



فرزکاری مارپیچ فولاد سردکاری شده AISI D2 با ابزار کاربیدی PVD تحت شرایط خشک

نوید ملارمضانی^۱، حجت الله رنجبر^۱، محمدحسین صادقی^{۲*}، امیر راستی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، Sadeghim@modares.ac.ir

چکیده

در پژوهش حاضر با استفاده از فرآیند نوین فرزکاری مارپیچ بر روی فولاد AISI D2 با سختی ۵۲ راکول سی سوراخ هایی ایجاد گردید. فرآیند فرزکاری مارپیچ تحت دو نوع پوشش و دو نوع هندسه متفاوت صورت گرفت. برای دستیابی به مقاومت به سایش مناسب، از پوشش های TiAlN و TiN که به روش PVD پوشش گذاری شده اند، استفاده شد. تمام آزمایش ها در حالت خشک و بدون حضور روان کار صورت گرفت. سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش برای هر دو پوشش یکسان و به ترتیب ۵۰ میلی متر بر دقیقه، ۰/۱ میلی متر بردندانه و ۰/۱ میلی متر، در نظر گرفته شد. پارامترهای بهینه ی ماشین کاری، از آزمایش های اولیه و پیشینه ی پژوهش، به دست آمد. با هر پوشش ۴ آزمایش صورت گرفت، به طوری که در مجموع ۱۲ آزمایش انجام شد. نتایج حاکی از این بود که نیرو و زمان ماشین کاری برای هر دو پوشش مشابه است ولی سایش ابزار در پوشش TiAlN تقریباً با نرخ یکنواخت و شیب کمتری افزایش می یابد. زبری سوراخ های حاصل شده از پوشش TiAlN تقریباً یکسان بود و به عبارتی دیگر فرآیند ماشین کاری با پوشش TiAlN از تکرارپذیری بالاتری برخوردار بود. همچنین مشاهده شد، با استفاده از ابزار سرکروی می توان به کمترین مقدار سایش و بهترین کیفیت دست یافت.

کلید واژگان: فرزکاری مارپیچ، پوشش PVD، سایش ابزار، ماشین کاری خشک، ماشین کاری سخت

Helical milling of cold-work AISI D2 steel with PVD carbide tool under dry conditions

Navid Molla Ramezani, Hojjatollah Ranjbar, Mohammad Hossein Sadeghi*, Amir Rasti

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, Sadeghim@modares.ac.ir

ABSTRACT

In the current study, some holes were created on AISI D2 steel using the novel helical milling process. The helical milling process was performed using two different alloys (TiAlN and TiN) and two geometries of the carbide tool. To reach a suitable wear resistance, the TiAlN and TiN were used as tool coating by PVD process. The experiments were performed on similar conditions of cutting speed, feed rate and depth of cut of 50 m/s, 0/1 mm/tooth and 0/1 mm, respectively. For each state, four different samples were milled. The results indicated that the machining time and force were similar for both coatings. On the contrary, in TiAlN coating, wear of the tool was increased with uniform rate and less slope than TiN. Furthermore, the generated holes demonstrated similar roughness for TiAlN sample which in fact shows the higher repeatability of the milling process with TiAlN coated tool.

Keywords: Dry Machining, Hard Machining, Helical Milling, PVD Coating, Tool Wear.

۱- مقدمه

نیتراید مکعبی^۱ و سرامیک، دارای مقاومت به سایش پایین تری می باشند. از این رو، برای بهبود مقاومت به سایش، ابزارهای کاربیدی را با مواد سختی که دارای مقاومت به سایش بالایی هستند، پوشش دهی می کنند. این به گونه ای است که هر چه سختی و دمای عملکرد پوشش ها بالاتر باشد، مقاومت به سایش افزایش می یابد. علاوه بر این، پوشش ها به دلیل خواص محافظتی و روان کاری بین ابزار و قطعه کار، موجب کاهش اصطکاک می شوند؛ بنابراین با افزایش قابلیت های تریبولوژیکی، می توان کاربردهای مهمی چون ماشین کاری خشک را بهبود بخشید [۳،۲].

