمونه‌های SiC و TiC-NiAl چسبان، خراشان و تریوشیمیایی می‌باشد. همچنین نتایج میکرو و ماکروسختی نشان داد که TiC-NiAl همانند SiC سختی بالا برای استفاده در پمپ دارد.

واژه‌های کلیدی: سایش، اصطکاک، کامپوزیت TiC-NiAl، چسبان، خراشان، سختی

## Comparison of tribological properties of SiC and TiC-NiAl compounds

M. Kholghi, M. B. Rahaei, and A. Shafyei

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology

**Abstract:** In this research, the lubricity and wear behavior of sintered SiC ceramic was studied in comparison to TiC-NiAl composite produced by self propagation high temperature (combustion) synthesis for use in pump (Hard Face Part of Mechanical Seals). The tribological behavior of single phase SiC and TiC-NiAl was investigated by pin on disk tester under dry condition in room temperature. Coefficient of friction and wear lost of SiC and TiC-NiAl samples was measured by pin on disc test and main wear investigated by scanning electron microscopy (SEM) and optical microscopy (OM). Experimental results showed that TiC-NiAl has friction coefficient and wear behavior close to SiC. Dominant mechanism of wear for TiC-NiAl and SiC is adhesion, abrasion and tribochemical. Also micro and macro hardness result showed that TiC-NiAl has high hardness like SiC for use in pump.

**Keywords:** Wear, Friction, TiC-NiAl Composite, Adhesion, Abrasion, Hardness

**E-mail of corresponding author (s):** rahaei@merc.ac.ir

## مقدمه

در دو دهه اخیر استفاده از مواد سرامیکی برای کاربردهای تریبولوژیکی افزایش یافته است. این اساساً به علت خصوصیات خاص سرامیک ها مانند چگالی کم، مقاومت به خوردگی بالا، انبساط حرارتی کم و سختی بالا در محدوده وسیعی از دما است. در این گروه کاربرد سیلیسیم سختی بالا، استحکام نسبی بالا، نقطه ذوب بالا و نسبت استحکام به چگالی بالا دارد، که مقاومت بالا به سایش و خراش را نتیجه می دهد [۱].

یکی از مهم ترین قطعاتی که در سال های گذشته تحقیقات وسیعی را به خود اختصاص داده است و اشراهای مصرفی در آب بندهای مکانیکی پمپ ها است. کاربرد سیلیسیم از جمله ترکیبات کاربردی مهم است که در پمپ ها به عنوان وشر آب بند مکانیکی (قسمت سطوح سخت) به کار برده می شود. یکی از روش های مهم تولید آن روش سیتترینگ<sup>۱</sup> است که روشی پر هزینه و زمان بر می باشد [۲].

ترکیبات بین فلزی خصوصیات دارند که آنها را خیلی جذاب برای کاربردهای صنعتی می سازد. NiAl و Ni<sub>3</sub>Al پتانسیل بالا در کاربردهای دما بالا مانند توربین های گازی، فیکسچرهای عملیات حرارتی و پوشش های مقاوم به خوردگی دارند. NiAl مناسب تر از Ni<sub>3</sub>Al برای کاربردهای دما بالا می باشد. ساختار استفاده شده از NiAl، داکتیلیته کم، تافنس شکست ضعیف و استحکام ناکافی در دمای بالا دارد. بنابراین بیشتر تلاش ها بر این است تا خواص NiAl را به وسیله فاز تقویت کننده شامل TiC، Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و TiB<sub>2</sub> بهبود بخشند. کاربرد تیتانیم تکفاز ترد است ولی فلزاتی مانند Ni، Co و Fe همانند فاز ثانویه داکتیل، تافنس شکست را بهبود می بخشند. اضافه کردن ترکیب بین فلزی NiAl به فاز TiC، خصوصیات مکانیکی خوب را نتیجه می دهد [۳ و ۴]. سیتترینگ فاز مذاب و نفوذ مذاب دو تکنیک متداول در تولید این مواد

است [۵]. سنتز احتراقی دما بالا نیز در سیستم چهارتایی TiC-Ni-Al به منظور به دست آوردن کامپوزیت TiC-NiAl استفاده می شود. مزیت روش سنتز احتراقی<sup>۲</sup> شامل ملزومات انرژی کم، سادگی نسبی فرایند و تجهیزات، خلوص بالای محصولات و قیمت کم است [۶]. از این رو خصوصیات تریبولوژیکی TiC-NiAl تولید شده به روش سنتز احتراقی را با SiC برای جایگزینی در پمپ مقایسه می کنیم.

## روش تحقیق

## آزمون سایش (پین روی دیسک)

برای اندازه گیری ضریب اصطکاک و عمر سایشی آزمون پین روی دیسک برای شبیه سازی کار آب بند مکانیکی بر روی نمونه های SiC و TiC-NiAl تولید شده به روش سنتز احتراقی انجام گرفت. به این منظور وشر آب بند مکانیکی به قطر ۳ cm و ضخامت ۰/۵ cm تهیه شد و آزمون سایش انجام شد. زبری سطح نمونه ها در حدود ۲۰ μm به دست آمد. شرایط آزمون در جدول ۱ آمده است. در شکل ۱ دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک و اشراهای SiC و TiC-NiAl نشان داده شده است.

