



مطالعه تجربی تأثیر روش روانکاری در زبری سطح و مصرف سیال برش در ماشین کاری سوپر آلیاژها

بهنام داودی^{1*}، سید حسن موسوی²

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 163-16765، bdavoodi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 23 مرداد 1395 پذیرش: 10 شهریور 1395 ارائه در سایت: 24 مهر 1395 کلید واژگان: سوپر آلیاژ A286 حداقل مقدار روانکار زبری سطح رویه سطح پاسخ	سوپر آلیاژها به دلیل دارا بودن ویژگی‌های خاص مانند مقاومت بالا در برابر خوردگی و حرارت، توانایی حفظ خواص مکانیکی و شیمیایی خود در درجه حرارت‌های بسیار بالا موجب شده که کاربرد بسیاری در صنایع مختلف، خصوصاً در صنایع هوایی پیدا کنند. از طرفی، ضریب انتقال حرارت بسیار کم، چقرمگی بالا به همراه کار سختی در این آلیاژها موجب شده که ماشین کاری آن‌ها با چالشی جدی مواجه باشد. در مطالعه حاضر، تأثیر پارامترهای برش بر زبری سطح سوپر آلیاژ A286 در شرایط روانکاری مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. طرح آزمایش رویه پاسخ برای طرح‌ریزی آزمایش‌ها بکار گرفته شده است. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای ماشین کاری و شرایط روانکاری بر زبری سطح، دو فاکتور سرعت برش و سرعت پیشروی در سه سطح و همچنین شرایط روانکاری حداقل مقدار و روش مرطوب به عنوان اصلی‌ترین پارامترها در نظر گرفته شده‌اند. از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی و میکروسکوپ نوری به منظور بررسی سایش ابزار و کیفیت سطح قطعه کار استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش حداقل مقدار روانکار باعث افزایش قدرت نفوذ ذرات سیال روانکار-خنک‌کار به منطقه برش شده و با کاهش زبری سطح باعث بهبود فرایند می‌شود. مشاهده شد که با افزایش مقدار پیشروی در سرعت برش ثابت، مقادیر عددی زبری سطح در معیار R_a برای شرایط مختلف روانکاری از هم فاصله گرفته و مقدار آن برای روش حداقل مقدار روانکار کمتر است که برتری این روش نسبت به روش مرطوب را نشان می‌دهد.

An experimental investigation of the effect of lubrication method on surface roughness and cutting fluid consumption in machining of super alloys

Behnam Davoodi*, Seyed Hasan Musavi

Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 1676513 Tehran, bdavoodi@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 13 August 2016
Accepted 31 August 2016
Available Online 15 October 2016

Keywords:
Superalloy A286
Minimum quantity lubrication
Surface roughness
Response surface method

ABSTRACT

Super alloys due to special features such as high resistance to corrosion and heat, have the ability to maintain mechanical and chemical properties at extremely high temperatures which are used in various industries, especially in the aerospace industry. On the other hand, very low heat transfer coefficient and high toughness with work hardening in these alloys caused the machining of them to be seriously challenged. In the present study, the effect of cutting parameters on surface roughness of A286 superalloy has been studied in different lubrication conditions. Response surface method experimental design was used to plan experiments. In order to investigate the effects of machining parameters and conditions of lubrication on the surface roughness, Two factors - cutting speed and feed rate- on three levels and minimum quantity lubrication conditions and wet method are considered as the main parameters. In order to investigate the Tool wear and workpiece surface quality, the images of Scanning Electron Microscope and optical microscope are used. The results show that using the minimum quantity method of lubricant caused cooling-lubrication fluid particles penetrating power to the cutting zone to increase and improves the process by reducing the surface roughness. It was observed that with increasing feed rate in fixed cutting speed, numerical values of surface roughness in R_a criterion are taken apart for different lubrication circumstances and its value for the minimum quantity method of lubricant is less, which shows the superiority of this method over the wet method.

1- مقدمه

تکنولوژی به سمت بهینه کردن فرایندها در حال حرکت است [1]. امروزه تراش کاری به دلیل مزایایی چون سرعت بالای تولید و دقت ابعادی مناسب سهم عمده‌ای از عملیات ساخت و تولید قطعات را به خود اختصاص داده است [2]. با توجه به اینکه در اکثر قطعات تولیدشده، فرایند تراش کاری اولین

در سال‌های اخیر فرایندهای ماشین‌کاری با عملکرد بالا¹ پیشرفت زیادی کرده‌اند. برای دستیابی به انعطاف‌پذیری بالای تولید و افزایش بهره‌وری،

¹ High Performance Machining

انتخاب درست روش اعمال مایع روانکار به منطقه ماشین کاری را می-توان مهمترین پارامتر جهت بهبود پارامترهای خروجی در ماشین کاری سوپرآلیاژها و دیگر مواد سخت ماشین کاری شونده دانست. استفاده از سرعت برش بالا به همراه سرعت پیشروی مناسب کیفیت سطح تمام شده محصول را افزایش داده و نرخ تولید را بالا می برد. با این حال سرعت برش بالا، دمای منطقه برش را به شدت افزایش داده و تعامل براده با سطح ابزار به علت افزایش دمای براده، بسیار زیاد شده و قدرت نفوذ سیال روانکار به منطقه برش به شدت کاهش می یابد. به نحوی که دیگر سیال برش در حالت روانکاری مرطوب قدرت نفوذ را نخواهد داشت و عملاً حالت روانکاری خشک اتفاق می-افتد.

تولید و هدایت سیال برش در ابعاد میکرونی و به صورت کره های بسیار ریز تحت فشار بالا موجب می شود که قدرت نفوذ این مایعات به منطقه برش نسبت به روانکاری مرطوب به صورت چشمگیری افزایش یابد. ایجاد اسپری از روانکار و هوا تحت فشار 600 کیلوپاسکال به روش روانکاری حداقل مقدار³، کلید حل مشکل ماشین کاری سوپرآلیاژها و دیگر مواد سخت ماشین کاری شونده است. در این روش مقدار بسیار کمی از سیال برش تحت فشار بالای هوا قرار گرفته و از یک نازل با سوراخ بسیار ریز عبور کرده که این نازل موجب سرعت بخشیدن به سیال برش خروجی می شود. این ذرات روانکار تحت فشار و سرعت بالا به راحتی قدرت نفوذ به منطقه برش را خواهند داشت.

تحقیقات نشان داده است که بیش از دو سوم سیالات برش بعد از مصرف بدون هیچ تصفیه ای به صورت مستقیم وارد محیط زیست می شود. حجم عظیمی از این سیالات، از مشتقات نفتی و پایه معدنی بوده و تأثیرات جبران ناپذیری بر محیط زیست تحمیل می کند. وجود فرمالدئید در مایعات برش پایه نفتی عامل اصلی سرطان پوست در میان کارگران است. بیماری شدید پوستی به همراه برونشیت قفسه سینه به علت استنشاق گازهای سمی متساعده شده از این مایعات در اثر حرارت بالای منطقه برش از دیگر پیامدهای استفاده از مایعات صنعتی در فرایندهای ماشین کاری به حساب می آید [9]. در حال حاضر جایگزینی روش روانکاری معمولی با روش های جدید و کارآمد مانند روانکاری با حداقل مقدار به شدت در صنایع مربوط به ماشین کاری حس می شود. این روش نه تنها تأثیرات منفی مایعات پایه معدنی را بر روی محیط زیست و انسانها به حداقل می رساند بلکه موجب بهبود پارامترهای خروجی با کاهش زبری سطح و نیروی برش و افزایش عمر ابزار می شوند.

تراش کاری سوپرآلیاژهای آهن-نیکل به عنوان اولین فرایند اعمالی بر روی قطعات خام، به عنوان مهمترین فرایند تولیدی نسبت به دیگر فرایندها مد نظر است. پس انتخاب درست ابزار تراش کاری، سیال برش مناسب و سازگار با محیط زیست و انتخاب یک روش مناسب جهت اعمال سیال روانکار به منطقه برش به منظور بهبود و افزایش بازده فرایند ماشین کاری بسیار مهم به نظر می رسد [10].

داودی و همکاران [11] به بررسی تجربی حذف سیال برش در تراش کاری اینکونل 725 با ابزار کاربیدی پوشش دار پرداختند. هدف از این مطالعه بررسی امکان حذف سیالات برش در فرایند تراش کاری اینکونل 725 بوده است. برای این منظور، اثر پارامترهای ماشین کاری مانند سرعت برش، نرخ پیشروی و عمق برش در نیروهای ماشین کاری، مورد بررسی قرار گرفت.

پروژه اعمالی به قطعات است، این امر موجب شده که فرایند تراش کاری به یکی از پرکاربردترین و ضروری ترین عملیات در صنعت ساخت و تولید تبدیل شود. روش های دستیابی به کیفیت مطلوب در فرایند تراش کاری و کاهش هزینه های ماشین کاری یکی از زمینه های اساسی تحقیقات کاربردی در این راستا است [3].

امروزه سیالات برش به عنوان یک ابزار جانبی در فرایندهای ماشین کاری به منظور بهبود شرایط ماشین کاری و افزایش کیفیت محصول مورد استفاده قرار می گیرند. وجود این مواد در برخی از فرایندهای ماشین کاری الزامی بوده، به نحوی که عدم استفاده از آن در برخی مواقع امکان انجام فرایند را غیرممکن می سازد. اما صدماتی که از جانب این سیالات برش به محیط زیست وارد می شود، باعث شده که کاربرد این مواد به یکی از بزرگ ترین نگرانی ها در حوضه فرایندهای ماشین کاری تبدیل شود. امروزه فرایند برش متحول شده است، به نحوی که قوانین و اختراهای قانونی جهت حفظ محیط زیست، نقش مهمی در تدوین فرایندها ایفا می کند. برای رسیدن به افزایش کیفیت برش از طریق کاربرد مواد خنک کننده و روانکار، فرایندهای ماشین کاری باید با توجه به قوانین حفاظت از محیط زیست، تنظیم گشته و به خطر افتادن سلامت کارگران (انواع مختلف سرطان ها و صدمات پوستی) به خاطر کاربرد روغن ها و امولسیون ها نباید فراموش شود. بسیاری از این سیالات، پایه معدنی¹ بوده و از مشتقات نفت خام، تهیه شده است. تخمین زده می شود که سالانه در سراسر جهان در حدود 640 میلیون گالن مایعات فلزکاری مصرف می شود [4]. استفاده سالانه از این مایعات توسط اتحادیه اروپا در حوالی 320000 تن برآورد شده است که بیش از 66 درصد از آن بعد از مصرف بدون هیچ فرایند تصفیه و پاک سازی به محیط زیست دفع می شود [5]. همچنین تخمین زده می شود که هزینه های مربوط به مایعات برش، از جمله خرید، آماده سازی، تعمیر و نگهداری و دفع آن حدود 17% از کل هزینه های ماشین کاری یک محصول را شامل شود. از آنجایی که این سیالات برش پایه معدنی، زیست تخریب ناپذیر هستند نیاز به عملیات پاک سازی پرهزینه ای قبل از دفع دارند، که هزینه دفع این سیالات می تواند دو تا چهار برابر از هزینه های خرید ابزار بالاتر باشد [6].

سوپرآلیاژهای پایه آهن-نیکل مانند A286 به دلیل دارا بودن ویژگی های خاص مانند مقاومت بالا در برابر خوردگی و حرارت و اکسیداسیون کاربردهای گسترده ای در صنایع هوافضا، هسته ای، کشتی سازی و ساخت توربین های گازی پیدا کرده اند. این ویژگی های خاص برای سوپرآلیاژهای پایه آهن-نیکل موجب شده که خواص شیمیایی و فیزیکی خود را در دماهای بالا حفظ کنند و در صنایعی که نیاز به کارکرد فلز در دماهای بالا باشد اولین گزینه برای انتخاب باشند [7]. از طرفی ضریب انتقال حرارت کم و چقرمگی بسیار بالای این آلیاژها موجب سایش شدید ابزار می شود. این امر باعث شده که این فلزات در خانواده مواد سخت ماشین کاری شونده² قرار بگیرند. سایش بالای ابزار در حین فرایند ماشین کاری موجب می شود که کیفیت سطح پایانی قطعه کار نامناسب شده و باعث ایجاد مشکل در فرایندهای ماشین کاری این سوپرآلیاژها شود. با توجه به مشکلات ذکر شده، اگر پارامترهای ماشین کاری و روش روانکاری مناسب به همراه سیال روانکار کارآمد مورد استفاده قرار نگیرد، تلفات مواد قطعه کار، شکست سریع ابزار و افزایش هزینه به همراه اثرات جبران ناپذیر زیست محیطی را به همراه خواهد داشت [8].

¹ Mineral-based fluids² Difficult-to-machining materials³ Minimum quantity lubrication (MQL)

بوده که در گروه مواد سخت ماشین کاری شونده قرار می گیرد. ترکیبات شیمیایی و خواص مکانیکی فلز مورد نظر به ترتیب در جدول 1 و 2 نشان داده شده است. سطح مقطع قطعه کار دایروی بوده و دارای قطر 60 میلی متر می باشد. طول تمامی قطعات 130 میلی متر است و از هر قطعه کار فقط یک پاس براده برداری شده است.

طول منطقه ماشین کاری شده برای تمام آزمایش ها 80 میلی متر بوده و 30 میلی متر از قطعه کار بین فک های سه نظام قرار گرفته است.

2-2- مواد ابزار

اینسرت کاربیدی بدون پوشش بعنوان ابزار برش برای ماشین کاری این سوپرآلیاژ به کار گرفته شده است. اینسرت برش با هندسه چهارگوش از کاتالوگ سندویک و با نام تجاری SNMG 120404 که شامل براده شکن نیز می باشد انتخاب شده است. ابزار مورد نظر از گرید 1105 و بدون پوشش، توصیه شده شرکت سندویک برای تراش کاری سوپرآلیاژها می باشد. از هولدر با کد PSBNR 2525 M12 استفاده شده است.

2-3- زبری سنج

شکل 1 تصویر دستگاه زبری سنج مورد استفاده در این پژوهش را نشان می دهد. زبری سطح بر اساس معیار R_a گزارش شده است که برابر با مجموع سطح پروفیل زبری در بالا و پایین خط مرکزی است. به منظور ارائه نتایج دقیق تر، از هر قطعه سه تست در نقاط مختلف قطعه به طول 3.2 میلی متر گرفته شده و مقدار میانگین این مقادیر، گزارش شده است.

2-4- روش اعمال روانکار

نحوه قرار گرفتن سر نازل دستگاه MQL نسبت به ابزار و قطعه کار در شکل 2 نشان داده شده است. این دستگاه توسط نویسندگان ساخته شده و کارایی

جدول 1 ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژ A286

عنصر	درصد وزنی (%)
کربن	Max 0/05
منگنز	Max 2/00
فسفر	Max 0/025
سولفور	Max 0/025
سیلیسیم	Max 1/00
کرم	13/5-16/00
نیکل	24/00-27/00
مولیبدن	1/00-1/50
تیتانیوم	1/90-2/35
وانادیوم	0/10-0/50
آلومینیم	Max 0/35
برن	0/003-0/01
آهن	base

جدول 2 خواص مکانیکی سوپرآلیاژ A286

پارامتر	مقدار
استحکام تسلیم (MPa)	655
استحکام کششی (MPa)	1000
درصد افزایش طول (%)	24

این نیروها شامل نیروی پیشروی، نیروی محوری و نیروی برش بوده اند. علاوه بر این، زبری سطح در هر دو شرایط ماشین کاری خشک با ابزار پوشش دار و ماشین کاری مرطوب با ابزار بدون پوشش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در مقایسه با فرایندهای ماشین کاری معمولی، سرعت برش و پوشش ابزار از پارامترهای مهم در حذف سیالات برش می باشد. اطلاعات به دست آمده از آزمایش ها نشان داد که در ماشین کاری با ابزار پوشش دار در محدوده خاصی از پارامترها، سیال برش را می توان به طور کامل از فرایند ماشین کاری حذف کرد.

ژانگ¹ و همکاران [12] به بررسی عمر ابزار و نیروی برش در فرایند فرزکاری نهایی اینکونل 718 تحت شرایط روانکاری خشک و حداقل مقدار روانکار پرداختند. ایشان در مطالعاتشان، ماشین کاری خشک و MQL را با یک روغن گیاهی زیست تخریب پذیر به منظور بررسی سایش ابزار و نیروی برش در فرایند فرزکاری نهایی با ابزار پوشش داده شده مورد مطالعه قرار دادند. و همچنین وابستگی بین انتشار سایش ابزار با تغییرات نیرو نیز از جانب آنها مورد بررسی قرار گرفته بود. نتایج تجربی نشان داد که MQL قابلیت ماشین کاری اینکونل 718 از قبیل افزایش عمر ابزار و کاهش نیروی برش را بهبود بخشیده است. از نقطه نظر زیست محیطی، MQL خواهان تولید پاک بوده و یک جایگزین برای روش مرطوب و خشک است.

داودی و همکاران [13] به بررسی تجربی و بهینه سازی پارامترهای برش در ماشین کاری آلیاژ آلومینیوم 5083 تحت شرایط روانکاری مرطوب و خشک به منظور حذف مایع برش پرداختند. آنها تأثیر سرعت برش و ضخامت براده تغییر شکل نیافته را بر نیروهای برش و پیشروی مورد توجه قرار داده اند. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت برش و کاهش ضخامت براده تغییر شکل نیافته می توان سیال برش را برای ماشین کاری آلیاژ آلومینیوم 5083 به طور کلی حذف کرد. و در نهایت یک محدوده مناسب برای تراش کاری بهینه این آلیاژ برای تولیدات صنعتی ارائه داده اند.

دهار² و همکاران [14] به انجام آزمایش برای مقایسه اثربخشی MQL در تراش کاری فولاد AISI 1040 با اینسرت کاربیدی بدون پوشش در مقایسه با ماشین کاری خشک و مرطوب پرداختند. آزمایش ها در ترکیب سرعت های برش و پیشروی مختلف انجام شد. نویسندگان تصریح کرده اند که عملکرد ماشین کاری MQL بهتر از ماشین کاری مرطوب بوده است. حداقل مقدار روانکار موجب کاهش قابل توجه دمای برش شده و به دنبال آن موجب بهبود دقت ابعادی می شود. در MQL تماس براده و سطح ابزار کاهش می یابد و به این ترتیب تمایل به سایش و آسیب در نوک ابزار کاهش می یابد. با توجه به پژوهش های صورت گرفته مشاهده می شود که مطالعه بسیار کمی در زمینه ماشین کاری سوپرآلیاژها به روش سازگار با محیط زیست صورت پذیرفته است.

در مطالعه حاضر تأثیر پارامترهای ماشین کاری با استفاده از روش روانکاری با حداقل مقدار و روش مرطوب بر روی زبری سطح قطعه کاری از جنس سوپرآلیاژ A286 به منظور بررسی تأثیر شرایط روانکاری-خنک کاری و امکان حذف یا به حداقل رساندن سیال برش، مورد بررسی قرار گرفته است.

2- مواد و تجهیزات

1-1- مواد قطعه کار

جنس قطعه کار بررسی شده در این پژوهش، سوپرآلیاژ پایه آهن-نیکل A286

¹ Zhang

² Dhar

دمای آن بالا است بسیار کاهش یافته و یا کاملاً حذف شود. تأثیر جهت تزریق روانکار و فاصله نازل تا منطقه ماشینکاری به منظور دستیابی به کمترین مقدار زبری سطح مورد بررسی قرار گرفت. با تنظیم زاویه نازل و فاصله نازل از سر ابزار، شرایط بهبود یافته زبری سطح با فاصله سر نازل 3 سانتیمتر از منطقه برش و زاویه 60 درجه‌ای آن نسبت به محور ابزار مطابق شکل 2 به دست آمد [15].

شکل 3 خروج سیال از نازل و فشار آن را نشان می‌دهد. به منظور وضوح بهتر، دبی خروجی سیستم به‌طور موقت افزایش یافته تا اسپری تولید شده به راحتی قابل رویت باشد.

جدول 3 مشخصات سیستم MQL مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

3- طراحی آزمایشات

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای ماشین کاری و شرایط روانکاری بر زبری سطح در ماشین کاری سوپرآلیاژ پایه آهن-نیکل A286، دو فاکتور سرعت برشی (v_c) و سرعت پیشروی (a_f) در عمق برش ثابت و در سه سطح، به عنوان اصلی ترین پارامترهای ماشین کاری در نظر گرفته شده‌اند. ماشین کاری با دو شرایط روانکاری حداقل مقدار و مرطوب صورت گرفته است. در این پژوهش، طرح آزمایش رویه پاسخ سطح برای طرح ریزی آزمایش‌ها بکار گرفته شده است. در این روش از تعداد آزمایش‌های ثابتی با توجه به سطوح و عوامل، استفاده می‌شود.

با استفاده از روش پاسخ سطح، 13 آزمایش برای هر شرایط روانکاری در نظر گرفته شده و در مجموع برای دو شرط روانکاری 26 آزمایش انجام شده است. در این 13 آزمایش، 5 آزمایش تکراری بوده که همان نقطه مرکزی در



Fig. 1 Image Roughness tester and Workpiece

شکل 1 تصویر زبری سنج و قطعه کار



Fig. 2 Nozzle MQL, tool and workpiece setup

شکل 2 چیدمان سر نازل دستگاه MQL نسبت به ابزار و قطعه کار

خوبی در تست‌ها از خود نشان داده است. ایجاد فشار 200 کیلوپاسکال به مخزن سیال برش باعث خروج سیال از خروجی مخزن می‌شود. هوای فشرده با فشار 600 کیلوپاسکال از مسیری دیگر به سیال خارج شده از تانک، در داخل یک پورت می‌رسد و با هم ترکیب شده و به علت اختلاف فشار آن دو، یک اسپری اولیه و ناقص در داخل لوله قبل از خروج از نازل دستگاه تولید می‌شود. در مرحله بعد این اسپری ناقص وارد یک نازل با ورودی 6 میلی‌متر و خروجی 1 میلی‌متر می‌شود. خروج هوا و سیال از این نازل که در آن یک مسیر غیر مستقیم و شکسته تعبیه شده، تحت فشار 600 کیلوپاسکال موجب شکسته شدن قطرات درشت اسپری شده و در هنگام خروج از نازل شاهد امتیاز شدن آن خواهیم بود. با خروج اسپری تحت فشار 6 بار، سرعت آن افزایش یافته و به منطقه برش تزریق می‌شود. سرعت و فشار بالای روانکار به همراه ابعاد میکرونی این ذرات موجب شده که قدرت نفوذ آن به مراتب بیشتر از حالت روانکار مرطوب شود. تخمین زده می‌شود مصرف سیال در این روش می‌تواند تا 10000 بار کمتر از حالت ماشین کاری مرطوب نیز تنظیم شود [9].

این دستگاه شامل یک قسمت الکتریکی شامل یک تایمر دیجیتالی به همراه یک شیر نیوماتیکی 5.3 با تحریک سولنوئیدی¹ بوده که در هنگام بی-باری (زمانیکه ماشین کاری صورت نمی‌گیرد) سیال را به داخل مخزن سیال هدایت کرده و از هدر رفتن سیال برش جلوگیری می‌کند.

از آب دی یونیزه به عنوان حلال پایه برای سیال برش استفاده شد. ترکیب آب دی یونیزه با روغن حل‌شونده (آب صابون) موجب می‌شود که امکان ایجاد واکنش‌های احتمالی در حین براده برداری در منطقه برش که



Fig. 3 A view of the spray produced in the MQL device

شکل 3 نمایی از اسپری تولیدشده در دستگاه MQL

جدول 3 مشخصات سیستم MQL

Table 3 characteristics system MQL

پارامتر	مقدار
دبی خروجی سیال	150Cc/hr
فشار اسپری	6 Bar
زاویه نازل نسبت به محور ابزار	60

¹ Solenoid

نظر گرفته‌شده‌اند. این روش یکی از پرکاربردترین روش‌های طرح‌ریزی آزمایش است [16]. با این روش بهتر و واضح‌تر می‌توان تغییرات خروجی را با توجه به پارامترهای ورودی مختلف نشان داد.

4- نتایج و بحث

پس از انجام هر آزمایش، مقادیر زبری سطح ناحیه ماشین‌کاری شده اندازه‌گیری شد. برای تعیین مقدار زبری سطح در هر نمونه، زبری‌سنجی در 3 ناحیه مختلف و هرکدام به طول ثابت صورت پذیرفت و میانگین این سه مقدار اندازه‌گیری شده، به‌عنوان زبری متوسط سطح ماشین‌کاری شده گزارش شد. زبری با معیار R_a اندازه‌گیری شده است. جدول 5 مقادیر پارامترهای برش در هر آزمایش را به‌همراه تمامی مقادیر اندازه‌گیری‌شده زبری سطح، در دو حالت MQL و م‌رطوب را نشان می‌دهد.

$$y = F(a_f, v_c) \quad (1)$$

$$y = B_0 + \sum_{i=1}^k B_i x_i + \sum_{i,j=1}^k B_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k B_{ii} x_i^2 \quad (2)$$

جدول 4 پارامترهای مورد آزمایش و سطوح آن

سطوح			فاکتورها
سطح 1	سطح 2	سطح 3	
45	70	95	سرعت برش (v_c) (mm/min)
0.12	0.22	0.32	سرعت پیشروی (a_f) (mm/rev)
1	---	---	عمق برش (d) (mm)

Table 5 Matrix Design Experiments of response surface method with R_a results

R_a (μm)	R_a (μm)	a_f	v_c	شماره
Wet	MQL	(mm/rev)	(m/min)	آزمایش
1.540	1.328	0.22	70	1
2.763	2.048	0.32	45	2
1.247	0.988	0.12	95	3
2.586	1.588	0.32	70	4
2.766	2.117	0.32	95	5
0.851	0.751	0.12	45	6
1.479	1.104	0.22	45	7
0.961	0.852	0.12	70	8
1.600	1.330	0.22	70	9
1.547	1.328	0.22	70	10
1.534	1.333	0.22	70	11
1.536	1.325	0.22	70	12
1.671	1.596	0.22	95	13

رابطه بین متغیرهای ورودی (سرعت برشی (v_c) و سرعت پیشروی (a_f) و پاسخ خروجی (y) با پیش‌بینی مقادیر پاسخ از مدل چند جمله‌ای

$$y = B_0 + B_1 v_c + B_2 a_f + B_{11} v_c^2 + B_{22} a_f^2 + B_{12} v_c a_f \quad (3)$$

مقادیر ضرایب معادله‌ی غیرخطی فوق به کمک روش رگرسیونی و به کمک نرم‌افزار آماری مینی‌تب² 16 محاسبه شدند. با جایگذاری مقادیر در معادله (3) مدل زبری سطح قطعه‌کار برای پارامترهای کدبندی شده به‌صورت رابطه (4) خواهد بود:

مدل نهایی زبری سطح برای پارامترهای واقعی به صورت رابطه (5) می باشد:

$$Ra = 0.53281 - 0.021124v + 6.24572f + 0.000215283v^2 + 0.45517f^2 - 0.016800vf \quad (5)$$

سرعت بیشتر وی هستند.

تجزیه و تحلیل واریانس برای بررسی مناسب بودن و کیفیت مدل رگرسیونی برازش شده و پارامترهای آن استفاده می‌شود. برای بررسی مناسب بودن مدل مقدار عدد فیشر (F) مدنظر گرفته می‌شود. نتایج آنالیز واریانس برای زبری سطح در جدول 6 ارائه شده است.

است که نشان دهنده مناسب بودن مدل رگرسیونی درجه دوم برای پیش بینی زبری سطح قطعه کار می باشد. همچنین مقدار $\text{prob} > f$ برای مدل مورد نظر کمتر از 0.0500 است که این امر گویای معنادار بودن مدل برازش شده است. همچنین مقدار عدد فیشر برای سرعت پیشروی 76.64 بوده که بیشترین مقدار است. این امر نشان دهنده آن است که تأثیر سرعت برش بر زبری سطح نسبت به دیگر پارامترها بیشتر بوده است.

4-2- بررسی تأثیر یارامترهای ماشین کاری بر زبری سطح

شکل 4 میزان تأثیر سرعت برشی بر مقدار زبری سطح برای حالت روانکاری مرطوب را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که میزان زبری سطح قطعه‌کار با سرعت افزایش سرعت برش از مقدار 45 تا 95 متر بر دقیقه برای میزان پیشروی مختلف به صورت جزئی افزایش می‌یابد. که این امر به تشکیل براده با لبه

جدول 6 نتایج تحلیل واریانس برای زبری سطح

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	عدد فیشر	prob>f
	(SS)	(SS)	(MS)	(F)	
مدل رگرسیونی	1.84	5	0.37	16.92	0.0009
سرعت برش	0.11	1	0.11	4.88	0.0629
سرعت پیشروی	1.67	1	1.67	76.64	<0.0001
سرعت×سرعت	0.050	1	0.050	2.30	0.1732
پیشروی×پیشروی	5.722E-5	1	5.722E-5	2.632E-3	0.9605
سرعت×پیشروی	7.056E-3	1	7.056E-3	0.32	0.5867
خطا	0.15	7	0.022		
مجموع	1.99	12			

¹ Response function

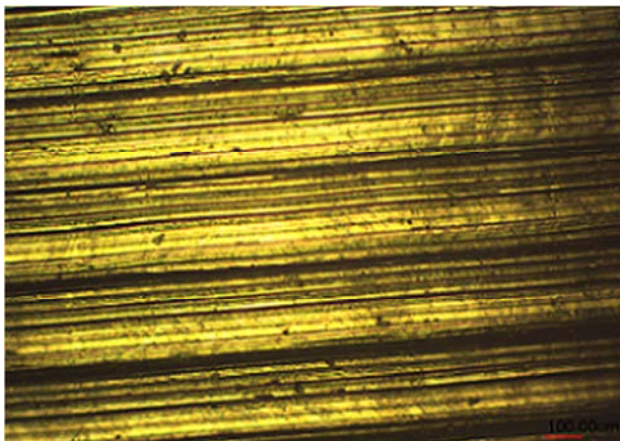


Fig. 6 Developed image with an optical microscope of the workpiece surface under wet lubrication (cutting speed 70 m/min, feed rate 0.32 rev/min)

شکل 6 تصویر تهیه شده با میکروسکوپ نوری از سطح قطعه کار تحت روانکاری مرطوب (سرعت برشی 70 متر بر دقیقه و سرعت پیشروی 0.32 میلی متر بر دور)

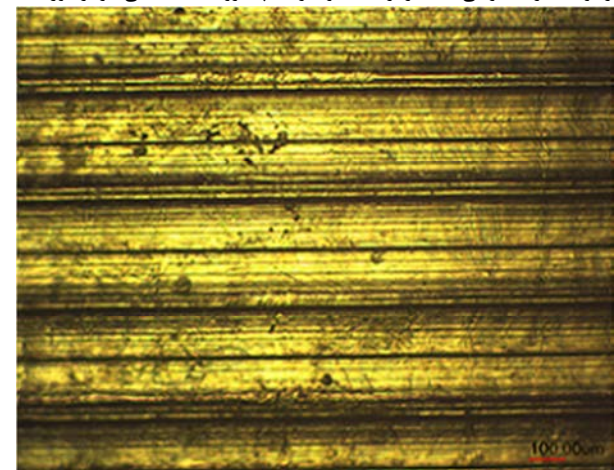


Fig. 7 Developed image with an optical microscope of the workpiece surface under wet lubrication (cutting speed 95 m/min, feed rate 0.32 rev/min)

شکل 7 تصویر تهیه شده با میکروسکوپ نوری از سطح قطعه کار تحت روانکاری مرطوب (سرعت برشی 95 متر بر دقیقه و سرعت پیشروی 0.32 میلی متر بر دور)

با توجه به تصاویر فوق، مشاهده می شود سایش چسپندگی تحت مکانیزم براده با لبه انباشته و لایه انباشته در سرعت برش 95 متر بر دقیقه و سرعت پیشروی 0.32 میلی متر بر دور مشاهده شده است. علاوه بر آن سایش ساییدگی شدید در قسمت راست لبه برش هم مشاهده می شود که تیزی لبه در آن قسمت را به طور کامل از بین برده است.

شکل 10 تغییرات زبری سطح قطعه کار با افزایش سرعت برش برای حالت روانکاری با MQL را نشان می دهد.

در شکل 10 مشاهده می شود که با افزایش سرعت برش در سرعت پیشروی ثابت، زبری سطح افزایش می یابد. این امر به خواص ذاتی ماده قطعه کار برمی گردد که با افزایش سرعت برش، تعامل براده با سطح ابزار افزایش یافته و قدرت نفوذ روانکار نیز به همان نسبت کاهش می یابد ولی نباید فراموش کرد که حتی افزایش مقدار زبری سطح با افزایش سرعت برش در روش حداقل مقدار روانکار نسبت به زبری سطح محاسبه شده در روش روانکاری مرطوب تحت شرایط سرعت برشی و پیشروی یکسان کمتر است. تمام مقادیر به دست آمده از زبری سطح پایانی قطعه کار برای حالت

انباشه و سایش جزئی ابزار مربوط می شود. در پارامترهای برشی فوق تحت شرایط روانکاری مرطوب، به علت عدم نفوذ مناسب سیال برش و به دنبال آن ایجاد حرارت که در بازه دمایی تشکیلی براده با لبه انباشته است موجب چسپیدن براده به سطح ابزار و سپس بر روی سطح ماشین کاری شده قطعه کار می شود. این براده چسپیده شده به سطح قطعه موجب خراب شدن صافی سطح آن می شود و به این ترتیب زبری سطح افزایش می یابد. آزمایش های صورت گرفته به همراه تصاویر میکروسکوپ نوری تهیه شده از سطح قطعه کار مطابق شکل 5، گویای این امر است که این آلیاژ استعداد زیادی به تشکیل براده با لبه انباشته دارد پس باید گفت که انتخاب پارامترهای برش برای ماشین کاری این آلیاژ بسیار مهم است.

در سرعت پیشروی 0.32 میلی متر بر دور برای سرعت های برش 70 و 95 متر بر دقیقه، براده با لبه انباشته به صورت چشمگیر مشاهده نشده است. شکل های 6 و 7 تصاویر تهیه شده با میکروسکوپ نوری از سطح قطعه کار تحت شرایط روانکاری مرطوب به ترتیب برای سرعت برشی 70 و 95 متر بر دقیقه و سرعت پیشروی ثابت 0.32 میلی متر بر دور را نشان می دهد. در اشکال فوق براده با لبه انباشته چشمگیری دیده نمی شود.

شکل های 8 و 9 تصویر SEM از سطح براده ابزار تحت شرایط روانکاری مرطوب به ترتیب برای سرعت برشی 70 و 95 متر بر دقیقه و سرعت پیشروی ثابت 0.32 میلی متر بر دور را نمایش می دهد. از تصاویر فوق مشاهده می شود که با افزایش سرعت برش از 70 به 95 متر بر دقیقه، سایش شدیدی در ابزار اتفاق می افتد و به دنبال آن زبری سطح قطعه کار دوباره افزایش می یابد.

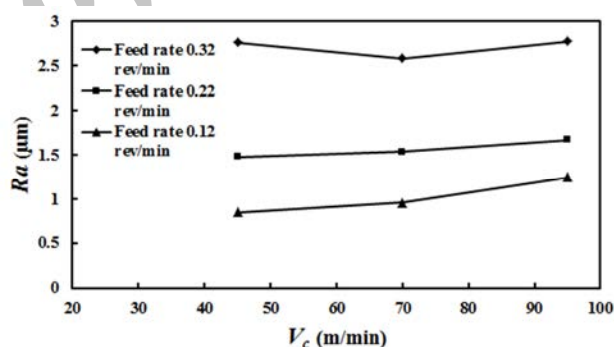


Fig. 4 Effect of cutting speed on surface roughness for different feed rate under wet lubrication conditions

شکل 4 تأثیر سرعت برش بر زبری سطح برای سرعت های پیشروی مختلف تحت شرایط روانکاری مرطوب

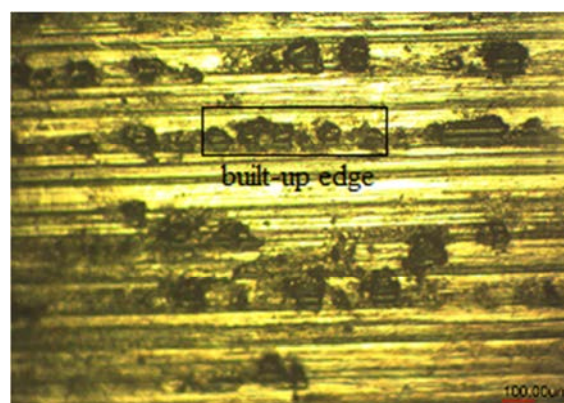


Fig. 5 Developed image with an optical microscope of built-up edge formation

شکل 5 تصویر تهیه شده با میکروسکوپ نوری از تشکیل براده با لبه انباشته

حالت روانکاری با حداقل مقدار، کاهش زبری سطح ناگهانی مشاهده می‌شود که برتری بالای این روش نسبت به روش مرطوب را نشان می‌دهد.

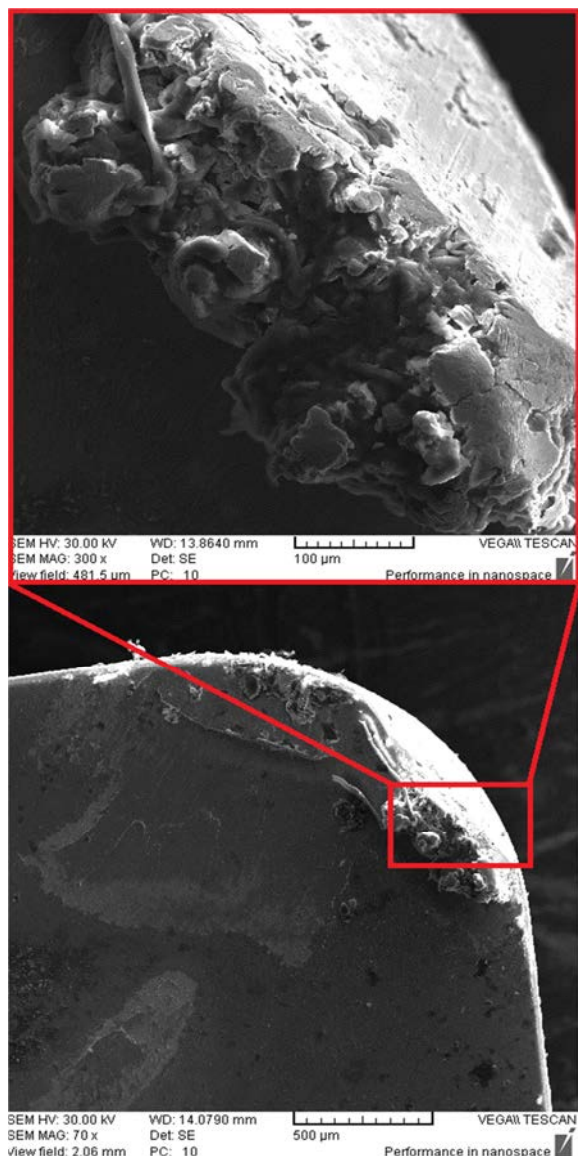


Fig. 9 SEM image of rake face of tool under wet lubrication (cutting speed 95 m/min, feed rate 0.32 rev/min)

شکل 9 تصویر SEM از سطح براده ابزار تحت روانکاری مرطوب (سرعت برشی 95 متر بر دقیقه و سرعت پیشروی 0.32 میلی‌متر بر دور)

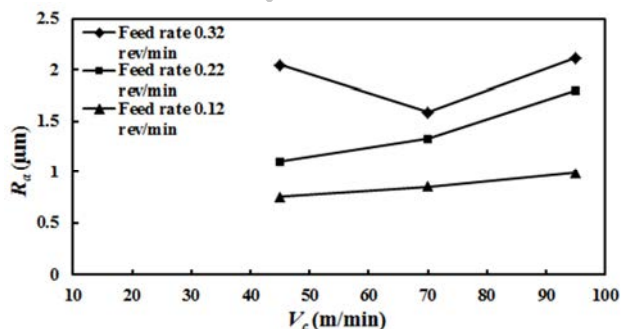


Fig. 10 Effect of cutting speed on surface roughness for different feed rate under MQL conditions

شکل 10 تأثیر سرعت برش بر زبری سطح برای سرعت‌های پیشروی مختلف تحت شرایط حداقل مقدار روانکار

روانکاری به صورت حداقل مقدار نسبت به حالت روانکاری مرطوب بهتر بوده است که این امر بیان‌کننده برتری این روش است. در روش حداقل مقدار روانکار، مایع روانکار تحت فشار بالایی قرار گرفته و با هوا مخلوط شده و از نازل عبور می‌کند. تحت چنین شرایطی مایع روانکار به صورت کره با ابعاد میکرونی درمی‌آید. این ذرات کروی به علت ابعاد ریز قابلیت نفوذ آنها به منطقه برش به شدت افزایش می‌یابد. نفوذ کامل این ذرات با سرعت و فشار بالا به منطقه برش و ایجاد یک لایه فیلم روانکار و کاهش سطح تماس ابزار با قطعه‌کار عامل اصلی برتری این روش نسبت به روش روانکاری مرطوب است.

4-2-2- سرعت پیشروی

شکل‌های 11 و 12 تأثیر تغییرات سرعت پیشروی بر میزان زبری سطح در سرعت برش ثابت، به ترتیب برای شرایط روانکاری مرطوب و حداقل مقدار روانکار را نشان می‌دهد. در ابتدای فرایند با کاهش سرعت پیشروی، حرارت تولیدشده افزایش می‌یابد [9]. افزایش جزئی حرارت، موجب نرم شدگی قطعه کار می‌شود. در این بازه دمایی استحکام قطعه کار کم شده ولی تأثیر چندانی بر مواد ابزار ندارد. به این ترتیب برداشت براده از سطح قطعه کار آسان‌تر شده و نیروی برش کاهش یافته و به دنبال آن زبری سطح قطعه‌کار و سایش ابزار بهبود می‌یابد. ولی با افزایش سرعت پیشروی، سایش ابزار به مقادیر بیشتری سوق پیدا کرده و کیفیت سطح قطعه‌کار کاهش می‌یابد. اگر فرایند ماشین‌کاری با وجود سرعت پیشروی نامناسب ادامه پیدا کند شاهد شکست لبه برش و یا سایش شدید سطح براده و پهلوی اصلی ابزار (روانکاری مرطوب) سرعت پیشروی 0.32 میلی‌متر بر دور و سرعت برشی 95 متر بر دقیقه) خواهیم بود که کیفیت نامناسب سطح قطعه‌کار به وضوح گویای این انتخاب نامناسب برای سرعت پیشروی است.

برای حالت روانکاری مرطوب برای سرعت برشی 45 متر بر دقیقه و سرعت پیشروی 0.32 میلی‌متر بر دور، ناپیوستگی در تغییرات میزان زبری سطح مشاهده می‌شود که به پدیده براده با لبه انباشته مرتبط است. در سرعت برش 70 متر بر دقیقه و سرعت پیشروی 0.32 میلی‌متر بر دور برای

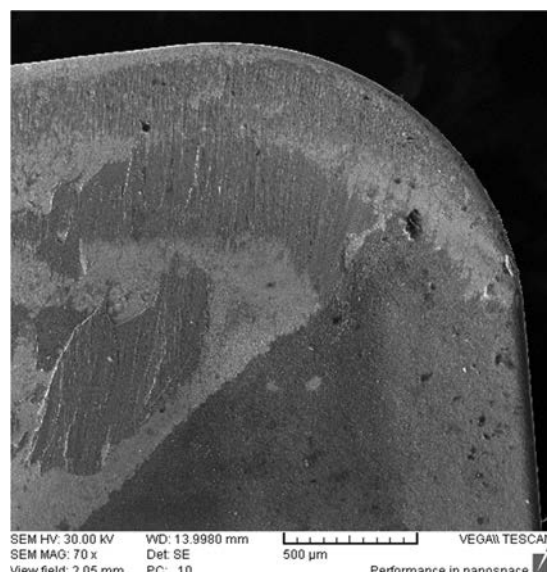


Fig. 8 SEM image of rake face of tool under wet lubrication (cutting speed 70 m/min, feed rate 0.32 rev/min)

شکل 8 تصویر SEM از سطح براده ابزار تحت روانکاری مرطوب (سرعت برشی 70 متر بر دقیقه و سرعت پیشروی 0.32 میلی‌متر بر دور)

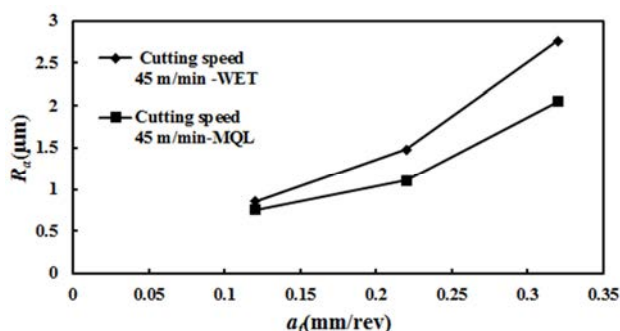


Fig. 13 Comparison surface roughness of two methods MQL and wet in cutting speed of 45 meters per minute and variable feed rate

شکل 13 مقایسه میزان زبری سطح دو روش MQL و مرطوب در سرعت برش 45 متر بر دقیقه و سرعت پیشروی متغیر

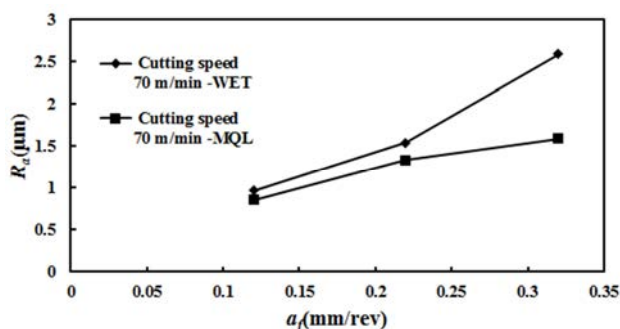


Fig. 14 Comparison surface roughness of two methods MQL and wet in cutting speed of 70 meters per minute and variable feed rate

شکل 14 مقایسه میزان زبری سطح دو روش MQL و مرطوب در سرعت برش 70 متر بر دقیقه و سرعت پیشروی متغیر

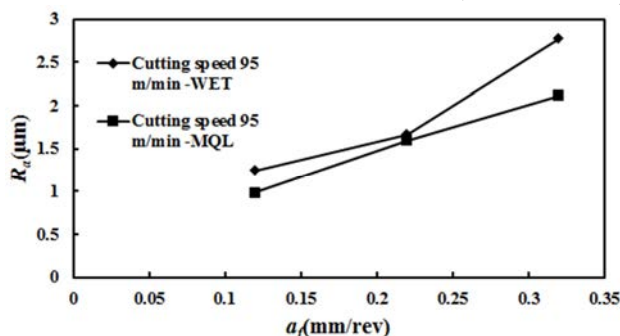


Fig. 15 Comparison surface roughness of two methods MQL and wet in cutting speed of 95 meters per minute and variable feed rate

شکل 15 مقایسه میزان زبری سطح دو روش MQL و مرطوب در سرعت برش 95 متر بر دقیقه و سرعت پیشروی متغیر

ارتعاش درآید به همین علت شاهد خطوط منحنی شکل عمود بر خطوط زبری سطح خواهیم بود که باعث کاهش کیفیت سطح قطعه کار بعد از فرایند ماشین کاری می شود.

شکل 17 خطوط یکپارچه و منظم زبری سطح بعد از فرایند ماشین کاری به روش حداقل مقدار روانکار را نشان می دهد. این خطوط منظم گویای روانکاری پیوسته این روش در طول اجرای فرایند است.

4-2-3- تعیین پارامترهای بهینه

در شکل های 18 و 19 خروجی نرم افزار مینی تب به منظور انتخاب شرایط بهینه با در نظر گرفتن زبری سطح کمینه تحت شرایط روانکاری حداقل مقدار و مرطوب به صورت سه بعدی نمایش داده شده است. شکل های فوق

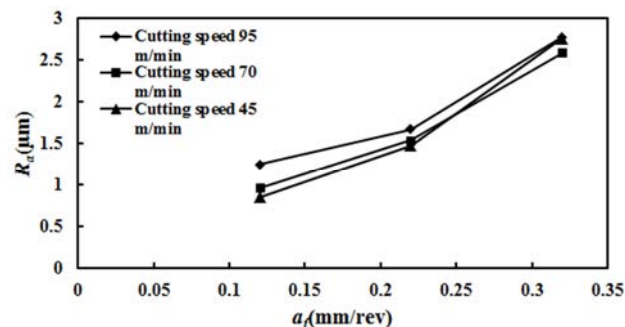


Fig. 11 Effect of feed rate variations on surface roughness in Constant cutting speed under wet lubrication conditions

شکل 11 تأثیر تغییرات سرعت پیشروی بر زبری سطح قطعه کار در سرعت برشی ثابت تحت شرایط روانکاری مرطوب

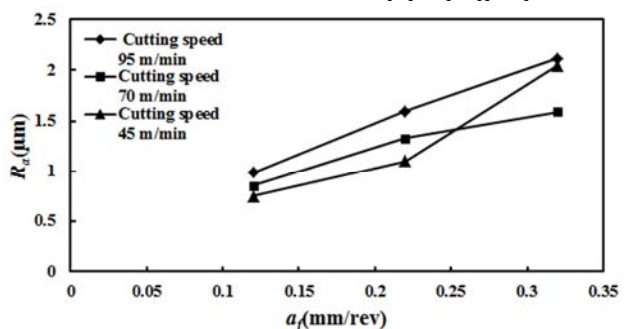


Fig. 12 Effect of feed rate variations on surface roughness in Constant cutting speed under MQL conditions

شکل 12 تأثیر تغییرات سرعت پیشروی بر زبری سطح قطعه کار در سرعت برشی ثابت تحت شرایط حداقل مقدار روانکار

میزان تغییرات شیب نمودار برای هر سطح از سرعت برشی در دو حالت روانکاری مختلف، متفاوت است. به عبارت دیگر، برای حالت MQL میزان افزایش شیب نمودار نسبت به شیب نمودار روانکاری مرطوب کمتر است که این امر نشانگر آن است که تغییرات سرعت پیشروی بر افزایش زبری سطح در فرایند ماشین کاری تحت روانکاری مرطوب تأثیر بیشتری داشته است ولی حساسیت تغییرات زبری در روش MQL کمتر بوده است. پس می توان گفت روش حداقل مقدار روانکار پایداری بیشتری نسبت به تغییرات نرخ پیشروی از نقطه نظر زبری سطح نسبت به حالت مرطوب دارد. که این امر دلیل دیگر برتری روش MQL نسبت به روانکار مرطوب است.

شکل های 13، 14 و 15 مقایسه میزان زبری سطح دو روش MQL و مرطوب در سرعت های برش و پیشروی مختلف را نشان می دهد. در تمام حالات موجود، کیفیت سطح قطعه کار تحت شرایط MQL بهتر از روش مرطوب است.

نمودارهای فوق به وضوح نشان می دهد که اختلاف زبری سطح در سرعت پیشروی 0.32 میلی متر بر دور در دو حالت روانکاری مختلف چشمگیرتر است.

شکل های 16 و 17 تصویر میکروسکوپ نوری از سطح ماشین کاری شده قطعه کار در سرعت برش 95 متر بر دقیقه و سرعت پیشروی 0.12 میلی متر بر دور را به ترتیب برای دو حالت روانکاری مرطوب و حداقل مقدار نشان می دهد.

لهیدگی سطح قطعه کار تحت ماشین کاری با شرایط روانکاری مرطوب به راحتی در شکل 16 قابل رویت است. عدم نفوذ ذرات روانکار به منطقه ماشین کاری، موجب شده که نیروهای وارد بر ابزار افزایش یافته و ابزار به

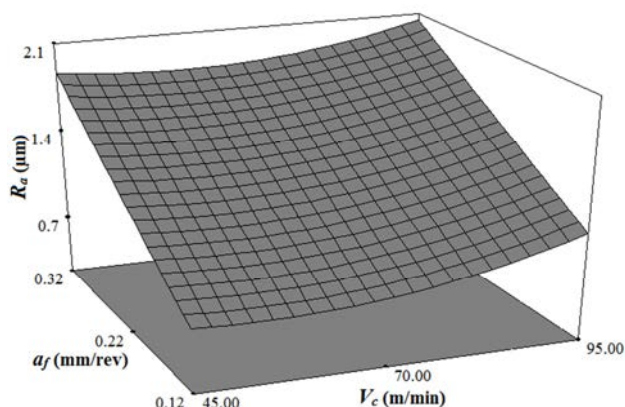


Fig. 18 three-dimensional picture of the effect of cutting speed and feed rate at the same time on the quality of workpiece surface under MQL condition

شکل 18 تصویر سه بعدی سطح مربوط به تأثیر همزمان سرعت برشی و نرخ پیشروی بر کیفیت سطح پایانی قطعه کار تحت شرایط MQL

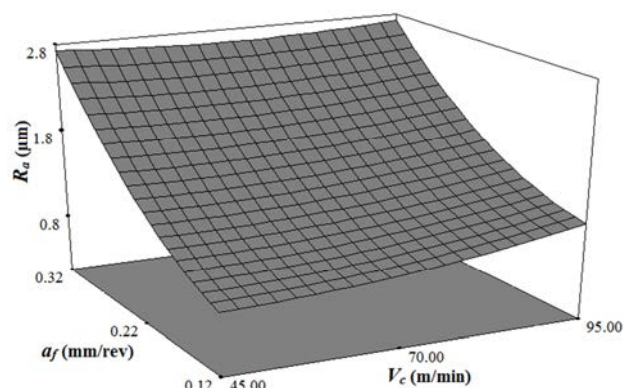


Fig. 19 three-dimensional picture of the effect of cutting speed and feed rate at the same time on the quality of workpiece surface under wet condition

شکل 19 تصویر سه بعدی سطح مربوط به تأثیر همزمان سرعت برشی و نرخ پیشروی بر کیفیت سطح پایانی قطعه کار تحت شرایط مرطوب

استفاده از MQL باعث افزایش قدرت نفوذ ذرات سیال روانکار-خنک‌کار به منطقه برش شده و با کاهش زبری سطح باعث بهبود فرایند می‌شود. همچنین با افزایش مقدار پیشروی در سرعت برش ثابت، مقادیر زبری سطح برای شرایط مختلف روانکاری از هم فاصله گرفته و مقدار آن برای حالت MQL کمتر شده است.

میزان تغییرات شیب نمودار تأثیر تغییرات سرعت پیشروی بر زبری سطح برای هر سطح از سرعت برشی در دو حالت روانکاری مختلف، متفاوت است. به عبارت دیگر، میزان افزایش شیب نمودار برای حالت MQL نسبت به روانکاری مرطوب کمتر است و این تفاوت نشانگر آن است که تغییرات سرعت پیشروی بر افزایش زبری سطح در فرایند ماشین کاری تحت روانکاری مرطوب تأثیر بیشتری داشته است ولی حساسیت تغییرات زبری در روش MQL کمتر بوده است. پس می‌توان گفت روش حداقل مقدار روانکار پایداری بیشتری نسبت به تغییرات نرخ پیشروی از نقطه نظر زبری سطح نسبت به روش حالت مرطوب دارد و یکی از دلایل برتری روش MQL نسبت به روش روانکاری مرطوب است.

علاوه بر بهبود زبری سطح در روش حداقل مقدار روانکار، میزان مصرف سیال برش به علت ماهیت فرایند به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد که از

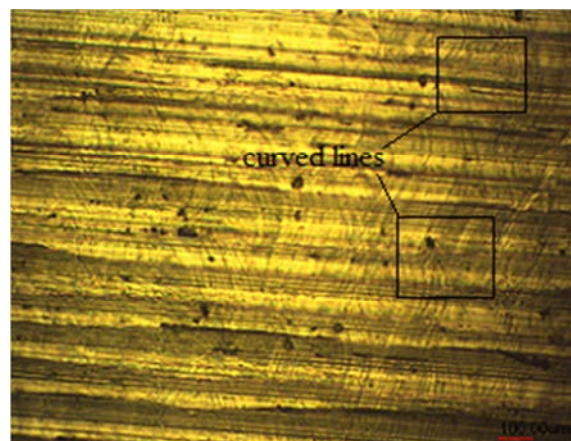


Fig. 16 Developed image with an optical microscope of the workpiece surface under wet lubrication

شکل 16 تصویر تهیه شده با میکروسکوپ نوری از سطح قطعه کار تحت روانکاری مرطوب

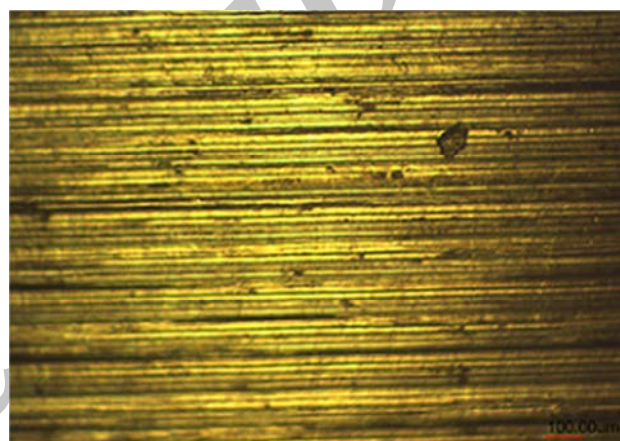


Fig. 17 Developed image with an optical microscope of the workpiece surface under MQL

شکل 17 تصویر تهیه شده با میکروسکوپ نوری از سطح قطعه کار تحت روانکاری حداقل مقدار

نمودار سه بعدی زبری سطح به همراه تأثیر همزمان دو پارامتر سرعت برش و سرعت پیشروی را به ترتیب برای حالت روانکاری MQL و روش مرطوب نشان می‌دهد. با توجه به نکات بیان شده زبری بهینه تحت شرایط روانکاری با حداقل مقدار در سرعت برشی 45 متر بر دقیقه و نرخ پیشروی 0.12 میلی-متر بر دور حاصل می‌شود و مقدار آن برابر 0.751 میکرون در معیار R_a است. در شرایط روانکاری مرطوب نیز مانند حالت MQL نقطه بهینه در سرعت برشی 45 متر بر دقیقه و نرخ پیشروی 0.12 میلی-متر بر دور صورت می‌گیرد ولی باید توجه داشت که کیفیت سطح این حالت کمتر از حالت MQL است. با توجه به شکل 19 می‌توان گفت که در نرخ پیشروی 0.32 میلی-متر بر دور تغییر سرعت برش تأثیر چندانی بر زبری سطح ندارد و علت آن هم تشکیل براده با لبه انباشته در سرعت برش پایین است.

5- نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی تجربی میزان تأثیر روش روانکاری با تغییرات سرعت پیشروی و سرعت برش بر مقدار زبری سطح در فرایند تراش کاری سوپرآلیاژ پایه آهن-نیکل A286 پرداخته است. آزمایش‌ها تحت شرایط روانکاری مرطوب و حداقل مقدار روانکار صورت پذیرفته است. نتایج نشان می‌دهد که

- نقطه نظر اقتصادی و زیست محیطی اهمیت بسزایی دارد.
- نتایج تجربی این پژوهش نشان داد که روش MQL قابلیت ماشین کاری سوپرآلیاژ A286 را از نقطه نظر افزایش کیفیت سطح، بهبود بخشیده و از نقطه نظر زیست محیطی، MQL خواهان تولید پاک بوده و جایگزین بسیار مناسب برای روش های مرطوب و خشک است.
- 6- مراجع**
- [1] 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 فارسی)
 - [2] A. R. Omiddodman, H. Hassanpour, M. H. Sadeghi, A. Rasti, M. H. Saadatbakhsh, Evaluation of workpiece hardness and cutting parameters effects on cutting force and surface roughness in drilling using vegetable-based cutting fluid, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 265-271, 2015. (in Persian فارسی)
 - [3] M.R. Shabgard, M. Jafarian Zenjanab, R. Azarafza, Experimental study on the influence of CuO nanofluid on surface roughness and machining force in turning of AISI 4340 steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 27-33, 2014. (in Persian فارسی)
 - [4] T. Brockhoff, A. Walter, Fluid minimization in cutting and grinding: abrasives, *Journal of Abrasive Engineering Society Butler*, pp. 38-42, 1998.
 - [5] H. S. Abdalla, W. Baines, G. McIntyre, C. Slade, Development of novel sustainable neat-oil metal working fluids for stainless steel and titanium alloy machining. part1. formulation development, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 34, No. 1, pp. 21-33, 2007.
 - [6] A. Shokrani, V. Dhokia, S. T. Newman, Environmentally Conscious Machining of Difficult-to-Machine Materials with Regard to Cutting Fluids, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 57, pp. 83-101, 2012.
 - [7] R.C. Reed, *The Superalloys: Fundamentals and Applications*, pp. 2-8, London, Cambridge University Press, 2008.
 - [8] E. Ezugwu, Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, No. 12, pp. 1353-1367, 2005.
 - [9] S. Debnath, M. M. Reddy, Q. Sok Yi, Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: A Review. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 83, pp. 33-47, 2014.
 - [10] D. Lalwani, N. Mehta, P. Jain, Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 206, No. 1-3, pp. 167-179, 2008.
 - [11] A. Hosseini Tazehkandi, F. Pilehvarian, B. Davoodi, Experimental investigation on removing cutting fluid from turning of Inconel 725 with coated carbide tools, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 80, pp. 271-281, 2014.
 - [12] S. Zhang, J.F. Li, Y.W. Wang, Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 32, No. 2, pp. 81-87, 2012.
 - [13] B. Davoodi, A. H. Tazehkandi, Experimental investigation and optimization of cutting parameters in dry and wet machining of aluminum alloy 5083 in order to remove cutting fluid, *Journal of Cleaner Production* xxx 1-9, 2014.
 - [14] N. R. Dhar, M. W. Isla., S. Islam, M. A. H. Mithu, The influence of Minimum Quantity of Lubrication (Mql) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning Aisi-1040 steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 171, No. 1, pp. 93-99, 2006.
 - [15] S. Amini, H. Khakbaz, Investigation of tool life with simple and viper ceramic tools in near dry machining in high speed turning, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 83-88, 2014. (in Persian فارسی)
 - [16] B. Davoodi, B. Eskandari, Investigation of tool life and wear mechanisms in turning of N-155 iron-nickel-base superalloy using response surface methodology, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 51-58, 2015. (in Persian فارسی)