

# بررسی و مطالعه سختی و رفتار سایشی سه پوشش TiN، TiCN و TiN- TiCN-TiN اعمال شده بر روی فولاد ابزار D<sub>2</sub> به روش تبخیر پرتو الکترونی EB-PVD

حسین شفیعی\*<sup>۱</sup>، حسن شفیعی<sup>۱</sup>، علی شفیعی<sup>۲</sup>

۱- مربی، عضو هیئت علمی، دانشکده مهندسی مواد، موسسه آموزشی عالی غیر انتفاعی صنعتی فولاد، فولاد شهر، اصفهان،

ایران

۲- دانشیار، عضو هیئت علمی، دانشکده مهندسی مواد، موسسه آموزشی عالی غیر انتفاعی صنعتی فولاد، فولاد شهر، اصفهان،

ایران

shafyei577@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۷/۱۰، تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۰۴)

## چکیده

در میان پوشش های سخت، پوشش نیتريد تیتانیوم (TiN) و کربونیتريد تیتانیوم (TiCN) به علت برخورداری از سختی بالا، مقاومت به خوردگی خوب و ضریب اصطکاک کم توانسته‌اند تا بیش از ده برابر باعث افزایش طول عمر یک ابزار گردند. اعمال این دو پوشش بر روی زیر لایه های مختلف می تواند توسط فرآیند های مختلفی صورت گیرد. انتخاب نوع فرایند پوشش دهی می تواند تا حد زیادی بر ساختار، خواص مکانیکی و رفتار تریبولوژیکی این پوشش ها تأثیر گذار باشند. بر اساس مطالعات و بررسی های انجام شده تا کنون کار چندانی بر روی مقایسه این دو پوشش هنگامی که به روش EB-PVD (Electron Beam Gun PVD) انجام شده باشد، صورت پذیرفته است. در این پژوهش پس از اعمال سیکل عملیات حرارتی متداول سخت کردن شامل آستنیتنه کردن، کوئنچ و تمپر، ابتدا پوشش های تک لایه TiN و TiCN و چندلایه TiN-TiCN-TiN به روش EB-PVD بر روی فولاد ابزار D<sub>2</sub> اعمال شد. سپس با استفاده از میکروسکوپ های الکترونی رومیزی SEM، نیروی اتمی AFM، دستگاه نانوآیندنتور، دستگاه پراش پرتو ایکس و همچنین انجام آزمون گلوله بر روی دیسک، سختی و رفتار تریبولوژیکی دو پوشش TiN و TiCN چه به صورت تک لایه و یا چندلایه مورد مطالعه قرار گرفت. تجزیه و تحلیل الگوهای پراش پرتو ایکس در پوشش های ایجاد شده و استفاده از رابطه شر گویای این مطلب است که پوشش های ایجاد شده با ضخامتی ۲ تا ۳ میکرون دارای ساختاری نانو با اندازه دانه در حدود ۵ تا ۶ میکرون می باشند. میزان زبری سطح پوشش های ایجاد شده برای پوشش های TiN و TiCN و چندلایه TiN-TiCN-TiN به ترتیب برابر با ۱۲ و ۲۲ و ۲۹ نانومتر بدست آمد. نتایج آزمون های نانو سختی سنجی و همچنین سایش نشان می دهند که بالاترین سختی و مقاومت سایشی مربوط به پوشش TiCN و کمترین متعلق به پوشش TiN است در حالی که پوشش چندلایه در بین این دو قرار دارد.

## کلمات کلیدی:

پوشش های سخت، TiN، TiCN، پوشش های EB-PVD

## ۱- مقدمه

سایش یکی از مهم ترین عوامل استهلاک قطعات مهندسی است و سالانه خسارات زیادی را به اقتصاد وارد می کند. ولی با اعمال

است که TiCN یک محلول جامدی از TiN و TiC می باشد که دارای مجموعه ای از مزایا و خواص هر دو پوشش می باشد. بخصوص در کاربردهای تریبولوژیکی TiCN رفتار سایشی بهتری دارد. زیرا وجود کربن در ساختار TiCN علاوه بر بالا بردن سختی پوشش، به عنوان یک روانکار عمل نموده و باعث کاهش ضریب اصطکاک پوشش می گردد. لازم به ذکر است که خواص این دو پوشش بستگی به ترکیب شیمیایی دقیقی از نظر مقدار کربن و نیتروژن در پوشش ( $Ti_xC_yN_z$  و  $Ti_xN_y$ )، دارد [۵].

پژوهش های انجام شده توسط محققین گویای این مطلب است که یکی از پارامترهایی که می تواند تا حد زیادی به بر ساختار و خواص مکانیکی این دو پوشش، از جمله رفتار تریبولوژیکی آن ها، تأثیر گذار باشد انتخاب نوع فرایند پوشش دهی است. به همین دلیل می توان گفت رفتار تریبولوژیکی پوشش های اعمال شده به روش EB-PVD با سایر روش های پوشش دهی متفاوت است. اگرچه در مورد این دو پوشش، به خصوص هنگامی که توسط سایر روش های پوشش دهی ایجاد شده باشد، چه به صورت تک لایه و چه به صورت چندلایه، تحقیقات گسترده ای صورت گرفته است.

## ۲- مواد و روش انجام آزمایش

فولاد انتخاب شده به عنوان زیرلایه، یکی از معروف ترین فولاد های ابزار پر کربن و پر کرم می باشد که در سیستم طبقه بندی AISI به نام فولاد ابزار سرد کار  $D_2$  و در استاندارد آلمان با کد ۱/۲۳۷۹ نام گذاری شده است. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد ابزار  $D_2$  (بر حسب درصد وزنی)

عنصر	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Fe
درصد وزنی	۱/۵۵	۰/۲۵	۰/۳۰	۱۱/۴۵	۰/۷۵	۰/۹۸	پایه

پوشش های سخت و نازک بر روی این قطعات می توان باعث افزایش عمر و میزان کارآیی آن ها گردید. پوشش های سخت دارای گسترده گی وسیعی می باشند که با استفاده از روش های مختلفی همچون پاشش حرارتی، رسوب شیمیایی بخار و یا رسوب فیزیکی بخار بر روی سطح قطعات اعمال می گردند. در میان این پوشش های سخت، پوشش نیتريد تیتانیوم (TiN) و کربونیتريد تیتانیوم (TiCN) به علت برخورداری از سختی بالا، مقاومت به خوردگی خوب، ضریب اصطکاک کم و کاهش چسبندگی پوشش به ماده ساینده اند جایگاه ویژه ای را به خود اختصاص دهند. این پوشش ها در مواردی حتی توانسته اند بیش از ده برابر باعث افزایش طول عمر یک ابزار گردند [۱-۲].

