

مقایسه خواص تریبولوژیکی ترکیبات TiC-NiAl و SiC

محمد باقر رهائی^۱، سید خطیب الاسلام صدرنژاد^۲،
علی شفیعی^۳، محمد رضا رحیمی پور^۴، مجتبی خلقی^۵

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 TiC-NiAl و SiC از طریق آزمون پین روی دیسک تحت شرایط خشک در دمای اتاق بررسی شد. ضریب اصطکاک و کاهش وزن نمونه های TiC-NiAl و SiC بوسیله آزمون پین روی دیسک اندازه گیری شد و نوع سایش بوسیله 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 نمونه های TiC-NiAl و SiC چسبان، خراشان و تریوشیمیایی می باشد. همچنین نتایج میکرو و ماکروسختی نشان داد که TiC-NiAl همانند SiC سختی بالا برای استفاده در پمپ دارد.

واژه های کلیدی: آب بند مکانیکی، سنتز احتراقی، کامپوزیت، کامپوزیت TiC-NiAl، سایش، اصطکاک، چسبان، خراشان، سختی

^۱ دانشجوی دکتری، پژوهشگاه مواد و انرژی

^۲ استاد، دانشگاه صنعتی شریف

^۳ استادیار، دانشکده مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

^۴ استادیار، پژوهشگاه مواد و انرژی

^۵ کارشناس ارشد، دانشکده مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

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 کاربید 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 مهمترین قطعاتی که در سالهای گذشته تحقیقات وسیعی را به خود اختصاص داده است، واشرهای مصرفی در آب بندهای مکانیکی پمپ ها است. کاربید سیلیسیم از جمله ترکیبات کاربیدی مهم است که در پمپ ها به عنوان واشر آب بند مکانیکی (قسمت سطوح سخت) به کار برده می شود. یکی از روشهای مهم تولید آن روش سینترینگ است، که روشی پر هزینه و زمان بر می باشد [۲].

ترکیبات بین فلزی خصوصیتی دارند که آنها را خیلی جذاب برای کاربردهای صنعتی می سازد. NiAl و Ni₃Al پتانسیل بالا در کاربردهای دما بالا مانند توربین های گازی، فیکسچرهای عملیات حرارتی و پوشش های مقاوم به خوردگی دارند. NiAl مناسبتر از Ni₃Al 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 تلاشها بر این است تا خواص NiAl را بوسیله فاز تقویت کننده شامل Al₂O₃، TiC و TiB₂ بهبود بخشند. کاربید 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].

سینترینگ فاز مذاب و نفوذ مذاب دو تکنیک متداول در تولید این مواد است [۵]. سنتز احتراقی دما بالا نیز در سیستم چهارتایی Ti-C-Ni-Al به منظور به دست آوردن کامپوزیت TiC-NiAl استفاده می شود. مزیت روش سنتز احتراقی 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.

مواد و روش تحقیق

ابتدا نمونه TiC-NiAl به روش سنتز احتراقی مشابه نتایج کار دیگر محققین تهیه شد [۶]. 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 واشر

یازدهمین کنگره‌ی سالانه‌ی انجمن مهندسين متالورژی ایران

آب‌بند مکانیکی به قطر ۳ cm و ضخامت ۰/۵ cm تهیه شد و آزمون سایش انجام شد. زبری سطح نمونه‌ها در حدود $20\ \mu\text{m}$ به دست آمد. شرایط آزمون در جدول ۱ آمده است. در شکل ۱ واشرهای SiC و TiC-NiAl نشان داده شده است. آنالیز عنصری نمونه‌ها با استفاده از تکنیک EDS، ساختار تریبولوژیکی سطح نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM مدل XL3) ساخت کمپانی (PHILIPS) و میکروسکوپ متالوگرافی معکوس (مدل PIPHO300) ساخت کمپانی (Nikon) مورد مطالعه قرار گرفت و بررسی مورفولوژی ذرات سایش و رد سایش از استروسکوپ (مدل SMZ 800) ساخت کمپانی (Nikon) استفاده شد. مطالعات فاز شناسی توسط دستگاه پراش پرتو ایکس مدل Philips Xpert-MPD، مجهز به نرم افزار فاز یابی انجام شد. 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].

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. 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.

هنگامی که سطح ماده به طور کامل در حلال 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 حالیکه سطح نمونه فلزی کاملاً 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 خودبخود طبیعی از فلز انجام شود، سرعت سایش

مقایسه خواص تریبولوژیکی ترکیبات ...