## بررسی سطوح نمونه ها قبل و بعد از آزمون سایش

آنالیز عنصری نمونه ها با استفاده از تکنیک EDS<sup>۳</sup>، ساختار تریبولوژیکی سطح نمونه ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی<sup>۴</sup> (SEM مدل XL3) ساخت کمپانی (PHILIPS) و میکروسکوپ متالوگرافی معکوس<sup>۵</sup> (مدل PIPHO300) ساخت کمپانی (Nikon) مورد مطالعه قرار گرفت و بررسی مورفولوژی ذرات سایش و رد سایش از استروسکوپ<sup>۶</sup> (مدل SMZ 800) ساخت کمپانی

2 Self Propagation High Temperature Synthesis

3 Energy dispersive spectrometer

4 Scanning electron microscopy

5 Inverted Metallurgical Microscope

6 Stereoscopic Zoom Microscope



ب) دستگاه آزمون پین روی دیسک



شکل (۱) الف) نمونه واشرهای SiC و TiC-NiAl

جدول (۱) شرایط آزمون پین روی دیسک

سرعت خطی (m/s)	نیروی عمودی (kg)	رطوبت نسبی	محیط	دما	قطر پین	سختی پین	نوع پین
۰/۰۸	۲۰، ۲۴ و ۲۸	٪ ۳۵	خشک	۲۳ °C	۰/۵ cm	۶۴RC	فولاد رول برینگ

نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده (عمر سایشی) برای ترکیبات SiC و TiC-NiAl در بارهای ۲۰، ۲۴ و ۲۸ کیلوگرم برای مسافت طی شده ۱۰۰۰ متر به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ آمده است. دلیل انتخاب این بارها برای آزمون سایش تغییر سریع در افزایش ضریب اصطکاک در یک بار بحرانی در ترکیبات است که این تغییر سریع برای افزایش سایش (کاهش وزن) نمونه نیز صحیح است و کاربرد دارد [۷]. این تغییر سریع در بار ۲۴۰ نیوتن برای نمونه‌ها به دست آمد.

محدوده ضریب اصطکاک در بارهای مختلف در جدول ۲ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک در نمونه TiC-NiAl (۰/۳۵-۰/۴۱) نزدیک به SiC خصوصاً در نیروی اعمالی کم (۲۰۰ نیوتن) است. از این رو مقدار روانکاری نمونه TiC-NiAl در حد قابل قبول با نمونه SiC برای کار در پمپ است.

هنگامی که سطح ماده به طور کامل در حلاء تمیز شده باشد و کاملاً صاف و بدون هیچ‌گونه پستی و بلندی در حد میکروسکوپی باشد، نیروی برشی سبب افزایش پلاستیسیته در محل اتصال شده و ضریب اصطکاک به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. در واقع میزان اتصالات دو سطح افزایش یافته است. اما در حالی که سطح نمونه فلزی کاملاً

(Nikon) استفاده شد. مطالعات فازشناسی توسط دستگاه پراش پرتو ایکس<sup>۱</sup> مدل Philips Xpert-MPD، مجهز به نرم‌افزار فازیابی انجام شد.

#### سختی سنجی

ماکرو سختی در مقیاس RA و میکروسختی در مقیاس ویکرز برای نمونه‌ها به دست آمد.

#### نتایج و بحث

آنالیز تفرق اشعه ایکس نمونه‌های SiC و TiC-NiAl (شکل ۲)، تصاویر SEM (شکل ۳) و آنالیز EDS در شکل ۴ آمده است. نتایج در نمونه SiC، تک‌فاز SiC و در نمونه TiC-NiAl فازهای TiC و NiAl را نشان می‌دهد. همچنین تخلخل‌های سطحی خصوصاً در نمونه SiC به وضوح مشخص است. لازم به ذکر است به دلیل حساسیت کم آنالیز EDS به عناصر سبک، در این روش درصد اتمی عناصر سبک مانند کربن را ناچیز نشان می‌دهد [۷].

متر و نیروی ۲۴۰ نیوتن) بوده است و عمر سایشی نمونه TiC-NiAl در حد قابل قبول با نمونه SiC است.

به منظور ارزیابی مکانیزم سایش برای نمونه‌ها در آزمون پین روی دیسک تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، آنالیز عنصری از سطوح سایش، تصاویر میکروسکوپ نوری از مسیر سایش، سطوح پین و ذرات حاصل از سایش نشان داده شده‌اند.

در شکل ۸ تصاویر SEM از سطح سایش، شکل ۹ تصاویر مسیر سایش، سطح پین و ذرات حاصل از سایش و در شکل ۱۰ آنالیز EDS برای نمونه SiC پس از آزمون پین روی دیسک ارائه شده است. همان‌طور که تصاویر SEM و میکروسکوپ نوری نشان می‌دهد چسبندگی ذرات سایش (سایش چسبان)، ایجاد ذرات سایش اکسیدی (سایش تریبوشیمی) و ایفا کردن نقش پودر ساپنده توسط ذرات سایش اکسیدی را می‌توانیم داشته باشیم (سایش خراشان) که باعث انهدام مداوم سطح می‌شوند. مورفولوژی ذرات حاصل از سایش به صورت ذرات سیاه کروی (تریبوشیمی)، کلوخه‌ای (خراشان) و ورقه‌ای (چسبان) است. همچنین بر روی پین اثر خراش مشخص است و آنالیز EDS علاوه بر عناصر سیلیسیم و کربن، عنصر آهن که ترکیب اصلی نمونه پین فولادی است و اکسیژن را روی سطح نشان داد. در طی فرایند سایش لایه اکسیدی ایجاد شده پایداری مناسب را ندارد و پس از مدتی از سطح جدا می‌شود و به همین ترتیب جدا شدن و چسبیدن ذرات به سطح نمونه تکرار می‌شود. از این رو با توجه به نتایج فوق و نمودار شکل ۷، در نمونه SiC در آزمون سایش، سایش‌های خراشان، چسبان و تریبوشیمیایی مکانیزم‌های غالب است [۷، ۹ و ۱۱].

