



مقایسه رفتار مکانیکی پوشش‌های نازک تک لایه، چند جزئی و چند لایه سرامیکی از روش ترسیب شیمیایی از فاز بخار به کمک پلازما

محبوبه آزادی^۱، علیرضا صبور روح اقدم، شاهرخ آهنگرانی

^۱. دانشگاه سمnan، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی (استادیار)

^۲. دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مواد (دانشیار)

^۳. سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، پژوهشکده مواد پیشرفته و انرژی‌های نو (استادیار)

چکیده

در این مقاله پوشش تک لایه، چند لایه و چند جزئی از نیتريد تیتانیم و کاربید تیتانیم از روش ایجاد ترسیب شیمیایی از فاز بخار به کمک پلازما (PACVD) ایجاد شده است. بررسی و مقایسه رفتار مکانیکی این پوشش‌ها با ضخامت ۲-۳ میکرومتر بر روی فولاد H13 انجام شده است. بدین منظور بعد از ایجاد پوشش، آنالیز پراش اشعه ایکس زاویه مایل برای بررسی ترکیب شیمیایی، با استفاده از دستگاه سختی سنجی نوپ بررسی تغییرات میکروسختی، با به کارگیری دستگاه پین روی دیسک، تعیین خواص سایشی سطح پوشش انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد بهترین خواص مکانیکی از لحاظ افزایش سختی و مقاومت به سایش مربوط به پوشش ده لایه نیتريد تیتانیم/کاربید تیتانیم می‌باشد. همچنین حداقل ضریب اصطکاک برای پوشش کاربید تیتانیم تک لایه حدود ۰/۱ گزارش شد.

واژه‌های کلیدی: سایش؛ سختی؛ پوشش نازک؛ پوشش سرامیکی؛ ترسیب شیمیایی از فاز بخار.

^۱. M.azadi@semnan.ac.ir

مقدمه

پوشش‌های نیتريد تیتانيم، نيتروکاربيد تیتانيم و کاربيد تیتانيم به دليل داشتن خواصي مطلوب مانند سختي و مدول الاستيک بالا، مقاومت بالا در برابر سايش و ضريب اصطکاک کمتر نسبت به مواد فلزي بدون پوشش، امروزه کاربرد گسترده‌اي را در صنعت در زمينه ساخت قطعات متفاوت چون ابزارهاي برش به عنوان پوشش‌هاي نازک سخت به خود اختصاص داده‌اند [۱-۳]. از آنجا که پوشش‌هاي سخت همانند کاربيد تیتانيم به علت تردي نسبتاً بالا معمولاً برای استفاده در قالب‌هاي شکل‌دهي، آهن‌گري، سنبه و ماتريس (شرایط بارگذاري ديناميک يا ضربه-اي) مناسب نمی‌باشد، لذا در تحقيقات اخير، از سنتز پوشش‌هاي چند لايه برای رفع اين مشکل استفاده شده است [۴-۵]، زیرا که هر لايه از پوشش‌هاي چند لايه، دارای خواص مخصوص به خود است که استفاده همزمان از اين لايه‌ها، سبب بهبود کارکرد قطعات می‌شود. عمده‌ترين روش‌هاي ايجاد اين نوع پوشش‌ها، روش ترسيب از فاز بخار فزيکی و شيميایي می‌باشد. کم بودن نرخ رسوب‌دهي، نیاز به خلأ بسيار بالا، کاهش استحکام چسبندگی پوشش به زیر لايه و قدرت پرتاب نسبتاً کم به منظور پوشش‌دهي قطعات با هندسه پیچيده از محدوديت‌هاي روش ترسيب از فاز بخار فزيکی محسوب می‌شود [۶]. در روش ترسيب از فاز بخار شيميایي گرمایی، دمای زياد فرايند (بالتر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) نیز، سبب کاهش کیفیت پوشش و تغيير خواص زیر لايه می‌شود. اما روش ترسيب از فاز بخار شيميایي به کمک پلاسما، تکنیک مناسبی برای ايجاد پوشش با کم کردن چند محدوديت ذکر شده، می‌باشد [۷-۸]. تحقيقات بسياری [۵-۴ و ۱۰] در مورد ايجاد پوشش تک لايه به اين روش شده است وليکن در اين مقاله برای اولين بار یک پوشش ده لايه با ترکيب شيميایي مورد نظر از اين روش ايجاد شد و سپس، آناليز پوشش با استفاده از آزمون‌هاي مختلف، میکروسختي، ميزان سايش، ضريب اصطکاک سطح پوشش انجام شد و رفتارهاي متفاوت پوشش چندلایه، چند جزئی و تک لايه مورد مقايسه قرار گرفت.