علاوه بر جنس، ضخامت پوشش و روش پوشش گذاری هم از اهمیت بالایی برخوردار است. پوشش گذاری بر روی ابزارهای برشی از روش های

در سال های اخیر، محققان زیادی بر روی ابزارهای برشی مطالعه کردند تا به راندمان های بالایی در ماشین کاری قطعات دست یابند. به طوری که این مطالعه ها سبب توسعه ی ابزارهای گوناگونی شده است تا علاوه بر عمر ابزار، کیفیت و صافی سطح قطعه کار را نیز بهبود بخشد. کاربیدها نوعی از ابزارهای برشی هستند که در عین هزینه مناسب، دارای ویژگی هایی نظیر سختی بالا، انبساط حرارتی پایین، ضریب الاستیسیته و هدایتی بالا می باشند. به همین جهت، این ابزارها به عنوان رایج ترین و پرکاربردترین ابزار، برای ماشین کاری فولادها و آلیاژهای ریخته گری محسوب می شوند [۱].

ابزارهای کاربیدی در مقایسه با ابزارهای پیشرفته تری همچون برن

1. cubic boron nitride

Please cite this article using:

N. Molla Ramezani, H. Ranjbar, M.H. Sadeghi, A. Rasti, Helical milling of cold-work AISI D2 steel with PVD carbide tool under dry conditions, Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No. 13, pp. 203-206, 2015 (in Persian فارسی)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

نمودند، نوع پوشش بر روی سختی حاصل از ماشین‌کاری مؤثر است؛ و همچنین دریافتند، در صورت دستیابی به قابلیت تریبولوژیکی بالا در بین ابزار و قطعه‌کار می‌توان عمر ابزار و یکپارچگی سطح را در فرزکاری سخت بهبود بخشید.

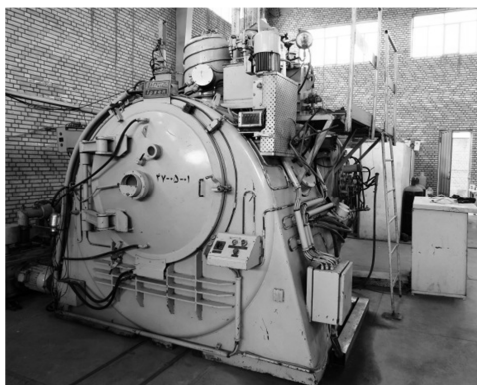
بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد، بر روی مشخصه‌های پوشش‌ها در ماشین‌کاری سخت، پژوهش‌های گسترده‌ای صورت گرفته است اما با این وجود، تاکنون گزارشی در خصوص پوشش‌ها در فرزکاری مارپیچ فولاد سخت منتشر نگردیده است. به همین جهت در پژوهش حاضر، فرزکاری مارپیچ بر روی فولاد سخت شده AISI D2 با سختی ۵۲ راکول‌سی مورد مطالعه تجربی قرار گرفت و سایش ابزار، زبری سطح سوراخ تولیدی در این فرایند بررسی شدند.

۲- کار تجربی

۲-۱- مواد و تجهیزات

در پژوهش حاضر از فولاد سخت سردکاری شده AISI D2 (ASTM A681) با سختی 52 ± 2 راکول‌سی به‌عنوان قطعه‌کار استفاده شد. ترکیب شیمیایی این فولاد که با آنالیز کوانتومی‌تری نشری به‌دست‌آمده در جدول ۱ ارائه شده است. جهت دستیابی به سختی مورد نظر قطعه‌کار، تحت عملیات حرارتی خلأ قرارگرفت. عملیات حرارتی سخت‌کاری تحت خلأ فرایندی است که در آن آستنیتی کردن فولاد تحت خلأ و کوئنچ آن با گاز خنثی مانند نیتروژن یا آرگون انجام می‌شود. این روش دارای مزایای قابل‌توجهی است. از این مزایا می‌توان به یکنواختی سختی از سطح به مغز، کاهش شدید تنش پسماند حاصل از عملیات حرارتی، کاهش شدید اعوجاج و افزایش چقرمگی اشاره کرد. در شکل ۱ کوره‌ی مورد استفاده برای این عملیات حرارتی نشان داده شده است. جهت ماشین‌کاری از اینسرت‌هایی با پوشش TiN و TiAlN در دو هندسه‌ی تخت و سر کروی استفاده گردید. عرض حاصل از اینسرت‌ها پس از قرارگیری در ابزارگیر برابر ۸ میلی‌متر بود. اینسرت‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

