مقایسه خواص تریبولوژیکی ترکیبات TiC-NiAl و SiC

مجتبی خلقی، محمد باقر رهائی و علی شفیعی

دانشکده مهندسی مواد – دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیدہ

در این پژوهش رفتار سایش و روانکاری کامپوزیت TiC-NiAl تولید شده به روش سنتز احتراقی و SiC تولید شده به روش سیترینگ 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 به وسیله آزمون پین روی دیسک اندازه گیری 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 نژدیک به SiC دارد. نوع سایش برای نمونه های TiC-NiAl و SiC چسبان، خراشان و تریبوشیمایی میباشد. همچنین نتایج میکرو و ماکروسختی نشان داد که IiC-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 disk 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 tribochimical. 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

است [۵]. سنتز احتراقی دما بالا نیز در سیستم چهارتایی TiC-Ni-Al به منظور به دست آوردن کامپوزیت -TiC امالا استفاده می شود. مزیت روش سنتز احتراقی ^۲ شامل ملزومات انرزی 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 واشر آب بند مکانیکی به قطر m ۳ و ضخامت m ۵/۰ تهیه شد و آزمون سایش انجام شد. زبری سطح نمونه ها در حدود ست آمد. شرایط آزمون در جدول ۱ آمده است. در شکل ۱ دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک و واشرهای 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^۳، ساختار تریبولوژیکی سطح نمونه ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی ^۴ (SEM مدل XL3) ساخت کمپانی (PHILIPS) و میکروسکوپ متالوگرافی معکوس ^۵ (مدل (Act) و میکروسکوپ متالوگرافی معکوس ^۵ (مدل (Nikon) ساخت کمپانی (Nikon) مورد مطالعه قرار گرفت و بررسی مورفولوژی ذرات سایش و رد سایش از استروسکوپ^۶ (مدل SMZ 800) ساخت کمپانی

در دو دهه اخیر استفاده از مواد سرامیکی برای کاربردهای تريبولو ژيکي افزايش يافته است . اين اساساً به علت خصوصیات خاص سرامیک ها مانند چگالی کم، مقاومت به خوردگی بالا، ا نبساط حرارتی کم و سختی بالا در محدوده وسيعي از دما است. در اين گروه كاربيد سيليسيم سختى بالا، استحكام نسبى بالا، نقطه ذوب بالا و نسبت استحکام به چگالی بالا دارد، که مقاومت بالا به سایش و خراش را نتيجه مي دهد [۱]. یکی از مهم ترین قطعاتی که در سال های گذشته تحقیقات وسيعى را به خود اختصاص داده است واشرهاي مصرفي در آب بندهای مکانیکی پمپها 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 میشود. یکی از روش های مهم تولید آن روش سینترینگ است که روشی پر هزینه و زمان بر می باشد[۲]. ترکیبات بین فلزی خصوصیاتی 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 مناسب تر 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 تلاش ها بر این است تا خواص NiAl را ب وسیله فاز تقویت کننده شامل TiC ،Al₂O₃ و TiB بهبود بخشند. كاربيد تيتانيم تكفاز ترد است ولی فلزاتی مانند Co ،Ni و Fe همانند فاز ثانويه داكتيل، تافنس شكست را بهبود مى 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

1 Sintering

² Self Propagation High Temperature Synthesis

³ Energy dispersive spectrometer

⁴ Scanning electron microscopy

⁵ Inverted Metallurgical Microscope

⁶ Stereoscopic Zoom Microscope



شكل (۱) الف) نمونه واشرهاي SiC و SiC



ب) دستگاه آزمون پین روی دیسک

جدول (۱) شرایط آزمون پین روی دیسک

سرعت خطی (m/s)	نیروی عمودی (kg)	رطوبت نسبى	محيط	قطر پېن دما	سختى پين	نوع پين
•/•A	۲۰، ۲۴ و ۲۸	7. 30	خشک	τ۳ °C →/۵ cm	۶۴RC	فولاد رول برينگ

(Nikon) استفاده شد. مطالعات فازشناسی توسط دستگاه يراش يرتو ايكس' مدل Philips Xpert-MPD، مجهز به نرمافزار فازیابی انجام شد.

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

نتايج و بحث

آنالیز تفرق اشعه ایکس نمونه های SiC و SiC-NiAl (شکل ۲)، تصاویر SEM (شکل ۳) و آنالیز EDS در شکل ۴ آمده است. نتایج در نمونه SiC، تک فاز 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 مے دھد [۷].

