Archive of SID

مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹۴، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص ۱۹۸-۲۰۲

مجموعه مقالات کنفرانس ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳ و ۱۴ آبان ۱۳۹۴

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه تجربی سایش ابزار و زبری سطح در فرزکاری مارپیچ سرعت‌بالای فولاد D2

نوید ملارمضانی[۱]، امیر راستی[۲]، محمدحسین صادقی[۳*]، بهزاد جباری پور[۴]، مجتبی رضایی حاجیده[۵]

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

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

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

۴- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران

۵- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران

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

چکیده

با توجه به رشد فنّاوری در چند دهه گذشته، استفاده از فولادهای سخت گسترش‌یافته است. ماشین‌کاری این نوع فولادها به دلیل خواص ذاتی آن‌ها، با چالش‌های زیادی مانند سایش شدید ابزار و افت کیفیت سوراخ همراه است؛ بنابراین، کنترل فرآیند در تولید قطعاتی از جنس این فولادها از اهمیت به سزایی برخوردار است. به همین منظور برای یافت شرایط مطلوب ماشین‌کاری، در پژوهش حاضر با استفاده از فرآیند فرزکاری مارپیچ، بر روی فولاد سخت‌کاری شده D2 سوراخ‌هایی ایجاد گردید. فولاد D2 مورد آزمایش، تحت عملیات حرارتی خلأ تا ۵۲ راکول‌سی سخت گردید. اینسرت‌های مورداستفاده از نوع کاربایدی با روکش TiCN انتخاب گردیدند. سرعت برشی به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر روی سایش ابزار در ۵ سطح تغییر داده شد. نرخ پیشروی و عمق برش نیز ثابت و به بزرگی ۰/۰۵ و ۰/۱ تنظیم شدند. هرکدام از آزمایش‌ها ۴ بار تکرار شد و درمجموع ۲۰ آزمایش انجام گرفت. ماشین‌کاری در حالت خشک صورت گرفت. خروجی‌های مورد مطالعه شامل سایش ابزار و زبری سطح سوراخ بودند. سایش ابزار توسط میکروسکوپ ابزارسازی اندازه‌گیری شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که با افزایش سرعت برشی در این نوع فولاد سخت، زبری سطح کاهش می‌یابد؛ اما در مقابل، سایش ابزار به مقدار قابل‌توجهی افزایش یافت.

کلید واژگان: فرزکاری مارپیچ، فولاد سخت، سایش ابزار، زبری سطح

Experimental study of tool wear and surface roughness on high speed helical milling in D2 steel

Navid Molla Ramezani[1], Amir Rasti[1], Mohammad Hossein Sadeghi[1*], Behzad Jabbari Pour[2], Mojtaba Rezaei Hajideh[2]

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

2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University Central Tehran Branch, Tehran, Iran

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

ABSTRACT

Concerning the technology growth in the past few decades, the use of hard steels is expanded. Nevertheless, machining of this alloys Encounter with many challenges such as severe tool abrasion and low hole quality, because of their inherent nature. Therefore, process control directly related to the economy of the parts made of these steels and is important. In order to find optimal conditions for machining, in this study holes were created on the D2 steel by using helical milling process. D2 steel was hardened under vacuum heat treatment to 52 HRC. Carbide inserts with TiCN coating were selected. 5 level of cutting speed was considered as the main parameter affecting the tool wear. Feed rate and the cutting depth were constant at 0.05 and 0.1, respectively. Each of the experiments were repeated 4 times and 32 tests were performed, totally. Milling tests were performed under dry condition. Studied outputs were tool wear and hole surface roughness. Tool wear were measured by tool maker microscopy. The results showed that with increasing cutting speed, surface roughness decrease. In contrast, tool wear increased.

Keywords: Helical milling, Hardened Steel, tool wear, Surface Roughness.