سایش ابزارهای برشی معمولاً به‌صورت تدریجی رشد می‌کند و به عوامل



شکل ۱ کوره عملیات حرارتی تحت خلأ

جدول ۱ آنالیز شیمیایی فولاد AISI D2

نوع عنصر	وانادیوم	مولیبدن	کروم	سیلیسیوم	کربن
درصد	۰/۹۰٪	۰/۸۰٪	۱۲/۰۰٪	۰/۳۰٪	۱/۵۰٪

6. Holder

مختلفی ازجمله رسوب‌دهی بخار شیمیایی^۱ (CVD) و رسوب‌دهی بخار فیزیکی^۲ (PVD) تشکیل می‌گردد که هرکدام از این روش‌ها از ویژگی‌های مختص به خود برخوردارند. از این ویژگی‌ها می‌توان به این مورد اشاره نمود که پوشش‌دهی با روش PVD و CVD به‌ترتیب سایش کمتر ابزار و صافی سطح بهتری را در پی خواهند داشت [۴].

از طرفی دیگر با توجه به رشد و توسعه فناوری، علاوه بر ابزارها و ماشین‌آلات، قطعات تولیدی هم‌دست خوش تغییرات زیادی شده‌اند تا بتوانند کاربردهای بهتری از خود نشان دهند. یکی از این تغییرات مهم، افزایش سختی قطعات تولیدی است که این موضوع خود چالش‌هایی را در ماشین‌کاری این قطعات به‌دنبال داشته است. از این‌رو، ماشین‌کاری این مواد همواره، به یک موضوع مورد توجه تولیدات صنعتی و تحقیقات علمی در سراسر جهان تبدیل شده است [۵،۶].

اوکادا و همکارانش [۷] عملکرد ابزارهای کاربیدی PVD را در فرزکاری سخت^۳، بررسی کردند. آن‌ها بر روی ۴ نوع پوشش ابزار کاربیدی، TiN, TiCN, TiAlN و TiAlN/TiAlCrN مطالعه کردند و دریافتند در ابزارهای کاربیدی با پوشش TiAlN, TiN, TiCN دمای ناحیه برش به دلیل سایش ابزار، افزایش می‌یابد ولی در مقابل دمای برش در ابزار کاربیدی با پوشش TiAlN/AICr (به دلیل سایش کم) مقدار اندکی افزایش می‌یابد. همچنین، آن‌ها بیان کردند با کاهش سایش هم می‌توان نتیجه گرفت، دمای حاصل بین ابزار و قطعه کار در حالت ثابتی قرار دارد که این امر سبب ثبات دمای ماشین‌کاری و جلوگیری از شوک حرارتی می‌گردد. به گونه‌ای که این شوک‌های حرارتی اثر نامطلوبی در شکست ابزار می‌گذارد، زیرا موجب شکل‌گیری میکرو ترک‌هایی می‌گردند که با افزایش این میکرو ترک‌ها، ابزار به‌طور ناگهانی دچار شکست می‌گردد.

اصلان [۸]، عملکرد ابزارهای کاربیدی را در فرزکاری فولاد سخت‌کاری شده X210 Cr12 مورد مطالعه قرارداد. هدف آزمایش وی بررسی سایش ابزارهای کاربیدی با پوشش TiC, TiCN+TiAlN, TiCN بود. اصلان بیان کرد، ابزارهای کاربیدی با پوشش TiAlN از پوشش TiCN بهتر عمل می‌کنند. به‌طوری‌که سایش ابزارهای کاربیدی را با پوشش TiCN+TiAl برابر ۰/۷۲ میلی‌متر، برای پوشش TiCN برابر ۰/۷۹ میلی‌متر و برای پوشش TiAlN برابر ۰/۵۵ میلی‌متر اعلام نمود.

