



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 ۹۶۶۱۵-۱۴۳، 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 فرایند فرزکاری در نظر گرفته شدند. روش طراحی آزمایش رویه پاسخ برای بررسی اثر پارامترها بر روی زبری سطح، مورد استفاده قرار گرفته 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 تأثیر استفاده از سیستم روان‌کاری با حداقل سیال برشی در سرعت‌های برشی و عمق برشی بالا مشهودتر بود.

کلیدواژگان: 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 Matapouri²

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

به دلیل راندمان بالای تولید و کاهش زمان و هزینه، فرایندی است که اخیراً برای دستیابی به این قابلیت مطرح شده است. همان‌گونه که نام آن پیداست، در این فرآیند، ماشین‌کاری با سرعت دورانی بالای اسپیندل انجام می‌شود [۱]. در این فرآیند کیفیت سطح پس از ماشین‌کاری، به علت حداقل بودن حرارت ورودی به قطعه‌کار افزایش پیدا می‌کند. رک و موسیان [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 فرایند فرزکاری مورد بررسی قرار دادند

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

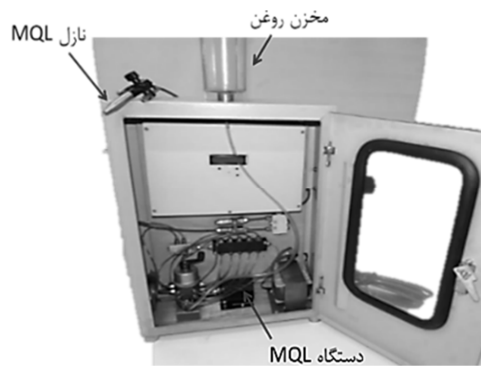
سطح قطعات بیشترین تنش کاری را تحمل می‌کنند و تحت تأثیر عوامل محیطی متعددی قرار دارند. در نتیجه مطالعه تغییرات سطحی قطعات و به‌ویژه آن‌هایی که تحت بار دینامیکی هستند حائز اهمیت است. سلامت سطح به مطالعه این تغییرات ایجاد شده در طی فرایند تولید یک قطعه در قالب مشخصه‌های مختلف می‌پردازد که از مهم‌ترین شاخص‌های 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

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)



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.

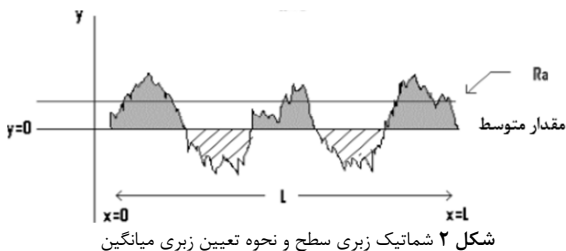
به‌منظور بررسی تأثیر شرایط ماشین‌کاری چهار فاکتور سرعت برشی (V_c)، سرعت پیشروی (f_z)، عمق برش محوری (a_p) و عمق برش شعاعی (a_e) به‌عنوان اصلی‌ترین پارامترهای فرزکاری سرعت بالا، در ۳ سطح تغییر داده شدند. در این تحقیق، طرح آزمایش رویه پاسخ برای طرح‌ریزی آزمایش‌ها به‌کار گرفته شد. در روش سطوح پاسخ، از تعداد 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.

$$Ra = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} |y| dx \quad (1)$$

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

ضدزنگ با سختی ۵۵ راکول‌سی و در دو محیط روانکاری تر و حالت مه افشانی^۱، به‌وسیله دو نوع ابزار تک‌لایه و چندلایه انجام دادند.

اوبرگ و همکاران [۵] تأثیر خنک‌کاری برودتی را در فرایند 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 فرایند تراش‌کاری سخت فولاد آلیاژی ۴۳۴۰ سخت‌کاری شده، به‌وسیله ابزار اینسرتی پوشش‌دار مورد بررسی قرار دادند. 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 فرایند 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^۲ 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 ۱۵×۳۰×۳۰ میلی‌متر انجام شد. برای انجام آزمایش‌ها، از ماشین فرز کنترل عددی چهار محوره کنترل همزمان میکرون ۷۱۰ UCP 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 اتمیزه‌کننده‌ای 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.

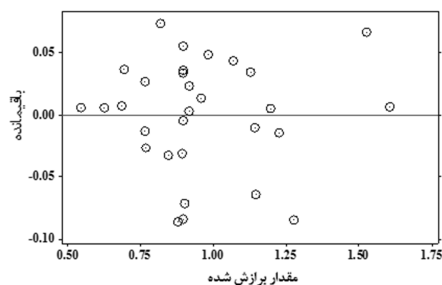
قطرات روغن در جریان گاز حامل، تشکیل اسپری روغن-هوا داده که از آن برای روان‌کاری ناحیه ماشین‌کاری استفاده می‌شود. روان‌کاری MQL در آزمایش‌ها با استفاده از روغن معدنی، با دبی ۲۴۰ میلی‌لیتر بر ساعت و فشار ۶ بار انجام شد.

