مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹۴، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص ۸۶-۸۹

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

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران
Society of Manufacturing Engineering of Iran

مطالعه زبری سطح فولاد آلیاژی ۱/۷۷۶۵ سخت شده در فرایند فرزکاری سرعت بالا

مجید یوسفی تبار[۱*]، محمدخالد متی‌پوری[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی تسلیحات، دانشگاه مالک اشتر، تهران
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۹۶۶۱۵، h.hassanpour@modares.ac.ir

چکیده

ماشین‌کاری سرعت بالا دارای مزایای متعددی از قبیل افزایش تولیدپذیری، کاهش هزینه تولید و بهبود خواص قطعه‌کار نهایی است. از سوی دیگر، زبری سطح نهایی از مهم‌ترین شاخصه‌های کیفیت قطعه ماشین‌کاری شده می‌باشد. در این پژوهش، رابطه بین پارامترهای فرزکاری سرعت بالا و کیفیت سطح قطعه فولاد آلیاژی ۱/۷۷۶۵ با سختی ۵۰ راکول‌سی در حضور سیستم روان‌کاری با حداقل سیال برشی بررسی گردید. پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش محوری و شعاعی، به‌عنوان پارامترهای اصلی فرآیند فرزکاری در نظر گرفته شدند. روش طراحی آزمایش رویه پاسخ برای بررسی اثر پارامترها بر روی زبری سطح، مورداستفاده قرارگرفته و در مجموع ۳۰ آزمایش انجام شد. نتایج نشان داد که از بین پارامترهای برشی، به ترتیب نرخ پیشروی و سرعت برشی بیشترین تأثیر را بر روی زبری سطح داشته و زبری سطح با افزایش سرعت برشی کاهش یافت. همچنین تاثیر استفاده از سیستم روان‌کاری با حداقل سیال برشی در سرعت‌های برشی و عمق برشی بالا مشهودتر بود.

کلید واژگان: فرزکاری سرعت بالا، روش رویه پاسخ، زبری سطح

Study of surface roughness in high speed milling of 1.7765 hard alloyed steel

Majid Yousefitabar[1*], Mohammad Khaled Matapouri [2]

1- Fire arms engineering, malek-e-ashtar University, Tehran, Iran
2- Islamic Azad University, South Tehran Branch, Department of industrial Engineering, Tehran, Iran
*P.O.B. 96615-143, Tehran, Iran, h.hassanpour@modares.ac.ir

ABSTRACT

High speed machining has many advantages such as increasing productivity, reducing production cost and improving final workpiece properties. On the other hand, final surface roughness is one of the most important of machined workpiece. In present study, relationship between high speed milling parameters and workpiece surface quality made of 1.7765 steel alloy and hardness of 50 HRC in presence of minimum quantity lubrication method was investigated. Cutting speed, feed rate and axial and radial cutting depth were studied and totally 30 experiments were done. Results showed that among main cutting parameters, feed rate and cutting speed had the most effect on surface roughness and surface roughness reduced with increasing cutting speed. In addition, using minimum quantity lubrication had a good performance in high cutting speed and cutting depth.

Keywords: High speed milling, response surface method, surface roughness

۱- مقدمه

سطح قطعات بیشترین تنش کاری را تحمل می‌کنند و تحت تأثیر عوامل محیطی متعددی قرار دارند. درنتیجه مطالعه تغییرات سطحی قطعات و به‌ویژه آن‌هایی که تحت بار دینامیکی هستند حائز اهمیت است. سلامت سطح به مطالعه این تغییرات ایجاد شده در طی فرآیند تولید یک قطعه در قالب مشخصه‌های مختلف می‌پردازد که از مهم‌ترین شاخص‌های آن، می‌توان به زبری سطح اشاره کرد [۱]. زبری در عمر خستگی و دیگر خواص سطحی قطعه نهایی تأثیرگذار بوده و در بسیاری از مواقع، تنها معیار رد و یا قبول قطعه ماشین‌کاری می‌باشد.