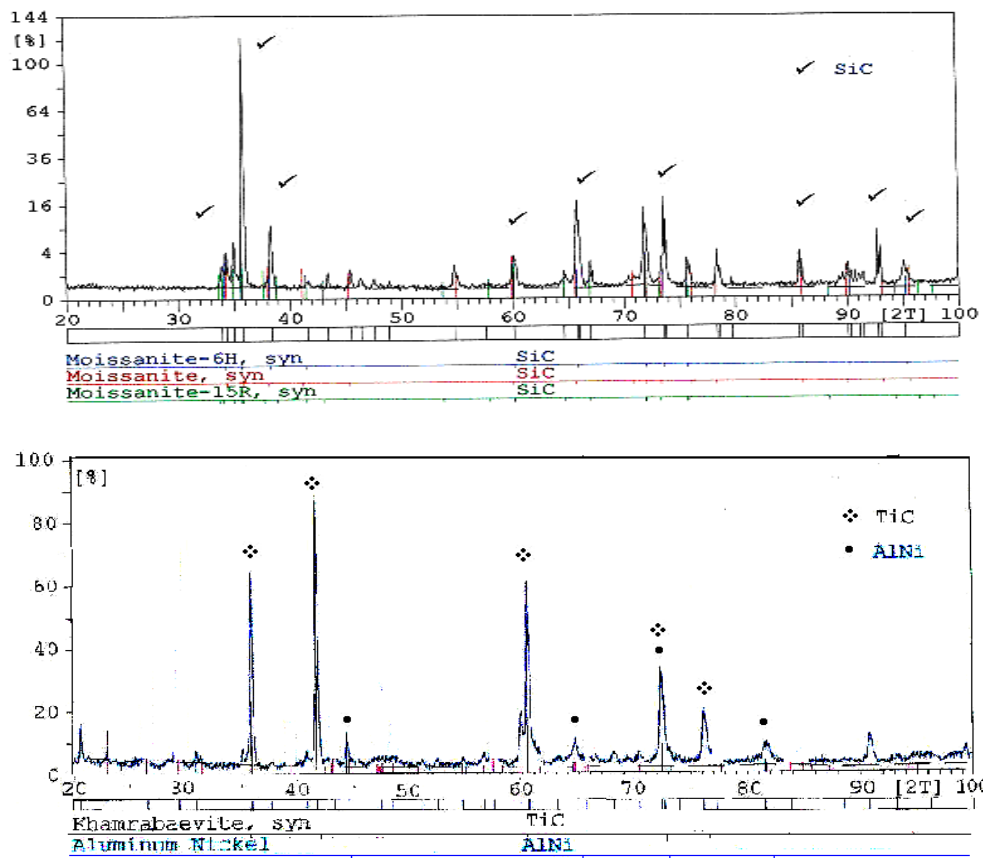
شکل ۱۰ تصاویر SEM از سطح سایش، در شکل ۱۲ تصاویر رد سایش، سطح پین و ذرات حاصل از سایش و در شکل ۱۳ آنالیز EDS برای نمونه TiC-NiAl پس از آزمون پین روی دیسک ارائه شده است. در تصاویر میکروسکوپی وجود پوسته اکسیدی، چسبندگی آن به

تمیز و صیقلی نشده باشد وجود یک فیلم اکسیدی بر روی سطح آن می‌تواند شدیداً سبب کاهش اصطکاک نسبت به حالت قبل گردد [۹].

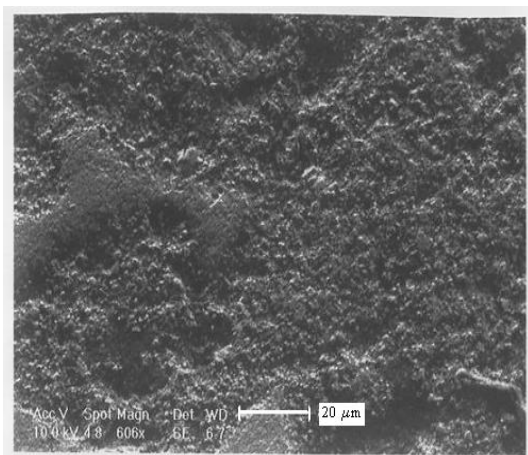
به طور کلی می‌توان گفت که نقش اصلی در کاهش سایش و اصطکاک را لایه‌های اکسیدی روانکار بازی می‌کنند. اگر بار اعمالی کم باشد و اکسیداسیون خودبه خود طبیعی از فلز انجام شود، سرعت سایش نسبتاً کم خواهد شد. در واقع سایش منجر به کاهش استحکام برشی از سطح اکسید-فلز می‌شود و اکسید مانند یک روانکار عمل می‌کند، که باعث کاهش ضریب اصطکاک و ایجاد سایش متوسط می‌شود. سایش متوسط مشخصه مواد لغزشی خشک است که اکسید محافظ طبیعی می‌تواند به طور پیوسته تغییر شکل دهد. بنابراین در سطوح لغزشی اکسید محافظ همانند روانکار خشک عمل می‌کند و سرعت سایش را کاهش می‌دهد. در بارهای بالا سرعت اکسیداسیون سریع افزایش می‌یابد و می‌تواند دوباره یک لایه محافظ تشکیل دهد و سایش متوسط دوباره پایدار شود. تفاوت در لایه اکسیدی تشکیل شده روی نمونه به دلیل تفاوت در مقاومت اکسیداسیون از ترکیبات مختلف است [۷ و ۱۰].

در بین فازهای TiC و SiC بیشترین مقاومت به اکسیداسیون مربوط به فاز SiC می‌باشد. واکنش‌های اکسیداسیون برای این فازها و برای عناصر Ni و Al در جدول ۳ آمده است. این عناصر یا فازها می‌توانند مقاومت به اکسیداسیون عالی داشته باشند یا تشکیل لایه اکسیدی پایدار دهند، از این رو قابلیت کاربرد در شرایط مختلف را دارند [۷ و ۱۰].

