

مقایسه رفتار تریبولوژیکی پوشش‌های سخت Cr-Ti-N ایجاد شده توسط

روش رسوب فیزیکی بخار با استفاده از قوس کاتدی

مهدی اکبرزاده مقدم، علی شفیعی و حمیدرضا سلیمی جزی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۹۱/۱۰/۱۰ - پذیرش مقاله: ۹۲/۰۱/۱۹)

چکیده

در این تحقیق رفتار سایشی پوشش‌های Cr-Ti-N که با کنترل جریان قوس کاتدی بر روی فولاد سرد کار ایجاد شده، مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور از آزمون سایش لغزشی گلوله بر روی دیسک با استفاده از گلوله‌ای از جنس کاربید تنگستن بر روی نمونه‌های فولادی پوشش داده شده در بارهای اعمالی ۵، ۷ و ۹ نیوتن در مسافت ۵۰۰ متر در دمای محیط انجام گرفت. شناسایی فازهای موجود در پوشش توسط روش پراش اشعه ایکس (XRD) و بررسی خواص مکانیکی توسط آزمون نانو هاردنس صورت پذیرفت. همچنین از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز تفکیک انرژی (EDX) جهت مطالعه سطوح سایش استفاده شد. نتایج حاصل نشان دهنده مقاومت سایشی بهتر پوشش‌های (Ti, Cr)N و TiN نسبت به پوشش CrN می باشد. مقاومت سایشی پوشش‌های Cr-Ti-N وابسته به میزان تیتانیوم بوده به طوری که با افزایش آن، مقاومت سایشی پوشش افزایش می یابد. سایش خراشان و تریوشیمی به عنوان مهم ترین مکانیزم سایش در پوشش ها شناخته شد.

واژه‌های کلیدی: رسوب فیزیکی بخار، لایه نازک، رفتار سایشی، پوشش Cr-Ti-N.

Comparison of tribological behaviors of PVD Cr-Ti-N coatings produced by cathodic arc evaporation technique

M. Akbarzadeh, A. Shafyei, H. R. Salimijazi

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology

(Received 30 December 2012, accepted 8 April 2013)

Abstract

In the current study, (Ti, Cr)N coatings were deposited on the D6 tool steel substrates. Physical and mechanical properties of coatings such as microstructure, thickness, phase composition and hardness were evaluated. The friction and wear behavior of the coatings were investigated using ball-on-disc test under normal loads of 5, 7 and 9 N at sliding distance of 500 m, at room temperature. Phase compositions were studied by X-ray diffraction method. Mechanical properties were determined by nano-indentation technique. Scanning electron microscope and energy dispersive spectroscopy were utilized to investigate the microstructures and wear mechanisms. The results clarified that the wear resistance of (Ti, Cr)N and TiN coatings were better than CrN coating. Wear resistance of the Cr-Ti-N coatings was related to Ti content and increased with increasing Ti content. The dominant wear mechanisms were characterized to be abrasive and tribochemical.

Key words: physical vapor deposition; thin films; wear behavior; Ti-Cr-N coating

E-mail of corresponding author: M.akbarzade@ma.iut.ac.ir

مقدمه

امروزه کاربرد پوشش‌های سخت پایه نیتریدی به منظور افزایش مقاومت سایشی فولادها وسعت زیادی یافته است. در دهه‌های اخیر پوشش نیترید تیتانیوم در مقایسه با دیگر نیتریدها کاربرد بیشتری در این زمینه داشته است. اما این پوشش دارای محدوده دمایی کاری پایینی بوده به طوری که اکثر نیازهای صنعتی امروزه را نمی‌تواند برآورده نماید. نیترید تیتانیوم در دمای بالاتر از 500°C اکسید شده و از آنجایی که این اکسید ناپایدار بوده، به راحتی از سطح جدا شده و بنابراین خواص مکانیکی و مقاومت سایشی آن شدیداً کاهش می‌یابد. بنابراین در طول ۳۰ سال گذشته تلاش‌های مدون زیادی برای بهبود خواص و یا جایگزینی این پوشش انجام گرفته است. یکی از بهترین پوشش‌های پیشنهادی برای جایگزینی TiN، پوشش CrN بوده است. مقاومت سایش عالی، چسبندگی خوب، تنش پسماند اندک ریز ساختار بهینه و استحکام خستگی مطلوب و محدوده دمایی کاری بالا، سبب افزایش مصرف پوشش‌های نیترید کروم در زمینه‌های مختلف نظیر پوشش‌های دایکست و اکستروژن، رینگ پیستون و ابزار برشی شده است. اما این پوشش در مقایسه با TiN دارای سختی پایین‌تری بوده که این موضوع باعث می‌شود که خواص مکانیکی و مقاومت سایشی آن پایین‌تر باشد [۱-۵].