در صنعت ماشین‌کاری، بالاخص مواد سخت ماشین‌کاری شونده، باید به دنبال آنالیز شرایط ماشین‌کاری بود تا از این طریق بتوان بهینه‌سازی را روی پارامترهای مؤثر بر ماشین‌کاری این آلیاژها انجام داد. هزینه‌بر بودن پروسه ماشین‌کاری این مواد، باعث افزایش رقابت صنعتی بین تولیدکنندگان و افزایش کارایی ماشین‌کاری مواد سخت شده است. فرزکاری سرعت بالا به‌دلیل راندمان بالای تولید و کاهش زمان و هزینه، فرایندی است که اخیراً برای دستیابی به این قابلیت مطرح شده است. همان‌گونه از نام آن پیداست، در این فرآیند، ماشین‌کاری با سرعت دورانی بالای اسپیندل انجام می‌شود [۲]. در این فرآیند کیفیت سطح پس از ماشین‌کاری، به‌علت حداقل بودن حرارت ورودی به قطعه‌کار افزایش پیدا می‌کند.

رِک و مویسان [۲] مطالعاتی را درباره اثرات نرخ پیشروی، سرعت برشی و سایش ابزار بر روی سلامت سطح در تراش‌کاری سخت روی چرخ‌دنده‌های سخت شده موضعی از جنس فولاد انجام دادند. نتایج حاکی از آن بود که نرخ پیشروی اصلی‌ترین پارامتری است که بر روی زبری سطح قطعه تأثیر می‌گذارد.

سیلوا و همکاران [۳] تأثیر سه محیط خشک، روان‌کاری MQL و سنتی را بر روی میزان سایش ابزار و زبری سطح فولاد آلیاژی در فرآیند فرزکاری مورد بررسی قرار دادند

لیو و همکاران [۴] عملیات فرزکاری با سرعت کم را بر روی یک فولاد

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. Yousefitabar, M. Khaled Matapouri , Study of surface roughness in high speed milling of 1.7765 hard alloyed steel, *Modares Mechanical Engineering*, *Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 86-89, 2015. (in Persian فارسی)

Archive of SID

www.SID.ir

ضدزنگ با سختی ۵۵ راکول‌سی و در دو محیط روانکاری تر و حالت مه افشانی[1]، به‌وسیله دو نوع ابزار تک‌لایه و چندلایه انجام دادند.

اوبرگ و همکاران [۵] تأثیر خنک‌کاری برودتی را در فرآیند فرزکاری فولاد آلیاژی و در مقایسه با دو محیط MQL و خشک مطالعه کردند و پی بردند که میزان نیروهای ماشین‌کاری و گشتاور اعمالی، در حالت برودتی بیشتر از حالت MQL و خشک است.

داس و همکاران [۶] میزان زبری سطح را در فرآیند تراش‌کاری سخت فولاد آلیاژی ۴۳۴۰ سخت‌کاری شده، به‌وسیله ابزار اینسرتی پوشش‌دار مورد بررسی قراردادند. در آزمایش آن‌ها تأثیر سه پارامتر نرخ پیشروی، سرعت برشی و عمق برش مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که نرخ پیشروی و سرعت برشی به ترتیب بیشترین تأثیر را روی زبری سطح دارند.

دویلز و همکاران [۷] ماشین‌کاری خشک را بر روی اینکونل ۷۱۸ انجام دادند که در شرایط برش خاصی، حالت خشک سلامت سطح بهتری داشت.

لیو و همکاران، [۸] به بررسی مشخصه‌های سلامت سطح فولاد یاتاقانی با سختی حدود ۶۴-۶۰ راکول‌سی پرداختند. نتایج نشان داد که تحت برخی شرایط برشی، امکان به وجود آمدن تنش پسماند کششی وجود دارد. همچنین مقدار زبری سطح در تراش‌کاری قطعات با سختی بالاتر از ۵۰ راکول‌سی کاهش می‌یابد.