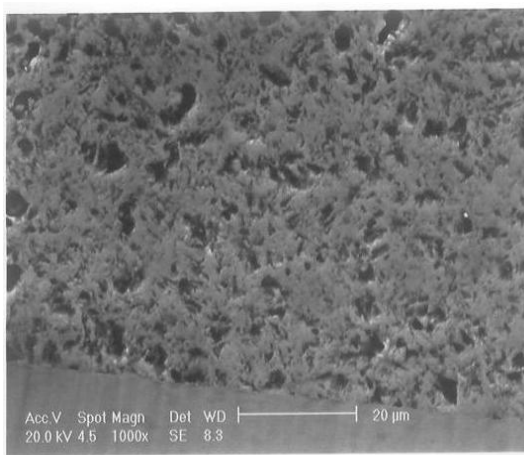
منحنی مشخصه سایش (تغییرات کاهش وزن- مسافت طی شده) برای نمونه‌های SiC و TiC-NiAl در آزمون سایش در بار ۲۴ کیلوگرم به دست آمد (شکل ۷). با توجه به منحنی مشخصه سایش کاهش وزن در نمونه‌های SiC و TiC-NiAl کم (حدود ۲ میلی‌گرم در مسافت ۱۰۰۰



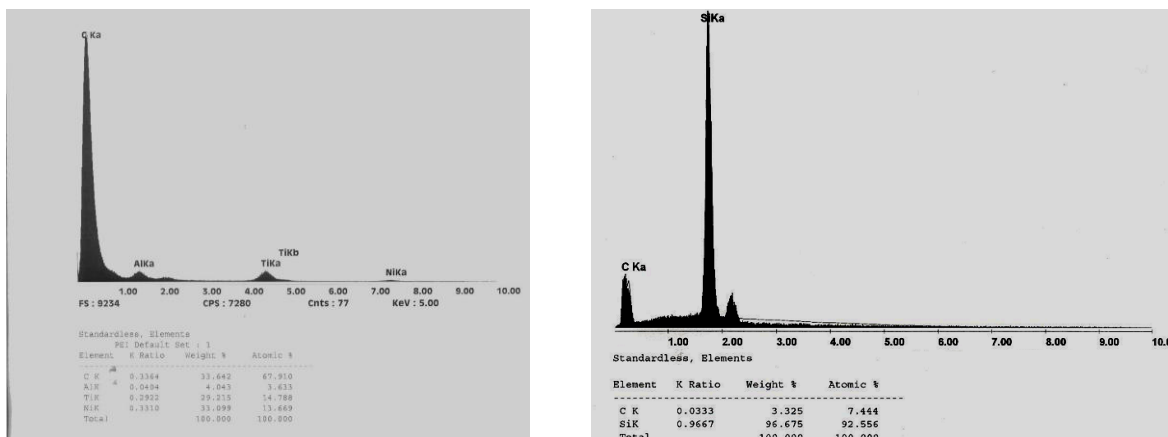
شکل ۲- آنالیز تفرق اشعه ایکس در نمونه‌های الف) و اشتر آب بند مکانیکی SiC، (ب) و اشتر TiC-NiAl.