مواد و روش تحقيق

پارامترهاي پوشش‌دهي همانند چرخه کاری، ولتاژ و محدوده تقريبي دمای فرايند برای ايجاد پوشش‌ها با توجه به مقالات [۱۱-۱۲ و ۳] انتخاب شده است. از جريان مستقيم پالسي برای ايجاد پلاسما در دستگاہ پوشش‌دهي استفاده شد. برای تمامی پوشش‌ها چرخه کاری ۳۳ درصد و ولتاژ ۶۰۰ ولت است. ميزان شار گازهاي هيدروژن و آرگون نیز برای تمامی نمونه‌ها به ترتيب ۱۶۰۰ و ۵۰۰ ميلي‌ليتر بر دقيقه است. برای پوشش نيتريد تیتانيم تک لايه، فشار محفظه ۲-۴ ميلي بار و زمان پوشش‌دهي ۱۲۰ دقيقه به منظور ايجاد یک لايه $2/5 \pm 0/5$ میکرومتری بود. همچنين ميزان فشار اوليه دستگاہ حدود ۰/۱ ميلي‌بار (۰/۰۷ تور) است. جزئیات دقيق‌تر در مورد نحوه پوشش‌دهي بر روی فولاد ابزار H13 در مقالات ديگر آمده است [۱۳]. برای بررسی نوع فاز و ترکيب ايجاد شده پوشش‌ها، از آزمون پراش پرتو ایکس استفاده شد. در اين تکنیک زاويه ورودی کم (۰/۳ تا ۳ درجه) انتخاب شد تا ميزان نفوذ پرتو ایکس به مقدار مينيمم خود (۳۰ تا ۳۰۰ نانومتر) رسیده و آناليز در سطح نیز با خطای

کمتری همراه باشد [۱۴]. پس در این آزمون نیز، به دلیل ضخامت نازک پوشش‌ها ($2/5 \pm 0/5$ میکرومتر) از تکنیک پراش با زاویه مایل استفاده شد. مشخصات دستگاه استفاده شده و پارامترهای مربوطه در این آزمون عبارتند از: دستگاه با مدل فلیپس (PHILIPS- X Pert- PW- 1730)، ولتاژ ۴۰ کیلو ولت، آمپراژ ۳۰ میلی آمپر، کاتد مسی ($Cu\ \alpha$)، طول موج ۱/۵۴۰۵۶ انگسترم، گام زاویه‌ای ۰/۰۸ و زاویه برخورد ۲ درجه. به منظور ارزیابی بهتر میکروسختی پوشش از آزمون میکروسختی نوپ با نیروی ۵۰ گرم با میانگین داده ۵ نقطه استفاده شد.

سایش نمونه‌ها توسط دستگاه پین بر روی دیسک، مطابق استاندارد ASTM G99-90 با نیروی ۱۰ نیوتن با سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه، در مسافت ۱۰۰۰ متر انجام شد. پین مورد استفاده در این آزمون، از جنس کبالت-کاربید تنگستن با سختی حدود ۲۸۰۰-۲۵۰۰ ویکرز و قطر ۶ میلی‌متر با هندسه تقریباً نیمه‌کروی بود. به منظور تعیین میزان نرخ سایش، میزان تغییر وزن نمونه‌ها در پنج بازه زمانی در مسافت‌های ۲۰۰ متری با ترازو (با دقت ۵۰۰ میکروگرم) اندازه‌گیری شد. در آزمون سایش نیروی اعمالی برای تمامی نمونه‌ها یکسان است. میزان رطوبت هوا ۳۰ درصد و میزان دمای هوا ۲۲ درجه سانتی‌گراد بود. برای بررسی مکانیزم سایش از میکروسکپ نوری و الکترونی روبشی استفاده شد.