یکی از مهم ترین فرایندهایی که بطور وسیع برای رسوب پوشش های TiN و TiCN مورد استفاده قرار می گیرد، فرایند رسوب فیزیکی بخار (PVD) است [۲-۳-۴]. این فرایند پوشش دهی یکی از فرایندهای مدرن به حساب می آید که امروزه به نحو چشم گیری توسعه یافته است و قادر به رسوب دادن انواع پوشش های فلزی، آلیاژی و سرامیکی بر روی قطعات مختلف صنعتی می باشد. این دو پوشش علاوه بر کاربردهای صنعتی، در کاربردهای دکوراسیون و تزئینی، در صنایع مختلف مهندسی، شیمیایی، الکتریکی-اپتیکی و حتی هسته ای نیز توجه ویژه ای را به خود جلب نموده اند.

در ابتدا پوشش های TiC، TiN و یا TiCN به صورت تک لایه مورد استفاده قرار می گرفتند. اما با توسعه روش های PVD به پوشش های چندلایه و بعضاً مرکب از عناصر متعدد، گسترش یافتند. مورفولوژی، ساختار و ترکیب شیمیایی این دو پوشش به وسیله محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. معلوم شده

روی این فولاد انجام پذیرفت. در عملیات حرارتی آنیل، فولاد

قبل از عملیات حرارتی سخت کردن، عملیات حرارتی آنیل بر

شد. به کمک نتایج این آزمون، فازهای موجود در پوشش و همچنین اندازه دانه در پوشش های ایجاد شده محاسبه گردید. از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) برای بررسی کیفیت سطحی نمونه ها و همچنین ارزیابی برجسته نگاری استفاده شد. با استفاده از این دستگاه می توان تصاویر دو بعدی و سه بعدی از سطوح پوشش و منطقه سایش تهیه نمود. علاوه بر این از میکروسکوپ الکترونی SEM مدل SEM Philips M130 جهت مطالعه سطح و اندازه گیری ضخامت پوشش های ایجاد شده استفاده شد.

به منظور اندازه گیری میزان سختی پوشش های ایجاد شده بر روی زیرلایه و همچنین تعیین میزان زبری سطوح پوشش، از دستگاه نانوایندتور (Nanoindentation Tester) ساخت شرکت CSM استفاده شد. برای تعیین سختی محدوده بار اعمالی توسط دستگاه ۰/۱-۵۰۰ میلی نیوتن و دقت اندازه گیری عمق ۰/۰۴ نانومتر می باشد. دستگاه مجهز به یک فرورونده از جنس الماس مدل B-J87، ساخت شرکت Berkovich، می باشد که توسط یک نیروی فزاینده که به صورت عمودی اعمال می شود و از یک نیروی بسیار کم شروع و به یک مقدار ماکزیمم خاتمه می یابد، استفاده می شود.

نمونه های آزمون سایش به شکل دیسک هایی با قطر ۵ cm و ضخامت ۰/۵ cm تهیه شد. آزمون سایش با استفاده از دستگاه سایش و به روش گلوله بر روی دیسک با گلوله ای از جنس کاربید تنگستن و در دو نیروی ۵ و ۸ نیوتن و در سرعت ۰/۱۵ متر بر ثانیه و مطابق با استاندارد ASTM-G99 انجام شد [۱۰-۱۱].

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ضخامت پوشش

در شکل ۱ سطح مقطع سه پوشش TiN و TiCN و TiN-TiCN در بزرگ نمای ۴۰۰۰ برابر که توسط میکروسکوپ الکترونی SEM گرفته شده، نشان داده شده است. این سه پوشش بر روی زیرلایه هایی با زبری ۵۰ نانومتر و دمای پیش گرم ۲۵۰ درجه سانتی گراد و به مدت زمان پوشش دهی ۴۰ دقیقه اعمال

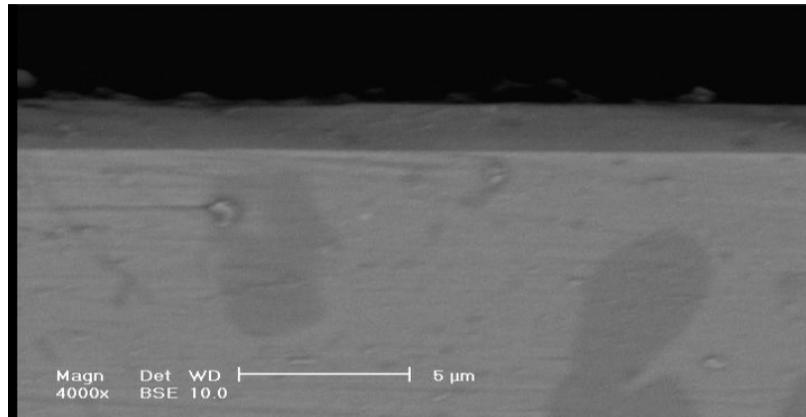
به مدت ۲ ساعت در دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد حرارت داده شد و سپس تا دمای ۷۷۰ درجه سانتی گراد سرد شد. در ادامه به مدت ۴ ساعت در این دما نگهداری شده و سپس با خروج از کوره تا دمای محیط سرد شد. دلیل انجام این سیکل آتیل طولانی وجود کاربیدهای درشت اولیه  $M_7C_3$  می باشند، که به علت بالا بودن درصد عناصر آلیاژی در این فولاد، در هنگام انجام در ساختار این آلیاژ تشکیل می شوند. بعد از عملیات آتیل، نمونه ها به مدت یک ساعت در دمای ۱۰۲۰ درجه سانتی گراد آستنیته شده و سپس در روغن سرد شدند. عملیات تمپر (بازپخت) این فولاد به وسیله نگهداری به مدت یک ساعت در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد انجام پذیرفت.