مطابق تحقیقات انجام شده، پوشش‌های چند جزئی با نسبت متفاوتی از عناصر آلیاژی دارای طول عمر بیشتر و خواص بهتری نسبت به پوشش‌های دو جزئی می‌باشند. پوشش‌های سخت نیتریدی سه جزئی اخیراً به دلیل ایجاد خواص منحصر به فرد در اکثر کاربردهای سایشی و خوردگی مورد توجه زیاد محققین قرار گرفته‌اند. گوناگونی فازها در این سیستم‌ها سبب تولید پوشش‌هایی با خواص گوناگون شده است. امروزه تحقیقات زیادی روی توسعه ترکیبات سه جزئی نیتریدی صورت گرفته است. به طوری که امروزه استفاده از این پوشش‌ها در ابزارهای صنعتی روز به روز

افزایش می‌یابد. امروزه تحقیقات زیادی روی توسعه ترکیبات سه جزئی نیتریدی Cr-X-N صورت گرفته است. جزء سوم این ساختار می‌تواند ترکیبات [۶] Ti، [۷] C، [۸] Al و [۹] باشد. مشخص شده است که هر یک از عناصر اثرات و رفتار متفاوتی را نسبت به پوشش CrN ایجاد می‌نماید. یکی از پوشش‌هایی که مزایای هر دو پوشش TiN و CrN داشته و در عین حال فاقد محدودیت‌های هر یک می‌باشد، پوشش سه جزئی Ti-Cr-N می‌باشد. مطالعه در مورد امکان استفاده از این پوشش در صنایع نظامی، خودروسازی، ابزارهای برشی و قالب‌های ریخته‌گری و همچنین امکان جایگزینی این پوشش با دیگر پوشش‌های مرسوم، در حال انجام است. هر چند تاکنون تحقیقات زیادی درباره ترکیبات سه جزئی نیتریدی Cr-Ti-N منتشر شده اما عمده این تحقیقات بر روی رفتار مکانیکی و پایداری حرارتی و رفتار اکسایشی این پوشش، در نسبت‌های مختلفی از کروم و تیتانیوم معطوف شده و بررسی رفتار سایشی این پوشش کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۰-۱۳].

مواد و روش تحقیق

در این تحقیق پوشش‌های (Cr,Ti)N بر روی دیسک‌های فولادی به شماره استاندارد D6 از گروه فولادهای ابزار سردکار با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ اعمال گردید. اعمال پوشش توسط شرکت سوین سطح پلازما به روش تبخیر قوس کاتدی (CAE-PVD) صورت گرفت.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده.

عنصر	C	Si	Mn	Cr	W	Fe
در صد وزنی	۲/۱۳	۰/۲۵	۰/۳	۱۱/۵	۰/۷	۸۵/۱۲

با استفاده از اره نواری نمونه‌هایی به ضخامت 5 ± 1 میلی متر و قطر 50 ± 1 میلی‌متر از میلگرد فولادی برش داده

شد. سیکل عملیات حرارتی مناسب با توجه به جنس و ابعاد قطعه ، شامل آستنیت شدن فولاد در دمای 950°C به مدت یک ساعت و سپس کوئنچ در محیط روغن در دمای 30°C و سپس عملیات تنش زدایی در دمای 180°C به مدت یک ساعت اعمال گردید. برای رسیدن به شرایط سطحی مشابه نمونه‌ها تا سمباده ۴۰۰۰ پولیش شدند. سختی فولاد در این مرحله به 980Hv_{30} افزایش یافت. پوشش‌های (Ti,Gr)N توسط روش رسوب فیزیکی بخار با استفاده از قوس کاتدی و مطابق شرایط ذکر شده در جدول ۲ و با استفاده هم‌زمان از دو منبع تبخیر تیتانیوم و کروم اعمال گردید. قبل از انجام فرایند پوشش دهی و به منظور آماده سازی سطوح به مدت ۳۰ دقیقه، بمباران سطحی زیر لایه توسط یون‌های آرگون تحت ولتاژ مستقیم ۲۰۰۰ ولت درون محفظه دستگاه PVD صورت گرفت. انجام این فرایند علاوه بر حذف آلودگی‌های جزئی در سطح ، باعث می‌شود که اتم‌های سطحی از لحاظ انرژی دچار برانگیختگی شده و در سطح بالاتر از لحاظ انرژی، پیوند ضعیف‌تری با اتم‌های زیرین خود داشته باشند و آماده ایجاد پیوند یونی با اتم‌های پوشش و در نهایت چسبندگی بهتر پوشش به زیر لایه شود.