هدف از این پژوهش، بررسی زبری سطح در فرآیند فرزکاری سرعت بالای فولاد سخت شده با استفاده از تکنیک روان‌کاری با حداقل سیال برشی (MQL) و در نهایت ارائه پیشنهادی به‌منظور فرزکاری بهینه این فولاد با معیار زبری حداقل است. به این منظور با کمک روش طراحی آزمایش رویه پاسخ[2] و تحلیل آماری، تأثیر پارامترهای مختلف فرزکاری بر روی زبری سطح بررسی شد.

۲- مواد و روش تحقیق

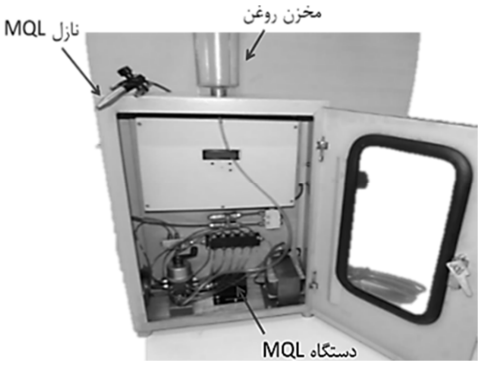
جنس ماده قطعه‌کار در این تحقیق، فولاد ۱/۷۷۶۵ سخت شده با سختی ۵۰ راکول‌سی بود. آزمایش‌های طرح‌ریزی شده روی نمونه‌هایی مکعبی شکل به ابعاد ۱۵x۳۰x۳۰ میلی‌متر انجام شد. برای انجام آزمایش‌ها، از ماشین فرز کنترل عددی چهار محوره کنترل همزمان مایکرون UCP ۷۱۰ استفاده گردید.

در تمامی تست‌ها، تیغچه فرز سر تخت تنگستن‌کارباید ۴ لبه، با پوشش TiAlN و قطر ۸ میلی‌متر، محصول شرکت کورلوی مورد استفاده قرار گرفت. روش روان‌کاری بکار رفته، روان‌کاری با حداقل سیال برشی بود. به‌منظور اعمال جریان روان‌کار MQL، از سیستم نشان داده شده در شکل ۱ استفاده گردید.

دستگاه دارای نازل اتمیزه کننده‌ای است که جریان هوا و جریان روغن به‌طور جداگانه وارد آن می‌شوند. سرعت جریان گاز نسبت به جریان روغن بسیار بیشتر است و در دهانه خروجی نازل، سرعت جریان گاز باعث شکستن روغن و تبدیل آن به قطرات ریز شده که توسط گاز حامل شتاب می‌گیرند.

قطرات روغن در جریان گاز حامل، تشکیل اسپری روغن- هوا داده که از آن برای روان‌کاری ناحیه ماشین‌کاری استفاده می‌شود. روان‌کاری MQL در آزمایش‌ها با استفاده از روغن معدنی، با دبی ۲۴۰ میلی‌لیتر بر ساعت و فشار ۶ بار انجام شد.

اندازه‌گیری زبری سطح با استفاده از دستگاه زبری‌سنج پرتابل ماهر مدل PS1



شکل ۱ دستگاه MQL استفاده شده جهت انجام آزمایش‌ها

انجام گرفت. روش‌های مختلفی برای بیان عدد زبری سطح وجود دارد. یکی از آن‌ها زبری متوسط است که معمولاً با Ra نشان داده می‌شود. در این تحقیق نیز، زبری براساس معیار زبری متوسط گزارش شد. مطابق شکل ۲، زبری متوسط برابر با سطح بین پروفیل زبری و خط مرکزی آن و یا انتگرال پروفیل زبری مطلق در طول اندازه‌گیری می‌باشد.