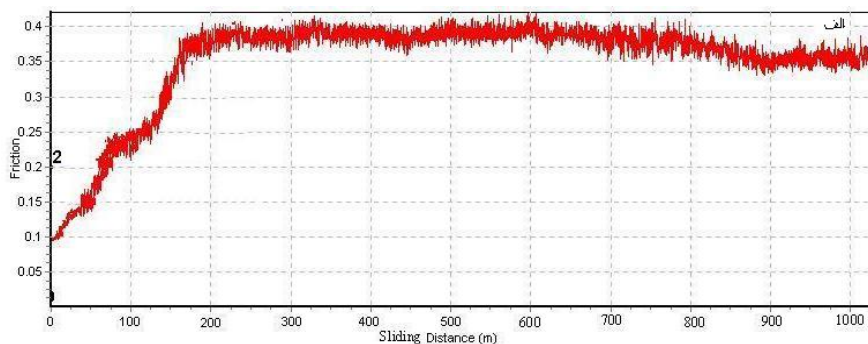
شکل ۳- تصاویر SEM ترکیب SiC،



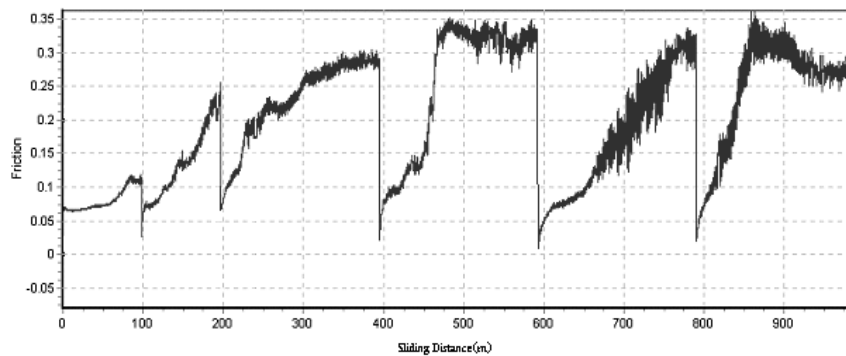
شکل ۳- تصاویر SEM ترکیب SiC،



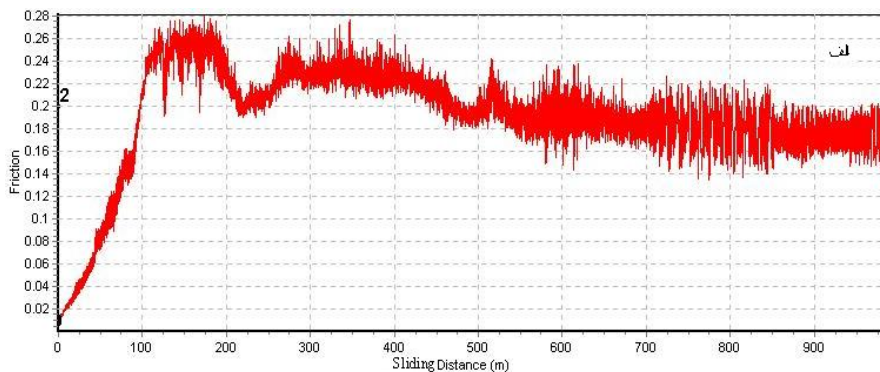
شکل ۴- آنالیز EDS در نمونه‌های الف) و اثر آب بند مکانیکی SiC ب) در نمونه و اثر TiC-NiAl.



الف

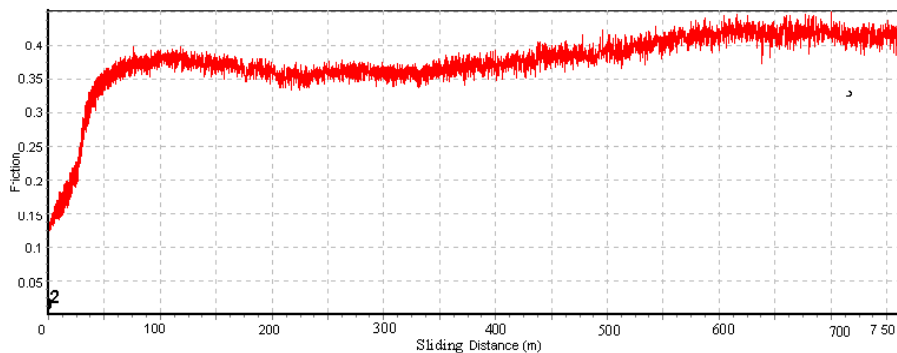


ب

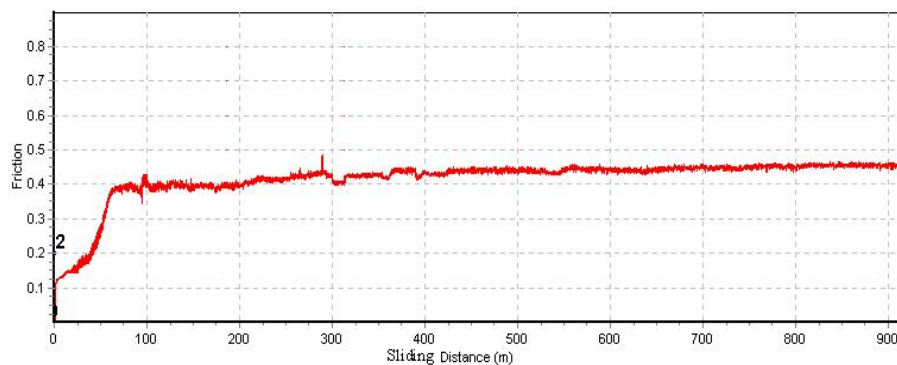


ج

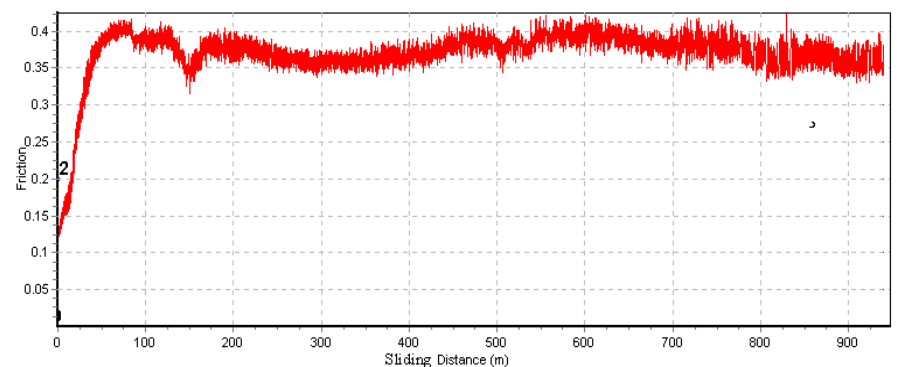
شکل ۵- نمودار ضریب اصطکاک بر حسب عمر سایشی ترکیب SiC در سرعت خطی ۰/۰۷ m/s (الف) بار ۲۰kg ب) ۲۴kg ج) ۲۸kg.



الف



ب



ج

شکل ۶- نمودار ضریب اصطکاک بر حسب عمر سایشی ترکیب TiC-NiAl در سرعت خطی ۰/۰۷ m/s  
 الف) بار ۲۰kg ب) ۲۴kg ج) ۲۸kg