۱- مقدمه

از انقلاب صنعتی تاکنون، فرآیندهای ماشین‌کاری به‌عنوان هسته ساخت و تولید محسوب می‌گردند که خود شامل زیرمجموعه‌های گسترده‌ای ازجمله سوراخ‌کاری می‌باشند. سوراخ‌کاری یکی از فرآیندهای اصلی تولید بوده و تا ۳۰ درصد از فرآیند تولید یک قطعه را تشکیل دهد. علاوه‌بر این، امروزه سوراخ‌کاری در تولید قطعاتی مانند کامپوزیت‌ها و مواد سخت کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است [۲،۱].

تولید مواد سخت دارای مزایای گوناگونی است که عبارت‌اند از: کاهش هزینه‌های ماشین‌کاری، کاهش زمان، کاهش تعداد ماشین‌ابزار، کاهش عملیات پرداخت، بهبود سلامت سطح، کاهش عملیات پرداخت، کاهش اعوجاج ناشی از عملیات حرارتی و دستیابی به نرخ بالای براده‌برداری [۳].

فولادهای سخت در صنایع مختلف از جمله صنایع هوا و فضا، قالب‌سازی، صنایع حفاری و نیروگاهی کاربرد گسترده‌ای دارند. برای معرفی فولادهای سخت، تعابیر مختلفی وجود دارد، ولی به‌طورکلی فولادهای سخت به فولادهایی گفته می‌شود که بیش از ۴۵ راکول‌سی سختی داشته باشند [۴] این فولادها به‌دلیل سخت بودن، رفتار متفاوتی با فولادهای عادی دارند. از

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

N. Molla Ramezani, A. Rasti, M.H. Sadeghi, B. Jabbari Pour, M. Rezaei Hajideh, Experimental study of tool wear and surface roughness on high speed helical milling in D2 steel, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 198-202, 2015 (in Persian فارسی)

www.SID.ir

Archive of SID

این تفاوت‌ها می‌توان به شرایط برش در پیشروی بالا (در محدوده مجاز) و کاهش عملیات پیش برش، اشاره نمود [۵،۴].

ایجاد سوراخ در فولادهای سخت به روش سنتی معمولاً در چندین مرحله صورت می‌گیرد. به این صورت که قطعه‌کار در حالت آنیل[1] سوراخ‌کاری شده و پس از عملیات حرارتی سخت‌کاری، درنهایت تحت عملیات پرداخت مانند سنگ‌زنی قرار می‌گیرد. روش سنتی علاوه بر زمان‌بر بودن، هزینه بالاتری را هم به دنبال دارد. در مقابل با استفاده از روش ماشین‌کاری سخت به‌عنوان یکی از روش‌های با عملکرد بالا[2] می‌توان قطعه‌کار سخت شده را به‌یک‌باره ماشین‌کاری کرده و زمان و هزینه تولید را کاهش داد [۶].

امروزه فرزکاری مارپیچ[3] به‌عنوان یک فرآیند ماشین‌کاری با عملکرد بالا شناخته می‌شود که دارای مزایای منحصربه‌فردی است. از این مزایا می‌توان به انعطاف‌پذیری بالای آن برای تولید سوراخ با قطرهای متفاوت (بدون نیاز به تعویض ابزار)، افزایش عمر ابزار، یکپارچه‌سازی فرآیند، به حداقل‌رسانی زمان تولید و افزایش کیفیت تولید اشاره نمود [۸،۷].

فرزکاری مارپیچ در مقایسه با سوراخ‌کاری معمولی، به علت دارا بودن فضای بیشتر در طول حرکت مارپیچ، تماس کمتری بین ابزار و سطح قطعه کار برقرار می‌کند که این سایش کمتر ابزار را به دنبال دارد. ازاین‌رو استفاده از فرزکاری مارپیچ در ساخت قطعات مورد کاربرد در صنایع مختلف، اعم از هوافضا، نیروگاهی و قالب‌سازی در حال گسترش است.

ایبر و همکاران [۹]، با استفاده از فرآیندهای مختلف سوراخ‌کاری و فرزکاری مارپیچ، بر روی فولادهای سخت شرایط برش را مورد مطالعه قرار دادند و گزارش کردند که به دلایل اقتصادی و محیط زیستی، بهتر است فرآیند ماشین‌کاری در این فولادها در حالت خشک و بدون وجود روان کار صورت گیرد. همچنین آن‌ها دریافتند که با استفاده از فرزکاری مارپیچ می‌توان سوراخی با زبری سطح پرداخت تولید نمود که این امر، از به‌کارگیری عملیات پرداخت‌کاری مانند برقوزنی جلوگیری می‌کند.