نتایج و بحث

در این مقاله به صورت مجزا به ارائه نتایج و بحث پیرامون هر آزمون پرداخته می‌شود.

الف- آزمون پراش اشعه ایکس

با توجه به نتیجه آزمون پراش پرتو ایکس به منظور تعیین ترکیب شیمیایی (شکل ۱) می‌توان گفت، جهات کریستالوگرافی در این پوشش‌ها، صفحات (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰)، (۳۱۱) و (۲۲۲) بوده که رشد ترجیحی در پوشش‌های تک لایه و چند لایه در صفحه (۲۰۰) است. هر چند صفحه دیگر (۱۱۱) نیز از لحاظ ترمودینامیکی پایدار بوده و در گزارش دیگر محققین این صفحه به عنوان صفحه‌ای برای رشد ترجیحی ذکر شده است [۱۵]. در حالت استاندارد پوشش نیتريد تیتانیم در زوایای ۳۶/۸۱، ۴۲/۶۱، ۶۱/۹۸، ۷۴/۲۰ و ۷۸/۰۸ و پوشش کاربرد تیتانیم، باید از خود در زوایای ۳۶/۹۰، ۴۲/۶۰، ۶۲/۰۰، ۷۴/۴۸ و ۷۸/۱۸ درجه از خود پیک‌های مربوط به این فاز را نشان دهد. ضخامت پوشش‌های ده لایه چون کم است، پوشش چندجزئی و چندلایه دارای مدل پراش تقریباً یکسان است.

ب- آزمون میکروسختی

نتایج این آزمون، در جدول شماره ۱ ارائه شده است. بیشترین سختی مربوط به پوشش ده لایه و حداقل آن مربوط به پوشش نیتريد تیتانیم تک لایه است. پوشش ده لایه دارای تغییر درصد سختی حدود ۱۰ و ۵۰ نسبت به پوشش تک‌لایه کاربرد تیتانیم و نیتريد تیتانیم است. دلیل افزایش سختی پوشش‌های چند لایه، افزایش نیروی لازم

برای حرکت نابه‌جائی‌ها با توجه به ازدیاد فصل مشترک‌ها، یکنواختی سطح و افزایش تنش پسماند فشاری [۱۶] می‌باشد. در مقاله‌ای ذکر شده است که افزایش تغییرات میزان سختی با توجه به افزایش تنش پسماند حدود ۰/۱ می‌باشد [۱۷]. همچنین وجود ساختارهای مشابه مکعبی مرکز وجوه پر، در هر دو لایه نیتريد تیتانیم و کاربید تیتانیم موجب افزایش سختی در پوشش‌های چند لایه می‌شود، زیرا که در این حالت کمترین حفره‌ها و ترک‌ها در فصل مشترک میان لایه‌ها ایجاد می‌گردند [۱۸].

ج- آزمون سایش

خواص ذاتی مواد چون سختی، استحکام، انعطاف‌پذیری و سختی (کار) پذیری بر روی میزان مقاومت مواد در برابر سایش تأثیرگذار هستند. علاوه بر این، عوامل بسیاری مانند میزان صافی سطوح، نوع محیط (روغن)، نیروی اعمالی، سرعت اعمال نیرو، خوردگی، زبری ساینده، میزان ذرات آلودگی و دما وجود دارند که به عنوان پارامترهای خارجی بر روی میزان سایش تأثیرگذار می‌باشند. لذا در این آزمون تمامی عواملی خارجی برای تمامی نمونه‌ها ثابت است، تا خواص ذاتی مواد به عنوان پارامتر تغییردهنده نتایج آزمون مطرح شوند. نتایج آزمون سایش در جدول ۱ ارائه شده است. حداقل میزان سایش در شرایط یکسان برای پوشش ده لایه و حداکثر آن مربوط به پوشش تک لایه نیتريد تیتانیم است.