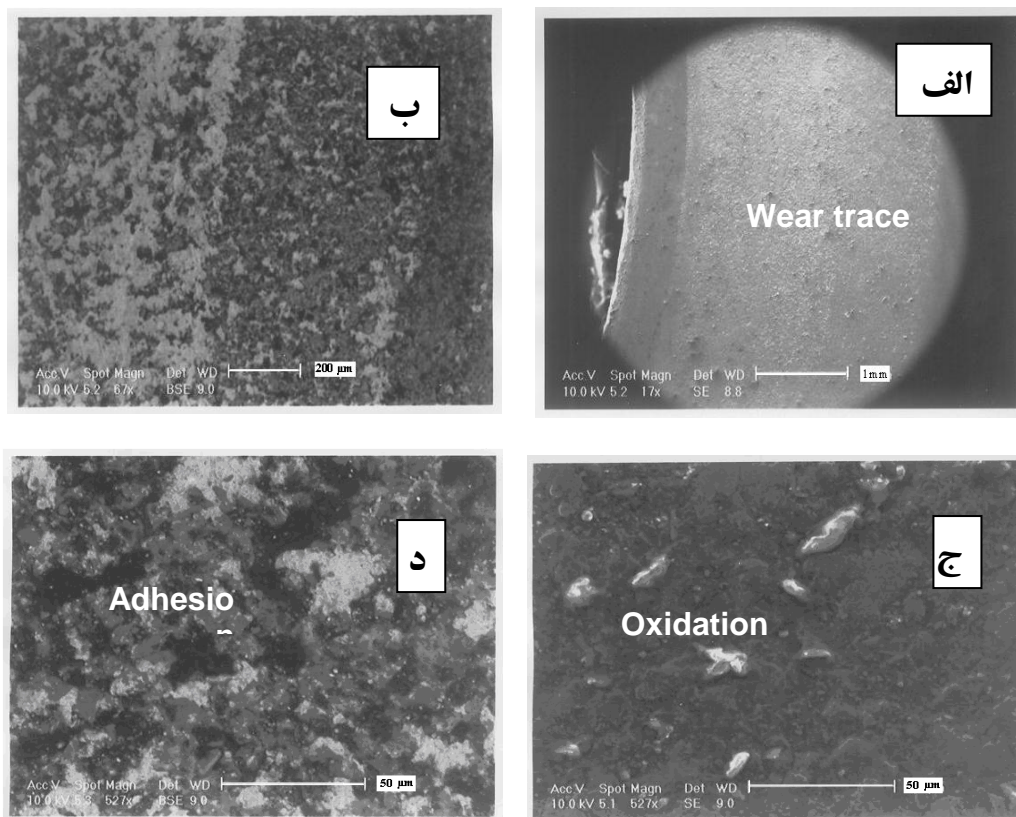
جدول ۲- محدوده ضریب اصطکاک برای ترکیبات TiC-NiAl و SiC.

ترکیبات	۲۰ kg	۲۴ kg	۲۸ kg
SiC	۰/۳۵-۰/۴۱	۰/۲-۰/۳۵	۰/۱۶-۰/۲۸
TiC-NiAl	۰/۳۵-۰/۴۳	۰/۴-۰/۴۵	۰/۳۳-۰/۴۸

جدول ۳- واکنش های اکسیداسیون برای فازها و عناصر در نمونه‌ها.

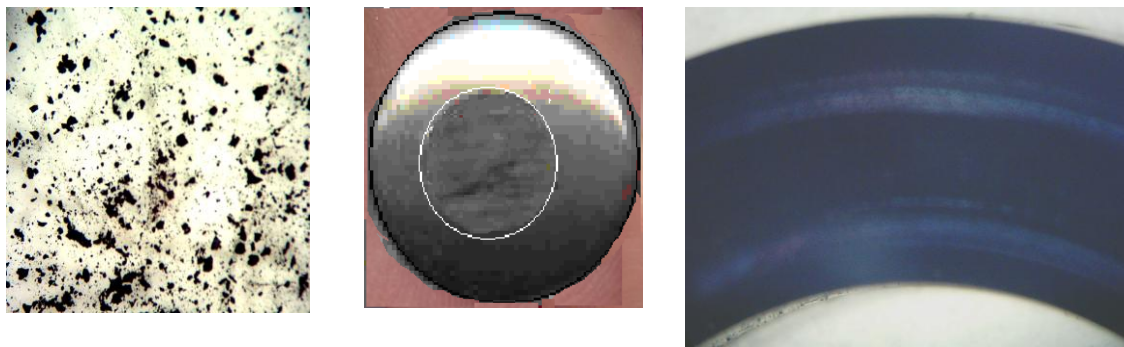
واکنش های اکسیداسیون	$\Delta G_{1298}$ (kJ)
$\text{SiC} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{CO}_2$	-589
$\text{SiC} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{CO}$	-614
$\text{TiC} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{TiO}_2(\text{Rutil}) + \text{CO}_2$	-551
$\text{TiC} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{TiO}_2(\text{Rutil}) + \text{CO}$	-564
$2\text{TiC} + 5/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Ti}_2\text{O}_3 + \text{CO}$	-539
$3\text{TiC} + 4\text{O}_2 \rightarrow \text{Ti}_3\text{O}_5$	-547
$4\text{TiC} + 11/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Ti}_4\text{O}_7 + 4\text{CO}$	-553
$\text{Ti} + \text{O}_2 \rightarrow \text{TiO}_2$	-860
$\text{Ni} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{NiO}$	-230
$2\text{Al} + 3/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$	-1689

مقدار انرژی آزاد مربوط به یک مول است.