اوکادا و همکارانش [۱۰]، عملکرد ابزارهای برشی مختلف را در فرزکاری سخت[4] فولادهای سخت‌کاری شده، موردمطالعه قراردادند. آن‌ها بیان کردند با کنترل سایش ابزار، زبری سطح، نیروهای ماشین‌کاری و دمای برش می‌توان عملکرد ماشین‌کاری را بالا برد. همچنین آن‌ها دریافتند که ابزارهای برش کاربایدی در مقابل ابزارهای برش برن نیتراید مکعبی سایش ابزار بالاتری دارند و به دنبال آن عمر کوتاه‌تری خواهند داشت ولی در عوض، ابزارهای کاربایدی با توجه به قیمت مناسب، می‌توانند زبری سطح مطلوبی را ایجاد نمایند. علاوه‌بر این آن‌ها بیان کردند، با کاهش سایش می‌توان نتیجه گرفت که دمای حاصل بین ابزار و قطعه‌کار حالت ثابتی دارد که این ثبات، خود سبب جلوگیری از شوک حرارتی می‌شود. این به‌گونه‌ای است که این شوک‌های حرارتی به دلیل ایجاد میکرو ترک‌ها، اثر نامطلوبی در شکست ناگهانی ابزار می‌گذارد.

الیورا و همکارانش [۱۱]، بر روی هندسه ابزارهای ماشین‌کاری مطالعه کردند و مشاهده نمودند با افزایش زوایا، سایش ابزار بیشتر می‌شود. با این وجود، آن‌ها دلیل این موضوع را به ضعیف شدن ابزار مربوط دانستند و همچنین بیان کردند، با کنترل سایش ابزار می‌توان عمر ابزار و نهایتاً هزینه‌های تولید را تحت کنترل قرارداد.

دنگ جیانکسین و همکاران [۱۲] مکانیسم سایش را بررسی و گزارش کردند که در اثر ماشین‌کاری فولاد سخت ضدزنگ نیمه آستنیتی، عناصری از ابزار به قطعه‌کار و بالعکس (از قطعه‌کار به ابزار) انتقال می‌یابد. به‌طوری‌که با استفاده از EDX مشاهده نمودند، عناصر تنگستن و کبالت از ابزار کاربایدی به فولاد ضدزنگ Cr12Mn5Ni4Mo3Al و همچنین عناصر آهن، کروم، نیکل، منگنز و مولیبدن از فولاد ضدزنگ به ابزار انتقال یافته است. با این وجود، آن‌ها بیان نمودند که به دلیل این انتقال عناصر، پارامترهایی نظیر نیروها، زبری سطح و سایش ابزار ناپایدار می‌گردد که این خود موجب کاهش راندمان تولید می‌گردد.

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای بر روی ماشین‌کاری مواد سخت صورت گرفته است ولی با این وجود، گزارشی در خصوص فرزکاری مارپیچ سرعت‌بالای فولاد سخت، منتشر نگردیده است. بدین منظور در پژوهش حاضر، فرزکاری مارپیچ بر روی فولاد سخت شده AISI D2 با سختی ۵۲ راکول‌سی مورد مطالعه تجربی قرار گرفت و سایش ابزار و زبری سطح سوراخ تولیدی در این فرایند بررسی شدند.

۲- آزمایش تجربی

۲-۱- مواد و تجهیزات

فولاد AISI D2 به‌عنوان قطعه‌کار انتخاب شد. قطعه‌کار توسط عملیات حرارتی تا ۵۲±۲ راکول‌سی سخت گردید. جهت سخت‌کاری، از عملیات حرارتی تحت خلأ استفاده شد. این نوع عملیات حرارتی دارای مزایایی نظیر خیز کم در قطعه کار است. با این وجود، پس از عملیات حرارتی به‌منظور حذف تاب خوردگی، قطعه‌کار توسط ماشین فرز کف‌تراشی[5] شد.