لیو [۹] بر روی ابزارهای تک‌لایه‌ای TiN و نانو پوشش‌های چندلایه‌ای TiAlN/AICrN مطالعه نمود. وی بیان کرد، شدت سایش و شکست ابزار بدون پوشش نسبت به ابزار پوشش‌دار بالاتر است. همچنین دریافت، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی، سختی و اکسیداسیون پوشش در طی ماشین‌کاری تأثیر قابل‌توجهی بر مقاومت ابزار در برابر مکانیسم‌های پوششی خواهند داشت. رابینوویچ و همکارانش [۱۰] بر روی پوشش‌های ابزارهای برشی مطالعه کردند و عنوان کردند، پوشش TiAlN موجب شکل‌گیری لایه محافظتی آلومینا میان ابزار و فولاد ضدزنگ می‌شود که این لایه سبب کاهش اصطکاک، کاهش ترک و کاهش سایش ابزار شده و نهایتاً موجب بهبود عمر ابزار می‌گردد.

ولدهیوس و همکارانش [۱۱] بر روی سازگاری تریبولوژی^۴ و بهبود بهره‌وری ماشین‌کاری بر روی فولاد سخت مطالعه نمودند. آن‌ها در مطالعه‌ی خود از پوشش‌های مختلف و ابزار کاربیدی سرکروی^۵ استفاده کرده و بیان

1. Chemical vapor deposition
2. Physical vapor deposition
3. Hard Milling
4. Tribological Compatibility
5. Ball Nose

میلی‌متر بودند و یا به عبارتی دیگر (با توجه به ابعاد قطعه کار) تمامی سوراخ راه به در بودند. جنس پوشش‌ها به همراه هندسه‌هایشان در جدول ۲ مشخص شده است.

به جهت بالا بردن دقت، آزمایش‌ها هرکدام ۴ بار تکرار شد و میانگین آن‌ها به صورت خروجی گزارش شد. در مجموع ۱۲ آزمایش طرح‌ریزی و انجام شد. علاوه بر این، به دلایل زیست‌محیطی و اقتصادی تمام آزمایش‌ها در حالت خشک و بدون حضور روان‌کار صورت گرفت.

۳- نتایج و بحث

در پژوهش حاضر، سایش ابزار و زبری سطح حاصل از سوراخ‌های تولیدی مورد بررسی قرار گرفت که در ادامه هرکدام مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳-۱- سایش ابزار

وجود اصطکاک و واکنش شیمیایی بین فولاد سخت‌کاری شده و ابزار، موجب می‌شود عناصری از فولاد به ابزار و بالعکس انتقال یابند. این انتقال و نفوذ عناصر سبب تولید زیاد براده، سایش، شکست ناگهانی ابزار و کاهش کیفیت سطح ماشین‌کاری شده، می‌گردد. علاوه بر این، ماشین‌کاری فولاد سخت سبب افزایش دما، بین ابزار و قطعه‌کار می‌گردد، که این حرارت بالای تولید شده، موجب ترویج پدیده‌های حرارتی مربوط به سایش می‌شود [۱۱].

مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی سایش در جدول ۲ نشان می‌دهد، سایش اینسرت کاربیدی تخت با پوشش TiN در مقایسه با سایش اینسرت کاربیدی تخت با پوشش TiAlN ۱/۳ برابر کمتر است. همچنین سایش اینسرت کاربیدی تخت با پوشش TiAlN در مقایسه با اینسرت کاربیدی سرکروی با پوشش TiAlN به مقدار قابل‌توجهی یعنی ۸/۴ برابر کمتر است. این کاهش شدید به دلیل درگیری کم ابزار سرکروی با قطعه‌کار و شعاع لبه‌ی اینسرت است.