بعد از انجام فرایند عملیات حرارتی سطح کلیه نمونه ها کاملاً صیقلی و پولیش شدند. سپس جهت زدودن کلیه ذرات پولیش احتمالی چسبیده به سطح، کلیه نمونه ها توسط الکل و در دستگاه آلتراسونیک شست و شو گردیدند. در ادامه و قبل از فرایند پوشش دهی، سختی اولیه نمونه ها، همچنین میزان زبری سطوح آنها اندازه گیری شد.

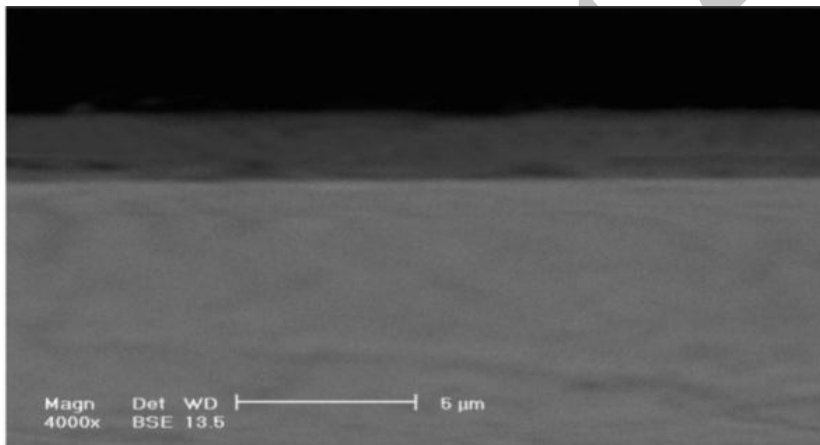
عملیات پوشش دهی با استفاده از سیستم (EB-PVD) مدل TiNA 900-2 ساخت کشور آلمان صورت گرفت. در فرآیند EB-PVD به علت بهره مندی از تکنولوژی بالا و ذوب و تبخیر ماده پوشش توسط بیم الکترونی، این امکان وجود دارد که با تغییر متغیرهای دستگاه به ترکیب های شیمیایی و ساختارهای خاص دست یافت [۶-۷]. در ابتدای پوشش دهی به منظور بهبود چسبندگی پوشش های سرامیکی TiN و TiCN به زیرلایه فولادی، پوشش بسیار نازکی به عنوان یک لایه میانی از جنس تیتانیوم خالص بر سطح نمونه ها ایجاد گردید. تحقیقات انجام شده در این زمینه نشان می دهد وجود یک لایه میانی همچون تیتانیوم علاوه بر بهبود چسبندگی پوشش به زیرلایه، می تواند بر خواص مکانیکی پوشش نیز تاثیر گذار باشد [۸-۹].

جهت تشخیص فازهای موجود در پوشش ایجاد شده از دستگاه اشعه ایکس مدل Philips Xpert-MPD تحت ولتاژ ۴۰ کیلوولت و جریان ۳۰ میلی آمپر و زمان توقف یک ثانیه استفاده

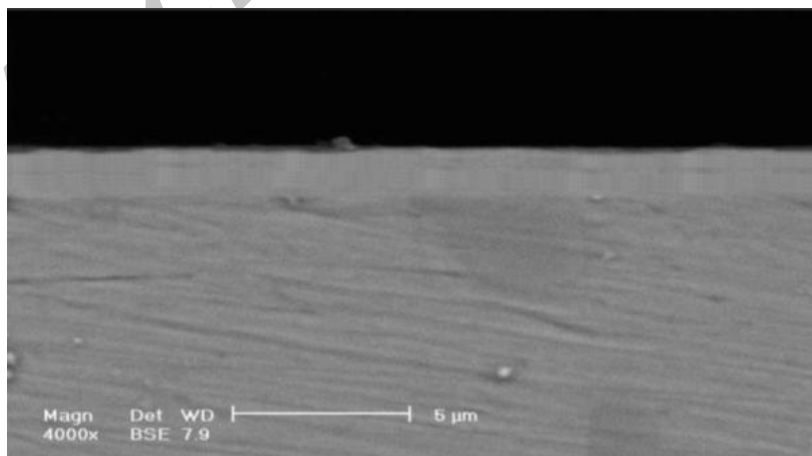
شده اند. ملاحظه می شود که چسبندگی بسیار خوبی بین پوشش و زیرلایه ایجاد شده است. از طرفی ضخامت این پوشش ها در محدوده ۲ تا ۳ میکرون می باشند.



الف



ب



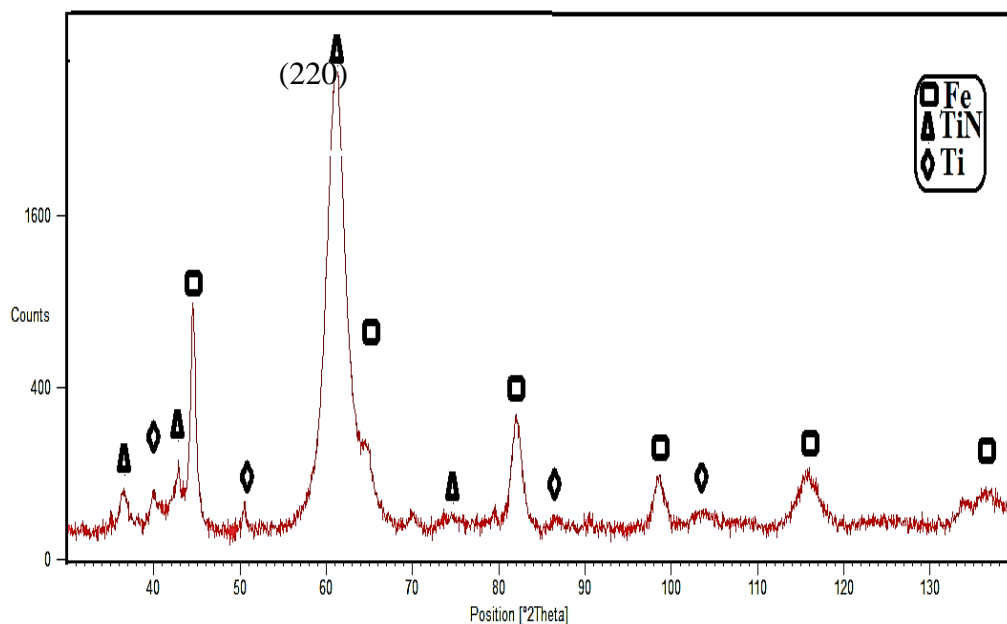
ج

شکل (۱): سطح مقطع پوشش های مختلف بر روی زیرلایه فولادی: (الف): پوشش TiN، (ب): پوشش TiN-TiCN-TiN، (ج): پوشش TiCN