نسبتاً کم خواهد شد. در واقع سایش منجر به کاهش استحکام برشی از سطح اکسید- فلز می شود و اکسید مانند یک روانکار عمل می کند، که باعث کاهش ضریب اصطکاک و ایجاد سایش متوسط می شود. سایش متوسط مشخصه مواد لغزشی خشک است که اکسید محافظ طبیعی می تواند به طور پیوسته تغییر شکل دهد. بنابراین در سطوح لغزشی اکسید محافظ همانند روانکار خشک عمل می کند و سرعت سایش را کاهش می دهد. در بارهای بالا سرعت اکسیداسیون سریع افزایش می یابد و می تواند 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 می باشد. واکنش های اکسیداسیون برای این فازها و برای عناصر Ni و Al در جدول ۳ آمده است. این عناصر یا فازها می توانند 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 نمونه های SiC و TiC-NiAl در آزمون سایش در بار ۲۴ کیلوگرم به دست آمد (شکل ۵). با توجه به منحنی مشخصه سایش کاهش وزن در نمونه های SiC و TiC-NiAl کم (حدود ۲ میلی گرم در مسافت ۱۰۰۰ 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 نمونه ها 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 شده اند.

در شکل ۶ تصاویر SEM از سطح سایش، شکل ۷ تصاویر مسیر سایش، سطح پین و ذرات حاصل از سایش و در شکل ۸ آنالیز EDS برای نمونه SiC پس از آزمون پین روی دیسک ارائه شده است. همانطور که تصاویر SEM و میکروسکوپ نوری نشان می دهد چسبندگی ذرات سایش (سایش چسبان)، ایجاد ذرات سایش اکسیدی (سایش تریبوشیمی) و ایفا کردن نقش پودر ساینده توسط ذرات سایش اکسیدی را می توانیم داشته باشیم (سایش خراشان) که باعث انهدام مداوم سطح می شوند. مورفولوژی ذرات حاصل از سایش به صورت ذرات سیاه کروی (تریبوشیمی)، کلوخه ای (خراشان) و ورقه ای (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 می شود و به همین ترتیب جدا شدن و چسبیدن ذرات به سطح نمونه تکرار می شود. از این رو با توجه به نتایج فوق و

نمودار شکل ۷، در نمونه SiC در آزمون سایش، سایش های خراشان، چسبان و تریبوشیمیایی مکانیزم های غالب است [۷، ۹ و ۱۱].

شکل ۸ تصاویر SEM از سطح سایش، در شکل ۱۰ تصاویر رد سایش، سطح پین و ذرات حاصل از سایش و در شکل ۱۱ آنالیز EDS برای نمونه TiC-NiAl پس از آزمون پین روی دیسک ارائه شده است. 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 می دهد. بنابراین در سطوح لغزشی اکسید محافظ همانند روانکار خشک عمل می کند و سرعت سایش را کاهش می دهد. با توجه به نتایج بالا، توضیحات قبلی و نمودار شکل ۷، در نمونه TiC-NiAl سایش های چسبان، خراشان و تریبوشیمیایی مکانیزم های غالب است [۷، ۹ و ۱۱].

سختی نمونه ها 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 می تواند نفوذ مواد ساینده را محدود کرده و سرعت سایش را کاهش دهد. بنابراین سختی بالا در نمونه های TiC-NiAl و SiC به طور موثری باعث کاهش نرخ سایش گردیده است [۱۲].

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.

مراجع

- [۱]. R. Ried, Handbook of Ceramic Hard Materials, Vol. 2, Wiley- VCH, 2000.
- [۲]. Rolf Wa'ssche, Dieter Klaffke, "Ceramic particulate composites in the system SiC-TiC-TiB₂ sliding against SiC and Al₂O₃ under water", Tribology International 32 (1999) 197-206.
- [۳]. Nuri Durla, "Titanium Carbide Based Composites for High Temperature Applications", Journal of the European Ceramic Society 19 (1999) 1415-1419.
- [۴]. C.L. Yeh, C.Y. Chung, P.H. Lin, S.D. Wang, Effects of TiC addition on combustion synthesis of NiAl in SHS mode, Journal of Alloys and Compounds 398(2005) 85-93.
- [۵]. M. X. Gao, Y. Pan, F. J. Oliveira, J. L. Baptista, J. M. Vieira, Interpenetrating microstructure and fracture mechanism of NiAl/TiC composites by pressureless melt infiltration, Materials Letters 58(2004) 1761-1765.
- [۶]. C. Curfs, I.G. Cano, G.B.M. Vaughan, X. Turrillas, A. Kvik, M.A. Rodriguez, "TiC-NiAl composites obtained by SHS: a time-resolved XRD study", Journal of the European Ceramic Society 22 (2002) 1039-1044.
- [۷]. R. Wasche, D. Klaffke, T. Troczynski, "Tribological performance of SiC and TiB₂ against SiC and Al₂O₃ at low sliding speeds", Wear 256(2004) 695-704.
- [۸]. D. Klaffke, M. Hartelt, Tribological characterization of thin hard coating by reciprocating sliding tests, Tribol. Lett. 1 (1995) 265-276.