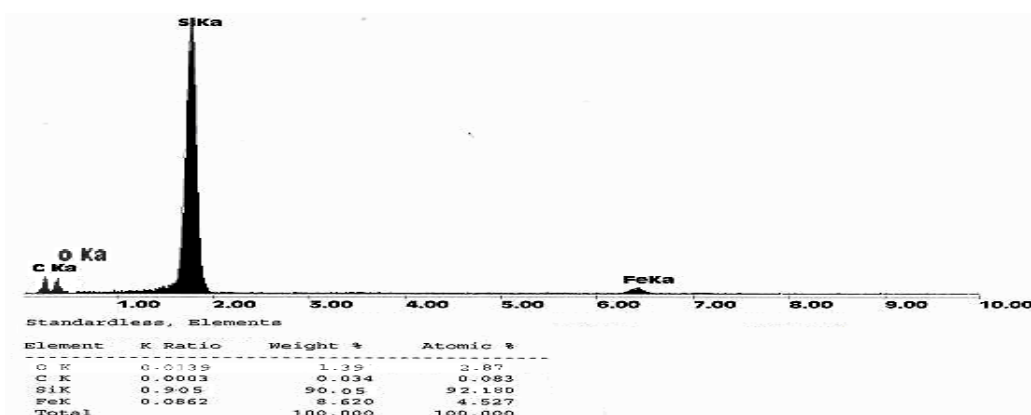


شکل ۸- تصاویر SEM سطح سایش نمونه SiC در بزرگنمایی های مختلف





شکل ۹- الف) ۷× رد سایش نمونه SiC ب) ۷× سطح سایش پین ج) ۱۴× ذرات حاصل از سایش

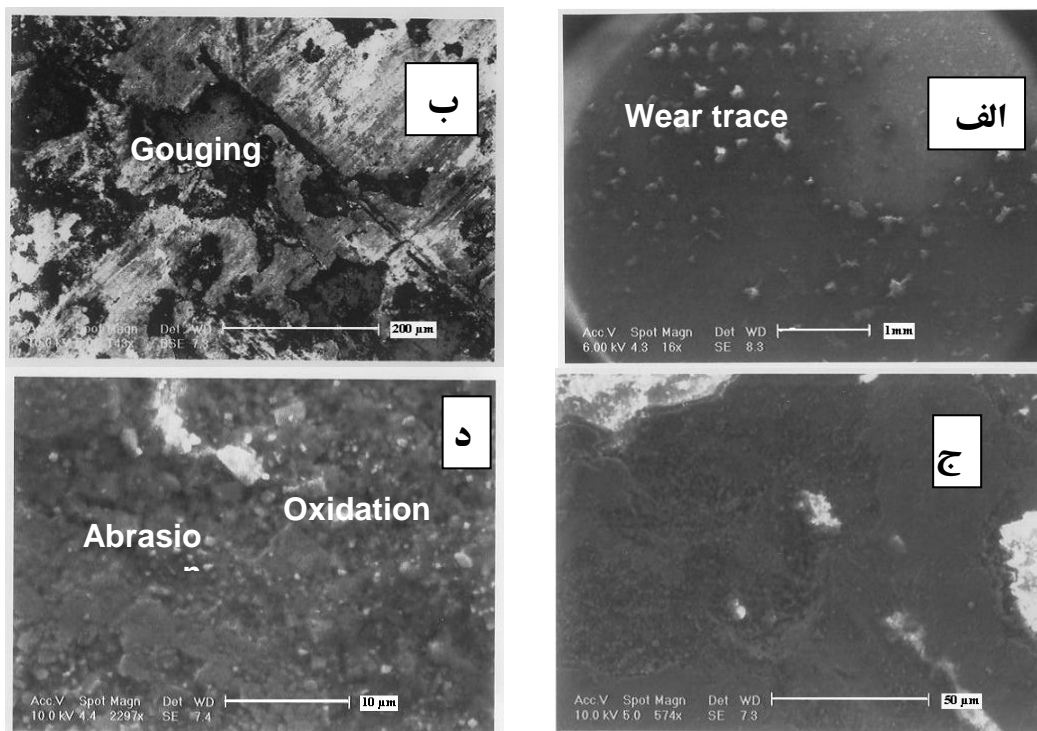


شکل ۱۰- آنالیز EDS سطح سایش نمونه SiC پس از آزمون پین روی دیسک.

خشک عمل می‌کند و سرعت سایش را کاهش می‌دهد. با NiAl در نمونه TiC-NiAl سایش‌های چسبان، خراشان و تریوشیمیایی مکانیزم‌های غالب است [۷، ۹] و [۱۱].

سختی نمونه‌ها در جدول ۴ آمده است. نتایج نشان داد سختی نمونه TiC-NiAl کمتر، اما در حد قابل قبول با نمونه SiC برای کار در پمپ است. افزایش سختی همواره یک پارامتر موثر برای بالا بردن مقاومت سایشی آلیاژهاست. افزایش سختی ماده تحت سایش می‌تواند نفوذ مواد ساینده را محدود کرده و سرعت سایش را کاهش دهد. بنابراین سختی بالا در نمونه‌های TiC-NiAl و SiC به طور موثری باعث کاهش نرخ سایش گردیده است [۱۲].

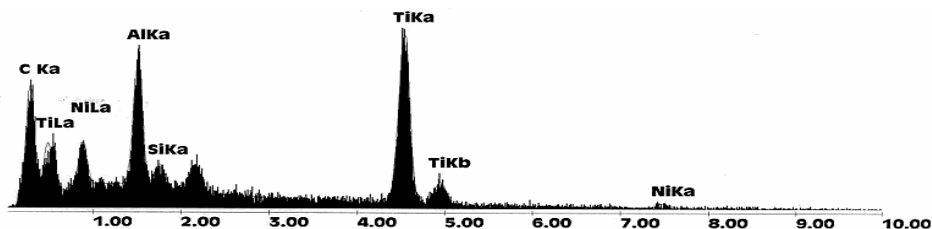
در تصاویر میکروسکوپی وجود پوسته اکسیدی، چسبندگی آن به سطح و جدا شدن پوسته اکسیدی (کندگی) مشخص شده است. در تصویر سطح پین کنده شدن ذرات از سطح آن مشهود است. همچنین آنالیز EDS علاوه بر عناصر ترکیب TiC-NiAl بر روی سطح سایش، عناصر ترکیب پین فولادی مانند آهن و همچنین اکسیژن را نشان می‌دهد. اگر نیروهای اعمالی (بارها) زیاد باشند و اکسید محافظ قادر نباشد به طور موثر تشکیل شود، کندگی اتفاق می‌افتد و سرعت سایش و اکسیداسیون زیاد خواهد شد. همچنین می‌تواند دوباره یک لایه محافظ تشکیل دهد و سایش متوسط (چسبان و خراشان) دوباره پایدار شود. سایش متوسط مشخصه مواد لغزشی خشک است که اکسید محافظ طبیعی می‌تواند به طور پیوسته تغییر شکل دهد. بنابراین در سطوح لغزشی اکسید محافظ همانند روانکار



شکل ۱۱- تصاویر SEM سطح نمونه TiC-NiAl در بزرگنمایی‌های مختلف.