جهت فرزکاری مارپیچ از اینسرت‌های کاربایدی استفاده گردید. اینسرت ها بر روی ابزارگیر مدل K2-CLC شرکت پرامت قرار گرفت. ابزارگیر و اینسرت مورد استفاده به ترتیب در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده است. آزمایش‌های طرح‌ریزی شده توسط ماشین فرز سی ان سی سه محوره‌ی مدل FS0 شرکت سی ام ای[6] انجام گرفت. حداکثر دور و واپایشگر دستگاه به ترتیب ۱۸۰۰۰ دور بر دقیقه و هایندهاین[7] بودند. برنامه‌ی ماشین‌کاری توسط نرم‌افزار پاورمیل[8] تهیه گردید و به واپایشگر[9] دستگاه انتقال یافت. در شکل ۳ نمایی از شرایط آزمایش نشان داده شده است.

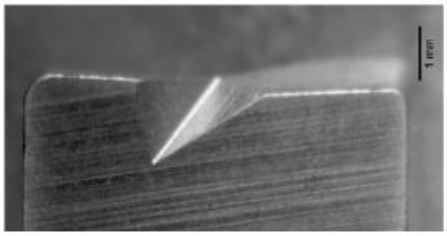
جهت اندازه‌گیری سایش‌های ایجاد شده در ابزارها از میکروسکوپ ابزارساز[10] استفاده شد. برای اندازه‌گیری سایش، اینسرت‌ها زیر میکروسکوپ

شکل ۱ ابزارگیر مورد استفاده در آزمایش

1. Annealing
2. High performance
3. Helical Milling
4. Hard Milling
5. Face milling
6. CME
7. Heidenhain
8. Powermill
9. Controller
10 Tool Maker

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲ اینسرت مورداستفاده در آزمایش

شکل ۳ نمایی از مواد و تجهیزات آزمایش فرزکاری مارپیچ

قرار گرفتند و با استفاده از نرم‌افزار، اندازه سایش لبه آزاد اندازه‌گیری گردید. ابتدا منحنی لبه ساییده شده مشخص گردید و سپس با تعیین فاصله منحنی (خط عمود بر منحنی) مقادیر سایش‌ها مشخص شد.

همچنین برای اندازه‌گیری زبری سطح از دستگاه زبری سنج ماهر مدل PS1 استفاده گردید. زبری سطح براساس معیار *Ra* گزارش گردید که برابر با انتگرال منحنی زبری به‌دست آمده در طول اندازه‌گیری شده است. زبری سطح هر سوراخ در سه نقطه اندازه‌گیری شد و میانگین این سه عدد به‌عنوان زبری سطح عنوان گردید.

۲-۲- روش انجام آزمایش

با توجه به آزمایش‌های اولیه و پیشینه پژوهش، سرعت‌های دورانی در پنج سطح از ۲۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شدند. سرعت‌های برشی محاسبه شده در جدول ۱ نشان داده شده است. نرخ پیشروی و عمق برش ثابت و به ترتیب برابر با ۰/۰۵ میلی‌متر بر دندانه و ۰/۱ میلی‌متر بودند. هر آزمایش چهار بار تکرار شد و درمجموع ۲۰ آزمایش صورت گرفت. آزمایش‌های انجام شده فرزکاری مارپیچ بر روی فولاد سخت AISI D2 باضخامت ۱۲ میلی‌متر انجام گرفت. آزمایش‌ها به دلایل اقتصادی و محیط زیستی در حالت خشک انجام شد. سوراخ‌کاری به روش فرزکاری مارپیچ و بدون هرگونه عملیات پیش متەزنی صورت گرفت. قطر ابزارها ۸ میلی‌متر بود که با آن‌ها سوراخی‌هایی به قطر ۱۰/۵ میلی‌متر ایجاد گردید. داده‌های به‌دست آمده از آزمایش‌ها توسط نرم‌افزار مینی‌تب ۱۶[1] تحلیل شد.