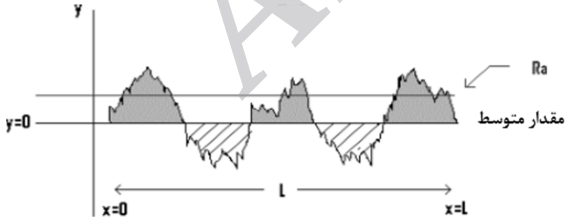
به‌منظور بررسی تأثیر شرایط ماشین‌کاری چهار فاکتور سرعت برشی (v_c)، سرعت پیشروی (f_z)، عمق برش محوری (a_p) و عمق برش شعاعی (a_e) به‌عنوان اصلی‌ترین پارامترهای فرزکاری سرعت بالا، در ۳ سطح تغییر داده شدند. در این تحقیق، طرح آزمایش رویه پاسخ برای طرح‌ریزی آزمایش‌ها به‌کار گرفته شد. در روش سطوح پاسخ، از تعداد آزمایش‌های ثابتی، با توجه به سطوح و عوامل، استفاده می‌شود. پارامترهای فرزکاری، تعداد سطوح و مقادیر آن‌ها در جدول ۱ آمده است.

بر این اساس، در مجموع تعداد ۳۰ آزمایش با ۳ بار تکرار انجام گرفت. آزمایش‌ها به‌منظور جلوگیری از بروز خطا، به‌صورت تصادفی انجام شدند. استراتژی ماشین‌کاری، فرزکاری موافق بود. در هر آزمایش، ۱۲۰ میلی‌متر از طول قطعه ماشین‌کاری گردید. برای انجام تحلیل‌های آماری نیز از نرم‌افزار مینی‌تب ۱۷ بهره گرفته شد.

$$Ra = \frac{1}{L}\iint_{x=0}^{x=L} |y| dx \qquad (۱)$$

۳- نتایج و بحث

همان‌طور که اشاره شد، در کل ۳۰ آزمایش انجام گرفت و پس از انجام هر آزمایش، مقادیر زبری سطح ناحیه ماشین‌کاری شده اندازه‌گیری شد. برای



شکل ۲ شماتیک زبری سطح و نحوه تعیین زبری میانگین

جدول ۱ پارامترهای مورد آزمایش و سطوح آن‌ها

فاکتورها	سطوح		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
عمق برش محوری (a_p) (mm)	۰/۵	۱	۱/۵
عمق برش شعاعی (a_e) (mm)	۱	۲	۳
سرعت پیشروی (f_z) (mm/tooth)	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۶
سرعت اسپیندل (V_c) (m/min)	۱۵۰	۳۰۰	۴۵۰

1. Mist
2. Response Surface Method

Archive of SID
www.SID.ir

تعیین مقدار زبری سطح در هر نمونه، اندازه‌گیری‌ها با استفاده از دستگاه زبری‌سنج در ۳ ناحیه و هرکدام به طول ۵/۶ میلی‌متر (در مجموع ۱۶/۸ میلی‌متر) صورت پذیرفت و میانگین این سه اندازه‌گیری به‌عنوان زبری متوسط سطح ماشین‌کاری شده (R) گزارش گردید. جدول ۲ مقادیر پارامترهای برشی در هر آزمایش را به همراه تمامی مقادیر اندازه‌گیری شده زبری سطح نشان می‌دهد.

جدول ۳ آنالیز واریانس مدل توسعه داده‌شده برای تخمین زبری سطح را پس از حذف پارامترهای بی‌معنی نشان می‌دهد. نتایج حکایت از معنی‌دار بودن تأثیر تمامی پارامترهای اصلی، تداخل پیشروی با عمق برش شعاعی و سرعت برش و نیز توان دوم عمق برش شعاعی دارد. همچنین مقدار R_{Sq} برای مدل نهایی برابر با ٪۹۴ به‌دست آمد، به این معنی که مدل برازش شده تا٪۹۴ از کل تغییرات زبری سطح را پوشش می‌دهد. از سوی دیگر براساس مقدار P برای فاکتور عدم انطباق، معنی‌دار نبودن این فاکتور اثبات گردید.