[۹]. صالحی، م و اشرفی زاده، ف، متالورژی سطح و تریبولوژی، انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران،

۱۳۷۴.

- [۱۰]. R. Wasche, D. Klaffke, In situ formation of tribologically effective oxide interfaces in SiC-based ceramics during dry oscillating sliding, Tribol. Lett. 5(1998) 173-190.
- [۱۱]. M. J. Neale and M. Gee, Testing for industry, Professional Engineering Publishing limited uk, PP. 7-18, 2000.
- [۱۲]. S. Hogmark, "Adhesive mechanisms in the wear of some tool steels" Wear 38, PP. 341-359, 1976.

جدول (۱) شرایط آزمون بین روی دیسک.

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

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

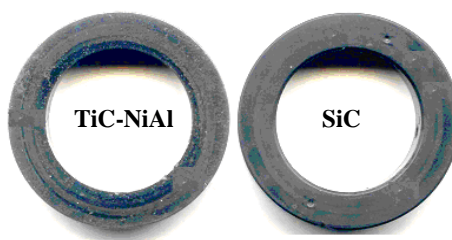
۲۸ Kg	۲۴ Kg	۲۰ Kg	ترکیبات
۰/۲۸-۰/۱۶	۰/۳۵-۰/۲	۰/۴۱-۰/۳۵	SiC
۰/۴۸-۰/۳۳	۰/۴-۰/۴۵	۰/۴۳-۰/۳۵	TiC-NiAl

جدول (۳) واکنش‌های اکسیداسیون برای فازها و عناصر در نمونه‌ها.

واکنش‌های اکسیداسیون	ΔG_{T298} (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.	

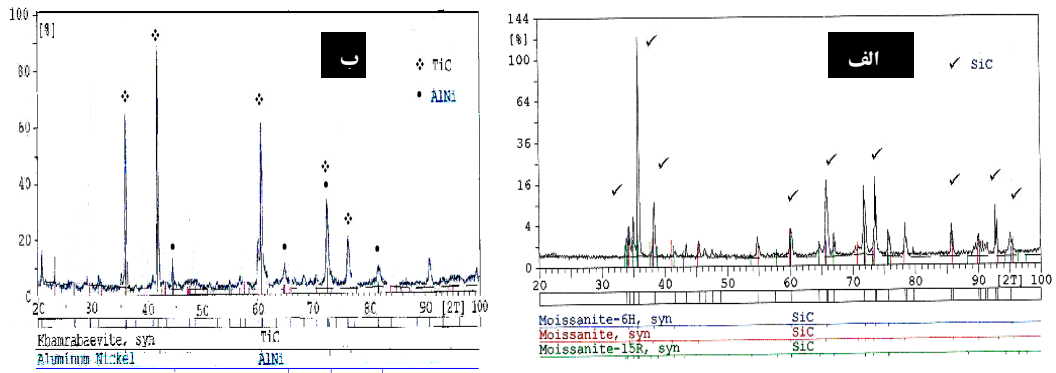
جدول (۴) نتایج سختی سنجی در نمونه‌های SiC و TiC-NiAl.

