مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد 1396، دوره 17، شماره 3، ص‌ص 263-269

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تأثیر روانکاری کمینه بر زبری سطح در سخت‌تراشی فولاد بلبرینگ 100Cr6 با ابزار نانو سی‌بی‌ان

محمدرضا نیری[1]، محمدمهدی ابوترابی*[2]، محمد حدادزاده[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد
3- دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه امیرکبیر، تهران
* یزد، صندوق پستی 89195-741، abootorabi@yazd.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 19 دی 1395
پذیرش: 23 بهمن 1395
ارائه در سایت: 21 اسفند 1395

کلید واژگان:
سخت‌تراشی
زبری سطح
روانکاری کمینه
نانو سی‌بی‌ان

چکیده

یکی از روش‌های جدید روانکاری در فرآیندهای ماشین‌کاری، روانکاری کمینه است. در این روش، مقدار بسیار کمی از سیال توسط هوای فشرده بصورت اسپری در آمده و به عنوان روانکار استفاده می‌شود. یکی از مزایای این روش، کاهش آلودگی محیط زیست و اثرات نامطلوب بر سلامتی اپراتور نسبت به روانکاری معمولی (تر) است. در این تحقیق، تأثیر روانکاری کمینه بر زبری سطح در سخت‌تراشی فولاد بلبرینگ 100Cr6 مورد بررسی قرار گرفته و با دو روش خشک و تر مقایسه شده است. برای انجام روانکاری کمینه، تجهیزاتی به دستگاه تراش اضافه گردید. برای براده‌برداری از فولاد 100Cr6 از ابزار نانو سی‌بی‌ان که نسل جدید ابزارهای سی بی ان با تکنولوژی نانو است استفاده شد. آزمایش‌های تجربی با سه روش خشک، تر و روانکاری کمینه انجام گرفته است. برای بررسی زبری سطح، هر یک از پارامترهای برشی شامل سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش در سه سطح مختلف انتخاب و همه حالت‌های ممکن از ترکیب این پارامترها آزمایش شده است. طبق نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی و نتایج حاصل از آنالیز واریانس، نرخ پیشروی 68%، روش روانکاری 14%، سرعت برشی 4% و عمق برش کمتر از 1% بر زبری سطح تأثیر داشت. نتایج به دست آمده نشان داد که زبری سطح در روش روانکاری کمینه نسبت به ماشین‌کاری خشک و تر به طور متوسط به ترتیب % 42 و % 30 کاهش یافته است.

The effect of minimum quantity lubrication on surface roughness in hard turning of 100Cr6 bearing steel with Nano-CBN tool

Mohammad Reza Nayeri[1], Mohammad Mahdi Abootorabi[1*], Mohammad Haddad Zade[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 89195-741, Yazd, Iran, abootorabi@yazd.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 08 January 2017
Accepted 11 February 2017
Available Online 11 March 2017

Keywords:
Hard Turning
Surface Roughness
Minimum Quantity Lubrication
Nano-CBN

ABSTRACT

One of the new lubrication methods in machining processes is Minimum Quantity Lubrication (MQL). In this method, a very small amount of fluid by compressed air creates a spray and is used as lubricant. One of the advantages of this method compared to conventional (wet) lubrication is the reduction of environmental pollution and undesired effects on operator health. In the present study, the effect of minimum quantity lubrication on surface roughness in hard turning of 100Cr6 bearing steel has been investigated and compared with dry and wet machining methods. To perform MQL, some equipment has been added to the lathe machine. The tool used for material removal of 100cr6 steel is Nano-CBN that is a new generation of CBN tools with Nano technology. All experimental tests were performed in dry, wet and MQL conditions. For investigation of surface roughness, each of the cutting parameters including cutting speed, feed rate and cutting depth were selected in three different levels and all possible combinations of these parameters have been tested. According to experimental results and analysis of variance, feed rate 68%, lubrication method 14%, cutting speed 4% and cutting depth less than 1% affected on the surface roughness. The obtained results showed that the surface roughness in MQL method has been averagely decreased 42% and 30% in comparison with dry and wet machining, respectively.

1- مقدمه

فولاد 100Cr6 یکی از فولادهای پرکربن و دارای مقاومت به سایش بالا است. این فولاد در ساخت قطعه‌کارهایی که تحت سایش شدید قرار دارند مثل یاتاقان‌ها و بلبرینگ‌ها کاربرد زیادی دارد. به دلیل سختی بالا، این فولاد بعد از شکل‌دهی اولیه، به شکل آنیل شده وارد بازار می‌شود تا مصرف کنندگان بتوانند به راحتی آن را برش داده و به اندازه دلخواه تبدیل و در نهایت آن را

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. R. Nayeri, M. M. Abootorabi, M. Haddad Zade, The effect of minimum quantity lubrication on surface roughness in hard turning of 100Cr6 bearing steel with Nano-CBN tool, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 263-269, 2017 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.15.9]

سخت‌کاری کنند تا مقاومت به سایش خود را بدست آورد. برای رسیدن به اندازه و شکل نهایی، قطعه‌کار از جنس فولاد 100Cr6 نیاز به یکسری عملیات تکمیلی مثل سنگ‌زنی دارد. با استفاده از سخت‌تراشی[1] می‌توان بدون نیاز به مراحل فوق، قطعه را پس از سخت‌کاری مستقیماً ماشین‌کاری کرد و به شکل و اندازه نهایی همراه با کیفیت مطلوب رساند و در زمان و هزینه صرفه‌جویی نمود. در حالت کلی، به فرآیند تراشکاری که در آن شرایط برش ماده بسیار سخت و دشوار باشد، سخت‌تراشی گفته می‌شود. در سخت-تراشی، سختی قطعه‌کار معمولاً بالای 45 HRC است. هدف سخت‌تراشی، امکان حذف عملیات تکمیلی از جمله عملیات سنگ‌زنی است. در برخی موارد برای دستیابی به دقت‌های خیلی بالا، بعد از عملیات سخت‌تراشی عملیات سنگ‌زنی انجام می‌گیرد. با استفاده از روش سخت‌تراشی می‌توان به زبری سطح در محدوده 0.4 تا 0.8 میکرومتر، تلرانس دایره‌ای بودن در محدوده 2 تا 5 میکرومتر و تلرانس ابعادی در محدوده ±3 تا ±7 میکرومتر دست یافت. عموماً موادی از قبیل فولاد ابزارها، بلبرینگ‌ها و فولادهای سخت شده با روش سخت‌تراشی ماشین‌کاری می‌شوند. البته باید توجه داشت که براده‌برداری از برخی از مواد که دارای سختی پایین‌تر از 45 HRC بوده اما فرآیند شکل‌گیری براده در آنها بسیار سخت و دشوار است مثل آلیاژهای اینکونل، هستلوی و برخی از مواد خاص دیگر نیز در محدوده سخت‌تراشی قرار می‌گیرد. در سخت‌تراشی، دمای منطقه ماشین‌کاری بسیار بالا است. برای کاهش حرارت تولید شده در سخت‌تراشی باید از روانکاری و خنک‌کاری مناسب در حین فرآیند استفاده شود [1].