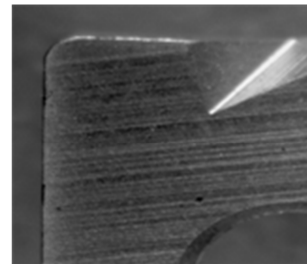
اینسرت کاربیدی با پوشش TiAlN دارای ویژگی منحصربه‌فردی بودند. به‌گونه‌ای برخلاف اینسرت دیگر، مقدار سایش از سوراخ اول تا سوراخ چهارم، با شیب بسیار کمی افزایش یافت. دلیل این موضوع را می‌توان به بالا بودن سختی، دمای عملکرد و ثبات دمایی این نوع پوشش مربوط دانست. علاوه بر این به دلیل وجود آلومینیوم در این نوع پوشش، امکان ایجاد لایه سخت آلومینیوم اکسید وجود دارد. به‌گونه‌ای که این لایه به‌عنوان یک محافظ عمل کرده و از سایش ابزار جلوگیری می‌کند. سایش اینسرت‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.

با این وجود لازم به ذکر است، در حالت کلی، سایش مشاهده شده در فرآیند مورد آزمایش، به دلیل درگیری کمتر اینسرت‌ها بسیار کم و قابل قبول است که این امر موجب افزایش عمر ابزار و به طبع کاهش هزینه‌ها و زمان مربوط به تعویض ابزار می‌گردد.

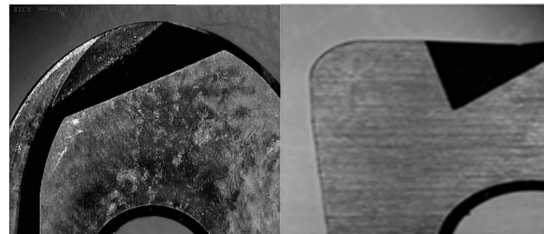
۳-۲- زبری سطح

برای اندازه‌گیری زبری سطح از دستگاه زبری‌سنج ماهر مدل PS1 استفاده گردید. زبری سطح براساس معیار Ra گزارش گردید که برابر با انتگرال

شماره	نوع پوشش	نوع هندسه	سایش ابزار mm	زبری سطح mm
۱	TiN	تخت	۰/۱۴۰	۰/۶۲۰
۲	TiAlN	تخت	۰/۱۸۴	۰/۴۷۵
۳	TiAlN	سرکروی	۰/۰۲۲	۰/۲۰۹



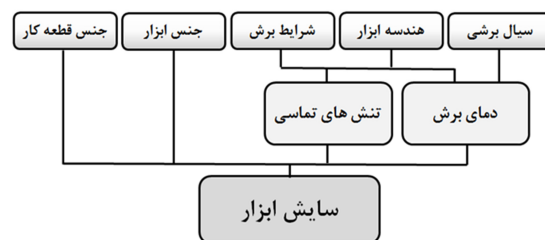
(الف)



(ج)

(ب)

شکل ۲ اینسرت‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها (الف) اینسرت کاربیدی تخت با پوشش TiN (ب) اینسرت کاربیدی تخت با پوشش TiAlN (ج) اینسرت کاربیدی سرکروی با پوشش TiAlN



شکل ۳ عوامل مؤثر بر سایش ابزار [۴]

زیادی بستگی دارد. از این عوامل می‌توان به قطعه‌کار، مایعات برشی، پارامترهای ماشین‌کاری (سرعت، نرخ پیشروی و عمق برش)، پارامترهای ماشین‌ابزار و فرآیند اشاره نمود [۴]. در شکل ۳ عوامل مؤثر بر سایش نشان داده شده‌اند.

سایش انواع بسیار مختلفی دارد که هرکدام به دلایل مختص به خود ایجاد می‌گردند. با این وجود، معمولاً سایش لبه آزاد^۱ برای پیش‌بینی عمر و پایداری ابزار ترجیح دارد. به همین جهت، در پژوهش حاضر سایش لبه‌ی آزاد اندازه‌گیری گردید.