۳- نتایج و بحث

خروجی‌های مورد اندازه‌گیری سایش ابزار، زبری سطح بودند که در ادامه هر کدام از این خروجی‌ها به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۱ پارامترهای متغیر آزمایش به همراه خروجی‌های اندازه‌گیری شده

ردیف	سرعت برشی m/min	نرخ پیشروی mm/tooth	عمق برش mm	سایش ابزار mm	زبری سطح µm
۱	۵۰			۰/۰۸۸	۰/۸۴۱
۲	۱۰۰			۰/۱۰۳	۰/۷۲۰
۳	۱۵۰	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱۱۱	۰/۶۸۹
۴	۲۰۰			۰/۱۸۰	۰/۶۷۰
۵	۲۵۰			۰/۲۰۰	۰/۵۷۶

۳-۱- سایش ابزار

سایش لبه آزاد برای پیش‌بینی عمر و پایداری ابزار ترجیح دارد. به همین جهت، در پژوهش حاضر سایش لبه‌ی آزاد اندازه‌گیری گردید. به دلیل کاهش تماس ابزار با قطعه کار سایش کمی در فرآیند فرزکاری مارپیچ مشاهده گردید. با این وجود، مقادیر سایش در جدول ۱ و شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش سرعت برشی، سایش ابزار بالا می‌رود. سایش ابزار از ۰/۰۸۸ میکرومتر تا ۰/۲۰۰ میکرومتر متغیر بود. زمانی که سرعت برشی از ۵۰ متر بر دقیقه به ۲۵۰ متر بر دقیقه رسید، سایش ابزار بیش از ۲۲۸ درصد افزایش یافت.

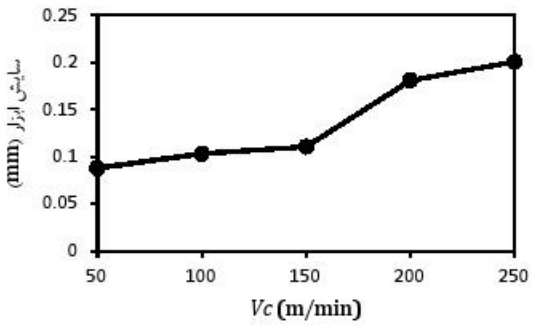
سرعت برشی و دمای ماشین‌کاری دو دلیل اصلی برای سایش ابزار محسوب می‌شوند. با افزایش سرعت برشی نیروی ماشین‌کاری بر روی نوک ابزار متمرکز شده و همچنین دمای برش افزایش می‌یابد. از طرفی، با بالا رفتن نیرو و دما در ناحیه‌ی بین ابزار و قطعه کار، ابزار کمی نرم‌تر شده و امکان ایجاد تغییر شکل پلاستیک را بیشتر می‌کند که درنتیجه سایش ابزار افزایش می‌یابد.

علاوه‌بر این با افزایش سرعت برشی، نرخ براده‌برداری در واحد زمان[2] افزایش می‌یابد که این خود موجب بیشتر شدن درگیری ابزار با قطعه‌کار شده و در نهایت سبب افزایش شدید سایش می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است نرخ افزایش سایش تا سرعت ۱۵۰ متر بر دقیقه تقریباً خطی است ولی از این سرعت به بعد، به دلیل افزایش بیش‌ازحد دمای برش، سایش به مقدار قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. سایش اینسرت‌های برشی در شکل نشان داده‌شده است.

اما با این وجود، به دلیل کم بودن سایش ابزار در فرآیند فرزکاری مارپیچ، عمر ابزار به‌اندازه قابل‌توجهی افزایش می‌یابد که این امر سبب افزایش طول ماشین‌کاری می‌گردد و در واقع می‌توان با این روش، تعداد سوراخ‌های تولیدی را افزایش داد.