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

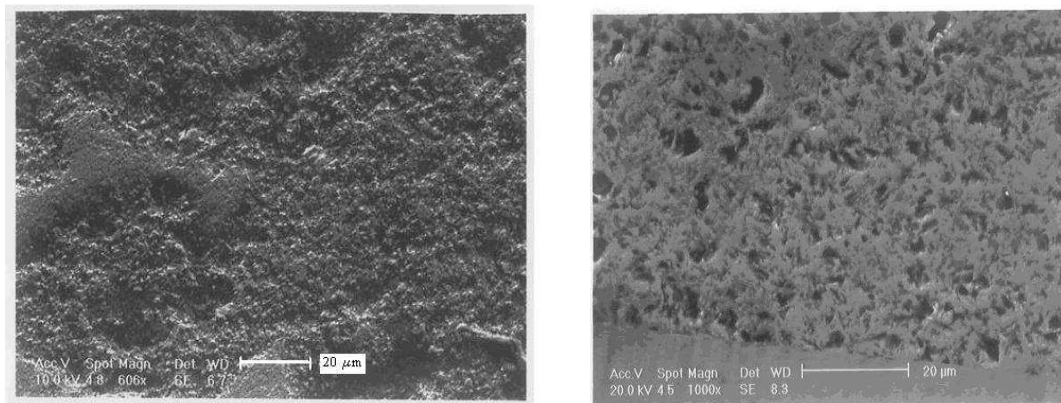


شکل (۱) الف) نمونه‌های TiC-NiAl و SiC.

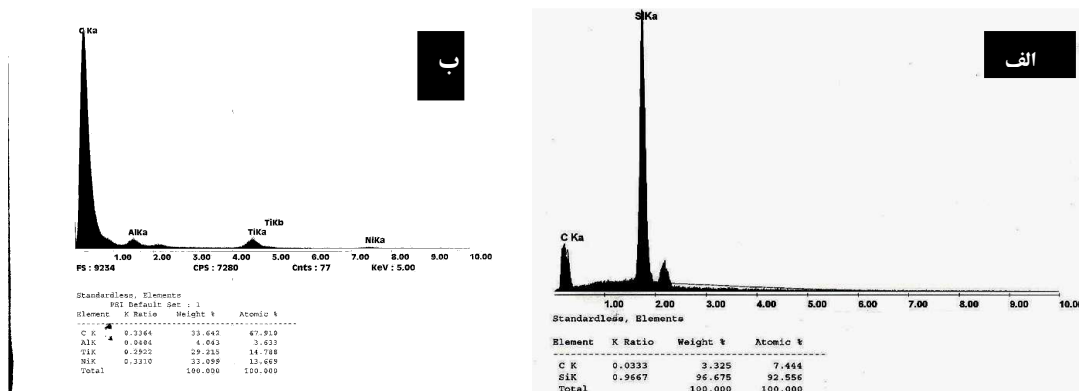
مقایسه خواص تریبولوژیکی ترکیبات ...



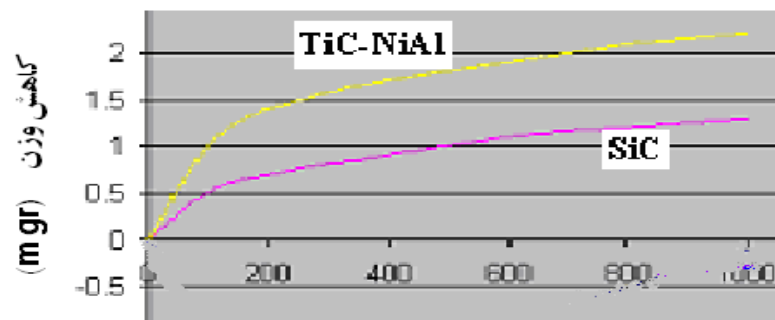
شکل (۲) آنالیز تفرق اشعه ایکس در نمونه های الف) و اشهر آب بند مکانیکی SiC، و اشهر TiC-NiAl (ب)