۲-۲- روش انجام آزمایش

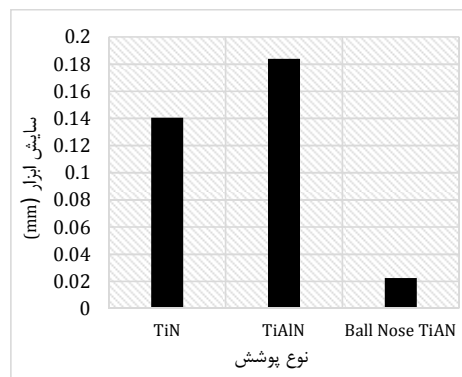
جهت مقایسه پوشش‌ها و هندسه‌ی اینسرت‌ها پارامترهای ماشین‌کاری یکنواخت در نظر گرفته شد. بدین منظور، جهت دستیابی به پارامترهای بهینه‌ی ماشین‌کاری، از آزمایش‌های اولیه و پیشینه‌ی پژوهش، استفاده گردید. به‌گونه‌ای که سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برشی برای فرآیند فرزکاری مارپیچ به ترتیب، ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه، ۰/۱ میلی‌متر بر دندان و ۰/۱ میلی‌متر انتخاب گردید. هرکدام از آزمایش‌ها تحت وجود پیش‌مته انجام شدند. به‌طوری‌که ابتدا سوراخی در قطعه کار با قطر ۵/۲ میلی‌متر ایجاد گردید و سپس توسط فرآیند فرزکاری مارپیچ، سوراخ به قطر ۱۰/۵ میلی‌متر تبدیل شد. همچنین لازم به ذکر است، طول تمامی سوراخ‌ها تولیدی ۱۲

1. Flank wear

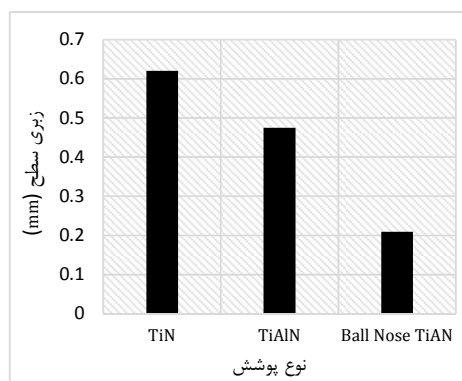
۱. به‌طور عمومی پوشش‌ها سبب افزایش مقاومت در برابر اکسیداسیون، بهبود روغن‌کاری، محافظت ابزار در برابر انتقال عناصر، کاهش تغییرات دمایی در ابزار و کاهش ترک‌خوردگی در ابزار می‌شوند.
۲. با استفاده از پوشش TiAlN (به دلیل کاهش اصطکاک) می‌توان به کیفیت سطح بهتری دست یافت.
۳. سایش اینسرت کاربیدی با پوشش TiAlN به دلیل بالا بودن سختی، دمای عملکرد و ثبات دمایی، به شیب کمی افزایش می‌یابد.
۴. به دلیل درگیری کمتر و شعاع لبه برش، کمترین سایش و کمترین زبری سطح حاصل از فرآیند فرزکاری مارپیچ مربوط به اینسرت سرکروی با پوشش TiAlN بود.
۵. به دلیل یکنواختی نسبی سایش در پوشش‌های TiAlN می‌توان سورخ‌هایی با زبری یکسان تولید نمود و به عبارت دیگر می‌توان با استفاده از این پوشش به تکرارپذیری بالایی دست یافت.