۳-۲- زبری سطح

زبری سطح یکی از پارامترهای اساسی در تعیین کیفیت سطح و طول عمر



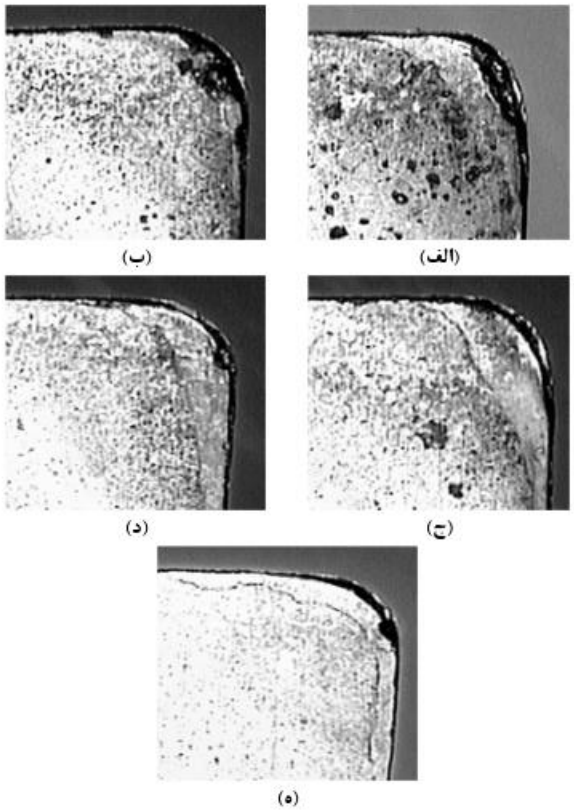
شکل ۴ سایش ابزار در سرعت‌های برشی متفاوت برحسب میلی‌متر

1. Minitab 16

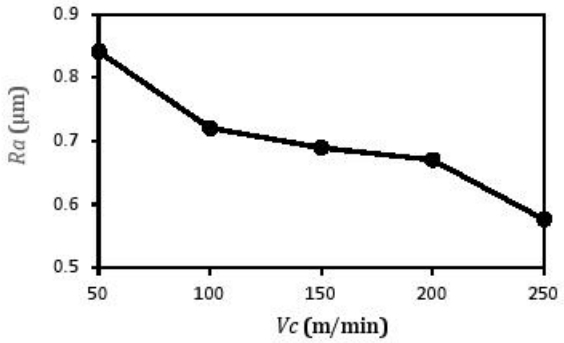
2. Material Removal Rate

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۵ سایش اینسرت‌ها در سرعت‌های برشی الف) ۲۵۰ متر بر دقیقه ب) ۲۰۰ متر بر دقیقه ج) ۱۵۰ متر بر دقیقه د) ۱۰۰ متر بر دقیقه ه) ۵۰ متر بر دقیقه



شکل ۶ زبری سطح حاصل از سوراخ‌ها در سرعت‌های برشی متفاوت برحسب میکرومتر

یک محصول هست. دلیل این امر اثرگذاری زبری سطح بر عمر قطعات تحت بار دینامیکی است، به‌طوری‌که قطعات دارای زبری سطح بالا به دلیل افزایش تمرکز تنش و احتمال ایجاد ترک در سطح قطعه، طول عمر کمتری خواهند داشت. زبری سطح در هر سوراخ در سه موقعیت متفاوت اندازه‌گیری شد و مقدار میانگین گزارش گردید.

با افزایش سرعت برشی، زبری سوراخ تولیدی (برخلاف سایش)، بهبود می‌یابد. این موضوع را می‌توان به‌دلیل اصطکاک کم بین ابزار و سطح ماشین‌کاری شده و تغییر شکل پلاستیکی بهتر دانست. لازم به ذکر است، با افزایش سرعت برشی، زبری سطح بهبود یافته و به مقدار زبری سطح تئوری نزدیک می‌شود. بهترین و بدترین زبری سطح به ترتیب برابر ۰/۵۷۶ میکرومتر و ۰/۸۴۱ میکرومتر به دست آمد. به‌گونه‌ای که با افزایش سرعت برشی از ۵۰ متر بر دقیقه به ۲۵۰ متر بر دقیقه زبری سطح بیش از ۴۸ درصد بهبود یافت. شکل ۶ نشان‌دهنده زبری سطح در سرعت‌های برشی متفاوت است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش فرآیند فرزکاری مارپیچ با سرعت‌های برشی متفاوت در فولاد سخت AISI D2 با سختی ۵۲ راکول سی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش به‌صورت خلاصه در ادامه آمده است:

۱. با افزایش سرعت برشی، سایش ابزار تا ۱۵۰ متر بر دقیقه روند نسبتاً ثابتی دارد اما از این سرعت به بعد به دلیل افزایش شدید دمای برش، سایش ابزار به مقدار چشمگیری افزایش می‌یابد.