ترتیب در شکل های 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 سريع براي افزايش سايش (كاهش وزن) نمونه نيز صحيح است و کاربرد دارد [٧]. این تغییر سریع در بار ۲۴۰ نیوتن برای نمونهها به دست آمد. محدوده ضریب اصطکاک در بارهای مختلف در جد ول ۲ آمده است. نتایج نشان می دهد که ضریب اصطکاک در نمونه TiC-NiAl (۱/۴۱–۰/۳۵) 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 براي كار در پمپ است. هنگامی که سطح ماده به طور کامل در خلاء تمیز شده باشد و کاملاً صاف و بدون هیچ گونه پستی و بلندی در حد میکروسکوپی باشد، نیروی برشی سبب افزایش پلاستیسیته در محل اتصال شده و ضریب اصطکاک به طور ناگهانی افزایش می یابد. در واقع میزان اتصالات دو سطح افزایش یافته است. اما در حالی که سطح نمونه فلوی کاملاً

نمودار ضريب اصطكاك بر حسب مسافت طي شده (عمر

سایشی) برای ترکیبات SiC و TiC-NiAl در بارهای

۲۰، ۲۴ و ۲۸ کیلوگرم برای مسافت طی شده ۱۰۰۰ متر به

1 X Ray Diffraction

www.SID.ir

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

به طور کلی می توان گفت که نقش اصلی در کاهش سایش و اصطکاک را لایه های اکسیدی روانکار بازی می کنند. اگر بار اعمالي كم باشد و اكسيداسيون خودب خود طبيعي از فلز انجام شود، سرعت سایش 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 مى شود . سايش متوسط مشخصه مواد لغزشى 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 م توسط 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 عنا صر 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 (شکل۷). 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 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. همان طور 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 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



ب) نمونه TiC-NiAl

شکل۳- تصاویر SEM ترکیب SiC،



الف) بار ۲۰kg ب) ۲۴kg ج) ۲۸kg.



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

۲۸ kg	۲۴ kg	۲۰ kg	تركيبات
•/YA=•/18	•/40-•/4	•/41-•/40	SiC
•/4٨-•/٣٣	•/۴-•/۴۵	•/4٣-•/٣۵	TiC-NiAl

واكنشهاي اكسيداسيون	ΔG_{f298} (kJ)		
$SiC + 2O_2 \longrightarrow SiO_2 + CO_2$	-589		
$SiC + 3/2O_2 \longrightarrow SiO_2 + CO$	-614		
$TiC + 2O_2 \longrightarrow TiO_2(Rutil) + CO_2$	-551		
$TiC + 3/2O_2 \longrightarrow TiO_2(Rutil) + CO$	-564		
$2\text{TiC} + 5/2\text{O}_2 \longrightarrow \text{Ti}_2\text{O}_3 + \text{CO}$	-539		
$3\text{TiC} + 4\text{O}_2 \longrightarrow \text{Ti}_3\text{O}_5$	-547		
$4TiC + 11/2O_2 \longrightarrow Ti_4O_7 + 4CO$	-553		
$Ti + O_2 \longrightarrow TiO_2$	-860		
$Ni + 1/2 O_2 \longrightarrow NiO$	-230		
$2Al + 3/2 O_2 \longrightarrow Al_2O_3$	-1689		
مقدار انرژی آزاد مربوط به یک مول است.			

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



شکل ۸- تصاویر SEM سطح سایش نمونه SiC در بزرگنماییهای 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 می کند و سرعت سایش را کاهش می دهد . با NiAl در نمونه TiC-NiAl سایش های چسبان، خراشان و تریبوشیمیایی مکانیزم های غا لب 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 سایش می تواند نفوذ 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 [17].

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. اگر نیروهای اعمالی (بارها) زیاد باشند و اکسید محافظ قادر نباشد ب طور موثر تشکیل شود، کندگی اتفاق می افتد 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 محافظ طبیعی میتواند به طور پیوسته تغییر شکل دهد بنابراین در سطوح لغزشی اکسید محافظ همانند روانکار



شکل ۱۱- تصاویر SEM سطح نمونه TiC-NiAI در بزرگنمایی های مختلف.



شكل ١٢- الف) × ٧ رد سايش نمونه TiC-NiAl ب) × ٧ سطح سايش پين ج) × ١۴ ذرات حاصل از سايش.



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.
- Rolf Wa sche, Dieter Klaffke, Ceramic particulate composites in the system SiC-TiC-TiB₂ sliding against SiC and Al₂O₃ 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.
- 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.
- 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.
- C. Curfs, I.G. Cano,G.B.M. Vaughan,X. Turrillas, A. Kvick, and M.A. Rodr guezb, *TiC-NiAl composites obtained by SHS: a time-resolved XRD study*, Journal of the European Ceramic Society 22 (2002) pp. 1039-1044.
- R. Wasche, D.Klaffke and T. Troczynski, *Tribological performance of SiC and TiB2* against SiC and Al₂O₃ 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.

۹. صالحی، م و اشرفی زاده، ف، متالورژی سطح و

تريبولوژی، انجمن علوم و تکنولوژی سطح ايران، 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 SiC-NiAl و

ويكرز	RA	نمونه	
1490	94	SiC	
974	۵/۸۱	TiC-NiAl	

نتيجه گيري

TiC-NiAl ۱. نتایج آزمایشات نشان داد که نمونه 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 یمپ است . از این رو سختی بالای نمونهها به طور موثری باعث کاهش نرخ سایش در نمون 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 يمپ است.

پیشنهادات برای تکمیل نتایج کاربرد نمونه TiC-NiAl در پمپ به عنوان آب بند مکانیکی آزمون های دیگر مانند تست دوام (کار در یمپ) 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 آزمونها و فرایند تولید صمیمانه تشکر و قدردانی مینمایم.

www.SID.ir