شکل (۳) تصاویر SEM ترکیب SiC، (ب) نمونه TiC-NiAl

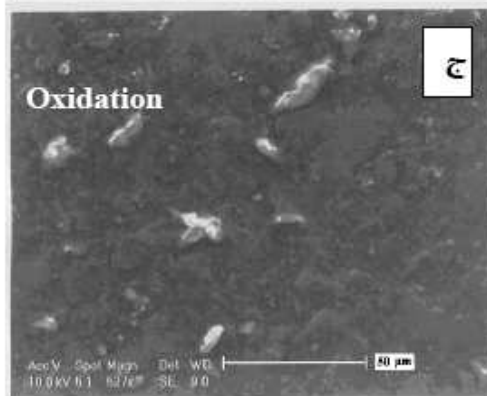
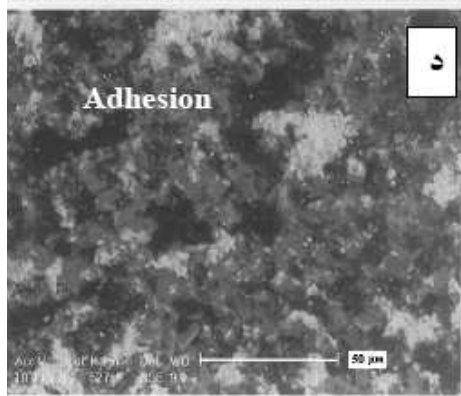
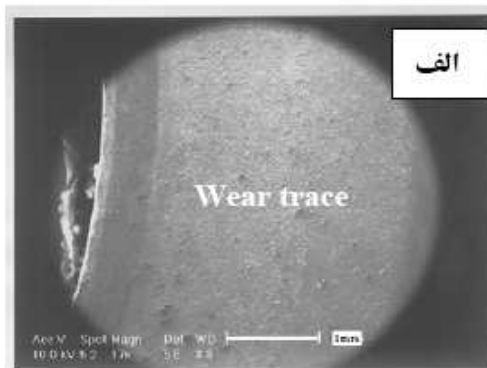
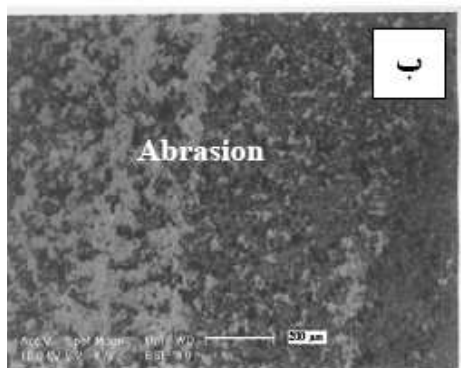


شکل (۳) آنالیز EDS در نمونه های الف) و اشهر آب بند مکانیکی SiC (ب) در نمونه و اشهر TiC-NiAl



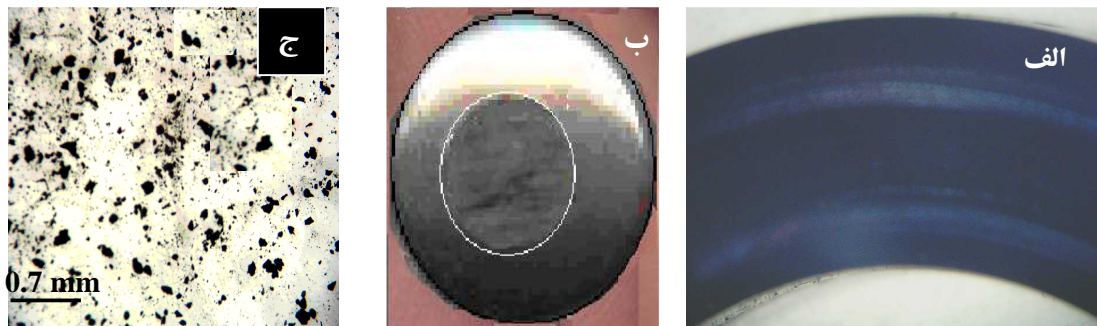
مسافت طی شده (m)

شکل (۵) مقایسه منحنی مشخصه سایش برای ترکیبات TiC-NiAl و SiC.

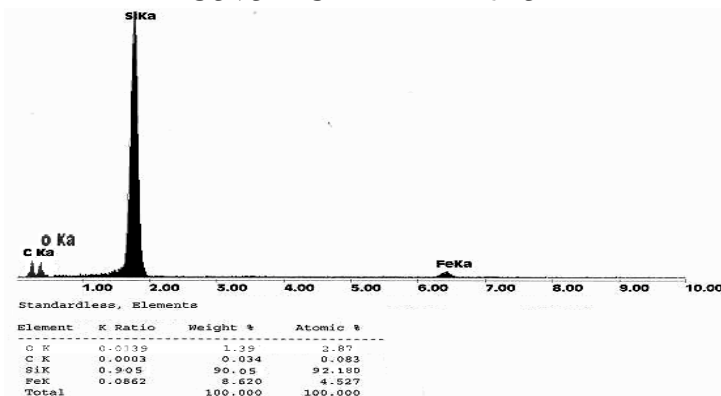


مقایسه خواص تریبولوژیکی ترکیبات ...