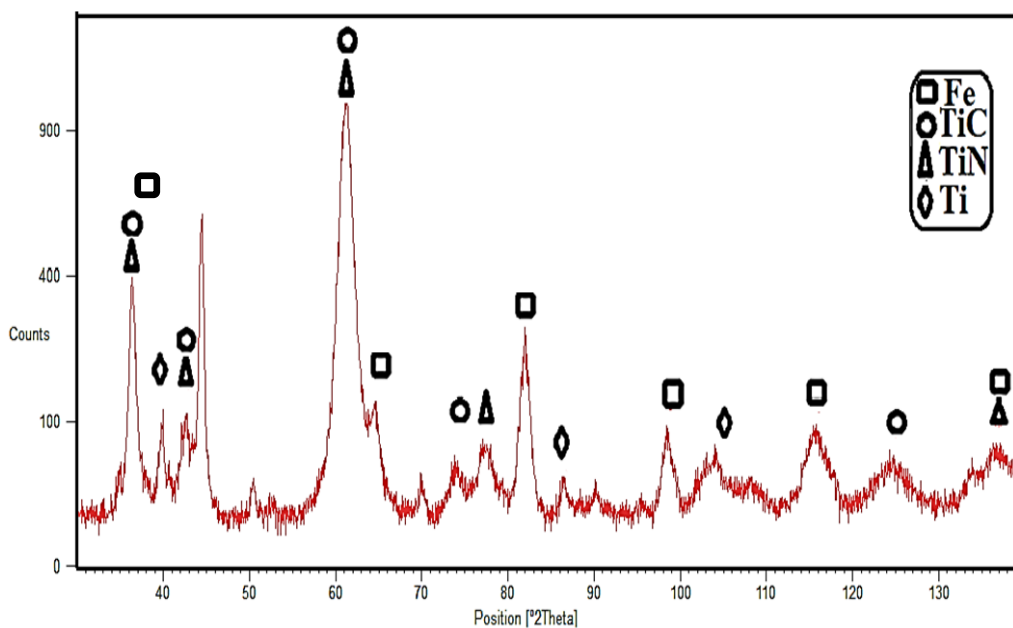
جهت اطمینان از ترکیب شیمیایی پوشش های اعمالی بر روی

۲-۳- آنالیز فازی پوشش ها و تعیین اندازه دانه

نمونه ها، همچنین تعیین اندازه دانه در هر پوشش نمونه‌هایی از پوشش‌های تک‌لایه و چندلایه مورد آزمون پراش پرتو ایکس قرار گرفتند. در شکل‌های ۳ و ۲ الگوهای پراش پرتو ایکس مربوط به دو نمونه TiN و TiCN آورده شده است.



شکل (۲): الگوی پراش پرتو ایکس نمونه ۱ (نوع پوشش TiN، دمای پیش گرم ۲۵۰ °C، زمان پوشش دهی ۴۰ min، زبری زیرلایه ۵۰ nm)



شکل (۳): الگوی پراش پرتو ایکس نمونه ۲ (نوع پوشش TiCN، دمای پیش گرم ۲۵۰ °C، زمان پوشش دهی ۴۰ min، زبری زیرلایه ۵۰ nm)

دانه در پوشش‌های PVD، تاکنون روابط متعددی ارائه شده است، که در این میان رابطه شرر بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش از این رابطه و پیک شاخص مربوط به صفحات (۲۲۰) برای تعیین اندازه دانه استفاده شد. ارتباط بین

همان گونه که مشاهده می‌گردد با اعمال پوشش EB-PVD پیک‌های مربوط به الگوی پرش پهن می‌گردد. اصولاً الگوی پراش پرتو ایکس برای اندازه دانه یا ذره کمتر از ۱۰۰ nm، پهن-شدگی محسوسی را از خود نشان می‌دهد. به منظور تعیین اندازه

پوشش‌های TiN و TiCN بدست آمد.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که هر سه پوشش ایجاد شده توسط روش پوشش دهی EB-PVD دارای اندازه دانه‌هایی در حدود ۵ تا ۶ نانومتر می‌باشند، که این می‌تواند منجر به خواص مکانیکی بسیار عالی مربوط به این پوشش‌ها گردد.

### ۳-۳- بررسی سختی نمونه‌ها

در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب منحنی‌های مربوط به آزمون نانوسختی سنجی مربوط به دو پوشش تک‌لایه TiN و TiCN و چندلایه TiN-TiCN-TiN رسم شده است. همانگونه که شکل‌های رسم شده نشان می‌دهد میزان بار اعمالی از صفر شروع می‌شود، با سرعت ناچیزی زیاد شده و به مقدار حداکثر خود یعنی ۳۰ mN می‌رسد. با اندازه‌گیری میزان عمق نفوذ نانوآیندنتور، می‌توان سختی پوشش را محاسبه کرد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در بین این سه پوشش بالاترین سختی مربوط به پوشش TiCN (برابر با ۳۵۵۲ HV) و کمترین سختی مربوط به پوشش TiN (برابر با ۳۱۴۱ HV) می‌باشد، در حالی که پوشش چندلایه (با سختی برابر با ۳۴۱۳ HV) در بین این دو قرار دارد. بالا بودن میزان سختی پوشش‌های TiCN نسبت به TiN، ایجاد شده توسط سایر روش‌های پوشش‌دهی، توسط محققین نیز به اثبات رسیده است [۱۲-۱۳].

اندازه دانه و پهنای پیک در الگوی پراش پرتو ایکس توسط رابطه شرر (معادله ۱) بصورت زیر است.

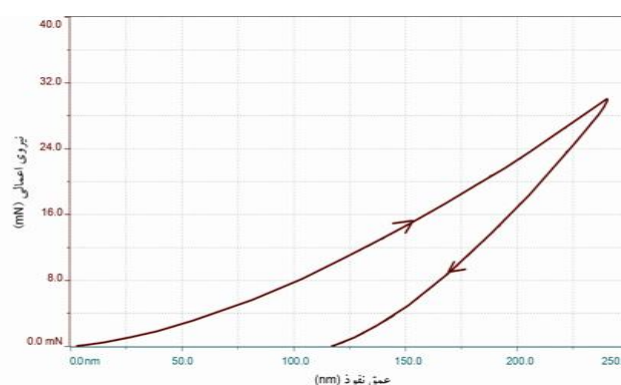
$$\beta \cos \theta = \frac{0.91\lambda}{d} \quad \text{معادله ۱}$$

در حالی که در این رابطه  $d$  اندازه دانه بر حسب نانومتر،  $\lambda$  طول موج پرتو ایکس بر حسب نانومتر (برابر با ۰/۱۵۴۲) و  $\theta$  زاویه تفرق بر حسب رادیان می‌باشد.  $\beta$  نیز پهنای اصلاح شده پیک در نیمه ارتفاع بر حسب رادیان است.

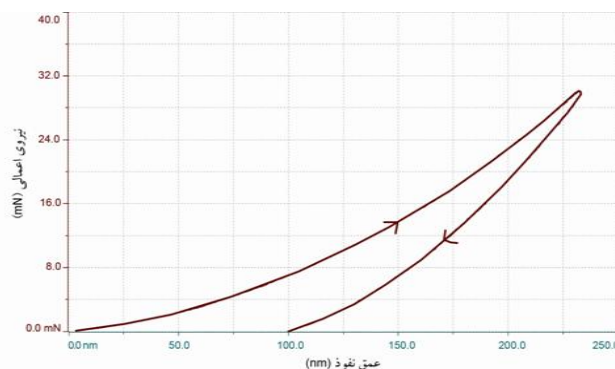
به منظور اندازه‌گیری پهنای اصلاح شده پیک در نیمه ارتفاع، حذف خطای دستگاهی و افزایش دقت اندازه‌گیری، با استفاده از الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به نمونه استاندارد قرص سلیکون و با استفاده از رابطه لورین (معادله ۲) پهنای اصلاح شده پیک در نیمه ارتفاع محاسبه شد.

$$\beta = \beta_{\text{exp}} - \beta_{\text{ins}} \quad \text{معادله ۲}$$

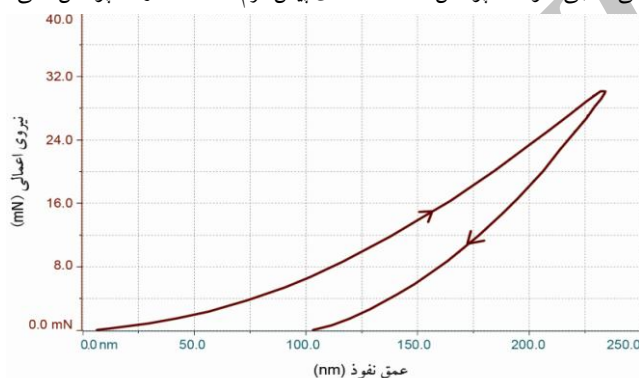
در رابطه فوق  $\beta$  پهنای اصلاح شده پیک در نیمه ارتفاع،  $\beta_{\text{exp}}$  پهنای پیک در نیمه ارتفاع در الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به نمونه پوشش داده شده و  $\beta_{\text{ins}}$  پهنای پیک در الگوی پراش پرتو ایکس قرص سلیکون بوده که مقدار آن برابر با ۰/۰۰۳ رادیان است. برای تعیین پهنای پیک در نیمه ارتفاع، اطلاعات عددی مربوط به هر پیک به نرم افزار Sigma Plot V.10 انتقال داده شد تا پیک مجدداً در این نرم افزار رسم و برازش گردد. در نهایت با اندازه‌گیری  $\beta$  و جایگذاری آن در معادله شرر، اندازه دانه در



شکل (۴): آزمون نانو سختی سنجی نمونه ۱ (پوشش TiN، دمای پیش گرم = ۲۵۰ °C، زمان پوشش دهی ۴۰ min، زبری زیرلایه ۵۰ nm)



شکل (۵): آزمون نانو سختی سنجی نمونه ۲ (پوشش TiCN، دمای پیش گرم = ۲۵۰ °C، زمان پوشش دهی = ۴۰ min، زبری زیرلایه ۵۰ nm)



شکل (۶): آزمون نانو سختی سنجی نمونه ۳ (پوشش TiN-TiCN-TiN، دمای پیش گرم = ۲۵۰ °C، زمان پوشش دهی = ۴۰ min، زبری زیرلایه ۵۰ nm)

### ۳-۴- بررسی مقاومت سایشی نمونه ها

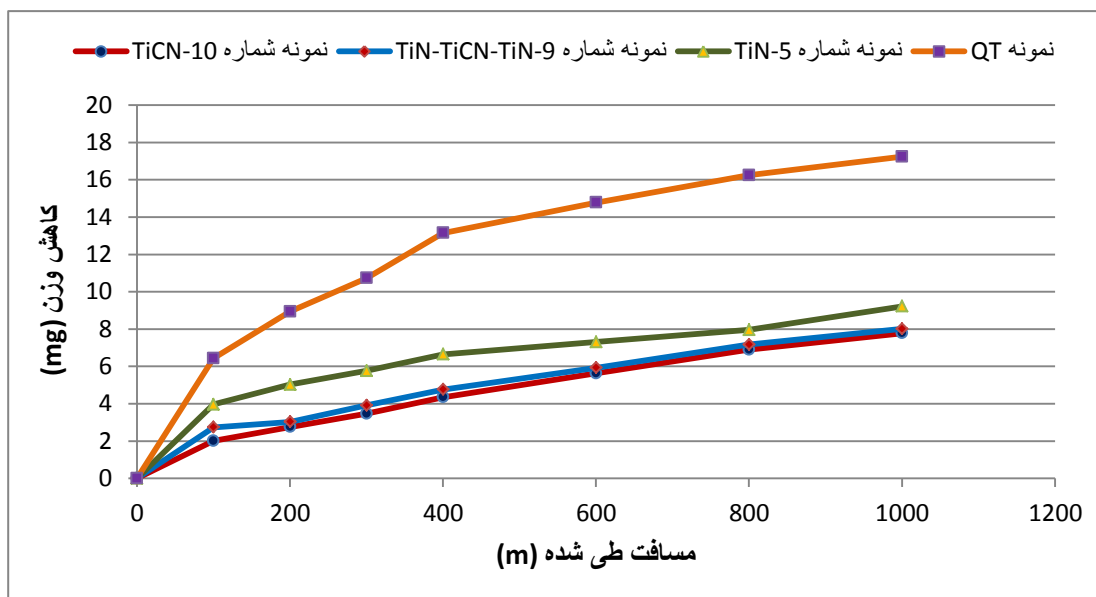
جهت بررسی و مقایسه رفتار تریبولوژیکی هر یک از نمونه‌ها از آزمون سایش گلوله روی دیسک استفاده شد. تلاش شد میزان مقاومت سایشی این پوشش‌ها با استفاده از میزان مقادیر کاهش وزن و محاسبه نرخ سایش، با همدیگر مقایسه شود. در ادامه چگونگی میزان زبری و پستی بلندی سطوح سایش با استفاده از میکروسکوپ AFM مورد مطالعه قرار گرفت.

همان گونه که شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهند با افزایش مسافت طی شده پوشش TiCN بهترین رفتار سایشی را در مقایسه با دو پوشش دیگر از خود نشان می‌دهد، در حالی که پوشش چندلایه TiN-TiCN-TiN در مرتبه بعد قرار دارد. به عبارتی پوشش TiN ضعیف‌ترین رفتار سایشی را از خود نشان می‌دهد. آزمون سایش تحت نیروی اعمالی برابر ۸ نیوتن انجام پذیرفته است. پوشش TiN بالاترین کاهش وزن و نرخ سایش را داراست در

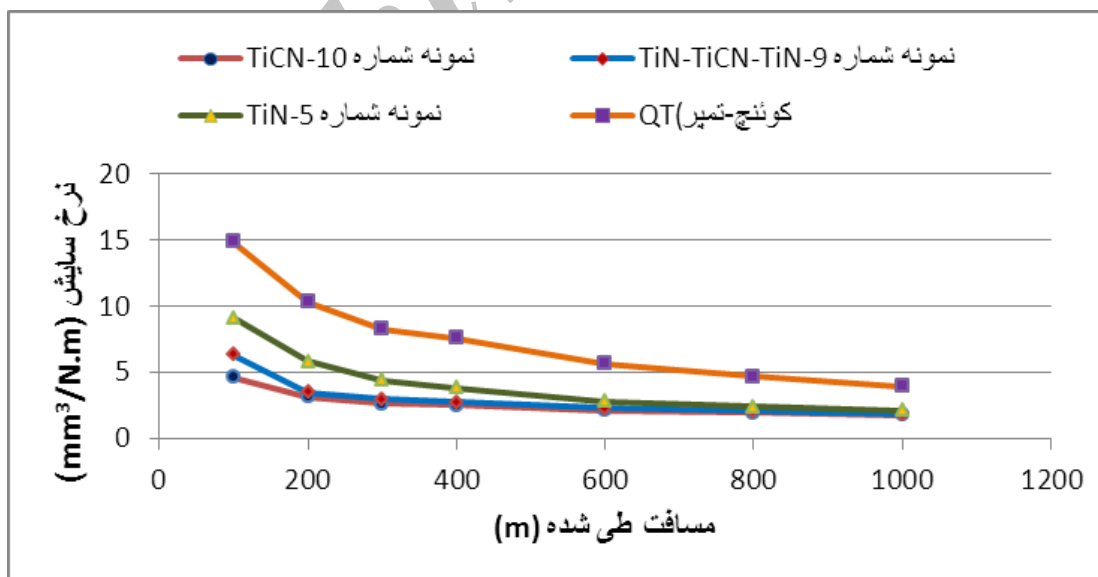
حالی که پوشش TiCN کمترین کاهش وزن و نرخ سایش را از خود نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود نمونه بدون پوشش (QT) (نمونه کوئنچ و تمپر شده) از نظر رفتار تریبولوژیکی تفاوت زیادی با نمونه‌های پوشش داده شده دارد. رفتار سایشی این سه پوشش برای هنگامی که بار اعمالی در آزمون سایش برابر با ۵ نیوتن بوده است نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با زیاد شدن نیروی اعمالی از ۵ نیوتن به ۸ نیوتن پوشش رفتار تریبولوژیکی ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهد. لذا می‌توان گفت طول عمر یک پوشش بستگی به میزان بار اعمالی در هنگام استفاده از ابزار دارد. مشابه حالت‌های قبل، بالاترین مقاومت سایشی در این بار اعمالی نیز مربوط به پوشش TiCN می‌باشد و کمترین مقاومت مربوط به TiN است. برتری پوشش TiCN نسبت به TiN و یا TiC توسط محققین دیگری تایید شده است. برای مثال جین دال و همکارانش [۱۳] توسط مطالعات

میزان صافی سطح پوشش‌های ایجاد شده که خود تابعی از نرخ رسوب، دمای زیرلایه و میزان ولتاژ اعمالی می‌باشد [۱۴-۱۵] از جمله پارامترهایی هستند که می‌تواند بر رفتار سایشی پوشش تأثیر گذار باشد.

خود دریافتند هنگامی که دو پوشش TiCN و TiN بر روی زیرلایه WC-6wt%CO به روش پوشش دهی پراکنش یونی اعمال شود، پوشش TiCN مقاومت به سایش، اکسیداسیون و حتی سختی داغ بالاتری نسبت به TiN دارد.

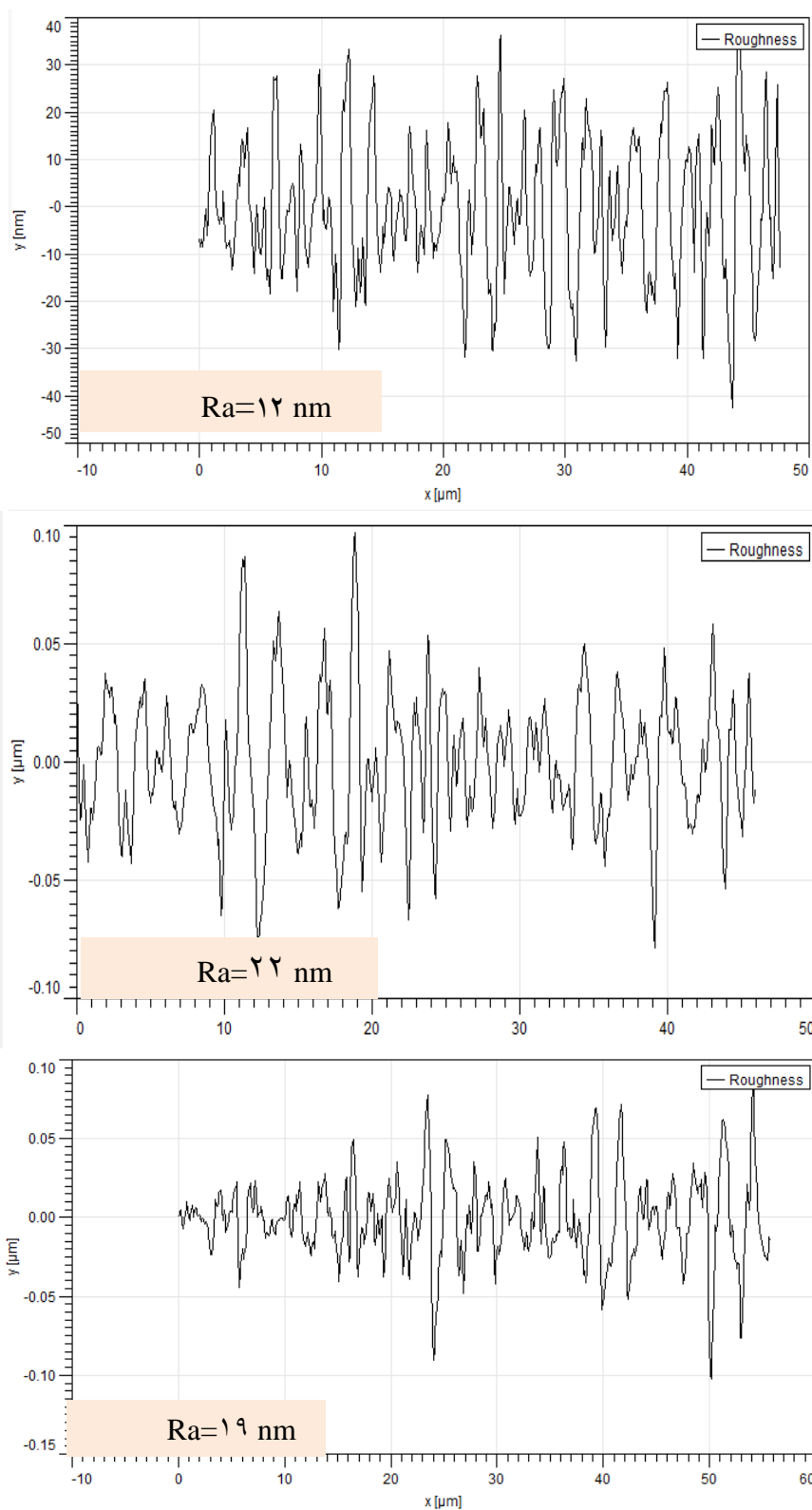


شکل (۷): تأثیر نوع پوشش بر مقدار کاهش وزن و مقایسه آن با نمونه بدون پوشش در بار اعمالی ۸ نیوتن



شکل (۸): تأثیر نوع پوشش بر مقدار نرخ سایش و مقایسه آن با نمونه بدون پوشش در بار اعمالی ۸ نیوتن



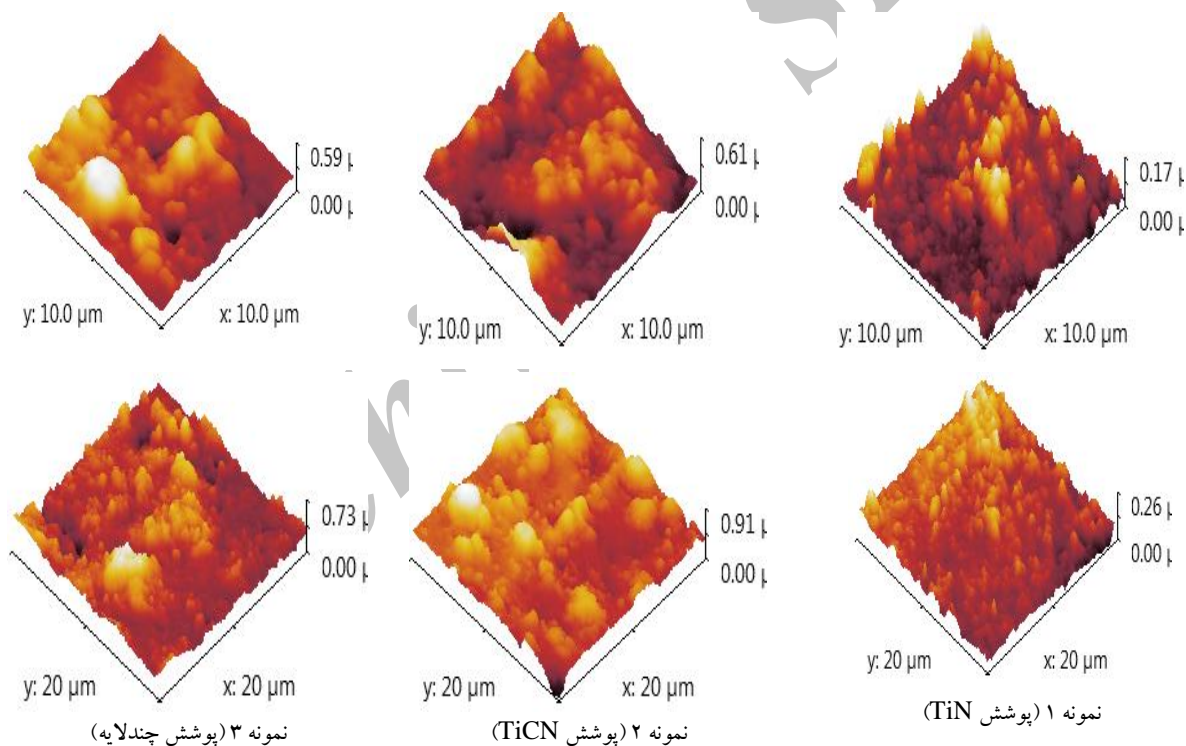


شکل (۹): منحنی میزان زبری (پستی بلندی) برحسب فاصله در منطقه اسکن شده AFM پوشش: (الف): تک لایه TiN، (ب): تک لایه TiCN، (ج): چند لایه TiN-TiCN-TiN

دیگر این که علیرغم این که پوشش TiN از صافی سطح بالاتری برخوردار است ولی باز هم مقاومت به سایش کمتری از خود نشان می‌دهد. دلیل آن پایین بودن سختی پوشش TiN نسبت به دو پوشش دیگر است.

در شکل ۱۰ نیز تصاویر AFM که از سطح نمونه‌های فوق الذکر تهیه شده، نشان داده شده است. مقایسه دقیق این تصاویر مویید این مطلب است که پوشش TiN از صافی سطح بیشتری نسبت به دو پوشش دیگر برخوردار است.

نتایج ناشی از اندازه‌گیری زبری سطوح قبل و بعد از عملیات پوشش‌دهی نشان می‌دهد زبری زیرلایه کاملاً پولیش شده قبل از فرایند پوشش‌دهی برابر با ۵۰nm می‌باشد. در حالی که بر اساس منحنی‌های زبری رسم شده توسط نانواینندنتور (شکل ۹) زبری این سه پوشش بعد از عملیات پوشش‌دهی برای پوشش TiN برابر ۱۲nm و برای پوشش TiCN برابر ۲۲nm و برای پوشش چندلایه TiN-TiCN-TiN برابر ۱۹nm خواهد بود. ملاحظه می‌شود که اعمال پوشش بر روی یک سطح کاملاً صیقلی و پولیش شده باز هم باعث بهبود صافی سطح شده است. نکته



شکل (۱۰): تصاویر تهیه شده از سطح نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ توسط AFM

۲- با اندازه‌گیری میزان سختی پوشش‌های تک‌لایه TiN و TiCN و چندلایه TiN-TiCN-TiN توسط نانواینندنتور، تحت بار اعمالی ۳۰ میلی نیوتن مشخص شد که در بین این سه پوشش بالاترین سختی مربوط به پوشش TiCN (برابر با ۳۵۵۲ HV) و کمترین سختی مربوط به پوشش TiN (برابر با ۳۱۴۱ HV)

#### ۴- نتیجه‌گیری

۱- با استفاده از سیستم پوشش‌دهی EB-PVD می‌توان در مورد پوشش‌های TiCN و TiN به ساختار نانو با اندازه دانه‌هایی در حدود ۵ تا ۶ نانومتر دست یافت.

- [6] J. Singh, J. Thomas Schriemp & D. E. Wolfe, "Electron Beam Physical Vapor Deposition Technology: Present and Future Applications", The Applied Research Laboratory, The Pennsylvania State University, University Park, PA 16804.
- [7] J. Singh, "Nano and macro-structured component fabrication by electron beam-physical vapor deposition (EB-PVD)", journal of materia, Vol. 40, pp. 1-26, 2005.
- [8] S. PalDey & S. C. Deevi, "Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: a review", Materials Science and Engineering A, Vol. 342, pp.58-79, 2003.
- [9] Y. L. Su & W. H. Kao, "Optimum multilayer TiN-TiCN coatings for wear resistance and actual application", Vol. 223, pp. 119-130, 1998.
- [10] ASTM G99-05, "Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus", ASTM Book of Standards; West Conshohocken, Pa, United States, Vol. 3, 2005.
- [11] G. A. Fontalvo, R. Humer, C. Mitterer, K. Sammt & I. Schemmel, "Microstructural Aspects Determining the Adhesive Wear of Tool Steels", Wear, Vol. 260, No. 9-10, pp. 1028 - 1034, 2006.
- [12] T. Polcar, R. Novak & P. Siroky, "The tribological characteristics of TiCN coating at elevated temperatures", Vol. 260, pp. 40-49, 2006.
- [13] P.C. Jindal, A. T. Sathanam, U. Schleinkofer & A. F. Shuster, "Performance of PVD TiN, TiCN, and TiAlN coated cemented carbide tools in turning", Refractory Metals & Hard Materials, Vol. 17, pp. 163-170, 1999.
- [14] C. M. Cotell, J. A. Sprague & F. A. Smist, "ASM Handbook", Surface Engineering, Second printing, Vol. 5, 1996.
- [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, 2009.
- می‌باشد، در حالی که پوشش چندلایه (با سختی HV ۳۴۱۳) در بین این دو قرار دارد.
- ۳- بر اساس نتایج بدست آمده از آزمون سایش گلوله بر روی دیسک تحت بارهای اعمالی ۵ و ۸ نیوتن و سرعت ۰/۱۵ متر بر ثانیه مشخص گردید که بالاترین و پایین ترین میزان کاهش وزن و همچنین نرخ سایش به ترتیب مربوط پوشش های TiN و TiCN می‌باشد این در حالی است که پوشش چندلایه TiN-TiCN-TiN در بین این دو قرار دارد.
- ۴- نتایج بدست آمده از آزمون زبری سنجی توسط دستگاه نانوایندنتور به همراه تصاویر سه بعدی AFM از سطح سایش نشان می‌دهد که در شرایط پوشش دهی یکسان، علیرغم اینکه پوشش TiN از صافی سطحی بهتری نسبت به TiCN برخوردار است ولی بدلیل اینکه پوشش TiCN از سختی بالاتری برخوردار است، این پوشش رفتار سایشی بهتری از خود نشان می‌دهد.
- ۵- مراجع**
- [1] E. Lugscheider, O. Knotek, C. Barimani & H. Zimmermann, "Arc PVD-coated cutting tools for modern machining applications," Surface and Coating Technology, Vol. 94-95, PP. 611-646, 1997.
- [2] M. Nordin, M. Larsson & S. Hogmark, "Mechanical and tribological properties of multilayered PVD TiN/CrN", Vol. 232, No. 2, pp. 221-225, 1999.
- [3] Azushima, Y. Tanno, H. Iwata & K. Aoki, "Coefficients of friction of TiN coatings with preferred grain orientations under dry condition", Vol. 265, PP. 1017-1022, 2008.
- [4] S. V. Hainsworth & W. C. Soh, "The effect of the substrate on the mechanical properties of TiN coatings", Surface and Coatings Technology, Vol. 163-164, PP.515-520, 2003.
- [5] S. J. Bull, Bhat D. G. Staia & M. H, "Properties and performance of commercial TiCN coatings. Part 2: Tribological performance", Surface & Coatings Technology, Vol. 163-164, pp. 507-514, 2003.