در این مقاله نیز با توجه به هندسه جسم ساینده و تصاویر محل‌های سایش، نوع سایش تمامی پوشش‌ها تلفیقی از مکانیزم خراشان و چسبان به همراه سایش خستگی سطحی بر اثر اعمال نیروی متناوب در زمان، تشخیص داده شد. ولیکن از لحاظ تماس و نوع تخریب ایجاد شده بر روی سطح، محل‌های سایش به صورت‌های متفاوت چون بریدگی و ایجاد شیار، له‌شدگی و ایجاد حفره و ... خود را نشان می‌دهد. با توجه به عکس‌های میکروسکپ نوری ارائه شده از مسیر سایش (شکل ۲-الف)، به نظر می‌رسد مکانیزم سایش در پوشش نیتريد تیتانیم به صورت چسبان باشد که فشردگی لایه‌ها در هم، در کناره‌های مسیر سایش مؤید این مطلب است. در این صورت ماده توسط جسم ساینده کنار زده می‌شود به طوری که میزان کاهش وزن ماده در این نوع سایش بسیار کم می‌باشد. اما در صورتی که لبه‌های ایجاد شده توسط عمل مکرر سایش از بین رود (سایش خستگی)، گزارش میزان کاهش وزن ماده می‌تواند قابل ملاحظه باشد. لذا در این حالت، پهنای مسیر سایش در مقایسه با سایر نمونه‌ها بیشتر (حدود ۱۲۰۰ میکرومتر) می‌باشد. مرز بین مناطق مورد سایش و مناطق دیگر با خطوط منحنی از هم جدا شده است که این مشاهده می‌تواند به علت کاهش میزان سختی پوشش در مقایسه با سایر پوشش‌ها مانند کاربید تیتانیم باشد. در منطقه سایش، کل مسیر سایش به صورت یکنواخت تحت تأثیر قرار گرفته است و میزان حفره‌ها کمترین مقدار خود را دارد. برخی از ترک‌های سطحی در مسیر سایش مشاهده می‌شود، این نوع ترک‌ها گاهی به کاهش یا عدم وجود تنش پسماند فشاری در سطح نسبت داده می‌شود [۱۹]. در برخی از مقاله‌ها اینگونه گزارش است که در هنگام سایش، در سرعت‌های بالا (۱/۵ متر بر ثانیه) و با حضور درصد رطوبت بالا (۸۰ درصد)، در هنگام سایش، یک لایه اکسید تیتانیم ایجاد شده که همین عامل سبب کاهش یا

افزایش ناگهانی میزان ضریب اصطکاک می‌شود [۲۰]. در این تحقیق که سرعت سایش به صورت متوسط انتخاب شده است و درصد رطوبت هوا بالا نیست، حضور چنین مکانیزمی (ترموشیمیایی) بعید به نظر می‌رسد. لذا نوع مکانیزم‌های ایجاد شده در این شرایط صرفاً به عوامل مکانیکی وابسته است و عوامل شیمیایی و تغییر فازهای جدید در این پوشش‌ها دخیل نمی‌باشد. آزمون عنصری طیف‌سنجی پرتو ایکس (شکل شماره ۳) از محل سایش این ادعا را ثابت می‌کند.

در پوشش کاربید تیتانیم با سختی بیشتر نسبت به پوشش نیتريد تیتانیم، پهنای قسمت مورد سایش، حدود ۸۰۰ میکرومتر شده و اما میزان حفرات ریز در طول مسیر سایش افزایش یافته و مکانیزم سایش را متفاوت از نمونه تک لایه نیتريد تیتانیم کرده است. طبق شکل ۲-ب می‌توان گفت، مرز بین مناطق مورد سایش و مناطق دیگر با خطوط کاملاً شکسته از هم جدا شده است و نوع مکانیزم سایش به صورت بریدگی پوشش از روی سطح (لایه‌برداری) می‌باشد. میزان فشردگی لایه‌ها در مرز سایش، کمترین مقدار خود را نشان داده که همین عامل نشان از شکست ترد و با کمترین مقدار تغییر شکل پلاستیک این پوشش می‌باشد. خطوط سایش در کل مسیر سایش به صورت موازی می‌باشد و اندازه حفرات دایره‌ای ایجاد شده کوچک (متوسط حدود ۱-۲ میکرومتر) و تعدادشان نیز محدود است. مسیر سایش در این پوشش نسبت به سایر پوشش‌ها صاف‌تر است که این مسئله کمترین ضریب اصطکاک برای کاربید تیتانیم تک لایه را نیز توجیه می‌کند که این نتیجه با گزارش دیگر محققین [۲۱] هماهنگی دارد.