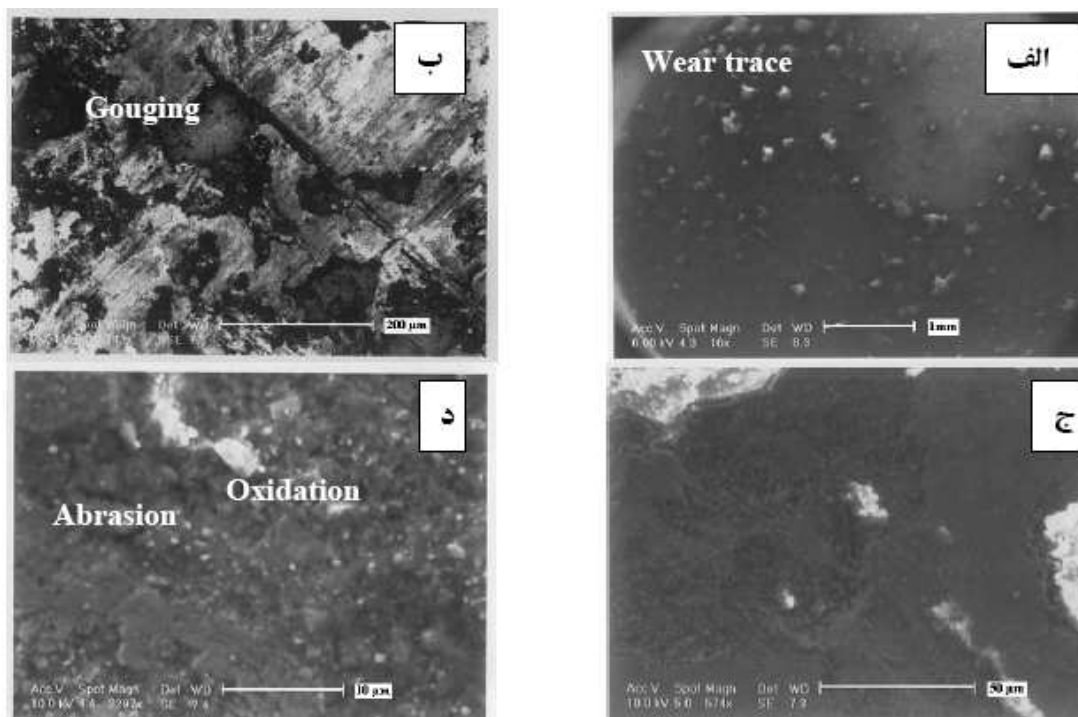
شکل (۶) تصاویر SEM سطح سایش نمونه SiC در بزرگنمایی های مختلف.



شکل (۷) (الف) $7\times$ رد سایش نمونه SiC (ب) $7\times$ سطح سایش پین ج) $14\times$ ذرات حاصل از سایش.



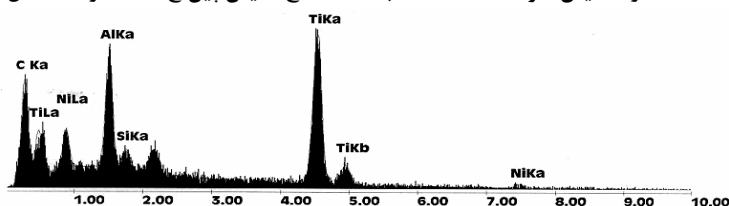
شکل (۸) آنالیز EDS سطح سایش نمونه SiC پس از آزمون پین روی دیسک.



شکل (۹) تصاویر SEM سطح نمونه TiC-NiAl در بزرگنمایی های مختلف.



شکل (۱۰) الف) $\times 7$ رد سایش نمونه TiC-NiAl (ب) $\times 7$ سطح سایش بین ج) $\times 14$ ذرات حاصل از سایش.



Standardless, Elements

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

شکل (۱۱) آنالیز EDS سطح سایش در نمونه TiC-NiAl پس از آزمون بین روی دیسک.

Comparison of Tribological properties of SiC and TiC-NiAl Compounds

M. B. Rahaei¹, S.K. Sadrnezhad², M. Rahimpour, A. Shafiye and M. Kholghi

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

¹ Phd Student, Materials and Energy Research Center, Rahaei@merc.ac.ir

² Professor, Sharif Industrial University, Sadrnezh@sharif.edu

مقایسه خواص تریبولوژیکی ترکیبات ...

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: Mechanical Seal, Combustion Synthesis, Wear, Friction, TiC-NiAl Composite, Adhesion, Abrasion, Hardness