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

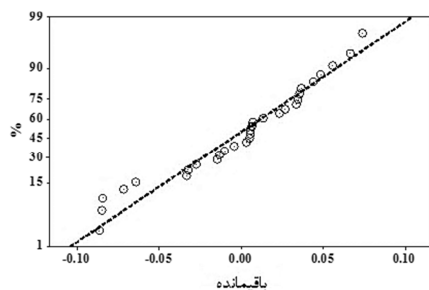
1. Mist
2. Response Surface Method

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
$a_e \times f_z$	۰/۰۰۱۴	۳/۰۷
$v_e \times f_z$	۰/۰۰۶۴	۱/۰۷
a_e^2	۰/۰۰۵۴	۲/۲۳
باقیمانده		۳/۳۸
عدم انطباق	۰/۷۱	
کل		۱۰۰



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



شکل ۴ توزیع نرمال باقیمانده های مدل توسعه یافته 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 می باشند. تداخل پیشروی با عمق برش شعاعی و سرعت برشی نیز دارای اثر معنی داری بودند که نمودار رویه پاسخ آن ها 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 آن ها نیز بالاتر است. مشاهده می گردد که در سطح پایین پیشروی، با افزایش عمق برش شعاعی، روند تغییرات زبری سطح ابتدا به مقدار جزئی بهبود یافته و سپس افزایش می یابد. این بهبود زبری در عمق برشی میانی را می توان ناشی از حذف اثر شخم زنی دانست. شخم زنی در عمق برشی و پیشروی پایین باعث ضخامت براده نتراشیده کوچک، ظاهر می شود. این پدیده منجر به جریان پلاستیک غیریکنواخت ماده شده و باعث خرابی سطح می شود.

در حالت کلی، شرایط ماشین کاری شامل بالاترین سرعت برشی، پایین ترین سرعت پیشروی و مقادیر عمق برشی کم تا متوسط، کمترین مقدار زبری سطح را برای قطعه ماشین کاری ارائه می کنند. البته بایستی توجه داشت که

تعیین مقدار زبری سطح در هر نمونه، اندازه گیری ها با استفاده از دستگاه زبری سنج در ۳ ناحیه و هرکدام به طول ۵/۶ میلی متر (در مجموع ۱۶/۸ میلی متر) صورت پذیرفت و میانگین این سه اندازه گیری به عنوان زبری متوسط سطح ماشین کاری شده (R) گزارش گردید. جدول ۲ مقادیر پارامترهای برشی در هر آزمایش را به همراه تمامی مقادیر اندازه گیری شده زبری سطح نشان می دهد.

جدول ۳ آنالیز واریانس مدل توسعه داده شده برای تخمین زبری سطح را پس از حذف پارامترهای بی معنی نشان می دهد. نتایج حکایت از معنی دار 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٪ به دست آمد، به این معنی که مدل برازش شده تا ۹۴٪ از کل تغییرات زبری سطح را پوشش می دهد. از سوی دیگر براساس مقدار P برای فاکتور عدم انطباق، معنی دار نبودن این فاکتور اثبات گردید.

شکل ۳ نشان می دهد که مقادیر باقیمانده های مدل توسعه یافته نسبت به مقادیر پیش بینی شده توسط آن، دارای پراکندگی نسبتاً مناسبی بوده و شکل ۴ نیز نشان می دهد که مقادیر این باقیمانده ها دارای توزیع نرمالی می باشند.

جدول ۲ ماتریس طراحی آزمایش رویه پاسخ به همراه نتایج

شماره آزمایش	a_p	a_e	V_c	f_z	R_a (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

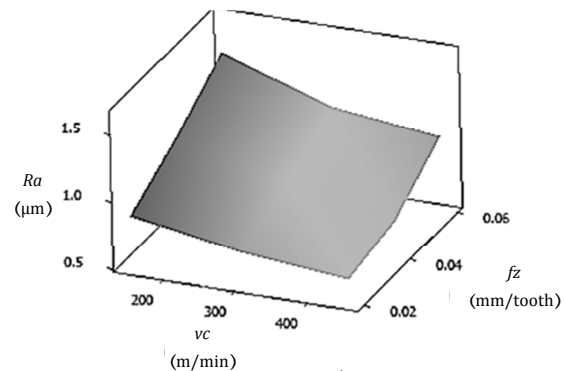
همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش پیشروی، زبری سطح افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش این پارامتر، تماس فیزیکی بین ابزار و قطعه کار بیشتر شده، اصطکاک و نیروهای ماشین کاری افزایش می‌یابد. بالا رفتن نیروها، باعث افزایش ارتعاش و بدتر شدن کیفیت سطح می‌شود

۴- نتیجه گیری

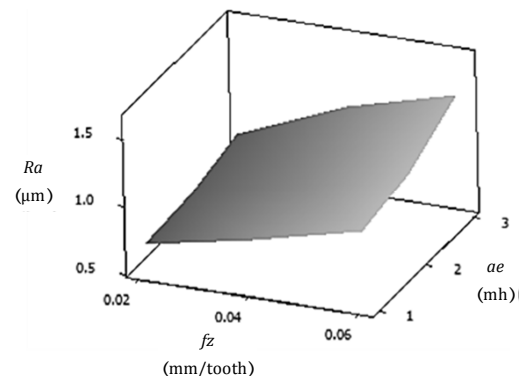
- ۱- روش طراحی آزمایش رویه پاسخ به خوبی برای مدل سازی تأثیر پارامترهای برشی بر روی خروجی های آزمایش مورد استفاده قرار گرفت.
- ۲- پیشروی با اختلاف زیادی به عنوان تأثیرگذارترین پارامتر مشخص گردید و بعد از آن، سرعت برشی و عمق برش شعاعی بیشترین سهم تأثیر را به خود اختصاص دادند.
- ۳- به طور کلی زبری سطح با افزایش پیشروی و عمق برشی افزایش یافت، درحالی که افزایش سرعت برشی دارای اثر کاهنده بر روی زبری سطح بود. در سطح پایین پیشروی نیز، کاهش عمق برشی باعث بروز پدیده شخم زنی 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.



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 شخم زنی و خرابی سطح می‌باشد و در نتیجه مقدار بهینه ای 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 آسان تر شدن تغییر شکل پلاستیک ماده به دلیل افزایش درجه حرارت دانست، که باعث کاهش اصطکاک و نیروهای ماشین کاری شده و در نتیجه پایداری فرآیند و در پی آن کیفیت سطح افزایش می‌یابد.