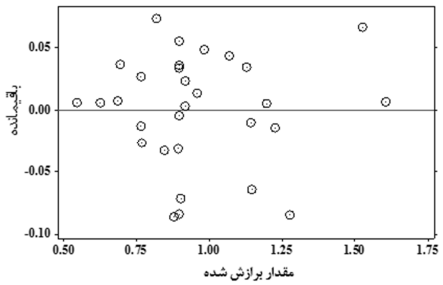
شکل ۳ نشان می‌دهد که مقادیر باقیمانده‌های مدل توسعه یافته نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده توسط آن، دارای پراکندگی نسبتا مناسبی بوده و شکل ۴ نیز نشان می‌دهد که مقادیر این باقیمانده‌ها دارای توزیع نرمالی می‌باشند.

جدول ۲ ماتریس طراحی آزمایش رویه پاسخ به همراه نتایج

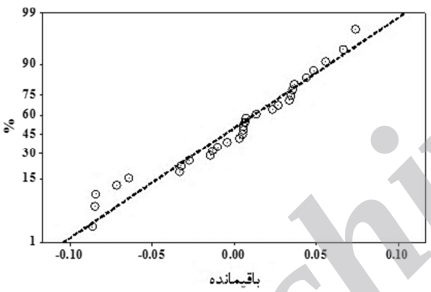
شماره آزمایش	a_p	a_e	V_c	f_z	Ra (µm)
۱	۱/۵	۱	۱۵۰	۰/۰۲	۰/۸۶
۲	۱	۲	۳۰۰	۰/۰۴	۰/۹۹
۳	۱	۲	۳۰۰	۰/۰۴	۰/۹۴
۴	۰/۵	۳	۱۵۰	۰/۰۲	۰/۸۸
۵	۱/۵	۱	۴۵۰	۰/۰۶	۰/۹۸
۶	۰/۵	۳	۴۵۰	۰/۰۲	۰/۷۴
۷	۰/۵	۱	۴۵۰	۰/۰۲	۰/۶
۸	۱/۵	۳	۱۵۰	۰/۰۶	۱/۶۶
۹	۱	۲	۳۰۰	۰/۰۴	۰/۹۳
۱۰	۰/۵	۱	۱۵۰	۰/۰۲	۰/۸۴
۱۱	۱/۵	۳	۴۵۰	۰/۰۶	۱/۲۴
۱۲	۱/۵	۳	۱۵۰	۰/۰۲	۱/۰۸
۱۳	۱	۲	۳۰۰	۰/۰۴	۰/۸۶
۱۴	۰/۵	۳	۴۵۰	۰/۰۶	۱/۰۹
۱۵	۰/۵	۱	۴۵۰	۰/۰۶	۰/۹۲
۱۶	۰/۵	۱	۱۵۰	۰/۰۶	۱/۲۷
۱۷	۰/۵	۳	۱۵۰	۰/۰۶	۱/۶۴
۱۸	۱/۵	۱	۱۵۰	۰/۰۶	۱/۲۷
۱۹	۱/۵	۳	۴۵۰	۰/۰۲	۰/۷۷
۲۰	۱/۵	۱	۴۵۰	۰/۰۲	۰/۶۷
۲۱	۰/۵	۲	۳۰۰	۰/۰۴	۰/۸۱
۲۲	۱/۵	۲	۳۰۰	۰/۰۴	۱/۰۲
۲۳	۱	۲	۴۵۰	۰/۰۴	۰/۷۸
۲۴	۱	۳	۳۰۰	۰/۰۴	۱/۱۸
۲۵	۱	۲	۳۰۰	۰/۰۴	۰/۹۵
۲۶	۱	۲	۳۰۰	۰/۰۲	۰/۷۶
۲۷	۱	۲	۱۵۰	۰/۰۴	۱/۱۷
۲۸	۱	۲	۳۰۰	۰/۰۴	۰/۹۸
۲۹	۱	۲	۳۰۰	۰/۰۶	۱/۲۱
۳۰	۱	۱	۳۰۰	۰/۰۴	۰/۹۳

جدول ۳ آنالیز واریانس مدل زبری سطح

عامل	مقدار P	سهم تأثیر (٪)
a_p	۰/۰۰۳۸	۱/۷۵
a_e	۰/۰۰۰۱	۱۳/۰۷
V_c	۰/۰۰۰۱	۲۳/۸۸
f_z	۰/۰۰۰۱	۵۱/۰۴
$a_e x f_z$	۰/۰۰۱۴	۳/۰۷
$v_c x f_z$	۰/۰۰۶۴	۱/۰۷
$a_e^{\,r}$	۰/۰۰۵۴	۲/۲۳
باقیمانده		۳/۳۸
عدم انطباق	۰/۷۱	
کل		۱۰۰



شکل ۳ پراکندگی باقیمانده ها در مقابل مقادیر برازش شده در مدل توسعه یافته زبری سطح



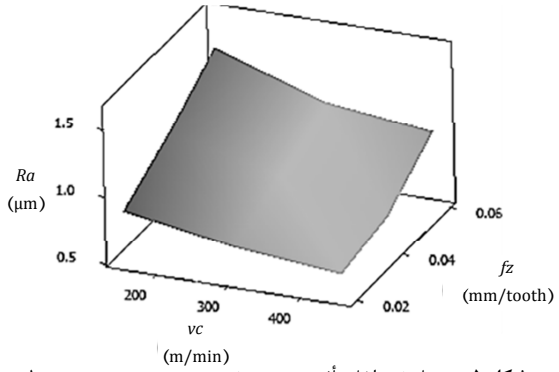
شکل ۴ توزیع نرمال باقیمانده‌های مدل توسعه‌یافته برای زبری سطح

نتایج بدست آمده از تحلیل آماری نشان دادند که به ترتیب پیشروی با ٪۵۱، سرعت برشی با ٪۲۴ و عمق برش شعاعی با ٪۱۳ دارای بیشترین تأثیر بر روی زبری سطح می‌باشند. تداخل پیشروی با عمق برش شعاعی و سرعت برشی نیز دارای اثر معنی‌داری بودند که نمودار رویه پاسخ آن‌ها در شکل ۵ و شکل ۶ آورده شده است. شیب تغییرات فاکتورهای سرعت برشی و عمق برشی شعاعی در سطوح بالای پیشروی بیشتر بوده و میزان تأثیرگذاری آن‌ها نیز بالاتر است. مشاهده می‌گردد که در سطح پایین پیشروی، با افزایش عمق برش شعاعی، روند تغییرات زبری سطح ابتدا به مقدار جزئی بهبودیافته و سپس افزایش می‌یابد. این بهبود زبری در عمق برشی میانی را می‌توان ناشی از حذف اثر شخم‌زنی دانست. شخم‌زنی در عمق برشی و پیشروی پایین بعلت ضخامت براده نتراشیده کوچک، ظاهر می‌شود. این پدیده منجر به جریان پلاستیک غیریکنواخت ماده شده و باعث خرابی سطح می‌شود.

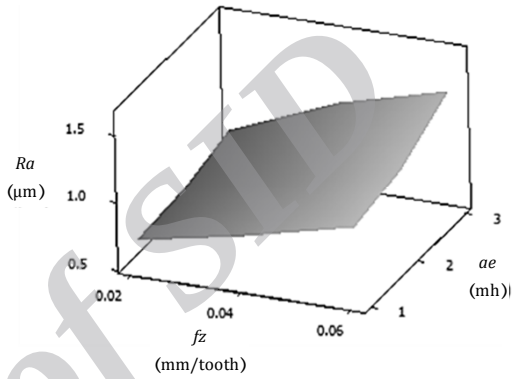
در حالت کلی، شرایط ماشین‌کاری شامل بالاترین سرعت برشی، پایین‌ترین سرعت پیشروی و مقادیر عمق برشی کم تا متوسط، کمترین مقدار زبری سطح را برای قطعه ماشین‌کاری ارائه می‌کنند. البته بایستی توجه داشت که