پهنای مسیر سایش برای پوشش ده لایه نیز حدود ۴۰۰ میکرومتر می‌باشد. به نظر می‌رسد، قسمتی‌هایی از منطقه مورد سایش تحت تخریب کمتری نسبت به باقی مناطق قرار گرفته‌اند. با افزایش تعداد لایه‌های پوشش می‌توان گفت افزایش چقرمگی پوشش در مسیر سایش (شکل ۲-ج) مشاهده می‌شود، زیرا که وجود ترک‌های سطحی و حفره‌ها به حداقل مقدار خویش رسیده است. مکانیزم پوشش‌های چند لایه ترکیبی از مکانیزم ایجاد خراشیدگی و بریدگی می‌باشد. لذا کاهش پهنای مسیر سایش و کاهش عمق صدمات همانند ایجاد حفره با افزایش تعداد لایه‌های پوشش و سختی پوشش، نیز با نتایج دیگر محققین [۲۲] هماهنگی دارد.

مسیر سایش برای پوشش چند جزئی نیترو کاربید تیتانیم نسبت به پوشش تک لایه نیتريد تیتانیم افزایش می‌یابد (شکل ۲-د) ولیکن به دلیل شیارهای کمتر دارای میزان مقاومت به سایش بیشتری نسبت به آن است.

برای بررسی بیشتر مکانیزم سایش از عکس میکروسکوپ الکترونی مسیر سایش (شکل ۴) نیز استفاده شد. در پوشش تک لایه کاربید تیتانیم بریدگی در سطح مشاهده شده و در پوشش‌های چند لایه نوع اثرات سایش به فشردگی، له‌شدگی و جدایش لایه‌ها تبدیل شده است. عمق بریدگی‌ها در این پوشش‌ها کم است که همین عامل سبب شده که افزایش میزان مقاومت به سایش با افزایش تعداد لایه‌ها، به صورت چشمگیری خود را نشان دهد.

میزان ضریب اصطکاک برای پوشش نیتريد تیتانيم به صورت میانگين بين ۰/۴-۰/۵ است که حداکثر ضریب اصطکاک را در میان ديگر پوشش ها به خود اختصاص داده است. همچنین در تحقیقی نشان داده شده است که میزان ضریب اصطکاک برای پوشش نیتريد تیتانيم تقريباً مستقل از میزان نیروی اعمالی (۱۰-۲ نیوتن) می باشد [۲۳]. در صورتی که پوشش نیتريد تیتانيم از روش های ترسیب از فاز بخار فیزیکی تهیه شده باشد، نمودار ضریب اصطکاک باز هم روند افزایشی داشته و میزان ضریب اصطکاک حتی به ۱ هم می رسد [۲۴]. لذا می توان گفت پوشش های ایجاد شده با استفاده از روش های شیمیایی، دارای ضریب اصطکاک کمتری نسبت به پوشش های ترسیب شده از روش های فیزیکی هستند. ضریب اصطکاک پوشش ده لایه نسبت به پوشش تک لایه نیتريد تیتانيم حدود دو برابر کمتر است. افزایش سختی و تغییر نوع مکانيزم سایش دليل این کاهش است.