جدول ۲. مشخصات و متغیرهای فرایند PVD

شرایط پوشش دهی	اندازه
حجم محفظه (m^2)	۱
خلأ اولیه	10^{-6}
خلأ ثانویه	10^{-3}
جریان تبخیر (A)	۶۰ و ۳۰۰
فاصله منبع از فلز پایه (Cm)	۳۰
زمان رسوب (min)	۷۰
دمای رسوب دهی ($^{\circ}\text{C}$)	۴۰۰

به منظور تعیین زبری سطوح زیرلایه و پوشش‌ها از دستگاه زبری سنج مدل William Haspon استفاده شد. جهت بررسی ساختار و فازهای موجود در نمونه‌های

پوشش داده شده از پراش پرتو ایکس توسط دستگاه فیلیپس با تابش Cu ($\text{K}\alpha$) استفاده شد. اندازه گیری خواص مکانیکی توسط دستگاه نانو ایندنتور ساخت شرکت CSM موجود در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان، تعیین شد. به منظور بررسی رفتار تریبولوژیکی پوشش از آزمون متداول گلوله روی دیسک و در شرایط محیطی صورت گرفت. بدین منظور از گلوله‌هایی از جنس کاربید تنگستن به قطر ۱ سانتی‌متر و با سختی ۱۲۶۰ ویکرز و دیسک متحرک سرعت $\frac{m}{s}$ ۰/۰۸۱ استفاده شد. پس از آزمون باریزیری بار اعمالی ۵، ۷ و ۹ نیوتن در مسافت ۵۰۰ تعیین گردید. پس از انجام آزمون‌ها به منظور ارزیابی بررسی مکانیزم‌های حاکم بر سایش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) سطوح و ذرات سایش، توسط آنالیز EDS جهت تعیین ترکیب شیمیایی ذرات سایش و مسیر سایش روی سطح نمونه‌ها مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر منطقه سایش و مقایسه بهتر رفتار سایشی از دستگاه Reflection Optical Microscope ساخت شرکت BRUKER آلمان که جزء تجهیزات جانبی دستگاه نانو فرورونده می‌باشد، استفاده گردید. با استفاده از این دستگاه پروفیل عرضی از مسیر سایش تهیه گردید.

نتایج و بحث

در جدول ۳ نتایج حاصل از آنالیز تفکیک انرژی، زبری و ضخامت هر یک نمونه‌ها آورده شده است. علی رغم یکسان بودن زمان رسوب دهی، ضخامت پوشش‌های ایجاد شده متفاوت بوده به گونه‌ای که ضخامت پوشش‌های TiN از CrN بیشتر می‌باشد. به طور کلی ضخامت نهایی پوشش وابسته به نرخ تبخیر و میزان انباشت ماده هدف بر روی زیرلایه می‌باشد. با توجه به زمان رسوب دهی یکسان (یک ساعت) و بیشتر بودن دمای ذوب و تبخیر تیتانیوم نسبت به کروم، ضخامت بالاتر پوشش‌های CrN نسبت به پوشش‌های TiN قابل

توجیه است. همچنین از آنجایی که در فرایند رسوب دهی پوشش (TiCr)N از دو هدف تیتانیوم و کروم به صورت مستقل استفاده گردیده و شرایط تبخیر با پوشش‌های دیگر یکسان این پوشش‌ها نسبت به دو پوشش دیگر دارای ضخامت بالاتری است.

با توجه به مقادیر Ra اندازه گیری شده، پوشش‌دهی در تمامی شرایط اعمال شده باعث افزایش زبری سطح می‌شود. افزایش زبری سطح در اثر اعمال پوشش به واسطه عیوب و حفره‌های سطحی و میکروذراتی است که به واسطه انتخاب نوع روش پوشش دهی ایجاد شده است و از آنجایی که وجود میکرو ذرات یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در میزان زبری بوده که با افزایش مقدار آن در واحد سطح، مقدار زبری نهایی نیز بیشتر می‌شود [۱۴، ۱۵].