روانکارها و روش‌های روانکاری مختلفی در صنعت وجود دارد. معمول‌ترین روش روانکاری، روش تر (معمولی) است. در این روش، حجم زیادی از سیال به عنوان روانکار به منطقه برش اعمال می‌شود. روش روانکاری تر دارای معایبی از جمله حجم بالای مصرف سیال، پاشش سیال به اطراف، آلودگی‌های زیست محیطی، خطرات مربوط به سلامتی انسان و هزینه بالا است. در سخت‌تراشی، علاوه بر موارد فوق، به دلیل شرایط سخت براده‌برداری، روانکار به مقدار لازم به محل برش نفوذ نکرده و در کار روانکاری و خنک‌کاری اختلال صورت می‌گیرد؛ در نتیجه، کیفیت سطح قطعه یکنواخت و مطلوب نخواهد بود. به این دلیل، تمایل زیادی وجود دارد که ماشین‌کاری سخت بصورت خشک یا با روش‌هایی غیر از حالت روانکاری معمولی (تر) انجام گیرد. در حالت خشک، دمای بالای منطقه ماشین‌کاری باعث تغییر در ساختار سطح قطعه، کاهش عمر ابزار و پرتاب براده‌های داغ به اطراف شده و خطرات و مشکلاتی برای اپراتور بوجود می‌آید [2]. یکی از روش‌های روانکاری پیشنهاد شده برای کاهش معایب روش‌های روانکاری خشک و تر، روش روانکاری کمینه[2] است که درآن، حجم بسیار کمی از سیال (معمولاً روغن) توسط هوای فشرده بصورت اسپری در آمده و به عنوان یک روانکار به محل برش تزریق می‌گردد. حجم سیال مصرفی در این روش در محدوده 5 تا 150 میلی‌لیتر بر ساعت است که در مقایسه با روش روانکاری تر بسیار ناچیز است [3].

یکی از مشخصه‌های مهم یک قطعه، زبری سطح است که با توجه به جنس، ابعاد و محل کاربرد قطعه تعیین می‌شود. دست‌یابی به زبری سطح پایین یکی از دغدغه‌های مهم ماشینکاران در صنعت است.

ابیکاوا و همکاران [4] شیار تراشی فولاد کم کربن را تحت روانکاری کمینه، معمولی و خشک مورد مقایسه قرار دادند و نتیجه گرفتند که روانکاری کمینه سایش ابزار را کاهش می‌دهد. تاسدلن و همکاران [5] طول تماس فصل مشترک ابزار با براده در تراشکاری منقطع بر روی فولاد 100Cr6 در سه حالت خشک، خنک‌کاری با هوای فشرده و روانکاری کمینه را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که روش روانکاری کمینه میزان سطح تماس بین ابزار با براده را کم می‌کند. آن‌ها بیان کردند که میزان روغن مصرفی و پوشش ابزار نیز بر میزان تماس ابزار با براده تأثیر زیادی دارد. خان و همکاران [6] دریافتند که ماشین‌کاری همراه با روش روانکاری کمینه می‌تواند نیروهای برش در تراشکاری فولاد AISI 9310 را بین 5 تا 15٪ کاهش دهد. حصیب و همکاران [7] تأثیر نوع روانکاری را در فرآیند تراشکاری فولاد با درصد کربن متوسط با سه روش روانکاری تر، خشک و کمینه مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج به دست آمده نشان داد که روانکاری کمینه، دمای ماشین‌کاری را 10 تا 40 درصد نسبت به حالت خشک کاهش می‌دهد و همچنین باعث کاهش سایش ابزار و بهبود عمر ابزار می‌شود. زیکیانگ و همکاران [8] تحقیقی به منظور تعیین نرخ سایش و الگوی سایش در ماشین‌کاری آلیاژ تیتانیوم Ti–6Al–4V با دو روش خشک و روانکاری کمینه انجام دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که سایش با مکانیزم چسبندگی و سایش از طریق اکسیداسیون با استفاده از روش روانکاری کمینه کاهش می‌یابد. پرایرون و همکاران [9] در فرآیندهای فرزکاری و تراشکاری از روش روانکاری کمینه استفاده کردند. آن‌ها آزمایش‌های خود را با سه روش تر، خشک و روانکاری کمینه انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که روش روانکاری کمینه از لحاظ محیطی کاملاً تمیز و غیر سمی بوده و باعث کاهش اصطکاک در عملیات برش و در نتیجه، بهبود عمر ابزار می‌شود. المونافی و همکاران [10] در تراشکاری فولاد ضد زنگ سخت شده با دو روش خشک و روانکاری کمینه به این نتیجه رسیدند که روش روانکاری کمینه نسبت به روش خشک به دلیل روانکاری با روغن، دارای اصطکاک پایین‌تری بوده و دمای برش کمتری دارد. افزایش عمر ابزار و کاهش نیروی برش و زبری سطح در روانکاری کمینه نیز از نتایج تحقیق آنها بود. پاتوری و همکاران [11] در تراشکاری آلیاژ اینکونل 718 با استفاده از دو حالت روانکاری کمینه معمولی و روانکاری کمینه همراه با ذرات دی‌سولفید تنگستن به این نتیجه رسیدند که در شرایط مناسب، زبری سطح قطعه‌کارهای ماشین‌کاری شده در حالت روانکاری کمینه همراه با ذرات دی‌سولفید تنگستن نسبت به روش روانکاری کمینه معمولی بهبود یافته است. این کاهش زبری سطح تا 35٪ گزارش شده است. امینی و خاکباز [12] عمر ابزار سرامیکی ساده و وایپر را در فرآیند تراشکاری سرعت بالای سوپر آلیاژ مونل K500 مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها با دو روش خشک و روانکاری کمینه انجام شد. نتایج نشان داد که روش روانکاری کمینه تأثیر بسیار زیادی در کاهش سایش ابزار و کاهش زبری سطح قطعه دارد و پارامترهای سیستم روانکاری کمینه بر راندمان این روش تأثیر زیادی دارد. میزان سایش ابزار سرامیکی وایپر کمتر از سایش ابزار سرامیکی ساده بود. حسن‌پور و همکاران [13] تأثیر روش‌های روانکاری مختلف بر روی زبری سطح را در فرآیند فرزکاری سخت فولاد آلیاژی 4340 مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که همواره زبری سطح بدست آمده با روش روانکاری کمینه، نسبت به دو روش خشک و تر کمتر بود. همچنین با افزایش عمق برش و سرعت برشی، راندمان روش روانکاری کمینه نسبت به روش خشک و تر افزایش می‌یابد.

در این مقاله، تأثیر پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش و روش روانکاری بر زبری سطح در فرآیند تراشکاری فولاد بلبرینگ 100Cr6 بررسی شده است. زبری سطح قطعه‌کارهایی که با روش روانکاری کمینه

[1] Hard turning
[2] Minimum Quantity Lubrication (MQL)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.15.9]

ماشین‌کاری شده‌اند کمتر از روش‌های تر و خشک است. بررسی تحقیقات منتشر شده قبلی نشان می‌دهد که مقایسه همزمان سه روش روانکاری کمینه، تر و خشک در تراشکاری فولاد بلبرینگ پر کاربرد 100Cr6 تاکنون انجام نشده است. علاوه‌بر این، ابزار نانو سی‌بی‌ان که نسل جدید ابزارهای سی‌بی‌ان با تکنولوژی نانو است برای نخستین بار در این مقاله برای سخت تراشی این فولاد استفاده و معرفی شده‌است.

2- آماده‌سازی فرآیند و انجام آزمایش‌ها

قطعه‌کار استفاده شده در آزمایش‌های تجربی از جنس فولاد بلبرینگ 100Cr6 است که عناصر تشکیل دهنده این فولاد با دستگاه طیف سنج نوری تعیین و در جدول 1 ارائه شده است. شکل و اندازه قطعه‌کار استفاده شده در شکل 1 نشان داده شده است. قطعه‌کارها مطابق نقشه شکل 1 ماشین‌کاری شده‌اند. آزمایش‌ها توسط دستگاه تراش مدل TN40 ساخت شرکت ماشین سازی تبریز انجام گرفت که سیستم روانکاری تر بر روی آن وجود داشت. به منظور ترکیب سیال با هوای فشرده برای انجام روانکاری کمینه و تشکیل اسپری هوا و روغن، از مجموعه روانکاری کمینه سوار شده بر روی ماشین تراش که در شکل 2 نشان داده شده، استفاده شده است. اجزاء واحد روانکاری کمینه استفاده شده در آزمایش‌های تجربی در شکل 3 نشان داده شده است. واحد روانکاری کمینه استفاده شده، یک واحد مراقبت سری D ساخت شرکت فستو است. مجموعه روانکاری کمینه شامل کمپرسور هوا با قدرت 3 اسب بخار (جهت تأمین هوای فشرده)، شیلنگ فشار قوی، تنظیم کننده فشار هوا، فشارسنج، فیلتر و خشک کننده هوا، مخزن سیال، واحد ترکیب سیال با هوا و نازل است. ابزار استفاده شده برای براده‌برداری از جنس نانو سی‌بی‌ان، بدون پوشش و ساخت شرکت میکروبور روسیه بود. بر اساس استاندارد ISO، کد ابزار و ابزارگیر به ترتیب CNMA 120408 S020N MBR5025MC و DCLNR 2525 M 12 است. مجموعه اینسرت و ابزارگیر استفاده شده در آزمایش‌ها در شکل 4 نشان داده شده است. به منظور تعیین زبری سطح قطعه‌کارها از دستگاه زبری سنج مدل TR100 ساخت شرکت تایم با معیار سنجش زبری متوسط R_a استفاده شده است. زبری سطح هر نمونه سه بار و در سه نقطه متفاوت تعیین و میانگین آن‌ها به عنوان زبری سطح نهایی در نظر گرفته شد. طول کورس حرکت پراب زبری سنج بر اساس استاندارد ISO 4287 به اندازه 2.5 میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

سختی اولیه قطعه‌کارها در حدود 30 راکول‌سی بود. همه قطعه‌کارها توسط عملیات حرارتی سخت‌کاری شده‌اند. به این منظور، ابتدا قطعه‌کارها داخل کوره الکتریکی ساخت شرکت اِکسایتون[1] قرار گرفته و تا دمای 840 درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند. قطعه‌کارها به مدت 1 ساعت در این دما

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد 100Cr6

Table 1 Chemical composition of 100Cr6 steel

عنصر	درصد وزنی
آهن	96.3
کربن	1.01
سیلیسیوم	0.248
کرم	1.49
منگنز	0.374
نیکل	0.102
مس	0.163

[1] Exciton

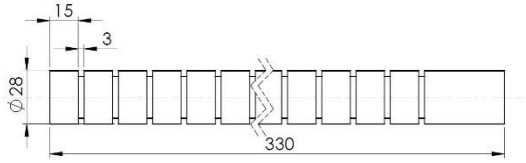

Fig. 1 The specimen of surface roughness test

شکل 1 قطعه نمونه تست زبری سطح

نگه‌داشته شدند تا کاملاً آستنیته شده و سپس در روغن تا دمای محیط سرد شدند تا ساختار قطعه به مارتنزیت تبدیل و اصطلاحاً کوئنچ گردد. پس از عملیات سخت کاری، جهت کاهش تنش‌های پسماند داخل قطعه، قطعه‌کارها به مدت 40 دقیقه در دمای 250 درجه سانتی‌گراد نگه داشته و سپس تا دمای محیط سرد شدند. سختی نهایی قطعه‌کارها در محدوده 55 تا 57 راکول‌سی قرار گرفت. مجموعه روانکاری کمینه چندین پارامتر مؤثر دارد که بر روی راندمان نهایی فرآیند تأثیرگذار هستند. این پارامترها شامل نوع سیال، دبی سیال، فشار هوا، محل پاشش سیال، نوع نازل (داخلی یا خارجی)، زاویه قرار گرفتن نازل و فاصله نازل از محل برش است. پارامترهای تنظیم شده برای مجموعه روانکاری کمینه در این تحقیق در جدول 2 ذکر شده است. روند کلی استفاده از سیال‌های برشی در فرآیندهای ماشینکاری به سمت حذف سیال‌های مضر برای محیط زیست و سلامتی انسان است و در این مسیر، یکی از پیشنهادها، استفاده از روغن‌های گیاهی است که روغن کرچک نیز در این دسته قرار می‌گیرد. برای انتخاب پارامترهای مربوط به روانکاری کمینه در جدول 2، از انجام آزمایش‌های مقدماتی با شرایط مختلف و داده‌های ذکر شده در سایر منابع منتشر شده استفاده شده است [14,15].

برای بررسی تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری و حالت‌های مختلف روانکاری بر روی زبری سطح فولاد بلبرینگ 100Cr6 در فرآیند تراشکاری، همه ترکیبات سه پارامتر سرعت برشی (V_C)، نرخ پیشروی (f) و عمق برش (a_p) در سه سطح مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. سطوح پارامترهای برشی مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی در جدول 3 نشان داده شده است. آزمایش‌ها در سه حالت خشک، تر و روانکاری کمینه و در مجموع، 81 آزمایش انجام شد. انتخاب سطوح پارامترهای برشی بر اساس پیشنهاد کارخانه سازنده ابزار و بررسی تحقیقات منتشر شده قبلی در مورد تراشکاری فولاد 100Cr6 انجام شده است.

3- نتایج و بحث

زبری سطح یکی از پارامترهای مهم برای بررسی قابلیت ماشین‌کاری محسوب می‌شود. عوامل زیادی بر زبری سطح تأثیرگذار است. جنس قطعه‌کار، جنس ابزار، هندسه ابزار، میزان ارتعاش دستگاه، سرعت برشی، نرخ پیشروی، روش روانکاری، نوع روانکار مصرفی و چندین عامل دیگر بر زبری سطح اثر می‌گذارند [1,16]. در این تحقیق، با توجه به ثابت بودن ماشین ابزار، ابزار و قطعه‌کار استفاده شده در همه تست‌ها و ثابت فرض کردن شرایط محیطی، تأثیر متغیرهای سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش و روش روانکاری بر زبری سطح در تراشکاری فولاد 100Cr6 مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از تست زبری سنجی نمونه‌های تراشکاری شده در جدول 4 ذکر شده است.

3-1- تأثیر سرعت برشی بر زبری سطح

سرعت برشی بر توان لازم برای ماشین‌کاری، میزان ارتعاش ایجاد شده،

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.15.9]

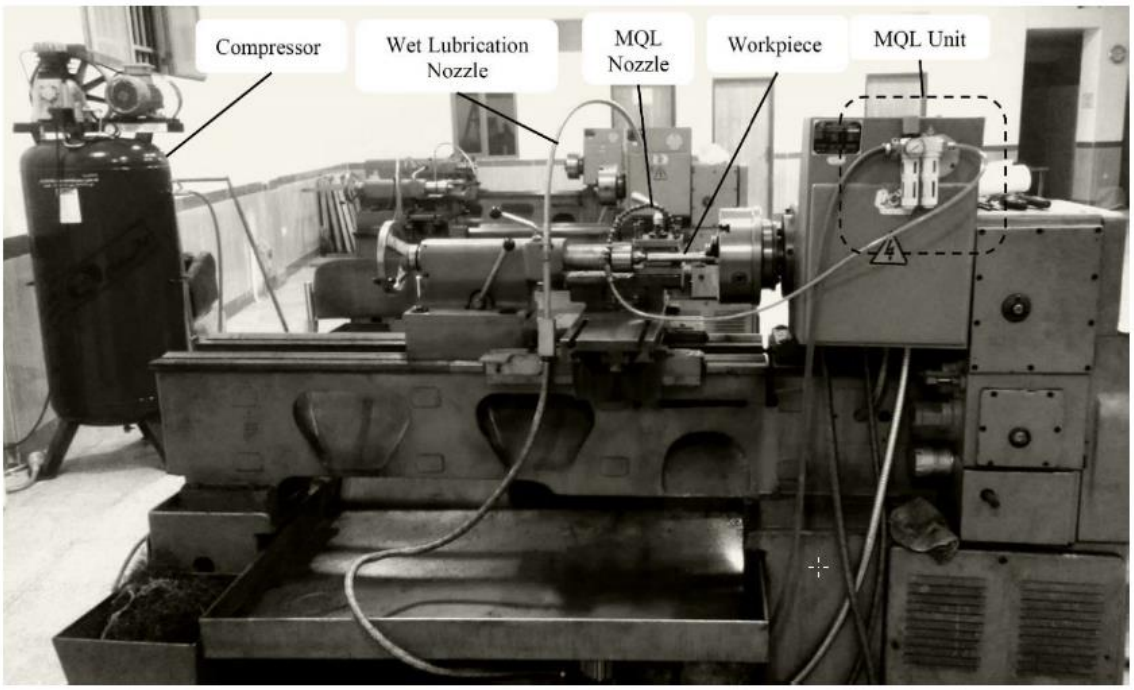

Fig. 2 Lathe machine with MQL equipment

شکل 2 ماشین تراش همراه با مجموعه روانکاری کمینه

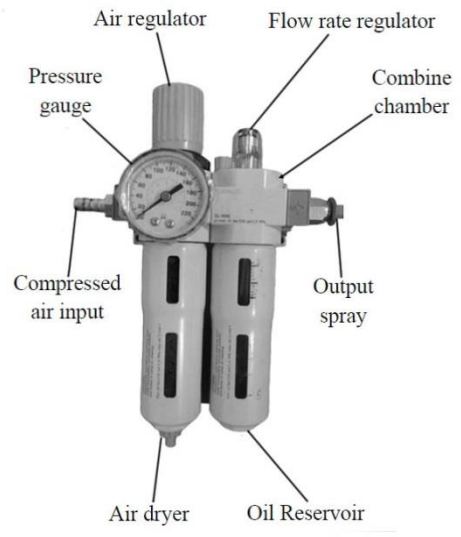

Fig. 3 Elements of MQL unit

شکل 3 اجزاء مجموعه روانکاری کمینه

جدول 2 پارامترهای مجموعه روانکاری کمینه

Table 2 Parameters of MQL setup

سیال	روغن کرچک
دبی سیال	30 ml/h
فشار هوا	5 bar
محل پاشش سیال	سطح براده ابزار
سیستم ترکیب سیال با هوای فشرده	خارجی
زاویه نازل	45 deg
فاصله نازل تا سطح ابزار	10 mm

زمان ماشین‌کاری، عمر ابزار و هزینه تمام شده قطعه تأثیرگذار است و

جدول 3 سطوح پارامترهای برشی ورودی برای آزمایش‌های زبری سطح

Table 3 Levels of input cutting parameters for surface roughness tests

سطح	روش روانکاری	سرعت برشی V_c (m/min)	نرخ پیشروی f (mm/rev)	عمق برش a_p (mm)
1	خشک	88	0.05	0.1
2	تر	123	0.14	0.2
3	کمینه	175	0.22	0.3

NCBN insert

Fig. 4 Tool holder with NCBN insert

شکل 4 ابزارگیر همراه با اینسرت نانوسی‌بی‌ان

تعیین مقدار مناسب آن از اهمیت زیادی برخوردار است. نحوه تأثیر سرعت برشی بر زبری سطح کاملاً مشخص نشده است. در برخی تحقیقات منتشر شده با افزایش سرعت برشی، زبری سطح افزایش و در برخی موارد با افزایش سرعت برشی، زبری سطح کاهش یافته است [17,18]. با توجه به نوع فرآیند و ماده مورد نظر، محدوده مشخصی از سرعت برشی برای دستیابی به زبری سطح مطلوب وجود دارد [19,20]. بنگا و آبرئو تأثیر پارامترهای برشی را بر قابلیت ماشین‌کاری فولاد 100Cr6 مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که برای دستیابی به کمترین زبری سطح، باید سرعت برشی را در محدوده خاصی تعیین کرد. در سرعت‌های برشی بالا به دلیل ارتعاش بالای دستگاه، زبری سطح نامطلوب خواهد شد و در سرعت‌های برشی پایین به دلیل افزایش اصطکاک، تشکیل لبه انباشته و افزایش نیروی لازم برای برش، زبری سطح افزایش می‌یابد [19]. در شکل 5، میانگین زبری سطح حاصل از

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.15.9]

جدول 4 طراحی آزمایش‌ها و مقادیر زبری سطح اندازه‌گیری شده

Table 4 Design of experiments and the measured surface roughness values

شماره آزمایش	روش روانکاری	V_c	f	a_p	R_a (µm)	شماره آزمایش	روش روانکاری	V_c	f	a_p	R_a (µm)	شماره آزمایش	روش روانکاری	V_c	f	a_p	R_a (µm)
1	1	1	1	1	0.53	28	2	1	1	1	0.38	55	3	1	1	1	0.39
2	1	1	1	2	0.58	29	2	1	1	2	0.48	56	3	1	1	2	0.46
3	1	1	1	3	0.69	30	2	1	1	3	0.57	57	3	1	1	3	0.51
4	1	2	1	1	0.94	31	2	2	1	1	0.79	58	3	2	1	1	0.61
5	1	2	1	2	1.00	32	2	2	1	2	0.86	59	3	2	1	2	0.64
6	1	2	1	3	1.04	33	2	2	1	3	0.89	60	3	2	1	3	0.78
7	1	3	1	1	2.28	34	2	3	1	1	1.75	61	3	3	1	1	1.01
8	1	3	1	2	2.33	35	2	3	1	2	1.78	62	3	3	1	2	1.05
9	1	3	1	3	2.24	36	2	3	1	3	1.73	63	3	3	1	3	0.94
10	2	1	2	1	0.46	37	2	1	2	1	0.53	64	3	1	2	1	0.40
11	2	1	2	2	0.48	38	2	1	2	2	0.48	65	3	1	2	2	0.46
12	2	1	2	3	0.51	39	2	1	2	3	0.65	66	3	1	2	3	0.45
13	2	2	2	1	0.93	40	2	2	2	1	0.75	67	3	2	2	1	0.59
14	2	2	2	2	1.01	41	2	2	2	2	0.78	68	3	2	2	2	0.62
15	2	2	2	3	1.07	42	2	2	2	3	0.90	69	3	2	2	3	0.60
16	2	3	2	1	2.20	43	2	3	2	1	1.61	70	3	3	2	1	1.13
17	2	3	2	2	2.23	44	2	3	2	2	1.75	71	3	3	2	2	1.24
18	2	3	2	3	2.12	45	2	3	2	3	1.59	72	3	3	2	3	1.30
19	3	1	3	1	1.85	46	2	1	3	1	0.83	73	3	1	3	1	0.32
20	3	1	3	2	1.73	47	2	1	3	2	0.70	74	3	1	3	2	0.38
21	3	1	3	3	1.19	48	2	1	3	3	0.98	75	3	1	3	3	0.44
22	3	2	3	1	0.79	49	2	2	3	1	0.90	76	3	2	3	1	0.57
23	3	2	3	2	0.91	50	2	2	3	2	0.86	77	3	2	3	2	0.57
24	3	2	3	3	1.09	51	2	2	3	3	0.88	78	3	2	3	3	0.68
25	3	3	3	1	2.18	52	2	3	3	1	2.20	79	3	3	3	1	1.74
26	3	3	3	2	2.34	53	2	3	3	2	2.41	80	3	3	3	2	1.82
27	3	3	3	3	1.88	54	2	3	3	3	2.37	81	3	3	3	3	1.63

تراشکاری فولاد 100Cr6 در سرعت‌های برشی مختلف نشان داده شده است. در ماشین‌کاری خشک با افزایش سرعت برشی، زبری سطح کاهش و سپس افزایش یافته است که علت آن توضیح داده شد. در روانکاری معمولی (تر) با افزایش سرعت برشی، زبری سطح افزایش یافته است. علت بهبود زبری سطح در سرعت‌های برشی پایین، بهبود سرعت انتقال گرمای تولید شده از محل برش است و با افزایش سرعت برشی، این اثر کاهش یافته و دما و زبری سطح بالا می‌رود. در حالت روانکاری کمینه، با افزایش سرعت برشی، زبری سطح تغییر محسوسی ندارد. هدف اصلی استفاده از روانکاری در فرآیندهای ماشین‌کاری، کاهش مقاومت برشی ماده، بهبود کیفیت سطح و افزایش عمر ابزار است و بهترین راه برای دست یافتن به این اهداف، افزایش میزان نفوذ روانکار به منطقه مشترک ابزار با براده است [21]. در روش روانکاری کمینه به دلیل نفوذ ذرات سیال توسط هوای فشرده به منطقه مشترک ابزار با براده، بازدهی برش افزایش یافته و کیفیت سطح بهتری بوجود می‌آید. با توجه به شکل 5، برای هر سه روش روانکاری کمترین زبری سطح در سرعت برشی 123m/min به دست آمده است که با نتایج به دست آمده توسط بنگا و آبرئو [19] مطابقت دارد. آن‌ها بهترین سرعت برشی برای دستیابی به زبری سطح

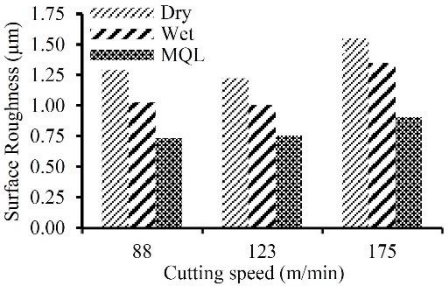

Fig. 5 Effect of cutting speed on surface roughness in dry, wet and MQL lubrication conditions

شکل 5 تأثیر سرعت برشی بر زبری سطح در سه حالت روانکاری خشک، تر و کمینه

مینیمم در سخت‌تراشی فولاد 100Cr6 را در محدوده 116 تا 130m/min تعیین کردند.

3-2- تأثیر نرخ پیشروی بر زبری سطح

از لحاظ تئوری، نرخ پیشروی و شعاع نوک ابزار بیشترین تأثیر را بر زبری سطح دارد [20]. نرخ پیشروی تعیین‌کننده گام برآمدگی‌های ناشی از تماس نوک ابزار با سطح قطعه‌کار است. در نتیجه، نرخ پیشروی تأثیر مستقیمی بر زبری سطح دارد و با افزایش نرخ پیشروی، زبری سطح افزایش و با کاهش آن، زبری سطح کاهش می‌یابد. بنگا و آبرئو [19] پس از انجام آزمایش‌های تجربی روی فولاد 100Cr6 به این نتیجه رسیدند که نرخ پیشروی بیشترین تأثیر را بر زبری سطح دارد و با انتخاب نرخ پیشروی پایین‌تر می‌توان به زبری سطح پایین‌تری دست یافت. در شکل 6، میانگین زبری سطح در نرخ‌های پیشروی مختلف نشان داده شده است. در هر سه حالت خشک، تر و روانکاری کمینه با افزایش نرخ پیشروی، زبری سطح افزایش یافته است. با توجه به ثابت بودن شعاع نوک ابزار در همه تست‌ها، علت افزایش زبری سطح در اثر افزایش نرخ پیشروی، افزایش گام برآمدگی‌های ناشی از تماس ابزار با سطح قطعه‌کار است. شیب افزایش زبری سطح در روش روانکاری کمینه نسبت به دو حالت روانکاری تر و خشک کمتر است. علت این امر، نفوذ ذرات سیال به منطقه برش، کاهش گرمای تولید شده و کاهش اصطکاک بین ابزار و قطعه کار است. با توجه به شکل 6، کمترین زبری سطح در نرخ پیشروی 0.05mm/rev به دست آمده است.

3-3- تأثیر عمق برش بر زبری سطح

عمق برش بر نیروی برش، توان لازم برای ماشین‌کاری و میزان ارتعاش قطعه تأثیرگذار است. عمق برش کمترین تأثیر را در بین سه پارامتر سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بر زبری سطح دارد [11] میانگین زبری سطح حاصل از تراشکاری فولاد 100Cr6 در سه حالت خشک، تر و روانکاری کمینه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.15.9]

در شکل 7 نشان داده شده است. در هر سه حالت ماشین‌کاری خشک، تر و روانکاری کمینه، با افزایش عمق برش، زبری سطح قطعه تغییر چندانی نداشته است. زبری سطح به دست آمده با روش روانکاری کمینه در عمق برش‌های مختلف همواره کمتر از دو روش خشک و روانکاری تر است.

3-4- تأثیر نوع روانکاری بر زبری سطح

روانکار یکی از اجزاء مهم در اکثر فرآیندهای ماشین‌کاری محسوب می‌شود. اهداف اصلی استفاده از روانکاری، افزایش طول عمر ابزار، بهبود کیفیت سطح، دقت ابعادی قطعه و کمک به انتقال براده از محل ماشین‌کاری است، به همین دلیل تعیین مؤثرترین روش روانکاری از اهمیت بالایی برخوردار است [22]. میانگین نتایج حاصل از تست‌های زبری سطح در سه روش خشک، تر و روانکاری کمینه در شکل 8 نشان داده شده است. با توجه به شکل 8، روش خشک بیشترین و روش روانکاری کمینه کمترین زبری سطح را دارد. میزان کاهش زبری سطح در روش روانکاری کمینه نسبت به روش روانکاری تر و خشک به ترتیب 30% و 42% است. در حالت خشک به دلیل افزایش دمای منطقه برش و شرایط سخت براده‌برداری، زبری سطح افزایش یافته است. در روش تر به دلیل غیر یکنواخت بودن میزان نفوذ سیال به منطقه برش، زبری سطح قطعه در نقاط مختلف یکنواخت نبوده و زبری سطح نهایی افزایش یافته است. در روش روانکاری کمینه، ذرات سیال توسط هوای فشرده به شکل اسپری تبدیل شده و باعث نفوذ بهتر به قسمت نوک ابزار و منطقه برش و تشکیل لایه روانکار مرزی بین ابزار و قطعه‌کار شده و از چسبیدن ذرات ماده به نوک ابزار جلوگیری می‌کند. با نفوذ ذرات سیال به منطقه برش، اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار، حرارت تولید شده و دمای ابزار و منطقه برش کاهش یافته و درنتیجه، شرایط براده‌برداری بهبود می‌یابد. توضیح بیشتر در

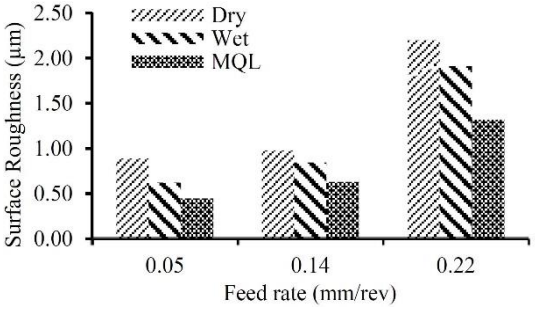

Fig. 6 Effect of feed rate on surface roughness in dry, wet and MQL lubrication conditions

شکل 6 تأثیر نرخ پیشروی بر زبری سطح در سه حالت روانکاری خشک، تر و کمینه

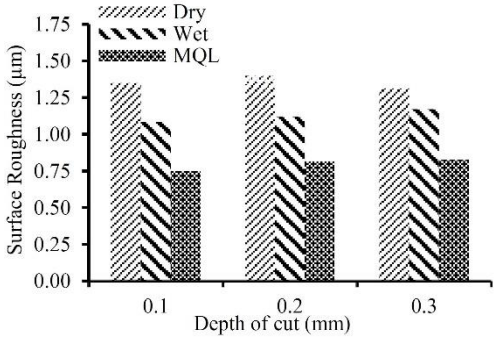

Fig. 7 Effect of cutting depth on surface roughness in dry, wet and MQL lubrication conditions

شکل 7 تأثیر عمق برش بر زبری سطح در سه حالت روانکاری خشک، تر و کمینه

جدول 5 آنالیز واریانس زبری سطح در سه حالت روانکاری خشک، تر و کمینه

Table 5 Analysis of variance for surface roughness in dry, wet and MQL lubrication

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F	P
Lubrication method	2	4.3675	13.95%	4.3675	2.1837	166.26	0
V_c	2	1.2761	4.08%	1.2761	0.638	48.58	0
f	2	21.3295	68.12%	21.3295	10.6647	811.97	0
a_p	2	0.0357	0.11%	0.0357	0.0179	1.36	0.265
$V_c \times f$	4	0.7349	2.35%	0.7349	0.1837	13.99	0
$f \times$ Lubrication method	4	0.8152	2.60%	0.8152	0.2038	15.52	0
$V_c \times f \times$ Lubrication method	8	2.0169	6.44%	2.0169	0.2521	19.2	0
Error	56	0.7355	2.35%	0.7355	0.0131		
Total	80	31.3113	100%				

مورد دلایل کاهش زبری سطح در ماشینکاری با روانکاری کمینه نسبت به روش‌های تر و خشک، در مراجع [23,21] ذکر شده است.

با توجه به اینکه انتخاب پارامترهای برشی بر اساس کاتالوگ ابزار نانو سی‌بی‌ان مورد استفاده در این تحقیق انجام شده است، می‌توان روندهای مشاهده شده در شکل‌های 5 تا 8 را به‌دلیل استفاده عمومی از این پارامترهای برشی دارای کاربرد صنعتی دانست. بررسی سایر تحقیقات نشان می‌دهد که روندهای مشاهده شده در این تحقیق، به‌طور کلی با تغییر مقادیر عددی پارامترهای برشی نیز قابل مشاهده است [17-20,11].

3-5- آنالیز واریانس زبری سطح

از آنالیز واریانس می‌توان جهت بررسی تأثیر یک یا چند عامل ورودی بر متغیر خروجی استفاده کرد. هدف از استفاده از این روش در این تحقیق، تعیین میزان تأثیر پارامترهای برشی و روش روانکاری بر زبری سطح در فرآیند سخت‌تراشی فولاد 100Cr6 است. به این منظور از نرم افزار مینی‌تب جهت تحلیل مقادیر اندازه‌گیری شده زبری سطح استفاده شده است.

نتایج حاصل از آنالیز واریانس برای زبری سطح در جدول 5 ذکر شده است. اگر مقدار P از مقدار α که در این تحقیق 0.05 در نظر گرفته شده است کمتر باشد، پارامتر مورد نظر بر رفتار سیستم مؤثر و در غیر اینصورت غیر مؤثر است. ابتدا فقط تأثیر پارامترهای روش روانکاری، سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بر زبری سطح مورد بررسی قرار گرفت و میزان خطای 14% به دست آمد که مقدار زیادی بود. سپس با وارد کردن اثرهای متقابل پارامترهای مؤثر بر فرآیند، میزان اثر خطا به 2.35% رسید. اثرهای متقابلی که تأثیری بر فرآیند نداشت، در آنالیز حذف گردید. با توجه به مقادیر معنی دار ستون P در جدول 5، سه پارامتر نرخ پیشروی، روش روانکاری و سرعت برشی و همچنین اثرهای متقابل آن‌ها، بر زبری سطح قطعه تأثیرگذار است.

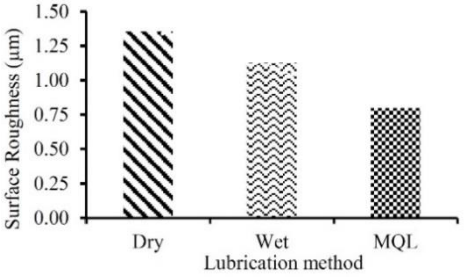

Fig. 8 Effect of lubrication method on surface roughness

شکل 8 تأثیر نوع روانکاری بر زبری سطح

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.15.9]

نرخ پیشروی 68.1%، روش روانکاری 14.0% و سرعت برشی 4.1% بر زبری سطح اثر گذاشته است. تأثیر عمق برش بر زبری سطح بسیار ناچیز است. نتیجه به‌دست آمده در مورد تأثیر اندک سرعت برشی و عمق برش بر زبری سطح در این تحقیق، در برخی دیگر از مقالات منتشر شده در زمینه سخت تراشی نیز مشاهده می‌شود [24]. اثر متقابل سرعت برشی و نرخ پیشروی 2.4%، اثر متقابل روش روانکاری و نرخ پیشروی 2.6% و اثر متقابل سه پارامتر روش روانکاری، نرخ پیشروی و سرعت برشی 6.4% بر زبری سطح تأثیر گذار است. در نتیجه ترکیب صحیح پارامترهای مؤثر بر فرآیند 11.40% بر زبری سطح قطعه تأثیرگذار بود که اهمیت بالای این موضوع را نشان می‌دهد. ترکیب صحیح پارامترهای برشی به این معنی است که اثر هر یک از پارامترهای سرعت برشی، روش روانکاری و نرخ پیشروی بر زبری سطح به یکدیگر وابسته هستند. در نتیجه برای دستیابی به زبری سطح مینیمم، باید هر یک از پارامترها را با در نظر گرفتن وضعیت پارامترهای دیگر تعیین کرد.

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش و روش‌های روانکاری خشک، تر و کمینه بر زبری سطح در فرآیند سخت‌تراشی فولاد بلبرینگ 100Cr6 مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد:

در بین سه پارامتر سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش، نرخ پیشروی 68%، سرعت برشی 4% و عمق برش کمتر از 1% بر زبری سطح تأثیر گذار بود. طبق نتایج آنالیز واریانس، روش روانکاری حدود 14% بر زبری سطح قطعه تأثیر گذار است. برای دستیابی به زبری سطح مینیمم باید سرعت برشی در محدوده مشخصی انتخاب شود. با افزایش نرخ پیشروی، زبری سطح قطعه افزایش یافت.

ترکیب روش روانکاری با نرخ پیشروی 2.6%، ترکیب سرعت برشی با نرخ پیشروی 2.4% و ترکیب سه پارامتر روش روانکاری، نرخ پیشروی و سرعت برشی با یکدیگر 6.4% بر زبری سطح نهایی تأثیرگذار بود.

نتایج به دست آمده نشان داد که زبری سطح به دست آمده با روش روانکاری کمینه نسبت به دو روش خشک و تر به طور متوسط به ترتیب 42% و 30% کاهش یافته است.

در روش خشک به دلیل نبود روانکار، دما و اصطکاک افزایش یافته و باعث ایجاد شرایط سخت برای ماشین‌کاری می‌شود. در حالت تر به دلیل فشار پایین سیال و همچنین نوع روانکار، روانکار بصورت مداوم به منطقه برش نفوذ نکرده و در نتیجه عمل خنک‌کاری بصورت یکنواخت انجام نمی‌گیرد و زبری سطح نیز یکنواخت نخواهد بود. در روش روانکاری کمینه، ذرات سیال توسط هوای فشرده به شکل اسپری تبدیل شده و باعث نفوذ بهتر به قسمت نوک ابزار و منطقه برش و تشکیل لایه روانکار مرزی بین ابزار و قطعه‌کار شده و از چسبیدن ذرات ماده به نوک ابزار جلوگیری می‌کند. با نفوذ ذرات سیال به منطقه برش، اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار، حرارت تولید شده و دمای ابزار و منطقه برش کاهش یافته و درنتیجه، شرایط براده‌برداری بهبود می‌یابد.

5- مراجع

[1] J. P. Davim, *Machining of Hard Materials*, pp. 1-140, London: Springer, 2011.
[2] R. Singh, V. Bajpai, *Coolant and Lubrication in Machining*, pp. 1-34: Handbook of Manufacturing Engineering and Technology, 2014.
[3] T. Walker, *MQL Handbook*, pp. 1-40: Unist company, 2013.
[4] T. Obikawa, Y. Asano, Y. Kamata, Computer fluid dynamics analysis for efficient spraying of oil mist in finish-turning of Inconel 718, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, No. 12-13, pp. 971-978, 2009.
[5] B. Tasdelen, H. Thordenberg, D. Olofsson, An experimental investigation on contact length during minimum quantity lubrication (MQL) machining, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 203, No. 1-3, pp. 221-231, 2008.
[6] M. M. A. Khan, M. A. H. Mithu, N. R. Dhar, Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 15-16, pp. 5573-5583, 2009.
[7] M. A. Hasib, A. Al-Faruk, N. Ahmed, Mist Application of Cutting Fluid, *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 13-18, 2010.
[8] Z. Liu, Q. An, J. Xu, M. Chen, S. Han, Wear performance of (nc-AlTiN)/(a-Si3N4) coating and (nc-AlCrN)/(a-Si3N4) coating in high-speed machining of titanium alloys under dry and minimum quantity lubrication (MQL) conditions, *Wear*, Vol. 305, No. 1-2, pp. 249-259, 2013.
[9] P. C. Priarone, M. Robiglio, L. Settineri, V. Tebaldo, Milling and Turning of Titanium Aluminides by Using Minimum Quantity Lubrication, *Procedia CIRP*, Vol. 24, pp. 62-67, 2014.
[10] M. H. S. Elmunafi, D. Kurniawan, M. Y. Noordin, Use of Castor Oil as Cutting Fluid in Machining of Hardened Stainless Steel with Minimum Quantity of Lubricant, *Procedia CIRP*, Vol. 26, pp. 408-411, 2015.
[11] U. M. R. Paturi, Y. R. Maddu, R. R. Maruri, S. K. R. Narala, Measurement and Analysis of Surface Roughness in WS2 Solid Lubricant Assisted Minimum Quantity Lubrication (MQL) Turning of Inconel 718, *Procedia CIRP*, Vol. 40, pp. 138-143, 2016.
[12] 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, pp. 83-84, 2013. (in Persian فارسی)
[13] H. Hassanpour, R. Rasti, M. H. Sadeghi, M. H. MoSaadatbakhsh, A. R. Omiddodman, Effect of cutting fluid application on surface roughness in hard milling of 4340-alloyed steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 50-60, 2015. (in Persian فارسی)
[14] T. Ueda, A. Hosokawa, K. Yamada, Effect of oil mist on tool temperature in cutting, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 128, No. 1, pp. 130-135, 2006.
[15] L. R. Silva, E. C. Bianchi, R. E. Catai, R. Y. Fusse, T. V. França, P. R. Aguiar, Study on the behavior of the minimum quantity lubricant - MQL technique under different lubricating and cooling conditions when grinding ABNT 4340 steel, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 27, No. 2, pp. 192-199, 2005.
[16] G. Halevi, *Process and operation planning*, pp. 152-158, Dordrecht ; Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.
[17] A. Bordin, S. Bruschi, A. Ghiotti, The Effect of Cutting Speed and Feed Rate on the Surface Integrity in Dry Turning of CoCrMo Alloy, *Procedia CIRP*, Vol. 13, pp. 219-224, 2014.
[18] B. A. Khidhir, B. Mohamed, Study of cutting speed on surface roughness and chip formation when machining nickel-based alloy, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 5, pp. 1053-1059, 2010.
[19] G. C. Benga, A. M. Abrao, Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 143-144, No. 1, pp. 237-241, 2003.
[20] G. Boothroyd, *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*, Second Edition, pp. 155-173, New York: Marcel Dekker, 1989.
[21] W. L. Y. Hsien, *Towards Green Lubrication in Machining*, pp. 1-46, London: Springer, 2015.
[22] D. A. Stephenson, J. S. Agapiou, *Metal Cutting Theory and Practice*, Third Edition, pp. 783-798, Boca Raton: CRC Press, 2016.
[23] Y. Su, N. He, L. Li, X. Li, An experimental investigation of effects of cooling/lubrication conditions on tool wear in high-speed end milling of Ti-6Al-4V, *Wear*, Vol. 261, No. 7, pp. 760-766, 2006.
[24] A. Khellaf, H. Aouici, S. Smaiah, S. Boutabba, M. Yallese, M. Elbah, Comparative assessment of two ceramic cutting tools on surface roughness in hard turning of AISI H11 steel: including 2D and 3D surface topography, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, DOI 10.1007/s00170-016-9077-3, 2016.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.15.9]