نتیجه گیری

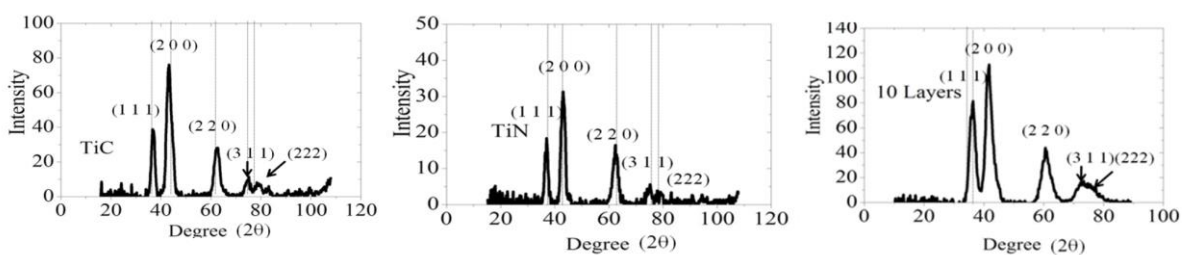
- (۱) پوشش نیتروکاربید تیتانيم نسبت به پوشش نیتريد تیتانيم دارای ضریب اصطکاک و میزان سایش کمتری است.
- (۲) بهترین خواص مکانیکی از لحاظ سختی و مقاومت به سایش مربوط به پوشش ده لایه نیتريد تیتانيم / کاربید تیتانيم است.
- (۳) برای اینکه حداقل ضریب اصطکاک (۰/۱) حاصل شود باید از پوشش تک لایه کاربید تیتانيم استفاده شود.
- (۴) با تغییر ترکیب شیمیایی پوشش نوع مکانيزم سایش می تواند تغییر پیدا کند و عوارش سایش با چندلایه شدن به جای ایجاد حفره به سمت له شدگی لایه ها پیش رود.

مراجع

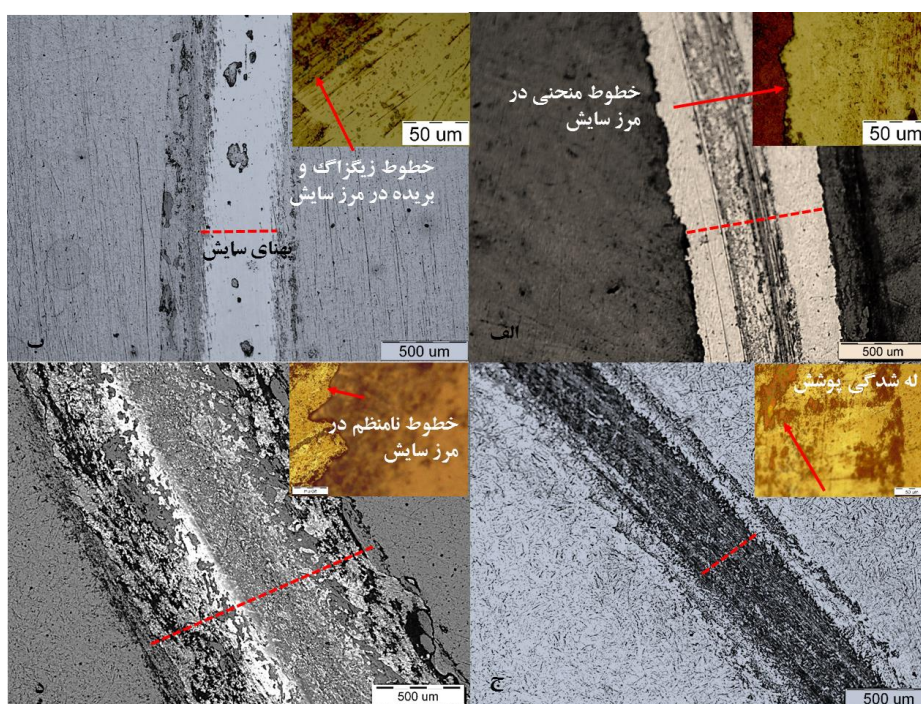
- [1] J. P.Mariano, K.H. Lau, A. Sanjurjo, J. Caro, J.M. Prado, C. Colominas, Multilayer coatings by CVD in a fluidized bed reactor at atmospheric pressure (AP/FBR-CVD): TiN/TaN and TiN/W, Surface and Coatings Technology 201 (2006) 2174-2180.
- [2] S. Shimada, T. Furuta, J. Tsujino, I. Yamazaki, Thermal plasma CVD of PSZ and double layered TiN/PSZ coatings by injection of alkoxides solutions with H₂O, Surface and Coatings Technology 202 (2008) 4644-4652.
- [3] M. Azadi, A. Sabour Rouhaghdam, S. Ahangarani, H. Hedaiat Mofidi, "Effect of number of layers on the toughness of TiN/TiC multilayer coatings" International Journal of Microstructure and Materials Properties 9 (2014) 500-515.
- [4] C. Taschner, B. Ljungberg, V. Hoffmann, C. Vogt, A. Leonhardt, Deposition of TiN, TiC and TiAlN coatings by pulsed d.c plasma enhanced CVD methods, Surface and Coatings Technology 142-144 (2001) 823-828. [46] N. J. Akchek, The plasma assisted chemical vapor deposition of TiC, TiN and TiCN, Thin Solid films 80 (1981) 221-225.
- [5] A. Devia, V. Benavides, E. Restrepo, D.F. Arias, R. Ospina, Influence substrate temperature on structural properties of TiN/TiC bilayers produced by pulsed arc techniques, Vacuum 81 (2006) 378-384.
- [6] J. Ding, Y. Meng, S. Wen, Mechanical properties and fracture toughness of multilayer hard coatings using nanoindentation, Thin Solid Films 371 (2000) 178-182.