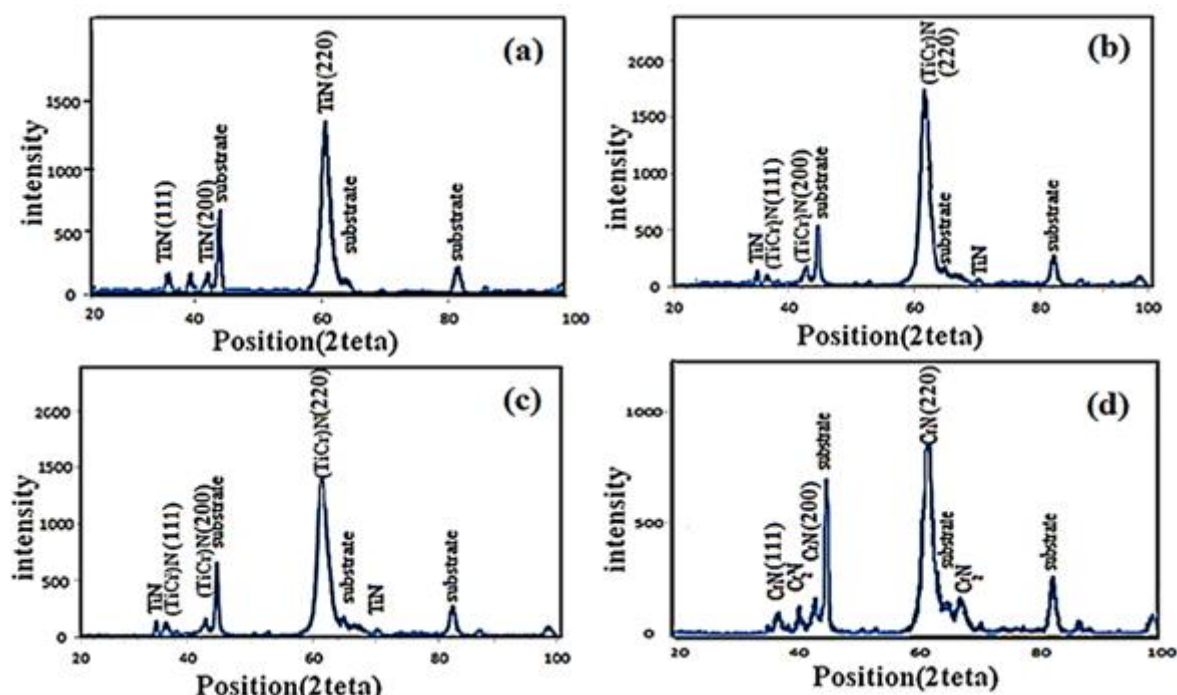
الگوی پراش اشعه ایکس هر یک از نمونه‌ها در شکل ۱ آورده شده است. به دلیل اینکه ضخامت پوشش‌ها کمتر از $5\mu\text{m}$ است، پیک‌هایی از فلز پایه نیز در الگوی پراش مشاهده می‌شود. دو پوشش TiN و CrN به دلیل نزدیکی پارامتر شبکه و یکسانی ساختار کریستالوگرافی، پراش اشعه ایکس در زوایا و صفحات یکسانی صورت می‌گیرد. با توجه به الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه CrN این پوشش از دو فاز CrN (مکعبی) و CrN_2 (هگزاگونال) تشکیل شده است.

علی رغم اینکه ترکیب TiN در یک دامنه وسیعی از فشار گاز نیتروژن پایدار است، ترکیب CrN تنها در یک دامنه محدودی از فشار نیتروژن پایدار و با تغییر جزئی فشار آن ترکیباتی با نسبت استوکیومتری مختلف ایجاد می‌شوند. با توجه به الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه‌های (TiCr)N و مقایسه آن با دیگر تحقیقات مشابه این پوشش به صورت تک فاز مکعبی و با مکانیزم انحلال انجمادی تشکیل شده است [۱۶-۱۸]. به منظور تعیین خواص مکانیکی هر یک از نمونه‌ها از آزمون نانو فرورونده که قابلیت اندازه گیری دقیق خواص مکانیکی به صورت موضعی دارد، استفاده شد. نتایج حاصل از این آزمون در جدول ۴ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سختی سه نوع پوشش اعمال شده نسبت به زیرلایه بیشتر بوده و همچنین مقادیر سختی در پوشش‌های CrN، (TiCr)N و TiN به ترتیب افزایش یافته است. همچنین با توجه به مقادیر جدول ۴ با افزایش نسبت تیتانیوم در پوشش (TiCr)N خواص مکانیکی پوشش بهبود می‌یابد.

با توجه به مکانیزم تشکیل انحلال انجمادی و قرار گرفتن اتم‌های تیتانیوم به صورت بین نشین در ساختار نیتريد کروم، میزان اعوجاج و تنش در ساختار افزایش یافته و بنابراین مکانیزم حرکت نابجایی‌ها مختل شده و سختی افزایش یافته و خواص مکانیکی بهبود می‌یابد.

جدول ۳. نتایج حاصل از آنالیز تفکیک انرژی، زبری و ضخامت هر یک نمونه‌ها

نمونه	جریان تبخیر قوس کاتد هدف تیتانیوم (A)	جریان تبخیر قوس کاتد هدف کروم (A)	ضخامت پوشش (μm)	نسبت کروم (Cr/(Cr + Ti))	نسبت تیتانیوم (Ti/(Cr + Ti))	زبری (Ra)
a	۰	۳۰۰	$2/8 \pm 0/1$	۰	۱	1 ± 13
b	۸۰	۳۰۰	$2/8 \pm 0/4$	۰/۴۵	۰/۶۵	3 ± 22
c	۳۰۰	۸۰	$4/8 \pm 0/0$	۰/۷۳	۰/۲۷	2 ± 28
d	۳۰۰	۰	$2/1 \pm 0/1$	۱	۰	3 ± 16



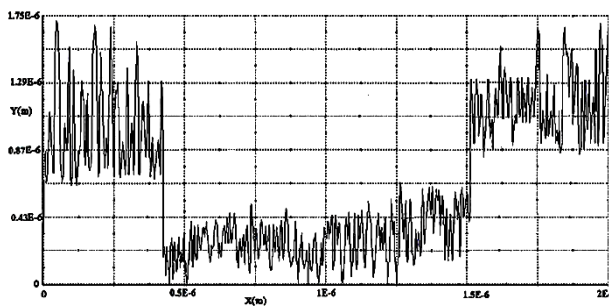
شکل ۱. الگوهای پراش اشعه ایکس هر یک از نمونه‌ها.