۲. با افزایش سرعت برشی، زبری سطح حاصل از سوراخ تولیدی به دلیل کاهش اصطکاک بین ابزار و سطح ماشین‌کاری شده، افزایش می‌یابد. بهترین مقدار سایش در سرعت برشی ۲۵۰ متر بر دقیقه و برابر ۰/۵۷۶ میکرومتر به دست آمد.

۳. با افزایش سرعت برشی زبری سطح و نیروی ماشین‌کاری کاهش می‌یابد ولی در عوض از عمر ابزار (سایش ابزار) کاسته می‌شود. لذا با توجه به روابط موجود بین سرعت برشی با عمر قلم باید مقدار بهینه‌ای برای سرعت برشی انتخاب گردد.

۴. بهینه‌ترین شرایط برش (ازنظر سایش، زبری) در فرزکاری مارپیچ فولاد سخت AISI D2 در سرعت ۱۵۰ متر بر دقیقه حاصل می‌گردد. به‌گونه‌ای که در این سرعت برشی در عین زبری سطح مطلوب می‌توان به سایش ابزار قبولی دست‌یافت.

۵. با استفاده از فرآیند جدید فرزکاری مارپیچ، می‌توان سوراخ‌های با سایش پایین و کیفیتی بالاتر ایجاد نمود.

۶. زبری سطح سوراخ تولیدی به‌وسیله فرآیند فرزکاری مارپیچ در حدی است که نیاز به استفاده از فرایندهای پرداخت را از بین می‌برد.

۵- مراجع

[1] Rao, R. Venkata. *Advanced modeling and optimization of manufacturing processes: international research and development. Springer Science & Business Media*, 2010.

[2] Tönshoff, H. K. W. Spintig, W. König, and A. Neises, Machining of holes developments in drilling technology, *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 43, No. 2, pp. 551-561, 1994.

[3] Aslan, E, Experimental investigation of cutting tool performance in high speed cutting of hardened X210 Cr12 cold-work tool steel (62 HRC), *Materials & design* 26.1, pp. 21-27, (2005)

[4] Davim, J. Paulo, ed. *Machining of hard materials*. Springer Science & Business Media, 2011.

[5] Koshy, P. R. C. Dewes, and D. K. Aspinwall, High speed end milling of hardened AISI D2 tool steel (~ 58 HRC), *Journal of Materials Processing Technology* 127, No. 2, pp. 266-273, 2002.

[6] Vila, Carlos, Hector R. Siller, Ciro A. Rodriguez, Gracia M. Bruscas, and Julio Serrano, Economical and technological study of surface grinding versus face milling in hardened AISI D3 steel machining operations, *International Journal of Production Economics* 138, No. 2, pp. 273-283, 2012.

[7] Grzesik, Wit. *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications*. Elsevier, 2008.

[8] M.H.Saadatbakhsh,A.Rasti,M.H.Sadeghi,H.Hassanpour,A.R.Omiddodman, Compare and study of hole quality characteristics in helical milling and conventional drilling, *Modares Mechanical Engineering* Vol. 14, No. 16, pp. 332-338, 2015. (In Persian)

[9] Iyer, R. P. Koshy, and E. Ng, Helical milling: an enabling technology for hard machining precision holes in AISI D2 tool steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47, No. 2, pp. 205-210, 2007.

[10] 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* 51, No. 2, pp. 127-132, 2011.

www.SID.ir

Archive of SID

[11] Olvera, David, Luis Norberto López de Lacalle, Gorka Urbikain, A. Lamikiz, P. Rodal, and I. Zamakona, Hole making using ball helical milling on titanium alloys, *Machining Science and Technology* 16, No. 2, pp. 173-188, 2012

[12] 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* 270, No. 7, pp. 520-527, 2011.

www.SID.ir