- [7] H. Jiménez, D.M. Devia, V. Benavides, A. Devia, Y.C. Arango, P.J. Arango, J.M. Velez, Thermal protection of H13 steel by growth of (TiAl)N films by PAPVD pulsed arc technique, *Materials characterization* 59 (2008) 1070-1077.
- [8] S. Shimada, M. Takahashi, J. Tsujino, I. Yamazaki, K. Tsuda, Deposition and wear resistance of Ti-B-N-C coatings on WC-Co cutting tools from alkoxide solutions by thermal plasma CVD, *Surface and Coatings Technology* 201 (2007) 7194-7200.
- [9] J. P. Davim, F. Mata, CVD diamond coated tools performance in machining of PEEK composites, *Materials and Design* 29 (2008) 1568-1574.
- [10] T.H. Fang, S.R. Jian, D.S. Chuu, Nanomechanical properties of TiC, TiN and TiCN thin films using scanning probe microscopy and nanoindentation, *Applied Surface Science* 228 (2004) 365-372.
- [11] T.H. Fang, S.R. Jian, D.S. Chuu, Nanomechanical properties of TiC, TiN and TiCN thin films using scanning probe microscopy and nanoindentation, *Applied Surface Science* 228 (2004) 365-372.
- [12] J.Y Yun, S.W Rhee, Effect of H, and N in the remote plasma enhanced metal organic CVD of TiN from tetrakis-diethyl-amido-titanium, *Thin Solid Films* 312 (1998) 24-26.
- [13] M. Azadi, A. S.Rouhaghdam, S. Ahangarani, H. H.Mofidi, M. Valiei, Mechanical behavior and properties of TiN/TiC coating using PACVD, *Advanced Material Research* 829 (2014) 476-481
- [14] H. Liepack, K. Bartsch, B. Arnold, H.D. Bauer, X. Liu, M. Knupfer, A. Leonhardt, Characteristics of excess carbon in PACVD TiC-amorphous carbon layers, *Diamond and Related Materials* 13 (2004) 106-110.
- [15] B. Dua, S. R.Paital, N. B.Dahotre, Synthesis of TiB₂-TiC/Fe nano-composite coating by laser surface engineering, *Optics and Laser Technology* 45 (2013) 647-653.
- [16] L. Karlsson, L. Hultman, J.E. Sundgren, Influence of residual stresses on the mechanical properties of TiC_xN_{1-x} (x=0, 0.15, 0.45) thin films deposited by arc Evaporation, *Thin Solid Films* 371 (2000) 167-177.
- [17] H. Gettel, R. Wiedemann, Residual stresses in PVD hard coatings, *Surface and Coatings Technology* 76-77 (1995) 265-273.
- [18] S. P.Pemmasani, K. V. Rajulapati, M. Ramakrishna, K.Valleti, R. C. Gundakaram, S.V. Joshi, Characterization of multilayer nitride coatings by electron microscopy and modulus mapping, *Materials characterization* 81 (2013) 7- 18.
- [19] S. Lo Caste, E. Lo Valvo, V. F. Ruisi, Wear mechanism of ceramic tools, *Wear* 160 (1993) 227-235.
- [20] J. F. Lin, J. H.Horng, Analysis of the tribological behaviour and wear mechanisms titanium nitride coating, *Wear* 171 (1994) 59-69.
- [21] J. Lin, J. J. Moore, M. Pinkas, D. Zhong, W. D. Sproul, TiBCN:CN_x multilayer coatings deposited by pulsed closed field unbalanced magnetron sputtering, *Surface and Coatings Technology* 206 (2011) 617-622.
- [22] S.H. Huang , S.F. Chen , Y.C. Kuo , C.J. Wang , J.W. Lee, Y.C. Chan , H.W. Chen , J.G. Duh, T.E. Hsieh, Mechanical and tribological properties evaluation of cathodic arc deposited CrN/ZrN multilayer coatings, *Surface and Coatings Technology* 206 (2011) 1744-1752.
- [23] U. Sen, Friction and wear properties of thermo-reactive diffusion coatings against titanium nitride coated steels, *Materials and Design* 26 (2005) 167-174.
- [24] E. Vancoille, J. P. Celis, J. R. Roos, Tribological and structural characterization of a physical vapor deposited TiC/Ti(C,N)/TiN multilayer 26 (1993) 115-119.