جدول ۴. نتایج حاصل از آزمون نانوفرورنده.

d	c	b	a	
$17/1 \pm 0/1$	$22/3 \pm 0/5$	$26/5 \pm 0/5$	$28/5 \pm 0/5$	سختی (MPa)
۲۷۳	۳۷۳	415 ± 2	360 ± 3	مدول یانگ (GPa)

افزایشی دارد. علت این امر را باید در نوع مکانیزم حاکم در رفتار سایشی سه پوشش و توانایی لایه اکسیدی در کنترل میزان سایش، با توجه به حضور مکانیزم تریبوشیمی در هر یک از پوشش‌ها، دانست. گزارش شده است که لایه اکسیدی ایجاد شده در سطح پوشش CrN چسبنده‌تر و متراکم‌تر از لایه اکسیدی پوشش TiN است، اما از آنجایی که دمای لازم برای تشکیل این لایه اکسیدی متراکم و چسبنده بر روی پوشش CrN، نسبت به لایه اکسیدی پوشش TiN بالاتر بوده و دما در اثر تماس مداوم گلوله ساینده و پوشش به اندازه‌ای کافی افزایش نمی‌یابد که این لایه اکسیدی به طور کامل و پایدار

به منظور مقایسه و بررسی مقاومت سایشی سه پوشش با یکدیگر، تغییرات وزن کاسته شده بر حسب مسافت سایشی در بار اعمالی ۷ نیوتن در شکل ۲ آورده شده است. میزان کاهش وزن پوشش CrN در طول مسیر سایش همواره بیش از دو پوشش TiCrN و TiN بوده که مؤید مقاومت سایشی ضعیف‌تر این پوشش نسبت به سایر پوشش‌ها می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که کاهش وزن پوشش TiCrN و TiN تا مسافت سایشی ۲۰۰ متر زیاد بوده و پس از آن نرخ کاهش وزن شدیداً کاهش می‌یابد و این در حالی است که شیب کاهش وزن پوشش CrN، در طی مسافت سایش همواره روندی

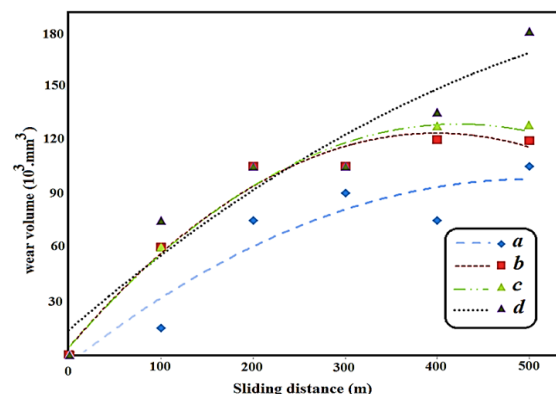


شکل ۳. تصویر پروفیل عرضی از سطح مقطع سایش پوشش (TiCr)N.

در شکل ۴ مقادیر ضریب اصطکاک نمونه فاقد پوشش و نمونه‌های پوشش داده شده به عنوان تابعی از نیروی اعمالی بعد از طی مسافت ۵۰۰ متر نشان داده شده است. به طور کلی انتظار می‌رود با افزایش بار اعمالی به علت افزایش میزان درگیری و قفل شدن ناهمگونی‌ها و افزایش میزان و حجم ذرات سایش تولید شده بین سطوح سایشی، ضریب اصطکاک افزایش یابد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ضریب اصطکاک نمونه بدون پوشش (زیرلایه) در سه بار اعمالی ۵، ۷ و ۹ نیوتن یکسان و مقدار آن از ضریب اصطکاک متوسط سه نمونه پوششی بیشتر می‌باشد. بنابراین اعمال پوشش باعث کاهش ضریب اصطکاک متوسط سطح می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار ضریب اصطکاک متوسط دو نمونه پوششی CrN و (TiCr)N با افزایش بار اعمالی، افزایش یافته در حالی که در نمونه پوششی TiN با افزایش بار اعمالی از ۷ تا ۹ نیوتن ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. دلیل این رفتار متفاوت اصطکاکی را باید در متفاوت بودن مکانیزم حاکم بر سایش این پوشش‌ها دانست. در نمونه TiN با افزایش بار اعمالی از ۷ تا ۹ نیوتن به علت افزایش میزان درگیری سطوح ساییده شده، دما در نقطه تماس گلوله با سطح افزایش می‌یابد و این موضوع باعث تشکیل لایه اکسیدی پایدار بر روی سطح شده که با توجه به اثر روانکاری این لایه میزان ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. اما در نمونه پوششی CrN و (TiCr)N علی‌رغم چسبندگی و پایداری و تراکم بالای لایه اکسیدی تشکیل

تشکیل شود و مقاومت آن در برابر سایش افزایش یابد، بنابراین تا پایان مسیر سایش میزان کاهش وزن با شیبی زیاد و نسبتاً ثابت ادامه می‌یابد [۱۹].

همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر و مقایسه بهتر میزان سایش نمونه‌ها، در بار اعمالی ۷ نیوتن و پس از طی مسافت سایشی ۵۰۰ متر، از تصاویر پروفایل عرضی حاصل از میکروسکوپ نوری استفاده شده است. نمونه‌ای از این تصاویر در شکل ۳ و نتایج حاصل از این آزمون در جدول ۵ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر این جدول و نمودار شکل ۲ هم‌خوانی داشته که موید نتایج ذکر شده می‌باشد. همچنین با توجه به پروفیل منطقه عرضی از آنجایی که انتقال از پوشش به منطقه سایش دارای شیب تندی است بنابراین شکست پوشش در منطقه انتقالی اتفاق افتاده است [۱۹].

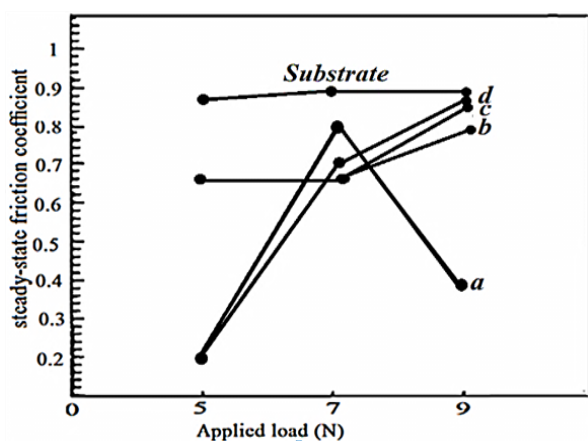


شکل ۲. تغییرات کاهش وزن نمونه‌ها بر حسب مسافت سایشی در بار اعمالی ۷ نیوتن.

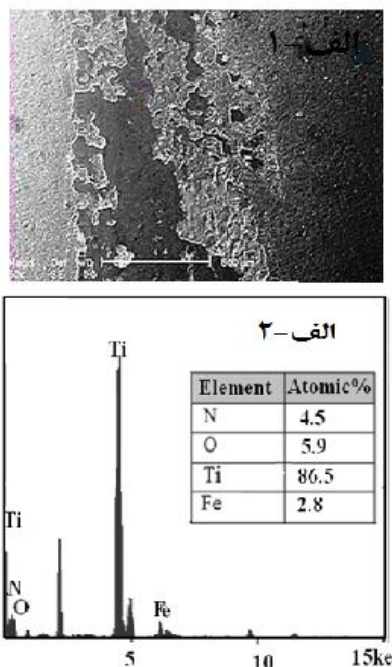
جدول ۵. نتایج حاصل از اندازه‌گیری عرض و عمق منطقه سایش و حجم منطقه ساییده شده.

نمونه	عمق مسیر سایش (μm)	عرض مسیر سایش (mm)	حجم سایشی (mm ³)
a	۰/۷۸	۱/۹۰	۰/۰۸۰
b	۱/۰۵	۱/۱۰	۰/۱۰۹
c	۱/۰۰	۱/۲۷	۰/۱۲۰
d	۲/۲۲	۰/۸۹	۰/۱۸۶

اکسیداسیون در طی سایش به طور فعالی ظاهر شود معمولاً چسبندگی و انتقال خام از یک سطح به سطح دیگر کمتر مشاهده می‌گردد [۱۹]. با توجه به حضور فعال مکانیزم اکسیداسیون، احتمال رخداد سایش چسبان ضعیف می‌باشد.



شکل ۴. مقادیر ضریب اصطکاک میانگین بر حسب بار اعمالی برای نمونه بدون پوشش و نمونه‌های پوششی.

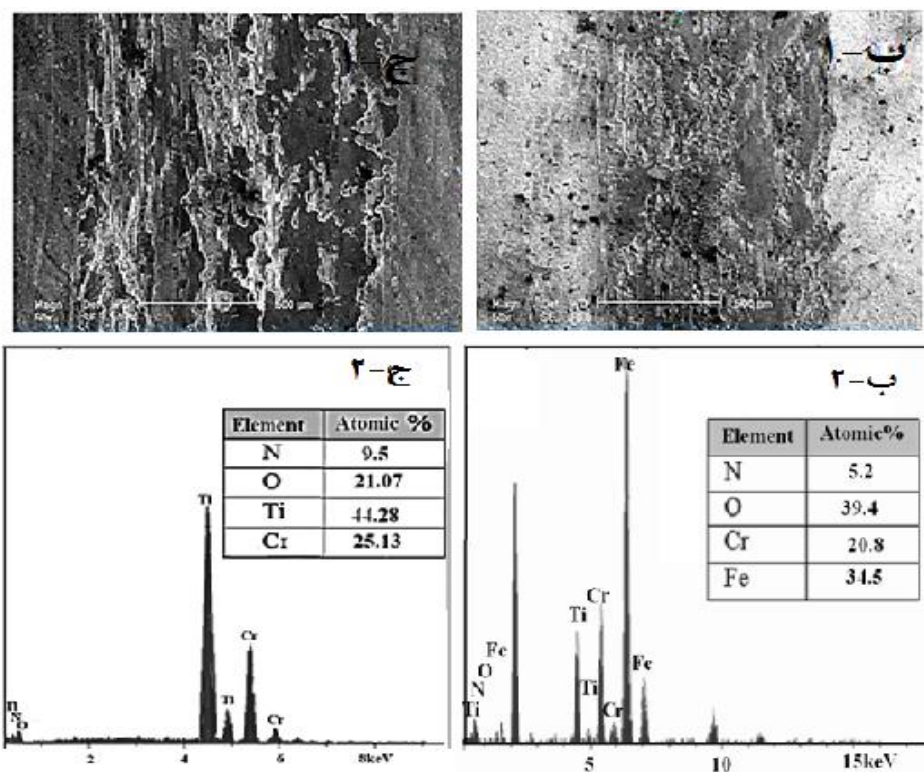


شکل ۵. تصاویر SEM و آنالیز EDS از سطوح سایش پوشش CrN: الف، (Ti,Cr)N: ب، و TiN: ج

شده، این لایه به طور کامل ایجاد نمی‌شود. با توجه به اینکه برای تشکیل لایه اکسیدی در دو پوشش CrN و (TiCr)N به دمای بالاتری (۵۰۰°C و ۶۰۰°C) نسبت به لایه اکسیدی در پوشش TiN (۳۰۰°C) نیاز بوده و از آنجایی که دما در محل تماس به اندازه کافی افزایش نمی‌یابد که لایه پایدار و چسبنده و یکنواخت اکسیدی تشکیل شود، بنابراین با افزایش بار و افزایش خیش خوردن سطح، این لایه به راحتی حذف شده و در نتیجه با افزایش

شکل ۵ تصاویر SEM و آنالیز EDS از سطوح سایش هر یک از نمونه‌ها در نیروی اعمالی ۷ نیوتن پس از طی مسافت ۵۰۰ متر را نشان می‌دهد. آثار خراشیدگی سطح و ایجاد خش، بر روی سطح تمامی پوشش‌ها ب قابل مشاهده است. حضور آثار کندگی و خراشیدگی در سطوح سایش پوشش‌های TiN، (TiCr)N و CrN رخداد مکانیزم سایش خراشان را تأیید می‌نماید. پیشرفت سایش با مکانیزم خراشان، منجر به کندگی پوشش از سطح و نمایان شدن زیرلایه می‌شود. آنالیز EDS حضور عنصر اکسیژن در سطوح سایش سه نوع پوشش و ذرات سایشی را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه آنالیز EDS نوعی آنالیز عنصری است نمی‌توان درباره فاز و ترکیب مورد نظر به صراحت صحبت نمود. هر چند که حضور اکسیژن نشان از تشکیل فاز اکسیدی و مؤید بر مکانیزم اکسایشی حاکم بر رفتار سایشی پوشش و تشکیل لایه سطحی محافظ تریبوشیمی می‌باشد. با شروع حرکت گلوله و آغاز سایش، اصطکاک به طور تدریجی به علت افزایش یافتن میزان درگیری و چسبندگی بین گلوله و پوشش افزایش یافته بنابراین دما در نقاط تماس به صورت جهنده‌ای افزایش می‌یابد و زمینه را برای تغییر فرم راحت‌تر ناهمگونی‌ها و همچنین افزایش چسبندگی‌ها فراهم می‌نماید.

لازم به ذکر است که اکسایش مهم‌ترین دلیل برای افزایش دمای منطقه سایش می‌باشد اعتقاد بر این است که چنانچه



ادامه شکل ۵.

نتیجه گیری

- (۴) مقاومت سایشی پوشش‌های (TiCr)N با افزایش نسبت تیتانیوم افزایش می‌یابد.
- (۵) سایش خراشان و تریوشیمی به عنوان مهم‌ترین مکانیزم سایش غالب در سه پوشش (TiCr)N در نسبت‌های مختلف فلزی می‌باشد.

(۱) توسط روش رسوب فیزیکی بخار با استفاده از قوس کاتدی و استفاده هم‌زمان از دو منبع تبخیر تیتانیوم و کروم و با کنترل جریان قوس، پوشش‌های سه جزئی Cr-Ti-N با نسبت‌های مختلف فلزی ایجاد شد.

(۲) خواص مکانیکی از جمله سختی پوشش‌های (TiCr)N با افزایش نسبت تیتانیوم افزایش می‌یابد.

(۳) اعمال پوشش سخت نیتریدی توسط روش تبخیری قوس کاتدی بر روی فولاد باعث افزایش زبری، کاهش ضریب اصطکاک سطح شده، به طوری که مقدار آن در سه پوشش TiN، (TiCr)N و CrN به ترتیب افزایش می‌یابد.

منابع

1. A. Azushima, Y. Tanno, H. Iwata, K. Aoki, "Coefficients of friction of TiN coatings with preferred grain orientations under dry condition", Wear, 265(2008)1017-1022.
2. M. Hua, H.Y. Ma, J. Li, C.K. Mok, "Tribological behaviours of patterned PVD TiN spot coatings on M2 steel coated with different bias voltages", Surface and Coatings Technology, 200(2006)3612-3625.

3. E. Soroka, B. Lyashenko, S. Qiao, C. Zhang, "Tribological Behaviour and Cutting Performance of PVD-TiN Coating/Substrate System with Discontinuous Surface Architecture, Rare Metal" Materials and Engineering, 40(2011)580-584.
4. C. Liu, A. Leyland, Q. Bi, A. Matthews, "Corrosion resistance of multi-layered plasma-assisted physical vapour deposition TiN and CrN coatings", Surface and Coatings Technology, 141(2001)164-173.
5. Navinšek, P. Panjan, A. Cvelbar, "Characterization of low temperature CrN and TiN (PVD) hard coatings", Surface and Coatings Technology, 74-75, Part 1(1995)155-161.
6. D.H. Jung, H.S. Park, H.D. Na, J.W. Lim, J.J. Lee, J.H. Joo, "Mechanical properties of (Ti,Cr)N coatings deposited by inductively coupled plasma assisted direct current magnetron sputtering", Surface and Coatings Technology, 169-170(2003)424-427.
7. G. Zhang, L. Wang, S.C. Wang, P. Yan, Q. Xue, "Structure and mechanical properties of reactive sputtering CrSiN films", Applied Surface Science, 255(2009)4425-4429.
8. B. Warcholinski, A. Gilewicz, Z. Kuklinski, P. Myslinski, "Arc-evaporated CrN, CrN and CrCN coatings", Vacuum, 83(2008)715-718.
9. M. Uchida, N. Nihira, A. Mitsuo, K. Toyoda, K. Kubota, T. Aizawa, "Friction and wear properties of CrAlN and CrVN films deposited by cathodic arc ion plating method", Surface and Coatings Technology, 177-178(2004)627-630.
10. J.G. Han, H.S. Myung, H.M. Lee, L.R. Shaginyan, "Microstructure and mechanical properties of Ti-Ag-N and Ti-Cr-N superhard nanostructured" coatings, Surface and Coatings Technology, 174-175(2003)738-743.
11. D.H. Jung, H.S. Park, H.D. Na, J.W. Lim, J.J. Lee, J.H. Joo, "Mechanical properties of (Ti,Cr)N coatings deposited by inductively coupled plasma assisted direct current magnetron sputtering", Surface and Coatings Technology, 169-170 (2003) 424-427.
12. V.V. Uglov, V.M. Anishchik, S.V. Zlotski, G. Abadias, S.N. Dub, "Stress and mechanical properties of Ti-Cr-N gradient coatings deposited by vacuum arc", Surface and Coatings Technology, 200(2005)178-181.
13. D.E. Wolfe, B.M. Gabriel, M.W. Reedy, "Nanolayer (Ti,Cr)N coatings for hard particle erosion resistance", Surface and Coatings Technology, 205(2011)4569-4576.
14. R.L. Boxman, D.M. Sanders, P.J. Martin, "Handbook of vacuum arc science and technology fundamentals and applications", Noyes Publications, Park Ridge, N.J., U.S.A., 1995.
15. M. Ali, E. Hamzah, I.A. Qazi, M.R.M. Toff, "Effect of cathodic arc PVD parameters on roughness of TiN coating on steel substrate", Current Applied Physics, 10(2010)471-474.
16. J. Vetter, H.J. Scholl, O. Knotek, "(TiCr)N coatings deposited by cathodic vacuum arc evaporation", Surface and Coatings Technology, 74-75(1995)286-291.
17. K.H. Lee, C.H. Park, Y.S. Yoon, J.J. Lee, "Structure and properties of (Ti_{1-x}Cr_x)N coatings produced by the ion-plating method", Thin Solid Films, 385(2001)167-173.
18. P. Hones, R. Sanjinés, F. Lévy, "Sputter deposited chromium nitride based ternary compounds for hard coatings", Thin Solid Films, 332(1998)240-246.
19. w.y. k, R.F. Bunshah, E. Sedakova, L.A. Dobrzański, W.H. Zachariasen, J. Fontaine, W.H. Zachariasen, "Micro structural and properties of TiAlN coating on high speed steel", Surface and Coatings Technology, 3(1995)71-77.