۵- مراجع

- [1] Liu, Z. Q. Xing Ai, Hui Zhang, Z. T. Wang, and Yi Wan. Wear patterns and mechanisms of cutting tools in high-speed face milling, *Journal of materials processing technology*, Vol 129, No. 1, pp 222-226, 2002.
- [2] Halil Çalışkan, Cahit Kurbanoğlu, Peter Panjan, Miha Čekada, and Davorin Kramar, Wear behavior and cutting performance of nanostructured hard coatings on cemented carbide cutting tools in hard milling, *Tribology International*. Vol 62, pp 215-222, 2013.
- [3] Sahoo, Ashok Kumar, and Bidyadhar Sahoo, Performance studies of multilayer hard surface coatings (TiN/TiCN/Al₂O₃/TiN) of indexable carbide inserts in hard machining: Part-II (RSM, grey relational and techno economical approach), *Measurement*, Vol 46, No. 8, pp 2868-2884, 2013
- [4] Kalpakjian, Serope, Steven R. Schmid, and Chi-Wah Kok. *Manufacturing processes for engineering materials*. Pearson-Prentice Hall, 2008.
- [5] Davim, J. Paulo, ed. *Machining of hard materials*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [6] Jianxin, Deng, Zhou Jiantou, Zhang Hui, and Yan Pei, Wear mechanisms of cemented carbide tools in dry cutting of precipitation hardening semi-austenitic stainless steels, *Wear*, Vol 270, No. 7, pp 520-527, 2011.
- [7] Okada, Masato, Akira Hosokawa, Ryutaro Tanaka, and Takashi Ueda, Cutting performance of PVD-coated carbide and CBN tools in hardmilling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol 51, No. 2, pp 127-132, 2011.
- [8] Aslan, E, Experimental investigation of cutting tool performance in high speed cutting of hardened X210 Cr12 cold-work tool steel (62 HRC), *Materials & design*, Vol 26, No.1, pp 21-27, 2005.
- [9] Liew, Willey Yun Hsien, Low-speed milling of stainless steel with TiAlN single-layer and TiAlN/AlCrN nano-multilayer coated carbide tools under different lubrication conditions, *Wear*, Vol 269, No. 7, pp 617-631, 2010.
- [10] Fox-Rabinovich, G. S., S. C. Veldhuis, G. K. Dosbaeva, K. Yamamoto, A. I. Kovalev, D. L. Wainstein, I. S. Gershman, L. S. Shuster, and B. D. Beake, Nanocrystalline coating design for extreme applications based on the concept of complex adaptive behavior, *Journal of Applied Physics*, Vol 103, No. 8 (2008): 083510.
- [11] Veldhuis, S. C., G. K. Dosbaeva, and K. Yamamoto, Tribological compatibility and improvement of machining productivity and surface integrity, *Tribology International*, Vol 42, No. 6, pp 1004-1010, 2009.



شکل ۴ مقایسه سایش اینسرت‌های آزمایش برحسب میلی‌متر



شکل ۵ مقایسه زبری اینسرت‌های آزمایش برحسب میکرومتر

منحنی زبری به‌دست آمده در طول اندازه‌گیری شده است. روش اندازه‌گیری به‌گونه‌ای بود که زبری هر سورخ در سه نقطه اندازه‌گیری شد و سپس میانگین سه اندازه‌گیری به‌عنوان زبری سطح عنوان گردید. زبری سورخ تولیدی با استفاده از پوشش TiAlN نسبت به پوشش TiN بهبود یافت. به‌طوری‌که زبری اینسرت کاربیدی تخت با پوشش TiN در مقایسه با اینسرت کاربیدی تخت با پوشش TiAlN و اینسرت کاربیدی سرکروی با پوشش TiAlN به‌ترتیب ۲۳/۳۸ درصد و ۲۹/۶۶ درصد کاهش یافت. این کاهش زبری را به‌دلیل کاهش اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار است. این به‌گونه‌ای است که با کاهش اصطکاک، واکنش‌های شیمیایی نظیر اکسیداسیون کمتر شده و سطح از پرداخت بهتری برخوردار می‌شود. علاوه بر این با توجه خاصیت خود روان‌کاری بهتر پوشش TiAlN (به دلیل تشکیل بهتر تیری بو فیلم) می‌توان به زبری سطح کمتری دست یافت.

زبری حاصل از اینسرت سرکروی به دلیل وجود شعاع ابزار، بهبود قابل توجهی یافت. لازم به ذکر است زبری سطح سورخ تولیدی به‌وسیله فرآیند فرزکاری مارپیچ قابل رقابت با برقوزنی است و به عبارت دیگر در حدی است که نیاز به استفاده از فرایندهای پرداخت را از بین می‌برد. سایش اینسرت‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر فرآیند فرزکاری مارپیچ تحت دو نوع پوشش و دو نوع هندسه متفاوت در فولاد سخت AISI D2 با سختی ۵۲ راکول‌سی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش به‌صورت خلاصه در ادامه آمده است: