



## تأثیر پوشش‌های چند لایه $TiN/TiCN/Al_2O_3$ روی سطح مته کاربرد تنگستن بر عملیات سوراخکاری چدن گرافیت کرووی

فریبرز جلالی<sup>1</sup>، مجتبی قطعی<sup>2\*</sup>، سید مجید هاشمیان<sup>2</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

\* شاهرود، صندوق پستی 361995161، mghatee@shahroodut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 12 مهر 1394

پذیرش: 10 آبان 1394

ارائه در سایت: 14 آذر 1394

کلید واژگان:

مته تنگستن کارباید

پوشش چند لایه  $TiN/TiCN/Al_2O_3$

چدن گرافیت کرووی

سایش ابزار

### چکیده

کاربیدهای سماتنه از معمولترین مواد ابزارهای ماشینکاری می‌باشند. به منظور بهبود فرآیند ماشینکاری، سطوح ابزارهای برشی باید در برابر سایش مقاوم بوده، دارای سختی بالا و از نظر شیمیایی خنثی باشند. در سال‌های اخیر پوشش‌های متنوعی به منظور بهبود خواص سایشی ابزارهای کاربرد تنگستن ارائه شده‌اند. در این تحقیق اثر پوشش چند لایه  $TiN/TiCN/Al_2O_3$  بر بهبود فرآیند سوراخکاری چدن گرافیت کرووی بررسی شده است. لایه خارجی پوشش از جنس  $Al_2O_3$  انتخاب گردید که دارای مقاومت به سایش بالا بوده و لایه داخلی  $TiN$  با چسبندگی عالی به سطح کاربرد تنگستن بود. لایه میانی از جنس  $TiCN$  انتخاب شد زیرا این لایه سازگاری مناسبی با لایه داخلی و خارجی دارد. در ابتدا مته‌ها از جنس کاربرد تنگستن ساخته و سپس پوشش سه لایه روی سطح مته کاربرد تنگستن به روش لایه‌نشانی شیمیایی بخار اعمال شد. میزان سایش مته، صافی سطح و تلرانس سوراخ ماشینکاری شده در شرایط کاری سوراخکاری مورد بررسی قرار گرفت. سطح سایش و ساختار پوشش بوسیله میکروسکپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. ضخامت پوشش‌های اعمالی 10 میکرومتر بود. نتایج نشان داد پوشش چند لایه تأثیر چشمگیری بر بهبود مقاومت به سایش مته نسبت به مته بدون پوشش داشته است. به علاوه، مشاهده گردید که صافی سطح و تلرانس سوراخکاری با استفاده از مته پوشش‌دار بهبود یافته است. دلیل این پدیده کاهش سایش و پایداری ابعادی مته‌ها در حین عملیات ماشینکاری است. به علاوه با توجه به ساختار سطح سایش، مشخص شد که مکانیزم سایش مته از نوع سایش خراشیدگی می‌باشد.

## Effect of $TiN/TiCN/Al_2O_3$ multilayer coating on Tungsten Carbide drill on drilling process of spherodized cast iron

Fariborz Jalali, Mojtaba Ghatee\*, Seyed Majid Hashemian

Department of Mechanical Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran

\*P.O.B. 361995161, Shahrood, Iran, mghatee@shahroodut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 04 October 2015  
Accepted 01 November 2015  
Available Online 05 December 2015

#### Keywords:

Tungsten Carbide drill  
 $TiN/TiCN/Al_2O_3$  multi layer coating  
Spherodized cast iron  
Tool wear

### ABSTRACT

Cemented carbides are the most common cutting tool materials. To improve machining process, the surface of the cutting tools must be wear resistance with high hardness and chemical inertness. In recent years, several coatings have been developed for tungsten carbide. In this paper, the effect of  $TiN/TiCN/Al_2O_3$  multicoatings on the performance of drilling process of spherodized cast iron was studied. The external layer is  $Al_2O_3$  which has high wear resistance and  $TiN$  was chosen as internal layer because of its excellent adhesion to the tungsten carbide surface. The intermediate layer was  $TiCN$  because of its compatibility with the other layers. At first, drills were prepared by machining process and then the triple layer coating was applied on the surface of tungsten carbide drills by chemical vapor deposition method. The coating process was performed under usual industrial condition. The thickness of the coatings was 10 micrometers. The wear of drills, the surface roughness and the hole diameter tolerance were investigated. The structure of coating and wear surface was studied by scanning electron microscopy. It was found that the multiple coating significantly improved the wear resistance of the drill compared to uncoated tools. In addition, it was found that the surface roughness and hole diameter tolerances improved by drilling with coated tools. The reason of this would be the lower wear rate and resulting dimension stability of the coated tools. In addition, based on wear surface structure, it was concluded that the mechanism of wear was abrasion.

### 1- مقدمه

افزایش طول عمر ابزارهای ماشینکاری از جنس کاربرد تنگستن انواع مختلفی از پوشش‌ها بر روی سطوح آنها اعمال می‌شود. این پوشش‌ها باعث بهبود چشمگیر خواص ابزار از جمله سختی، محافظت در برابر واکنش‌های

ابزارهای ماشینکاری یکی از پرکاربردترین مواد مهندسی هستند و کاربرد تنگستن ماده معمول برای ساخت ابزار برشی است. به منظور بهبود خواص و

Please cite this article using:

F. Jalali, M. Ghatee, S. M. Hashemian, Effect of  $TiN/TiCN/Al_2O_3$  multilayer coating on Tungsten Carbide drill on drilling process of spherodized cast iron, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 443-449, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

F. Jalali, M. Ghatee, S. M. Hashemian, Effect of  $TiN/TiCN/Al_2O_3$  multilayer coating on Tungsten Carbide drill on drilling process of spherodized cast iron, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 443-449, 2015 (in Persian)

ایجاد می‌کند. همچنین نیروهای ماشینکاری با ابزار پوشش داده شده با TiN کمتر از ابزار با پوشش Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> بود [2].

آ. بهات و همکاران تأثیر پوشش‌های مختلف بر روی سطح ابزار از جنس کاربرد تنگستن در عملیات ماشینکاری آلیاژ اینکونل 718 را مورد بررسی قرار دادند [3]. این محققین مشاهده نمودند پوشش TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN بهترین مقاومت به سایش را دارد و مکانیزم سایش از نوع خراشیدگی است.

اچ. جی پرنگل و همکاران اثر پوشش‌های چندلایه و تک لایه TiAlN بر مقاومت سایشی ابزارهای کاربرد تنگستن را بررسی کردند. این محققین نشان داده‌اند که پوشش‌های چند لایه در مقایسه با پوشش تک لایه در حالت ماشینکاری خشک چدن خاکستری عملکرد بهتری دارند [4].

س.م. اوه و ب.ج. ری مشاهده کردند که سرعت سایش ابزار کاربرد تنگستن با پوشش TiCN نسبت به پوشش TiC و TiN کمتر است [6].

ت. سله و آ. باریمانی تحقیقی در مورد کاربرد و مزایای انواع پوشش‌ها در فرآیند سوراخکاری با مته انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که پوشش TiAlN بر روی سطح مته کاربرد تنگستن به دلیل مقاومت حرارتی بالاتر برای سوراخکاری چدن مناسب‌تر است [7]. نشان داده شده است که پوشش‌های دولایه TiN/Ta<sub>2</sub>N و TiN/NbN تأثیر زیادی در مقاومت به سایش ابزارهای کاربرد تنگستن دارند [8]. تحقیقات نشان داده است که پوشش TiAlN در شرایط ماشینکاری خشک می‌تواند مقاومت به سایش ابزار کاربرد تنگستن را بهبود دهد [9]. به علاوه مشاهده شده است که پوشش‌های

TiN/TiAlN بر روی سطح ابزار برشی کاربرد تنگستن [10] و پوشش TiAlN بر روی سطح مته‌های کاربرد تنگستن باعث بهبود کارایی فرآیند سوراخکاری می‌شود [11]. تحقیقات نشان داده است که مکانیزم سایش ابزار به شرایط و نوع ماده ماشینکاری وابسته است [12] و به علاوه نوع پوشش بر کیفیت عملیات سوراخکاری تأثیر زیادی دارد [13]. تاکنون تحقیقات کمی در مورد اثر پوشش‌های چند گانه بر خواص سایش مته‌های کاربرد تنگستن انجام شده است. چدن خاکستری یکی از مهمترین مواد مهندسی است که کاربردهای گسترده‌ای در صنعت خودروسازی دارد اما هزینه بالای ماشینکاری آن کاربردهای گسترده آن را با محدودیت مواجه کرده است. عمر ابزار یکی از مهمترین متغیرها در هزینه ماشینکاری چدن‌های گرافیت کرووی است. به علاوه با توجه به رویکرد در صنایع خودروسازی به اتوماسیون فرآیند تولید نیاز به افزایش عمر ابزار ماشینکاری اهمیت بیشتری پیدا کرده است [14]. هدف از این تحقیق بررسی اثر پوشش سه لایه TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> مته‌های کاربرد تنگستن کارباید بر خصوصیات سایشی ابزار و کیفیت سطوح سوراخکاری کالیپر ترمز سمند می‌باشد. کالیپر ترمز نگهدارنده پیستون و لنت ترمز بوده و یکی از حساس‌ترین قسمت‌های خودرو می‌باشد که از نظر ایمنی

گردد A یعنی بالاترین درجه ایمنی خودرو را دارد. جنس کالیپر ترمز سمند از چدن گرافیت کرووی است که به آن چدن داکتیل یا ندولار نیز گفته می‌شود. این چدن علاوه بر خواص مکانیکی خوب و سختی مناسب با توجه به زمینه گرافیت کرووی و افزودن عناصری که قابلیت ماشینکاری آن را بالا می‌برند، دارای خواص ماشینکاری خوبی نیز می‌باشد.

انتخاب ترتیب پوشش‌دهی به این دلیل است که لایه TiN چسبندگی مناسبی به کاربرد تنگستن دارد [15] و لایه TiCN مقاومت به سایش بالا دارد و به علت ضریب اصطکاک مناسب می‌تواند فرآیند سوراخکاری را بهبود بخشد. لایه Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به علت مقاومت به سایش بالا و انتقال حرارت کم به عنوان لایه بیرونی انتخاب شده است.

در بسیاری از موارد انتخاب پوشش چند لایه بدلیل استفاده از خصوصیات لایه‌های مختلف نتایج بسیار بهتری در ماشینکاری به همراه دارد [4]. ضخامت کلی لایه‌های پوششی بین 2 تا 12 میکرون می‌باشد تا از اثرات منفی ناشی از ضخامت لایه‌ها جلوگیری شود. با افزایش ضخامت پوشش مقاومت سایشی ابزار افزایش می‌یابد اما در عین حال تردی پوشش افزایش یافته و امکان جدا شدن پوشش به صورت ورقه‌ای وجود خواهد داشت. به علاوه پوشش‌های نازک‌تر چقرمگی بیشتری دارند. هنگام ایجاد پوشش‌های چند لایه باید ترتیب پوشش‌ها و ضخامت هر لایه کنترل شود. معمول‌ترین روش ایجاد پوشش‌های چند لایه روش نشانی شیمیایی بخار<sup>1</sup> یا به اختصار CVD و یا لایه نشانی فیزیکی بخار<sup>2</sup> یا به اختصار PVD انجام می‌باشد. هر کدام از این روش‌ها فرآیندی مشخص و نیاز به تجهیزات خاصی دارد [5].

پوشش دادن به روش CVD توسط واکنش شیمیایی بین گازهای مختلف انجام می‌شود. در این فرآیند ابزار داخل کوره و در حمام بخار ماده مورد نظر قرار گرفته و تا دمای حدود 1000 درجه سانتیگراد گرم می‌شود. در این دما و با گذشت زمان مشخص، لایه بسیار نازکی از بخار پوشش مورد نظر روی ابزار قرار می‌گیرد. فرآیند CVD در حال حاضر یک فرآیند معمول است که کاربرد وسیعی دارد و تقریباً برای پوشش‌دهی تمام ابزارها با پوشش‌های متنوع مورد استفاده قرار می‌گیرد. پوشش ایجاد شده با روش CVD یکنواخت و همگن است. از مزایای پوشش‌دهی به روش CVD می‌توان به امکان ایجاد لایه‌های نازک با ضخامت کم و چسبندگی بسیار مناسب به زیر لایه اشاره کرد [1]. تحقیقات مختلفی در مورد اثر نوع پوشش ابزارهای تنگستن کارباید بر متغیرهای ماشینکاری مانند سایش ابزار، کیفیت سطوح ماشینکاری، نیروهای ماشینکاری انجام شده است [2-15].

ا. چفتچی اثر پوشش‌های چند لایه کاربرد تنگستن را بر خصوصیات ماشینکاری فولاد ضد زنگ آستنیت 304 AISI بررسی نمود. در این تحقیق تأثیر دو نوع پوشش چند لایه TiC/TiCN/TiN و TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> بر صافی سطح ماشینکاری و نیروهای ماشینکاری بررسی شد. در این تحقیق مشاهده شد ماشینکاری با ابزار کاربرد تنگستن با پوشش صافی سطحی بهتری

شیمیایی، محافظت در برابر انتقال حرارت به ابزار، کاهش ضریب اصطکاک بین ابزار و براده، مقاومت در برابر سایش سطح جانبی و مقاومت در برابر سایش حفره‌ای می‌شوند [1]. این پوشش‌ها به دلایل مختلف و بصورت تک لایه و یا چند لایه قابل استفاده هستند. به عنوان مثال پوشش اکسید آلومینیم (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) دارای مقاومت به سایش و پایداری شیمیایی در دمای بالا می‌باشد [2]. پوشش نیتريد تیتانیوم (TiN) دارای چسبندگی عالی و ضریب اصطکاک پایین است و از چسبیدن سطح آزاد ابزار به قطعه کار جلوگیری می‌کند [2]. پوشش کربو نیتريد تیتانیوم (TiCN) دارای خواص چسبندگی عالی است و به علاوه مقاومت سایشی خوبی نیز دارد و به همین دلیل می‌تواند به عنوان لایه نزدیک به زیر لایه استفاده شود و روی آن یک و یا دو لایه پوشش دیگر به منظور ایجاد سپر حرارتی و افزایش مقاومت سایشی اعمال می‌شود [3]. اگر چه کربو نیتريد تیتانیوم چسبندگی مناسبی به سطح کاربرد تنگستن دارد ولی به علت وجود کربن به حرارت حساس است و بنابراین جهت بهبود کارایی نیاز به سد حرارتی دارد. به همین دلیل این ماده با یک لایه با انتقال حرارت پایین مانند اکسید آلومینیم روی سطح خارجی پوشانده می‌شود [2].

در بسیاری از موارد انتخاب پوشش چند لایه بدلیل استفاده از خصوصیات لایه‌های مختلف نتایج بسیار بهتری در ماشینکاری به همراه دارد [4]. ضخامت کلی لایه‌های پوششی بین 2 تا 12 میکرون می‌باشد تا از اثرات منفی ناشی از ضخامت لایه‌ها جلوگیری شود. با افزایش ضخامت پوشش مقاومت سایشی ابزار افزایش می‌یابد اما در عین حال تردی پوشش افزایش یافته و امکان جدا شدن پوشش به صورت ورقه‌ای وجود خواهد داشت. به علاوه پوشش‌های نازک‌تر چقرمگی بیشتری دارند. هنگام ایجاد پوشش‌های چند لایه باید ترتیب پوشش‌ها و ضخامت هر لایه کنترل شود. معمول‌ترین روش ایجاد پوشش‌های چند لایه روش نشانی شیمیایی بخار<sup>1</sup> یا به اختصار CVD و یا لایه نشانی فیزیکی بخار<sup>2</sup> یا به اختصار PVD انجام می‌باشد. هر کدام از این روش‌ها فرآیندی مشخص و نیاز به تجهیزات خاصی دارد [5].

پوشش دادن به روش CVD توسط واکنش شیمیایی بین گازهای مختلف انجام می‌شود. در این فرآیند ابزار داخل کوره و در حمام بخار ماده مورد نظر قرار گرفته و تا دمای حدود 1000 درجه سانتیگراد گرم می‌شود. در این دما و با گذشت زمان مشخص، لایه بسیار نازکی از بخار پوشش مورد نظر روی ابزار قرار می‌گیرد. فرآیند CVD در حال حاضر یک فرآیند معمول است که کاربرد وسیعی دارد و تقریباً برای پوشش‌دهی تمام ابزارها با پوشش‌های متنوع مورد استفاده قرار می‌گیرد. پوشش ایجاد شده با روش CVD یکنواخت و همگن است. از مزایای پوشش‌دهی به روش CVD می‌توان به امکان ایجاد لایه‌های نازک با ضخامت کم و چسبندگی بسیار مناسب به زیر لایه اشاره کرد [1]. تحقیقات مختلفی در مورد اثر نوع پوشش ابزارهای تنگستن کارباید بر متغیرهای ماشینکاری مانند سایش ابزار، کیفیت سطوح ماشینکاری، نیروهای ماشینکاری انجام شده است [2-15].

ا. چفتچی اثر پوشش‌های چند لایه کاربرد تنگستن را بر خصوصیات ماشینکاری فولاد ضد زنگ آستنیت 304 AISI بررسی نمود. در این تحقیق تأثیر دو نوع پوشش چند لایه TiC/TiCN/TiN و TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> بر صافی سطح ماشینکاری و نیروهای ماشینکاری بررسی شد. در این تحقیق مشاهده شد ماشینکاری با ابزار کاربرد تنگستن با پوشش صافی سطحی بهتری

شیمیایی، محافظت در برابر انتقال حرارت به ابزار، کاهش ضریب اصطکاک بین ابزار و براده، مقاومت در برابر سایش سطح جانبی و مقاومت در برابر سایش حفره‌ای می‌شوند [1]. این پوشش‌ها به دلایل مختلف و بصورت تک لایه و یا چند لایه قابل استفاده هستند. به عنوان مثال پوشش اکسید آلومینیم (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) دارای مقاومت به سایش و پایداری شیمیایی در دمای بالا می‌باشد [2]. پوشش نیتريد تیتانیوم (TiN) دارای چسبندگی عالی و ضریب اصطکاک پایین است و از چسبیدن سطح آزاد ابزار به قطعه کار جلوگیری می‌کند [2]. پوشش کربو نیتريد تیتانیوم (TiCN) دارای خواص چسبندگی عالی است و به علاوه مقاومت سایشی خوبی نیز دارد و به همین دلیل می‌تواند به عنوان لایه نزدیک به زیر لایه استفاده شود و روی آن یک و یا دو لایه پوشش دیگر به منظور ایجاد سپر حرارتی و افزایش مقاومت سایشی اعمال می‌شود [3]. اگر چه کربو نیتريد تیتانیوم چسبندگی مناسبی به سطح کاربرد تنگستن دارد ولی به علت وجود کربن به حرارت حساس است و بنابراین جهت بهبود کارایی نیاز به سد حرارتی دارد. به همین دلیل این ماده با یک لایه با انتقال حرارت پایین مانند اکسید آلومینیم روی سطح خارجی پوشانده می‌شود [2].

در بسیاری از موارد انتخاب پوشش چند لایه بدلیل استفاده از خصوصیات لایه‌های مختلف نتایج بسیار بهتری در ماشینکاری به همراه دارد [4]. ضخامت کلی لایه‌های پوششی بین 2 تا 12 میکرون می‌باشد تا از اثرات منفی ناشی از ضخامت لایه‌ها جلوگیری شود. با افزایش ضخامت پوشش مقاومت سایشی ابزار افزایش می‌یابد اما در عین حال تردی پوشش افزایش یافته و امکان جدا شدن پوشش به صورت ورقه‌ای وجود خواهد داشت. به علاوه پوشش‌های نازک‌تر چقرمگی بیشتری دارند. هنگام ایجاد پوشش‌های چند لایه باید ترتیب پوشش‌ها و ضخامت هر لایه کنترل شود. معمول‌ترین روش ایجاد پوشش‌های چند لایه روش نشانی شیمیایی بخار<sup>1</sup> یا به اختصار CVD و یا لایه نشانی فیزیکی بخار<sup>2</sup> یا به اختصار PVD انجام می‌باشد. هر کدام از این روش‌ها فرآیندی مشخص و نیاز به تجهیزات خاصی دارد [5].

پوشش دادن به روش CVD توسط واکنش شیمیایی بین گازهای مختلف انجام می‌شود. در این فرآیند ابزار داخل کوره و در حمام بخار ماده مورد نظر قرار گرفته و تا دمای حدود 1000 درجه سانتیگراد گرم می‌شود. در این دما و با گذشت زمان مشخص، لایه بسیار نازکی از بخار پوشش مورد نظر روی ابزار قرار می‌گیرد. فرآیند CVD در حال حاضر یک فرآیند معمول است که کاربرد وسیعی دارد و تقریباً برای پوشش‌دهی تمام ابزارها با پوشش‌های متنوع مورد استفاده قرار می‌گیرد. پوشش ایجاد شده با روش CVD یکنواخت و همگن است. از مزایای پوشش‌دهی به روش CVD می‌توان به امکان ایجاد لایه‌های نازک با ضخامت کم و چسبندگی بسیار مناسب به زیر لایه اشاره کرد [1]. تحقیقات مختلفی در مورد اثر نوع پوشش ابزارهای تنگستن کارباید بر متغیرهای ماشینکاری مانند سایش ابزار، کیفیت سطوح ماشینکاری، نیروهای ماشینکاری انجام شده است [2-15].

ا. چفتچی اثر پوشش‌های چند لایه کاربرد تنگستن را بر خصوصیات ماشینکاری فولاد ضد زنگ آستنیت 304 AISI بررسی نمود. در این تحقیق تأثیر دو نوع پوشش چند لایه TiC/TiCN/TiN و TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> بر صافی سطح ماشینکاری و نیروهای ماشینکاری بررسی شد. در این تحقیق مشاهده شد ماشینکاری با ابزار کاربرد تنگستن با پوشش صافی سطحی بهتری

شیمیایی، محافظت در برابر انتقال حرارت به ابزار، کاهش ضریب اصطکاک بین ابزار و براده، مقاومت در برابر سایش سطح جانبی و مقاومت در برابر سایش حفره‌ای می‌شوند [1]. این پوشش‌ها به دلایل مختلف و بصورت تک لایه و یا چند لایه قابل استفاده هستند. به عنوان مثال پوشش اکسید آلومینیم (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) دارای مقاومت به سایش و پایداری شیمیایی در دمای بالا می‌باشد [2]. پوشش نیتريد تیتانیوم (TiN) دارای چسبندگی عالی و ضریب اصطکاک پایین است و از چسبیدن سطح آزاد ابزار به قطعه کار جلوگیری می‌کند [2]. پوشش کربو نیتريد تیتانیوم (TiCN) دارای خواص چسبندگی عالی است و به علاوه مقاومت سایشی خوبی نیز دارد و به همین دلیل می‌تواند به عنوان لایه نزدیک به زیر لایه استفاده شود و روی آن یک و یا دو لایه پوشش دیگر به منظور ایجاد سپر حرارتی و افزایش مقاومت سایشی اعمال می‌شود [3]. اگر چه کربو نیتريد تیتانیوم چسبندگی مناسبی به سطح کاربرد تنگستن دارد ولی به علت وجود کربن به حرارت حساس است و بنابراین جهت بهبود کارایی نیاز به سد حرارتی دارد. به همین دلیل این ماده با یک لایه با انتقال حرارت پایین مانند اکسید آلومینیم روی سطح خارجی پوشانده می‌شود [2].

در بسیاری از موارد انتخاب پوشش چند لایه بدلیل استفاده از خصوصیات لایه‌های مختلف نتایج بسیار بهتری در ماشینکاری به همراه دارد [4]. ضخامت کلی لایه‌های پوششی بین 2 تا 12 میکرون می‌باشد تا از اثرات منفی ناشی از ضخامت لایه‌ها جلوگیری شود. با افزایش ضخامت پوشش مقاومت سایشی ابزار افزایش می‌یابد اما در عین حال تردی پوشش افزایش یافته و امکان جدا شدن پوشش به صورت ورقه‌ای وجود خواهد داشت. به علاوه پوشش‌های نازک‌تر چقرمگی بیشتری دارند. هنگام ایجاد پوشش‌های چند لایه باید ترتیب پوشش‌ها و ضخامت هر لایه کنترل شود. معمول‌ترین روش ایجاد پوشش‌های چند لایه روش نشانی شیمیایی بخار<sup>1</sup> یا به اختصار CVD و یا لایه نشانی فیزیکی بخار<sup>2</sup> یا به اختصار PVD انجام می‌باشد. هر کدام از این روش‌ها فرآیندی مشخص و نیاز به تجهیزات خاصی دارد [5].

پوشش دادن به روش CVD توسط واکنش شیمیایی بین گازهای مختلف انجام می‌شود. در این فرآیند ابزار داخل کوره و در حمام بخار ماده مورد نظر قرار گرفته و تا دمای حدود 1000 درجه سانتیگراد گرم می‌شود. در این دما و با گذشت زمان مشخص، لایه بسیار نازکی از بخار پوشش مورد نظر روی ابزار قرار می‌گیرد. فرآیند CVD در حال حاضر یک فرآیند معمول است که کاربرد وسیعی دارد و تقریباً برای پوشش‌دهی تمام ابزارها با پوشش‌های متنوع مورد استفاده قرار می‌گیرد. پوشش ایجاد شده با روش CVD یکنواخت و همگن است. از مزایای پوشش‌دهی به روش CVD می‌توان به امکان ایجاد لایه‌های نازک با ضخامت کم و چسبندگی بسیار مناسب به زیر لایه اشاره کرد [1]. تحقیقات مختلفی در مورد اثر نوع پوشش ابزارهای تنگستن کارباید بر متغیرهای ماشینکاری مانند سایش ابزار، کیفیت سطوح ماشینکاری، نیروهای ماشینکاری انجام شده است [2-15].

ا. چفتچی اثر پوشش‌های چند لایه کاربرد تنگستن را بر خصوصیات ماشینکاری فولاد ضد زنگ آستنیت 304 AISI بررسی نمود. در این تحقیق تأثیر دو نوع پوشش چند لایه TiC/TiCN/TiN و TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> بر صافی سطح ماشینکاری و نیروهای ماشینکاری بررسی شد. در این تحقیق مشاهده شد ماشینکاری با ابزار کاربرد تنگستن با پوشش صافی سطحی بهتری

1- Chemical Vapour Deposition  
2- Physical Vapour Deposition

## 2- روش کار

## 1-1- پوشش‌دهی به روش لایه نشانی شیمیایی بخار

پوشش انتخاب شده برای نمونه مته موضوع این تحقیق، پوشش سه لایه TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> می‌باشد. رده<sup>1</sup> تنگستن کاربرد مته، K40 و ترتیب این پوشش از سمت زیر لایه تنگستن کاربرد به ترتیب زیر است:

(1) لایه داخلی: نیتريد تیتانیوم (TiN)

(2) لایه میانی: تیتانیوم کربن نیتريد (TiCN)

(3) لایه خارجی: اکسید آلومینیوم (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

شکل 1، شماتیک مته مورد نظر با زیر لایه از جنس تنگستن کاربرد رده K40 و ترتیب سه لایه پوششی را نشان می‌دهد.

پوشش نیتريد تیتانیوم به دلیل چسبندگی عالی به زیر لایه کاربرد تنگستن، به عنوان لایه اول انتخاب شد. به علاوه سازگاری بالاتر این لایه با کاربرد تنگستن باعث افزایش چقرمگی پوشش می‌گردد [1]. به علاوه این لایه در مقابل تشکیل گودال فرسایش در سطح براده مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهد [16]. لایه دوم TiCN انتخاب شده است. همان‌طوری که در مقدمه اشاره شد، تیتانیوم کربن نیتريد دارای خواص چسبندگی عالی بوده و مقاومت سایشی خوبی نیز دارد. لایه سوم اکسید آلومینیوم (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) انتخاب شده است. این لایه مقاومت به حرارت بسیار خوبی دارد و مانند سد حرارتی مانع از انتقال حرارت به لایه‌های پایین‌تر و کاربرد تنگستن می‌شود. ضمن اینکه این لایه مقاومت به سایش بسیار خوبی نیز دارد [1].

پوشش‌دهی از طریق CVD توسط واکنش شیمیایی بین گازهای مختلف انجام شد. شکل 2، شماتیک فرآیند پوشش‌دهی به روش CVD را نشان می‌دهد.

متغیرهای فرآیند پوشش‌دهی در جدول 1، ارائه شده است.

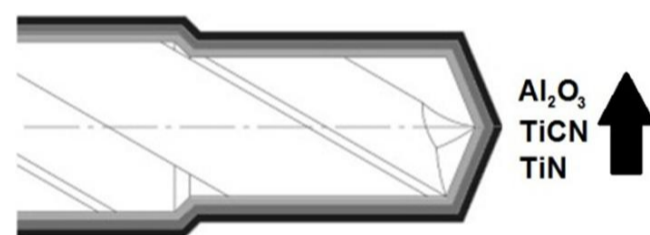


Fig. 1 Drill sketch with three layer coating TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

شکل 1 شماتیک مته با پوشش سه لایه TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

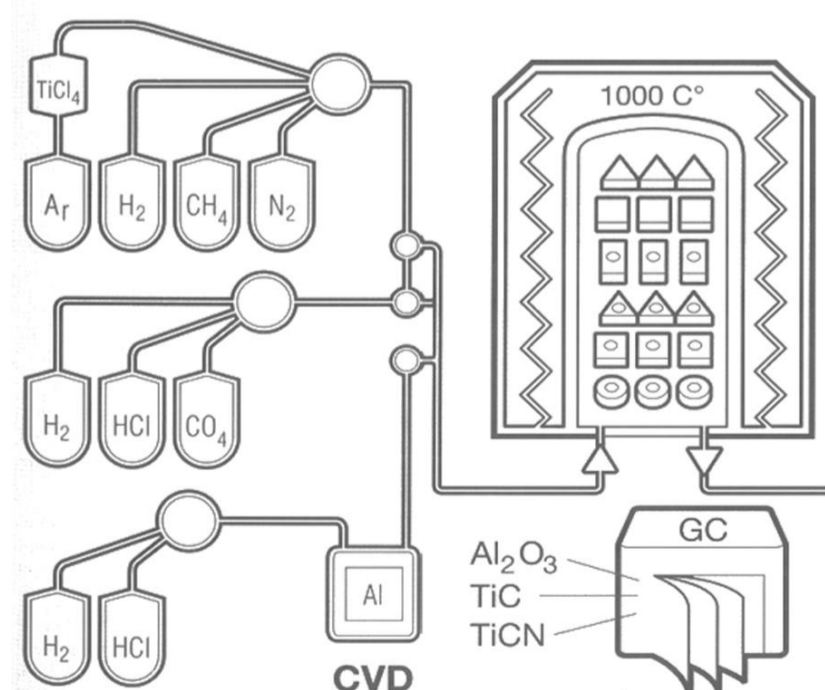


Fig. 2 Sketch of CVD coating process [1]

شکل 2 شماتیک فرآیند پوشش‌دهی به روش CVD [1]

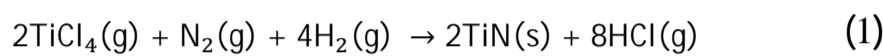
1- Grade

## جدول 1 متغیرهای فرآیند پوشش‌دهی

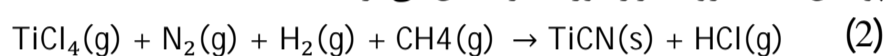
Table 1 Coating process parameters

مقدار	متغیرهای فرآیند
2	فشار داخل راکتور (atm)
1000	دمای راکتور (°C)
10	زمان پوشش‌دهی (h)

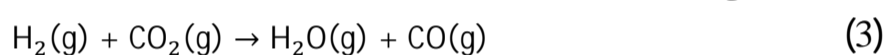
برای ایجاد پوشش نیتريد تیتانیوم (TiN)، تتراکلرید تیتانیوم (TiCl<sub>4</sub>) به همراه بخار نیتروژن و هیدروژن به داخل راکتور تزریق شد. این گازها در اثر دما و فشار اعمال شده در راکتور طی واکنش شیمیایی زیر نیتريد تیتانیوم تولید می‌گردد:



برای ایجاد پوشش تیتانیوم کربن نیتريد (TiCN)، بخار تتراکلرید تیتانیوم (TiCl<sub>4</sub>) به همراه بخار نیتروژن و هیدروژن و گاز متان به داخل راکتور تزریق شد. در اثر حرارت و دمای راکتور واکنش شیمیایی به صورت زیر انجام شده و پوشش TiCN روی ابزار مورد نظر اعمال می‌گردد:



برای تولید پوشش اکسید آلومینیوم (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)، کلرید آلومینیوم (AlCl<sub>3</sub>) به همراه گازهای دی‌اکسیدکربن (CO<sub>2</sub>) و هیدروژن (H<sub>2</sub>) استفاده شد. در اثر دما و فشار راکتور و در اثر ترکیب شیمیایی دی‌اکسید کربن و هیدروژن بخار H<sub>2</sub>O تولید می‌شود.



همزمان در اثر حرارت بالای محیط راکتور، کلرید آلومینیوم تصعید می‌شود و با بخار H<sub>2</sub>O حاصل شده از واکنش قبلی به صورت زیر واکنش شیمیایی داده و اکسید آلومینیوم تولید می‌شود:



نمونه مته مورد نظر به مدت ده ساعت و در دمای 1000 درجه سانتیگراد در راکتور CVD با ترتیب مورد نظر پوشش‌دهی شد. ضخامت کلی پوشش حدود 10 میکرون بود.

## 2-2- شناخت فرآیند عملیات سوراخکاری

شکل 3، نمای سه بعدی مدل کالیپر ترمز سمند را نشان می‌دهد.

ترکیب شیمیایی و درصد وزنی عناصر مختلف در جنس قطعه کار در جدول شماره 2، مشاهده می‌گردد.

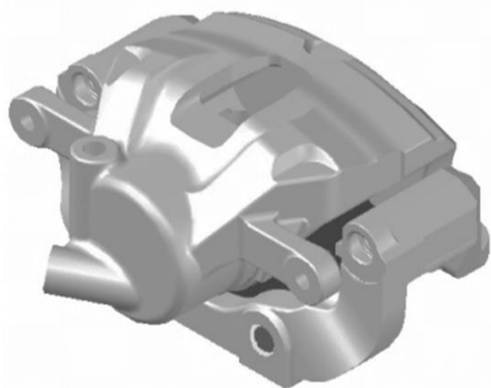


Fig. 3 Samand brake caliper 3D model [17]

شکل 3 نمای سه بعدی مدل کالیپر ترمز سمند [17]

جدول 2 درصد وزنی عناصر چدن گرافیت کرووی [18]

Table 2 Composition of spheroidal graphite cast iron [18]

عناصر	منیزیم	گوگرد	فسفر	منگنز	سیلیسیم	کربن
درصد وزنی	0.045	0.03	0.05	0.5	2.75	3.6

جدول 3 سرعت‌های برشی فرآیند سوراخکاری

Table 3 Cutting data of drilling process

مقدار	واحد	متغیر برشی
1400	دور بر دقیقه	دور اسپیندل (N)
280	میلی‌متر بر دقیقه	سرعت پیشروی (f)

سرعت برشی (V) و سرعت پیشروی (f) بهینه برای سوراخکاری قطعات چدن گرافیت کرووی با ابزار مته تنگستن کارباید به ترتیب در محدوده 55 تا 70 متر بر دقیقه و 0.2 تا 0.3 میلی‌متر بر دور می‌باشد [20]. بنابراین دور اسپیندل 1400 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 280 میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. عملیات خنک کاری به وسیله آب صابون از طریق دو لوله که در شکل 5، با شماره 3 مشخص شده‌اند، انجام شد.

### 2-3- عملیات سوراخکاری و اندازه‌گیری متغیرها

در ادامه این مقاله مته با پوشش سه لایه TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و مته بدون پوشش با علامت اختصاری P و U نامگذاری شده‌اند. با توجه به اینکه دستگاه سوراخکاری دارای دو اسپیندل بود، همزمان امکان تست هر دو نوع مته P و U وجود داشت. شکل 6، نحوه بستن مته در دستگاه نگه دارنده را نشان می‌دهد.

به منظور تعیین حداقل تعداد لازم انجام عملیات سوراخکاری جهت مشاهده سایش مقدار سایش مته بدون پوشش پس از سوراخکاری 500، 1000، 1500 و 2000 قطعه بررسی شد و مشاهده گردید تعداد 2000 قطعه برای اندازه‌گیری سایش مته و بقیه متغیرها مناسب‌تر است، زیرا در بازه‌های پایین‌تر میزان سایش مته قابل ملاحظه نبود. به این ترتیب، مته‌ها و قطعه پس از سوراخکاری 2000 قطعه از دستگاه باز شده و سایش مته‌ها با دستگاه اندازه‌گیری تصویری C2010<sup>1</sup> ساخت شرکت EASSON از کشور چین اندازه‌گیری شد. بزرگنمایی این دستگاه 120 برابر و قابلیت اندازه‌گیری با دقت 0.002 میلی‌متر را دارد [21]. به همین ترتیب در ادامه نیز میزان سایش سطح آزاد مته‌ها بعد از هر 2000 قطعه با این دستگاه اندازه‌گیری شد. قطر سوراخها با دستگاه C.M.M ساخت شرکت Leitz آلمان و صافی سطح سوراخ با دستگاه زبری‌سنج Marsurf M400<sup>2</sup> ساخت شرکت Mahr آلمان اندازه‌گیری شد [22،23].

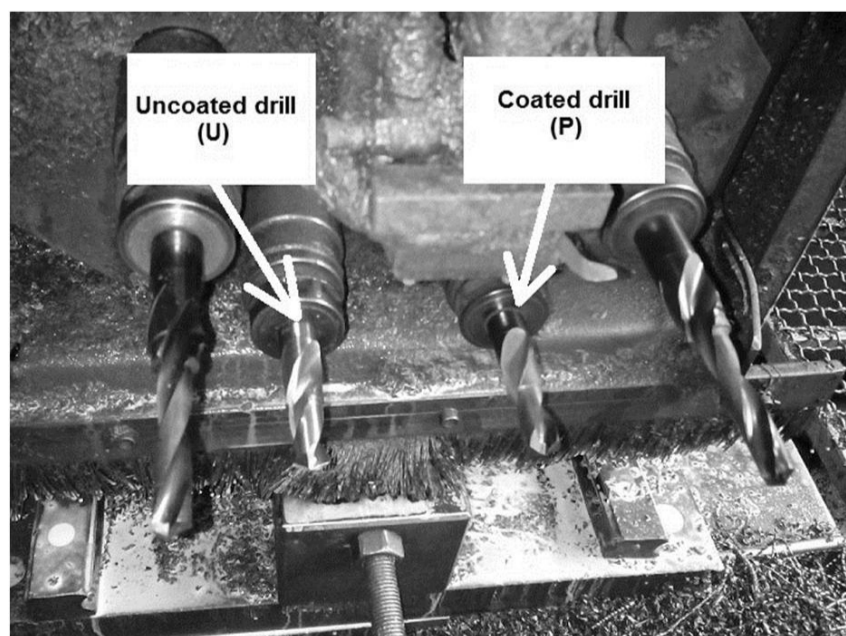


Fig. 6 Assembly of uncoated (U) and coated drills (P) on machine

شکل 6 بستن مته با پوشش P و مته بدون پوشش U روی دستگاه

مجموعه کالیپر از دو قسمت کالیپر و سیلندر تشکیل شده است که در شکل 3، قطعه فوقانی سیلندر و قطعه تحتانی کالیپر می‌باشد. در قسمت سیلندر، پیستون و در قسمت کالیپر لنت ترمزها قرار می‌گیرند. سوراخ مورد نظر که با نمونه مته سوراخکاری می‌شود در قسمت کالیپر قرار دارد.

موضع سوراخکاری مورد نظر در شکل 4 نشان داده شده است. روی کالیپر دو عدد سوراخ با قطر 12.3 است. تolerانس قطر این دو سوراخ  $\pm 0.1$  می‌باشد.

مته مورد نظر در این تحقیق به منظور سوراخکاری و پخ زنی سوراخ با قطر  $12.3 \pm 0.1$  و عمق 18 میلی‌متر روی کالیپر ترمز سمند مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به عمق و تolerانس سوراخکاری، این سوراخها با ابزار مته مخصوص که هم سوراخ و هم پخ 90 درجه را ایجاد کند، ماشینکاری می‌گردد. در فرآیند ماشینکاری کالیپر ترمز سمند، قبل از سوراخکاری سطوح دو طرف سوراخ مورد نظر با ابزارهای کفتراش ماشینکاری شده است. به این ترتیب هنگام ورود و خروج مته به داخل قطعه کار، پدیده غیرعادی به دلیل عدم مسطح بودن سطوح قطعه وجود نداشت.

برای ماشینکاری از ماشین مخصوص استفاده می‌شود. این ماشین سوراخکاری کالیپر ترمز سمند دارای چهار اسپیندل افقی می‌باشد. این چهار اسپیندل به یک الکتروموتور متصل بوده و تمام آنها با دور و سرعت پیشروی یکسان به حرکت در می‌آیند. در شکل 5، تصویر ماشین ابزار این ایستگاه مشاهده می‌شود.

این ماشین مخصوص دارای دو محور می‌باشد. محور اول، محور دورانی اسپیندل می‌باشد که مته روی آن بسته می‌شوند. این محور در شکل 5 با شماره 1 نشان داده شده است. جهت پیشروی محور دوم در جهت Y می‌باشد که در شکل با شماره 2 نشان داده شده است. در ابتدا و انتهای محور Y دو عدد میکروسویچ تعبیه شده است که محدوده حرکت ابتدا و انتهای این محور را کنترل می‌نماید. سرعت‌های برشی و پیشروی موجود دور اسپیندل و پیشروی در جدول 3، ارائه شده است.

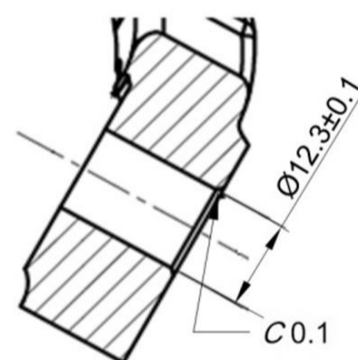


Fig. 4 Section of hole 12.3 mm of brake caliper drawing [19]

شکل 4 برش سوراخ با قطر 12/3 میلی‌متر از نقشه کالیپر ترمز [19]

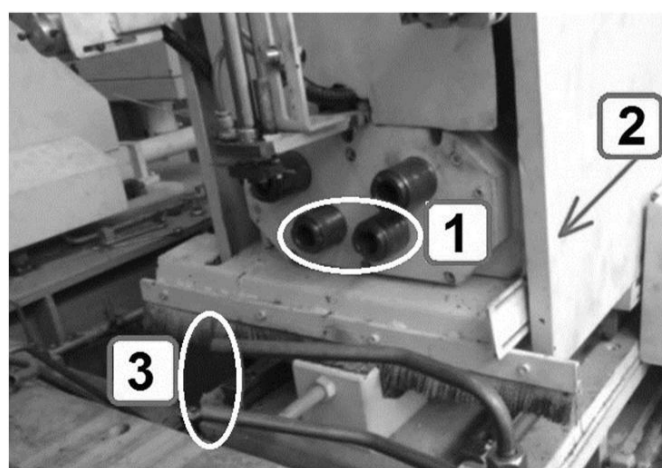


Fig. 5 Multi spindle machine for drilling Samand brake caliper

شکل 5 ماشین مخصوص چهار اسپیندل سوراخکاری کالیپر ترمز سمند

1- Vision Measuring Machine (V.M.M)

2- Roughness Tester



مته بدون پوشش بسیار کمتر بود. به نحوی که سایش سطح آزاد این مته پس از 2000 قطعه 0.04 میلی‌متر و پس از 48000 قطعه به 0.61 میلی‌متر رسیده است. علت مقاومت به سایش مته پوشش‌دار، مقاومت لایه‌های پوششی در مقابل سایش، مقاومت به حرارت و ضریب اصطکاک پایین‌تر نسبت به مته بدون پوشش می‌باشد.

نتایج اندازه‌گیری قطر سوراخ ماشینکاری شده با دو نمونه مته پوشش‌دار و بدون پوشش در شکل 9، مشاهده می‌گردد. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که قطر سوراخ با افزایش میزان سایش مته افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش قطر، افزایش نیروی محوری مته در نتیجه افزایش سایش سطح آزاد و سایش نوک مته می‌باشد. با سایش مته، نیروهای برشی و نیروی محوری نفوذ مته افزایش یافته و باعث فشار محوری و شعاعی به مته شده که همین عامل سبب انحراف مته از مرکز و در نتیجه افزایش قطر سوراخ می‌گردد [24].

همچنین نتایج اندازه‌گیری صافی سطح سوراخ ماشینکاری شده با هر دو نمونه مته بدون پوشش و پوشش‌دار در شکل 10، ارائه شده است. با ادامه عملیات سوراخکاری زبری سطح سوراخ‌های ایجاد شده افزایش می‌یابد. دلیل این پدیده، کند شدن لبه برشی و نوک مته می‌باشد که در نتیجه افزایش نیروهای برشی و افزایش لرزش‌های میکرونی را حین فرآیند سوراخکاری سبب شده و باعث افزایش زبری سطح می‌شود [24].

بدیهی است که مته بدون پوشش (با علامت اختصاری U) طول عمر بسیار کمتری نسبت به مته پوشش‌دار دارد. هدف آزمایش مته بدون پوشش

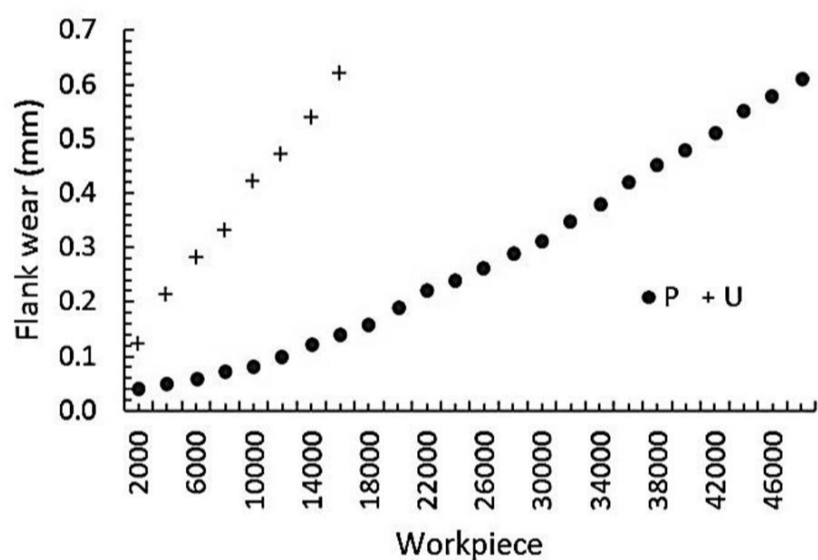


Fig. 8 Comparing flank wear of two drills according to drilled workpiece

شکل 8 مقایسه میزان سایش سطح آزاد دو نمونه مته بر حسب تعداد قطعه

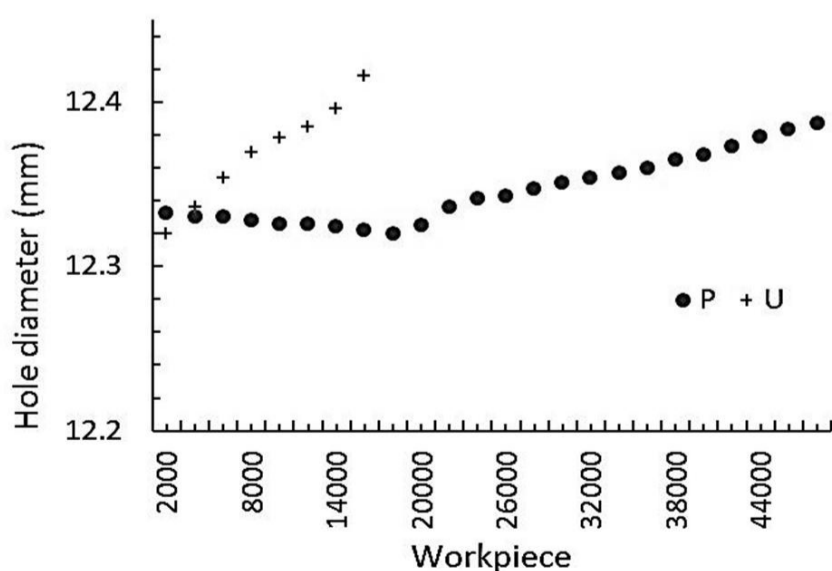


Fig. 9 Comparing diameter of holes with two drills according to drilled workpiece

شکل 9 مقایسه تغییرات قطر سوراخ ایجاد شده دو نمونه مته بر حسب تعداد قطعه

پوشش‌های مورد نظر و سطوح سایش بوسیله میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شد.

### 3- نتایج و بحث

طبق استانداردهای موجود بهترین معیار برای محاسبه سایش ابزار، سایش سطح آزاد<sup>1</sup> می‌باشد. اگر میزان سایش سطح آزاد مته به حد 0.6 میلی‌متر برسد مطابق استاندارد عمر مته به پایان رسیده است [16، 1].

اندازه سایش لبه آزاد مته بدون پوشش بعد از سوراخکاری 16000 به بیش از 0.6 میلی‌متر رسیده است. از نظر معیار سایش، عمر این مته به اتمام رسیده و ادامه سوراخکاری آن با ریسک شکست مواجه است، بنابراین می‌توان گفت عمر مته بدون پوشش 16000 قطعه است.

در شکل 7، تصاویر a، b و c به ترتیب میزان سایش سطح آزاد مته بدون پوشش پس از سوراخکاری 4000، 10000 و 16000 و تصاویر d، e و f به ترتیب میزان سایش سطح آزاد مته با پوشش TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> پس از سوراخکاری 16000، 32000 و 48000 قطعه را نشان می‌دهد.

همچنان‌که مشاهده می‌شود میزان سایش مته بدون پوشش پس از 16000 قطعه به 0.62 میلی‌متر (شکل 7c) رسید و این میزان برای مته با پوشش سه لایه تنها 0.14 میلی‌متر (شکل 7d) می‌باشد. بنابراین سوراخکاری با مته بدون پوشش پس از 16000 قطعه پایان یافت و سوراخکاری با مته پوشش سه لایه P ادامه یافت تا اینکه میزان سایش سطح آزاد این مته بعد از سوراخکاری 48000 قطعه به 0.61 میلی‌متر رسید (شکل 7f). بنابراین می‌توان گفت عمر مته با پوشش سه لایه 48000 قطعه است.

نتایج اندازه‌گیری سایش سطح آزاد در شکل 8، مشاهده می‌گردد. با توجه به این شکل سایش سطح آزاد مته‌ها با افزایش تعداد قطعه روند صعودی دارد. این مقدار برای مته بدون پوشش، پس از سوراخکاری 2000 کالیپر به بیش از 0.1 میلی‌متر و پس از 16000 قطعه به بیش از 0.6 میلی‌متر رسیده است. برای مته با پوشش سه لایه اندازه سایش در مقایسه با

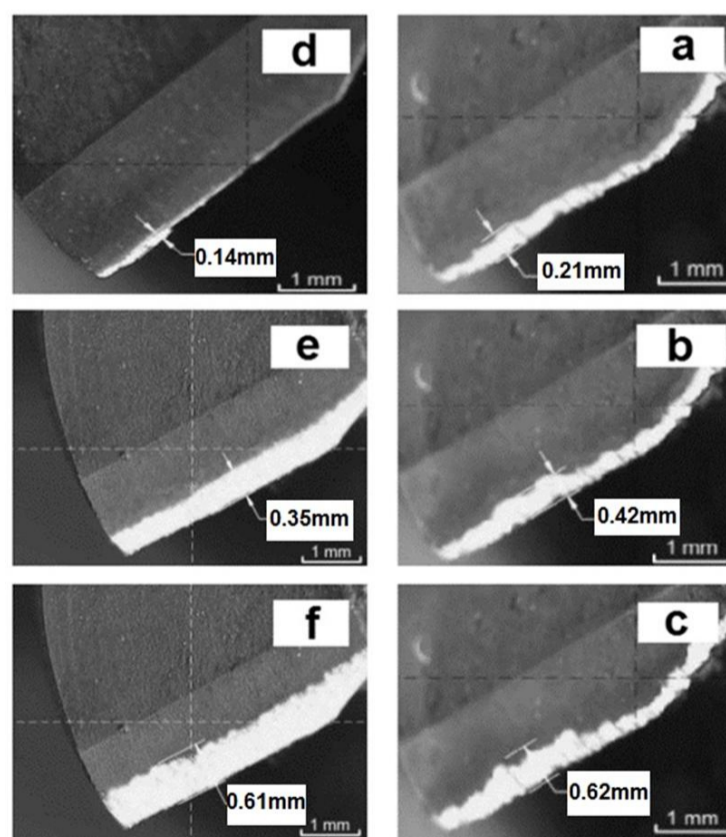


Fig. 7 Comparing flank wear of drills, right uncoated drill and left drill with three layer coating

شکل 7 مقایسه اندازه سایش سطح آزاد مته‌ها، سمت راست مته بدون پوشش و سمت چپ مته با پوشش سه لایه

1- Flank Angle Wear

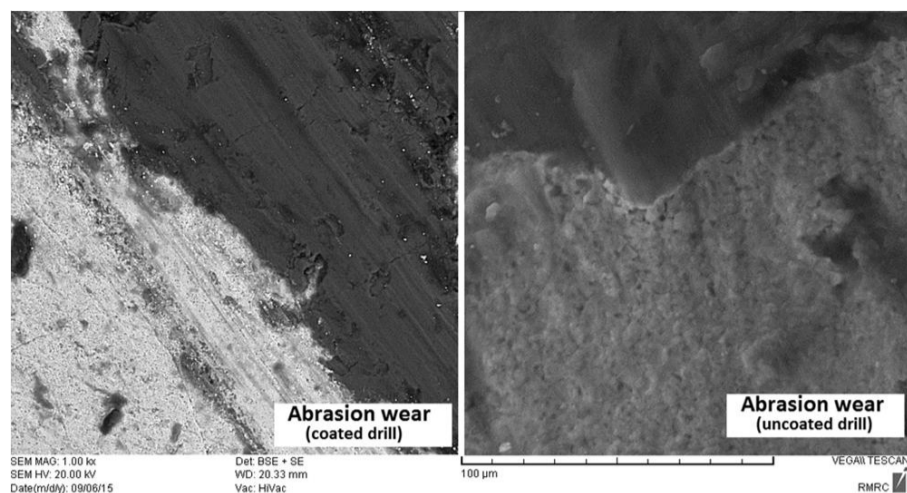


Fig. 11 SEM result of wear mechanism of two sample drills

شکل 11 تصاویر SEM مربوط به نوع مکانیزم سایش دو نمونه مته

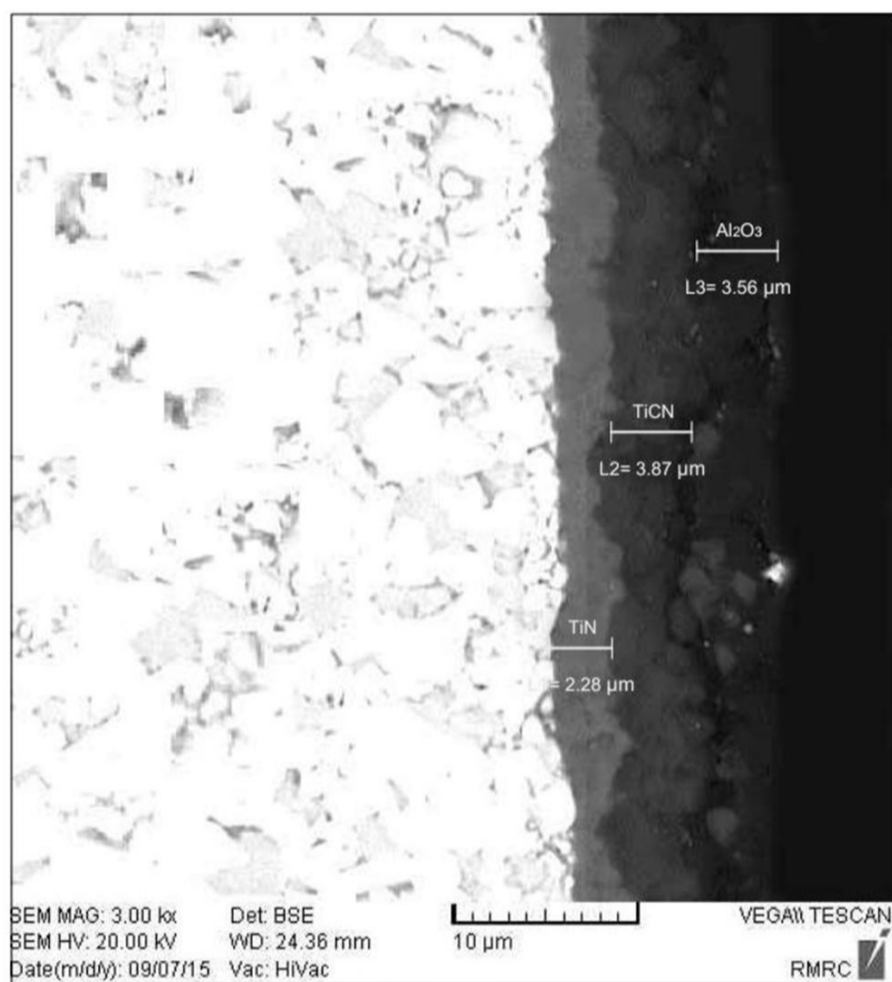


Fig. 12 SEM result of three layer coating TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

شکل 12 نتیجه SEM پوشش سه لایه TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) است که دارای سختی، مقاومت به سایش بالا و گرماسختی بالایی می‌باشد. علاوه بر آن وجود لایه تیتانیوم کربن نیتريد (TiCN) که دارای چسبندگی عالی و مقاومت به سایش خوبی در سطح آزاد ابزار ایجاد می‌کند، باعث افزایش طول عمر مته شده است. به علاوه مکانیزم سایش از نوع خراشیدگی می‌باشد

#### 5- سپاسگزاری

بدینوسیله از مدیریت محترم عامل شرکت الماسه‌ساز و پرسنل بخش پوشش‌دهی این شرکت که در مرحله پوشش‌دهی نمونه مته، نهایت همکاری را نمودند سپاسگزاری می‌شود.

از مدیریت محترم بخش ماشینکاری شرکت کروزر و پرسنل محترم آزمایشگاه اندازه‌گیری این شرکت که در مراحل آزمایش نمونه‌ها و اندازه‌گیری نهایت همکاری را نمودند تشکر و قدردانی می‌گردد.

#### 6- مراجع

- [1] S. J. Haghi, Modern Metal Cutting, a practical handbook, Tarrah Publication, Tehran, 2004. (in Persian)

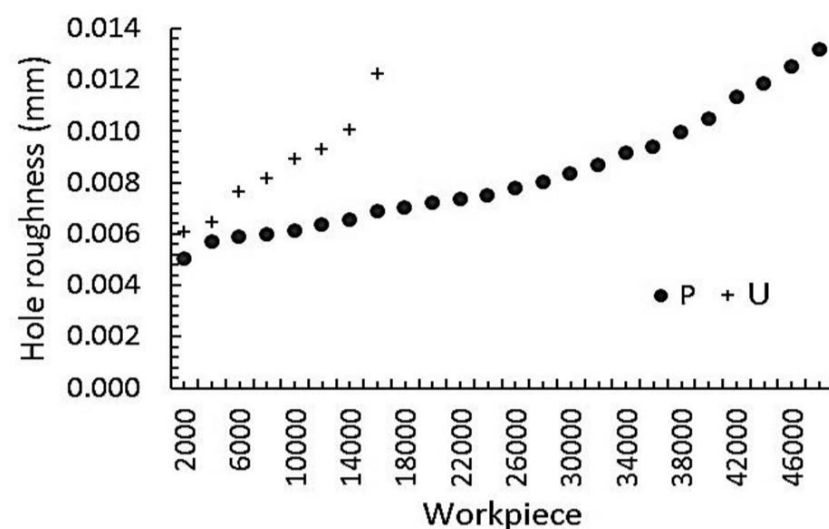


Fig. 10 Comparing hole roughness with two drills according to drilled workpiece

شکل 10 مقایسه تغییرات صافی سطح سوراخ ایجاد شده با دو نمونه مته بر حسب تعداد قطعه

مقایسه درصد تاثیر پوشش سه لایه TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> روی متغیرهای مورد نظر بود. با توجه به طول عمر این مته که 16000 قطعه گزارش شد و مقایسه آن با طول عمر 48000 قطعه مته با پوشش P در اینجا مشاهده می‌شود که تاثیر پوشش سه لایه روی متغیرهای مورد نظر بیش از سه برابر بوده است.

نتایج مشابهی در مورد اثر پوشش بر عملکرد ابزار برشی کاربرد تنگستن در ماشینکاری فولاد کربنی کروم بالا AISI D2 مشاهده شده است [25].

به علاوه نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد نوع پوشش بر توزیع دمای ابزار و براده در ماشینکاری فولاد برشی کم کربن موثر است و به علاوه پوشش Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> تاثیر زیادی بر کاهش دمای ابزار می‌باشد [26].

شکل 11، تصاویر SEM مربوط به سایش سطح آزاد ابزار را نشان می‌دهد. مکانیزم‌های متعددی برای سایش شامل از جمله: لبه انباشته، تغییر شکل پلاستیک، سایش شکافی، لب پریدگی و خراشیدگی<sup>1</sup> ارائه شده است [1].

با بررسی این تصاویر اثری از انواع دیگر سایش‌ها از جمله لبه انباشته، تغییر شکل پلاستیک، سایش شکافی، لب پریدگی و ... مشاهده نشد و تنها پدیده غالب سایش همان سایش ناشی از خراشیدگی بود [11]. با توجه به جنس قطعه کار که از نوع چدن داکتیل است انتظار سایش ناشی از خراشیدگی منطقی است؛ زیرا جنس چدن تمایلی به چسبیدن به ابزار ندارد. بنابراین سایش‌های ناشی از چسبندگی در ماشینکاری چدن اتفاق نمی‌افتد. شکل 12، تصویر SEM پوشش سه لایه ایجاد شده را نشان می‌دهد. علت تغییر رنگ در پوشش‌ها تفاوت در عدد اتمی هر پوشش می‌باشد. ضخامت لایه‌های TiN، TiCN و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به ترتیب برابر 2.28، 3.87 و 3.56 و ضخامت کل لایه‌ها 9.71 میکرون می‌باشد.

#### 4- نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که پوشش TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> باعث افزایش سه برابری در عمر مته سوراخکاری می‌شود. طول عمر مته پوشش دار 48000 قطعه (سوراخ) بود. تا انتهای طول مفید عمر مته قطر و صافی سطح سوراخ در محدوده تoleransi قرار داشت.

دلیل طول عمر بالای مته با این پوشش، وجود لایه اکسید آلومینیوم

1- Abrasion

- Hole quality assessment following drilling of metallic-composite stacks, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 51, pp. 569-578, 2011.
- [14] R. S. Kadu, G. K. Awari, C. N. Sakhale, J. P. Modak, Formulation and mathematical model for investigation of tool wears in boring machining on cast iron using carbide and CBN, *Procedia Materials Science*, Vol. 6, pp. 1710-1724, 2014.
- [15] H. Elmkhah, A. Abdollahzadeh, F. Mahboubi, A. S. Rohaghdam, K. H. Kim, Qualitative evaluation of mechanical properties of nanostructured TiAlN coating deposited on cutting tools by analysis of XRD results, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, pp. 61-66, 2014.
- [16] M. R. Razfar, *Fundamental of Machining and Cutting Tools*, Tehran: Amir Kabir University Publication, 2000. (in Persian فارسی)
- [17] Y. H. Kong, 3D Model of Samand brake caliper, Accessed on 20 August 2009; <http://www.mando.com>.
- [18] B. S. Kong, Specification of spheroidal graphite iron castings, Accessed on 7 March 2012; <http://www.mando.com>.
- [19] Y. H. Kong, 2D Drawing of Samand brake caliper, Accessed on 8 August 2009; <http://www.mando.com>.
- [20] Mapal competence drilling catalogue, Accessed on 15 January 2014; <http://www.mapal.com>.
- [21] Vision Measuring Machine Catalogue, Accessed on 2 April 2014; <http://www.easson-china.com>.
- [22] Leitz C.M.M Catalogue, Accessed on 25 September 2014; <http://www.leitz-metrology.com>.
- [23] MarSurf M 400 Catalogue, Accessed on 12 March 2013; <http://www.mahr.com>.
- [24] Guhring drilling troubleshooting, Accessed on 17 September 2012; <http://www.Guhring.com>.
- [25] A. K. Sahoo, B. Sahoo, A comparative study on performance of multilayer coated and uncoated carbide inserts when turning AISI D2 steel under dry environment, *Measurement*, Vol. 46, pp. 2695-2704, 2013.
- [26] H. Amirabadi, F. Jafarian, Effect of various coating on tool temperature distribution when machining low carbon steel, *Production and Manufacturing engineering conference*, Tabriz, Septembet 2010. (in Persian فارسی)
- [2] I. Ciftci, Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools, *Tribology International*, Vol. 39, pp. 565-569, 2006.
- [3] A. Bhatt, H. Attia, R. Vargas, V. Thomson, Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718, *Tribology International*, Vol. 43, pp. 1113-1121, 2010.
- [4] H.G. Prengel, A new class of high performance PVD coatings for carbide cutting tools, *Surface and coatings technology*, Vol. 139, pp. 25-34, 2001.
- [5] M. T. Laugier, Adhesion of TiC and TiN coatings prepared by chemical vapour deposition on WC-Co-based cemented carbides, *Journal of materials science*, Vol. 21, pp. 2269-2272, 1986.
- [6] S. M. Oh, B. G. Rhee, Wear behaviors of ceramics TiN, TiC and TiCN with arc ion plating, *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 12, pp. 1904-1911, 2003.
- [7] T. Cselle, A. Barimani, Today's application and future development of coatings for drills and rotating cutting tools, *Surface and coating technology*, Vol. 76-77, pp. 712-718, 1995.
- [8] T. I. Selinder, M. E. Sjostrand, M. Nordin, M. Larsson, A. Ostland, Performance of PVD TiN/TaN and TiN/NbN superlattice coated cemented carbide tools in stainless steel machining, *Surface and coatings technology*, Vol. 105, pp. 51-55, 1998.
- [9] K. Tonshoff, B. Karpuschewski, A. Mohfeld, T. Leyendecker, G. Erkens, H.G. Fur, R. Wenke, Performance of oxygen-rich TiALON coatings in dry cutting applications, *Surface and coatings technology*, Vol. 108-109, pp. 535-542, 1998.
- [10] C. Ducros, V. Benevet, F. Sanchette, Deposition, characterization and machining performance of multilayer PVD coatings on cemented carbide cutting tools, *Surface and coatings technology*, Vol. 163-164, pp. 681-688, 2003.
- [11] S. C. Santos, W. F. Sales, F. J. Silva, S. D. Franco, M. B. Silva Tribological characterisation of PVD coatings for cutting tools, *Surface and coatings technology*, Vol. 184, pp. 141-148, 2004.
- [12] S. Sharif, E.A. Rahim, Performance of coated- and uncoated-carbide tools when drilling titanium alloy Ti6Al4V, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 185, pp. 72-76, 2007.
- [13] I. S. Shyha, S. L. Aspinwall, S. Bradely, R. Perry, P. Harden, D. Dawson,