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۵ رویه پاسخ تداخل تأثیر سرعت برشی و نرخ پیشروی بر زبری سطح



شکل ۶ تأثیر عمق برشی شعاعی و نرخ پیشروی بر زبری سطح

در مقادیر پایین پیشروی و عمق برشی، امکان بروز پدیده شخم‌زنی و خرابی سطح می‌باشد و در نتیجه مقدار بهینه‌ای برای این پارامترها وجود دارد. با توجه به شکل، با افزایش سرعت برشی، زبری سطح کاهش می‌یابد. دلیل این پدیده را می‌توان افت تنش سیلان و آسان‌تر شدن تغییر شکل پلاستیک ماده به دلیل افزایش درجه حرارت دانست، که باعث کاهش اصطکاک و نیروهای ماشین‌کاری شده و در نتیجه پایداری فرآیند و در پی آن کیفیت سطح افزایش می‌یابد.

همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش پیشروی، زبری سطح افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش این پارامتر، تماس فیزیکی بین ابزار و قطعه‌کار بیشتر شده، اصطکاک و نیروهای ماشین‌کاری افزایش می‌یابد. بالا رفتن نیروها، باعث افزایش ارتعاش و بدتر شدن کیفیت سطح می‌شود

۴- نتیجه‌گیری

۱- روش طراحی آزمایش رویه پاسخ به خوبی برای مدل‌سازی تأثیر پارامترهای برشی بر روی خروجی‌های آزمایش مورد استفاده قرار گرفت.

۲- پیشروی با اختلاف زیادی به‌عنوان تأثیرگذارترین پارامتر مشخص گردید و بعد از آن، سرعت برشی و عمق برش شعاعی بیشترین سهم تأثیر را به خود اختصاص دادند.

۳- به‌طورکلی زبری سطح با افزایش پیشروی و عمق برشی افزایش یافت، درحالی‌که افزایش سرعت برشی دارای اثر کاهنده بر روی زبری سطح بود. در سطح پایین پیشروی نیز، کاهش عمق برشی باعث بروز پدیده شخم‌زنی و باعث خرابی سطح گردید.

۵- مراجع

[1] A. M. Abrão, J. L. S. Ribeiro, J. P. Davim, *Surface integrity*, in: *Machining of Hard Materials*, Eds., pp. 115-141: Springer, 2011.
[2] J. Rech, A. Moisan, Surface integrity in finish hard turning of case-hardened steels, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 5, pp. 543-550, 2003.
[3] R. Da Silva, J. Vieira, R. Cardoso, H. Carvalho, E. Costa, A. Machado, R. De Ávila, Tool wear analysis in milling of medium carbon steel with coated cemented carbide inserts using different machining lubrication/cooling systems, *Wear*, Vol. 271, No. 9, pp. 2459-2465, 2011.
[4] W. Y. H. Liew, 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.
[5] M. Nalbant, Y. Yildiz, Effect of cryogenic cooling in milling process of AISI 304 stainless steel, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 21, No. 1, pp. 72-79, 2011.
[6] S. R. Das, A. Kumar, D. Dhupal, Effect of Machining Parameters on Surface Roughness in Machining of Hardened AISI 4340 Steel Using Coated Carbide Inserts, *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 2, No. 4, pp. 445-453, 2013.
[7] A. Devillez, F. Schneider, S. Dominiak, D. Dudzinski, D. Larrouquere, Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools, *Wear*, Vol. 262, No. 7, pp. 931-942, 2007.
[8] X. Liu, D. Wen, Z. J. Li, L. Xiao, F. Yan, Experimental study on hard turning hardened GCr15 steel with PCBN tool, *Journal of Materials processing technology*, Vol. 129, No. 1, pp. 217-221, 2002.

Archive of SID

www.SID.ir