میکروسختی (گیگاپاسکال)	ضریب اصطکاک	میزان سایش (mm ³ /N.m)* 10 ⁻⁷	جنس پوشش
۲۰/۰ ± ۱/۰	۰/۴۰ - ۰/۵۰	۶/۶۷	نیتريد تیتانيم
۲۷/۰ ± ۱/۰	۰/۱۰ - ۰/۱۵	۳/۲۵	کاربيد تیتانيم
۲۹/۰ ± ۱/۰	۰/۱۰ - ۰/۲۰	۰/۰۵	پوشش ده لایه
۲۴/۰ ± ۱/۰	۰/۳۵ - ۰/۴۰	۳/۱۰	نیتروکاربيد تیتانيم

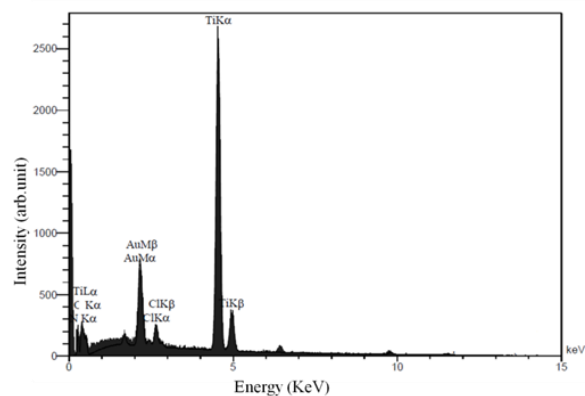


شکل ۱: نتایج آزمون پراش پرتو ایکس برای نمونه‌های مختلف

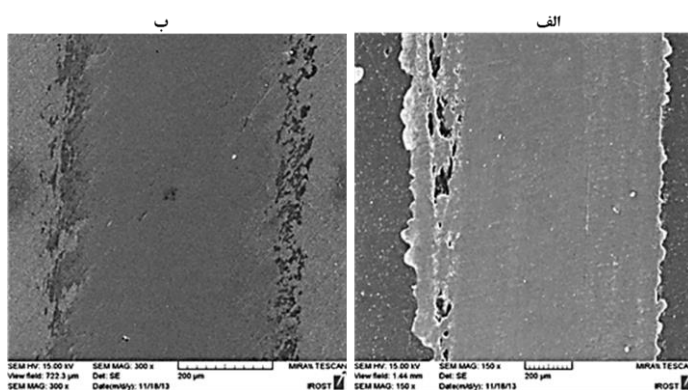


شکل ۲: تصویر میکروسکوپی نوری از محل سایش نمونه‌ها الف- نیتريد تیتانيم، ب- کاربيد تیتانيم، ج- پوشش ده لایه و د- نیتروکاربيد تیتانيم

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح



شکل ۳: نتیجه آزمون آنالیز عنصری در مسیر سایش پوشش



شکل ۴: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از محل سایش نمونه‌ها الف- کاربید تیتانیم و ب- پوشش ده لایه.