شکل ۱۲- الف) ۷× رد سایش نمونه TiC-NiAl (ب) ۷× سطح سایش پین (ج) ۱۴× ذرات حاصل از سایش.



Standardless, Elements

Element	K Ratio	Weight %	Atomic %
C K	0.0221	2.211	7.793
AlK	0.1067	10.666	16.74
O K	0.721	7.21	13.92
Fe K	0.653	6.53	4.79
TiK	0.5874	58.744	50.76
NiK	0.1653	16.530	11.920
Total		100.000	100.000

شکل ۱۳. آنالیز EDS سطح سایش در نمونه TiC-NiAl پس از آزمون پین روی دیسک.

## مراجع

1. R. Ried, *Handbook of Ceramic Hard Materials*, Vol. 2, Wiley- VCH, 2000.
2. Rolf Wa'sche, Dieter Klaffke, *Ceramic particulate composites in the system SiC-TiC-TiB<sub>2</sub> sliding against SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> under water*, Tribology International 32 (1999) pp. 197-206.
3. Nuri Durla, *Titanium Carbide Based Composites for High Temperature Applications*, Journal of the European Ceramic Society 19 (1999) pp. 1415-1419.
4. C.L. Yeh, C.Y. Chungb, P.H. Lin and S.D. Wang, *Effects of TiC addition on combustion synthesis of NiAl in SHS mode*, Journal of Alloys and Compounds 398(2005) pp. 85-93.
5. M. X. Gao, Y. Pan, F. J. Oliveira, J. L. Baptista and J. M. Vieira, *Interpenetrating microstructure and fracture mechanism of NiAl/TiC composites by pressureless melt infiltration*, Materials Letters 58(2004) pp. 1761-1765.
6. C. Curfs, I.G. Cano, G.B.M. Vaughan, X. Turrillas, A. Kvik, and M.A. Rodriguezb, *TiC-NiAl composites obtained by SHS: a time-resolved XRD study*, Journal of the European Ceramic Society 22 (2002) pp. 1039-1044.
7. R. Wasche, D.Klaffke and T. Troczynski, *Tribological performance of SiC and TiB<sub>2</sub> against SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at low sliding speeds*, Wear 256(2004) pp. 695-704.
8. D. Klaffke and M. Hartelt, *Tribological characterization of thin hard coating by reciprocating sliding tests*, Tribol. Lett. 1 (1995) pp. 265-276.
9. صالحی، م و اشرفی زاده، ف، *متالورژی سطح و تریبولوژی*، انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران، ۱۳۷۴.
10. R. Wasche and D. Klaffke, *In situ formation of tribologically effective oxide interfaces in SiC-based ceramics during dry oscillating sliding*, Tribol. Lett. 5(1998) pp. 173-190.
11. M. J. Neale and M. Gee, *Testing for industry*, Professional Engineering Publishing limited uk, 2000, pp. 7-18.
12. S. Hogmark, *Adhesive mechanisms in the wear of some tool steels*, Wear 38, 1979, pp. 341-359.

جدول (۴) نتایج سختی سنجی در نمونه های SiC و TiC-NiAl

ویکرز	RA	نمونه
۱۴۹۵	۹۴	SiC
۹۲۴	۵/۸۱	TiC-NiAl

## نتیجه گیری

۱. نتایج آزمایشات نشان داد که نمونه TiC-NiAl روانکاری و عمر سایشی مناسب، اما کمی ضعیف تر از نمونه SiC دارد.
۲. در نمونه های SiC و TiC-NiAl در طی فرایند سایش لایه اکسیدی ایجاد شده در بار ۲۴۰ نیوتن پایداری مناسب را ندارد و پس از مدتی از سطح جدا می شود و به همین ترتیب جدا شدن و چسبیدن ذرات به سطح نمونه را داریم. از این رو نوع سایش در نمونه های SiC و TiC-NiAl در آزمون سایش، خراشان، چسبان و تریبوشیمیایی است.
۳. سختی نمونه TiC-NiAl بالا و در حد قابل قبول با نمونه SiC برای کار در پمپ است. از این رو سختی بالای نمونه ها به طور موثری باعث کاهش نرخ سایش در نمونه های SiC و TiC-NiAl گردیده است.
۴. ارزیابی اولیه از خواص تریبولوژیکی نمونه TiC-NiAl در حد قابل قبول با نمونه SiC برای کاربرد در پمپ است.

## پیشنهادات

برای تکمیل نتایج کاربرد نمونه TiC-NiAl در پمپ به عنوان آب بند مکانیکی آزمون های دیگر مانند تست دوام (کار در پمپ) و خوردگی در سیالات مختلف انجام شود.

## تشکر و قدردانی

بدین وسیله از شهرک علمی تحقیقاتی اصفهان و شرکت سخت افزا به خاطر حمایت از این پژوهش، همکاری در انجام آزمون ها و فرایند تولید صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایم.