



مطالعه تأثیر عملکرد روان کاری کمینه و نوع روان کار در فرایند فرزکاری فولاد زنگ نزن EN 1.4903

محسن امامی

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا (ص) بهبهان، بهبهان
بهبهان، صندوق پستی 47189-63616، dr.emami@bkatu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 3 آبان 1397
پذیرش: 28 دی 1397
ارائه در سایت: مرداد 1398

کلیدواژگان:

فرزکاری

فولاد زنگ نزن مارتنزیتی EN
1.4903
روان کاری کمینه

در فرایندهای ماشین کاری به منظور کاهش اصطکاک تماس ابزار و قطعه کار، کاهش حرارت ماشین کاری و بهبود کیفیت سطح قطعه کار معمولاً از سیالات خنک کننده/روان کار استفاده می شود. با این وجود در سال های اخیر به منظور محافظت از سلامت انسان و محیط زیست، قوانین متعددی وضع شده و مصرف کنندگان را ملزم به کاهش مصرف سیالات برش و گسترش استفاده از سیالات کم خطر و تجدیدپذیر نموده است. به همین منظور اخیراً تکنیک جدید روان کاری کمینه برای فرایندهای ماشین کاری توسعه پیدا کرده است. روغن های گیاهی از جمله روغن های پایه زیستی محسوب می شوند و به دلیل بی خطر بودن شیمیایی و تجدیدپذیری، از ظرفیت قابل ملاحظه ای در زمینه استفاده در روان کاری کمینه برخوردار هستند. فولادهای زنگ نزن جزء دسته مواد سخت ماشین کاری شونده محسوب می شوند و از این رو بهبود قابلیت ماشین کاری آن ها همواره در تحقیقات مطرح بوده است. در این پژوهش اثر روان کاری کمینه و نوع روان کار در فرایند فرزکاری فولاد زنگ نزن مارتنزیتی EN 1.4903 بررسی شده است. برای این منظور از یک نوع روغن گیاهی دانه کنجد در دو حالت بدون افزودنی (خالص) و با افزودنی آنتی اکسیدان و یک نوع روغن معدنی برش استفاده شده است و نیروهای فرزکاری، زبری سطح و بافت سطح ماشین کاری شده نمونه ها مورد ارزیابی قرار گرفته اند. همچنین به منظور مقایسه، آزمایش ها در دو شرایط ماشین کاری خشک و تر نیز انجام شده است. نتایج نشان می دهد که روش روان کاری کمینه در مقایسه با روش های متداول، با کاهش نیروها و بهبود کیفیت سطح، قابلیت ماشین کاری فولاد زنگ نزن را ارتقاء می بخشد. همچنین نوع روغن مصرفی تأثیر قابل ملاحظه ای بر خروجی های فرایند دارد.

Study of the performance of minimum quantity lubrication (MQL) and type of lubricant in the milling process of stainless steel EN1.4903

Mohsen Emami

Department of Mechanical Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

* P.O.B. 63616-47189 Behbahan, Iran, dr.emami@bkatu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 25 October 2018
Accepted 18 January 2019
Available August 2019

Keywords:

Milling
Stainless steel EN 1.4903,
Minimum Quantity Lubrication
(MQL)

Abstract

Abstract

Cooling/lubricant fluids are typically used in machining processes to reduce the tool-workpiece friction, decrease machining heat and improve surface quality. In recent years, however, several laws have been used in place to protect human health and environment, requiring industry to reduce coolants consumption and expand the use of low-risk and renewable ones. For this reason, a recent new lubrication technique called minimum quantity lubrication (MQL) has been developed for the machining processes. Vegetable oils are kinds of bio-based lubricants and have a significant capacity to be used in MQL due to their environmentally friendly and renewable properties. Stainless steels are considered to be difficult to machining materials and hence their machinability improvement has always been the subject of research. In this investigation, the effects of MQL and type of lubricant in the milling process of martensitic stainless steel EN 1.4903 have been studied. For this purpose, one type of vegetable oil derived from sesame seeds in two conditions including non-additive (pure) and with antioxidant additives, as well as one type of mineral oil have been applied in the experiments. Then, milling force, surface roughness and surface texture have been evaluated. Also, in order to compare the results with other lubrication methods, the tests have been performed under dry and wet conditions. The results show that the MQL compared to the conventional lubrication methods increases the machinability of stainless steel by reducing forces and improving surface quality. Moreover, the type of oil applied has a great influence on the process outputs.

1- مقدمه

محسوب می شود. در ماشین کاری با استفاده از یک ابزار سخت از

سطح قطعه کار نرمتر، با مکانیزم برش، براده برداری صورت

ماشین کاری یکی از فرایندهای ساخت و تولید قطعات مهندسی

Please cite this article using:

M. Emami, Study of the performance of minimum quantity lubrication (MQL) and type of lubricant in the milling process of stainless steel EN1.4903, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 28-42, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله ذیل استفاده نمایید:

www.sid.ir

امروزه روند رو به رشدی در رابطه با کاهش مصرف روغن‌های معدنی و جایگزینی آن‌ها با روان کارهای دیگر ایجاد شده است. از جمله این روان کارها می‌توان به روغن‌های مصنوعی پایه پلی‌آلکالین گلیکول¹، پلی‌آلفالین²، استرها³ و پلی‌بوتان‌ها⁴ و روان کارهای پایه زیستی⁵ اشاره کرد [2، 3]. روان کارهای اشاره شده دارای ویژگی‌هایی مانند سمیت کم، خلوص بالا، قابلیت نگهداری آسان و اثرات زیست محیطی کم می‌باشند. روغن‌های استحصال شده از دانه‌های روغنی گیاهی از جمله روان کارهای پایه زیستی محسوب می‌شوند. روغن‌های پایه گیاهی در گذشته نیز کاربردهای صنعتی داشته‌اند اما به دلیل ارزان بودن محصولات نفتی چندان استفاده نشدند. با این وجود امروزه با توجه به ویژگی‌های تجدیدپذیر بودن و سازگاری با محیط زیست، این دسته از روان کارها مجدداً در مصارف صنعتی مورد توجه قرار گرفته‌اند [4]. از مهمترین منابع تولید روغن‌های گیاهی می‌توان به دانه‌های کلزا، آفتابگردان، سویا، پالم، کنجد و کانولا اشاره نمود. روغن‌های گیاهی خالص دارای زنجیره‌های طولی قطبی هستند و چسبندگی نسبتاً خوبی با سطوح فلزی ایجاد می‌کنند و از این رو برای روان کاری سطوح در ماشین کاری مناسب هستند. با این وجود برای کاربردهای صنعتی نه تنها بهتر است روغن پایه از نوع گیاه مناسبی تهیه شود بلکه بهتر است با استفاده از افزودنی‌های مناسب خواص فیزیکی و شیمیایی آن را بهبود داد. افزودنی‌ها معمولاً با درصد وزنی کمتر از 5% به روغن پایه اضافه می‌شوند. از جمله مهمترین افزودنی‌های روغن‌های برشی می‌توان به افزودنی‌های ضد اکسیداسیون، افزودنی‌های ضد سایش، افزودنی‌های فشار نهایی، افزودنی‌های ضد خوردگی و افزودنی‌های ضد اصطکاک اشاره کرد. از آنجا که موضوع روان کارهای زیستی اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته است، از این رو لازم است مطالعه بیشتری درباره نوع افزودنی‌ها، روش‌های ترکیب آن‌ها با روغن پایه و تأثیر آنها بر خواص روغن‌های پایه گیاهی صورت پذیرد.

روش روان کاری کمینه⁶ تکنیک جدیدی است که در سال‌های اخیر در راستای سیاست‌های جهانی زیست محیطی، در بسیاری از دانشگاه‌ها و صنایع مرتبط با ماشین کاری مورد مطالعه و استفاده قرار گرفته است. در روش روان کاری کمینه به ترتیب از روغن روان کار و جریان هوای فشرده جهت روان کاری و

می‌پذیرد. برش یک فرایند مکانیکی-حرارتی است که طی آن یک تغییر شکل پلاستیک شدید رخ داده و بخشی از ماده قطعه‌کار به صورت براده جدا می‌شود. علاوه بر آن در فرایند تشکیل براده، در نواحی تماس ابزار با براده و ابزار با سطح ماشین کاری شده، اصطکاک زیادی وجود دارد که سبب افزایش نیروهای ماشین کاری، چسبندگی براده به سطح ابزار، اصطکاک و تولید حرارت می‌شود. حرارت تولید شده در ماشین کاری نه تنها با تسریع سایش ابزار عمر آن را کاهش می‌دهد، بلکه می‌تواند باعث کاهش کیفیت سطح ماشین کاری شده نیز گردد. از این رو لازم است در فرایندهای سنتی براده‌برداری، از روشهای خنک کاری و روان کاری بهره جست و آثار مخرب اصطکاک و حرارت را به حداقل کاهش داد [1]. متداولترین روش خنک کاری و روان کاری ناحیه برش در فرایندهای براده‌برداری استفاده از سیالات برش به روش ماشین کاری تر است. در ماشین کاری تر معمولاً از روغن‌های حل‌شونده در آب استفاده می‌شود. این روغن‌ها با نسبت‌های مشخصی در آب حل شده و در فرایندهای براده‌برداری استفاده می‌شوند. روش سنتی خنک کاری تر با استفاده از روغن‌های حل‌شونده در آب معمولاً دارای معایب تکنولوژیکی و زیست محیطی فراوانی است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [2]:

- 1- در ماشین کاری تر معمولاً سیال به طور موضعی به ناحیه براده‌برداری پاشش نمی‌شود و حجم وسیعی از سیال به اطراف ریخته شده و کارایی چندان ندارد.
- 2- در بسیاری از موارد در ماشین کاری تر، سیال به دلیل دارا نبودن سرعت و فشار لازم، نمی‌تواند نفوذ مؤثری به موضع برش داشته باشد.
- 3- هزینه‌های مرتبط با انتقال، مصرف، فیلتر کردن، چرخش بسته سیال در دستگاه و دفع آن، سهم نسبتاً زیادی از کل هزینه‌های ماشین کاری را در بر می‌گیرد.
- 4- روغن‌های حل‌شونده مورد استفاده در ماشین کاری تر، عمدتاً از نوع روغن‌های معدنی مشتق شده از نفت خام هستند که افزودنی‌های شیمیایی به آنها اضافه شده است. روغن‌های معدنی تجدیدپذیر نیستند و دفع آنها آلوده کننده محیط زیست می‌باشد.
- 5- روغن‌های حل‌شونده در آب دارای مواد ضد باکتریایی هستند تا عمر کارکرد آن‌ها افزایش یابد. با این وجود این مواد جزء آفت کش‌ها محسوب می‌شوند و مقدار اضافی آنها در سیالات فلزکاری ممکن است باعث التهاب پوستی، مشکلات ریوی و تحریک چشم شود.

¹ Poly Alkaline Glycol (PAG)

² Poly Alpha Olefin (PAO)

³ Esters

⁴ Poly Butanes

⁵ Biobased Lubricants

⁶ Minimum Quantity Lubrication (MQL)

اثر شرایط مختلف خنک کاری و روان کاری (خشک، تر و روان کاری کمینه با روغن پایه گیاهی) بر سایش ابزار در فرایند فرزکاری فولاد زنگ نزن مارتنزیتی 5PH-15، توسط جونیور و همکاران [9] بررسی شده است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که به طور کلی روان کاری کمینه (با روغن پایه گیاهی) نسبت به سایر روش‌های روان کاری (تر و خشک) تأثیر بیشتری بر بهبود عمر ابزار دارد. اوزلیک و همکاران [10]، عملکرد ماشین کاری خشک و تر (با سیال برشی نیمه مصنوعی) را بر سایش ابزار در فرایند فرزکاری فولاد زنگ نزن AISI 316 بررسی نمودند. نتایج بدست آمده از آزمایش‌های تجربی آن پژوهش نشان داده است که در ماشین کاری تر با سیال برش نیمه مصنوعی، تنش‌های حرارتی شدیدی بر ابزار وارد شده و منجر به شکست ناگهانی آن می‌شود. لیو [11]، عملکرد دو حالت روان کاری شامل 1- روان کاری کمینه با روغن (93 درصد حجمی روغن پارافینی و 7 درصد حجمی سیکلومتیکون) و 2- ماشین کاری تر (با امولسیون پایه معدنی 9 درصد) را بر سایش ابزار در فرایند فرزکاری سرعت پایین فولاد زنگ نزن AISI 420 با ابزار کاربیدی (با پوشش چند لایه نانو) بررسی کرد و تحت شرایط مورد آزمایش نتایج ذیل به دست آمد. 1- روان کاری کمینه نسبت به ماشین کاری تر جهت کاهش سایش سطح آزاد ابزار مؤثرتر است. 2- ماشین کاری با روان کار کمینه نسبت به استفاده از سیال امولسیون موجب دستیابی به صافی سطح بهتر می‌شود. با توجه به نتایج پژوهش‌های پیشین می‌توان به لزوم انجام تحقیقات بیشتر در زمینه تأثیر نوع روان کار و روش روان کاری بر خروجی‌های فرایند فرزکاری از جمله نیروهای برش و کیفیت سطح ماشین کاری شده اشاره نمود. از این رو در این مقاله در فرایند فرزکاری فولاد زنگ نزن مارتنزیتی EN 1.4903 موارد زیر بررسی شده است:

- 1- تأثیر روش روان کاری کمینه بر خواص ماشین کاری فولاد مورد آزمایش و مقایسه آن با سایر روش‌های متداول از جمله ماشین کاری تر و ماشین کاری خشک.
- 2- تهیه روغن‌های برش با ویژگی‌های پایه متفاوت از جمله پایه گیاهی و معدنی و مقایسه تأثیر آن‌ها بر خواص ماشین کاری فولاد مورد آزمایش.
- 3- اضافه نمودن افزودنی مخصوص روان کار به روغن پایه گیاهی و ارزیابی عملکرد آن در فرایند ماشین کاری.

2- مواد و آزمایش‌های تجربی

در شکل 1 چیدمان آزمایشگاهی استفاده شده برای انجام آزمایش‌های تجربی این پژوهش نشان داده شده است. اجزای

خنک کاری ناحیه ماشین کاری استفاده می‌شود. روغن مورد استفاده نیز بسته به کاربرد می‌تواند غیر حل شونده در آب و یا حل شونده در آب انتخاب شود. در این روش روغن با دبی بسیار کم ($10 - 150 \text{ mlh}^{-1}$) از یک مسیر و جریان هوای فشرده با فشار (7 - 1 bar) از مسیر دیگر وارد یک نازل اتمیزه کننده شده و در دهانه خروجی نازل، جریان هوای فشرده، روغن را به ذرات بسیار ریز با اندازه میکرونی اسپری نموده و این ذرات توسط جریان هوای خارج شده از نازل به سمت ناحیه ماشین کاری (ناحیه هدف) هدایت می‌شوند [5]. ذرات بسیار ریز روغن با برخورد به سطح ناحیه هدف در آنجا مجدداً جمع شده و سطح مورد نظر را آغشته به روغن می‌کنند. از آنجا که عملیات روان کاری در این روش با مقدار مصرف بسیار کمتری از سیال صورت می‌پذیرد، این روش را روان کاری کمینه می‌نامند. در واقع یکی از محاسن روان کاری کمینه این است که در این روش جت اسپری هوا-روغن به طور موضعی به ناحیه برش (فصل مشترک ابزار و قطعه کار) پاشش می‌شود. نتایج پژوهش‌های گذشته نشان داده است که روان کاری کمینه باعث نفوذ مؤثرتر سیال به ناحیه برش شده و راندمان روان کاری را بهبود می‌دهد [6].

در این پژوهش نمونه‌های مورد آزمایش از فولاد زنگ نزن مارتنزیتی انتخاب شده‌اند. کاربرد این نوع فولاد بیشتر در نیروگاه‌ها، از جمله در ساخت لوله‌های بویلرها و در اتصالات بخار فوق گرم می‌باشد. فولادهای زنگ نزن عموماً جزء دسته مواد سخت ماشین کاری شونده محسوب می‌شوند. در واقع در حین ماشین کاری به دلایلی از جمله پلاستیسیته بالا، نرخ کارسختی بالا، خواص براده شکنی ضعیف و تمایل زیاد این مواد به تشکیل براده با لبه انباشته، شرایط براده برداری از آن‌ها دشوار می‌گردد. تحقیقات گذشته نشان داده است که فرایندهای براده برداری از فولادهای زنگ نزن همراه با نیروهای برشی زیاد، انرژی مخصوص برش بالا و کیفیت پایین سطح ماشین کاری شده می‌باشد. همچنین رسانایی ضعیف حرارتی فولادهای زنگ نزن در حین ماشین کاری باعث تشدید حرارت در ناحیه تماس ابزار-قطعه کار می‌گردد و نرخ سایش ابزار را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد [7]. برونی و همکاران [8]، اثر انواع مختلف شرایط روان کاری (خشک، تر و روان کاری کمینه) را بر زبری سطح و سایش ابزار در فرایند فرزکاری فولاد زنگ نزن AISI 420B بررسی نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تحت شرایط آزمایشگاهی تست شده، مقادیر زبری سطح و سایش ابزار با روان کاری کمینه، مقداری کمتر یا برابر با روش تر بدست می‌آید. همچنین در سرعت‌های بالاتر این اختلاف بیشتر می‌شود.

جدول 1 ترکیب شیمیایی نمونه‌های فولاد زنگ نزن [12]

Table 1 Chemical property of the stainless steel samples			
عنصر شیمیایی	درصد وزنی %	عنصر شیمیایی	درصد وزنی %
C کربن	0/11	Cu مس	0/11
Si سیلیسیم	0/29	Nb نئوبوم	0/06
Mn منگنز	0/37	Ni نیکل	0/13
Cr کروم	8/26	عناصر دیگر	0/02 w, 0/015 P,
Mo مولیبدن	0/91	آهن Fe	تعالد
V وانادیوم	0/19		

جدول 2 خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی نمونه‌های فولاد زنگ نزن [12]

Table 2 Physical, mechanical and thermal properties of the stainless steel material			
چگالی	سختی	استحکام کششی	رسانایی حرارتی
gr/cm ³	HB	Mpa	W/m.K
7/7	270	630-730	29/2

در آزمایش‌های این پژوهش متغیرهای براده‌برداری شامل عمق براده‌برداری، سرعت پیشروی و سرعت برشی ابزار می‌باشند. همچنین متغیرهای مربوط به روان کاری عبارتند از: 1- روش روان کاری و 2- نوع روان کار. در اینجا به منظور مقایسه، از سه روش روان کاری در تست‌ها استفاده شده است. این روش‌ها عبارتند از: 1- روان کاری خشک، 2- روان کاری تر و 3- روان کاری کمینه. در روش تر از یک نوع سیال و در روش روان کاری کمینه از سه نوع سیال استفاده شده است. نوع سیال در روان کاری تر، روغن حل شونده معدنی گرید اکو-کول¹ محصول شرکت فوکس² آلمان می‌باشد. برای انجام آزمایش‌های فرزکاری با روان کاری کمینه، سه نوع روغن روان کار متفاوت بکار گرفته شد که عبارتند از: 1- روغن پایه گیاهی خالص تهیه شده از دانه کنجد، 2- روغن پایه گیاهی تهیه شده از دانه کنجد و با اضافه نمودن افزودنی آنتی‌اکسیدان، 3- روغن برش پایه معدنی. روغن گیاهی خالص مورد استفاده به روش پرس سرد از دانه‌های کنجد بدست آمده است. ترکیبات اسیدهای چرب روغن گیاهی کنجد خالص مورد استفاده در جدول 3 نشان داده شده است. روغن دوم مورد استفاده در آزمایش‌های روان کاری کمینه، از مخلوط روغن پایه گیاهی تهیه شده از دانه کنجد و با اضافه نمودن افزودنی آنتی‌اکسیدان ساخته شده است. برای تهیه این روان کار، 3 درصد وزنی آنتی‌اکسیدان BHT³ با فرمول شیمیایی C15H24O در 97 درصد وزنی روغن خالص دانه کنجد در دمای

این چیدمان آزمایشگاهی عبارتند از: ماشین فرز، ابزار فرز، قطعه کار، دستگاه روان کاری کمینه، سیال روان کار، نازل پاشش سیال، دینامومتر، آمپلی‌فایر، کارت پی‌سی‌آی و لپتاپ. در پژوهش حاضر از ماشین فرز سی‌ان‌سی ساخت شرکت آسیرا سوئیس مدل F35 به منظور انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. همچنین از فولاد زنگ نزن مارتنزیتی گرید EN 1.4903 به عنوان ماده قطعه کار برای انجام آزمایش‌های تجربی فرزکاری استفاده شده است. در جدول 1 ترکیب شیمیایی و در جدول 2 خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی نمونه‌های تهیه شده نشان داده شده است. طول، عرض و ارتفاع نمونه‌های قطعه کار به ترتیب عبارتند از 16mm×60mm×82mm. از ابزار فرز انگشتی سه لبه کاربیدی روکش دار گرید KC625M با روکش PVD (TiCN) و قطر 6mm جهت فرزکاری نمونه‌های آزمایش استفاده شد. نوع آزمایش‌های فرزکاری در اینجا شیارتراشی است. به عبارت دیگر عرض شیار برابر با قطر ابزار می‌باشد.

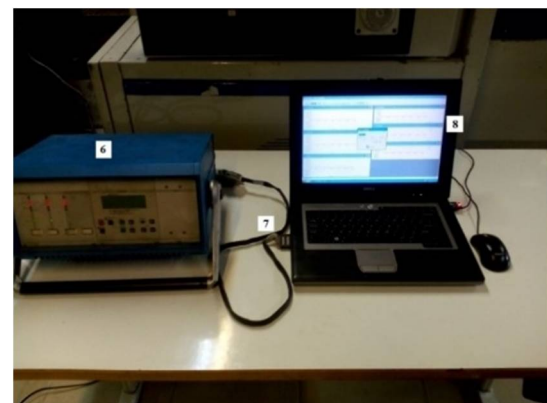


Fig. 1 Experimental setup (1-milling machine, 2- milling tool, 3- workpiece, 4-MQL Nozzle, 5-Dynamometer, 6-Amplifier, 7-PCI card, 8-Laptop)

شکل 1 چیدمان آزمایشگاهی (1- ماشین فرز، 2- ابزار فرز، 3- قطعه کار، 4- نازل MQL، 5- دینامومتر، 6- آمپلی فایر، 7- کارت PCI، 8- لپتاپ)

¹ Eco-cool soluble oil

² Fuchs

³ Butylated Hydroxytoluene

به گونه‌ای که در فاز انتشار رادیکال‌های آزاد، به سرعت با آن‌ها واکنش داده و با تشکیل رادیکال‌های جدید که پایدارتر هستند از روند تخریب روان کار جلوگیری بعمل می‌آورند. از طرف دیگر آنتی اکسیدان‌های ثانویه با پراکسیدهایی که در اثر واکنش روغن با اکسیژن بوجود می‌آیند، واکنش می‌دهند. این آنتی اکسیدان‌ها مسئول جلوگیری از شکستن چرخه، و همچنین جلوگیری از انشعاب و انتشار بیشتر اکسیداسیون می باشند [14]. روغن برش پایه معدنی بکار رفته در تست‌های این پژوهش، ساخت شرکت فوکس با گرید اکو-کات¹ 615LE می‌باشد. بر اساس برگه اطلاعات محصول شرکت سازنده [15]، این روغن غیرحل‌شونده در آب است و بیشتر برای عملیات‌های ماشین‌کاری روی انواع فولادهای معمولی و آلیاژی توصیه شده است. همچنین اضافه شده است که افزودنی‌های موجود در این روغن باعث کاهش اصطکاک و افزایش عمر ابزار می‌گردد. همچنین در جدول 4 خواص فیزیکی روغن‌های معدنی و گیاهی مورد استفاده نشان داده شده است. برای انجام آزمایش‌های روان کاری کمینه (MQL) از دستگاه روان کاری کمینه که در شکل 3 نشان داده شده است، استفاده شد.

جدول 4 خواص فیزیکی روغن‌های مورد استفاده در فرایند فرزکاری با روان کاری کمینه

Table 4 Physical properties of the applied oils in MQL milling

نوع روغن روان کار		
روغن گیاهی	روغن برش معدنی	خواص فیزیکی روغن
کنجد خالص	0/88	چگالی در 15°C (gcm ⁻³)
0/92	16	ویسکوزیته سینماتیک در 40°C (mm ² /s)
34/97	210	نقطه اشتعال (°C)
315	-18	نقطه ریزش (°C)
-6		

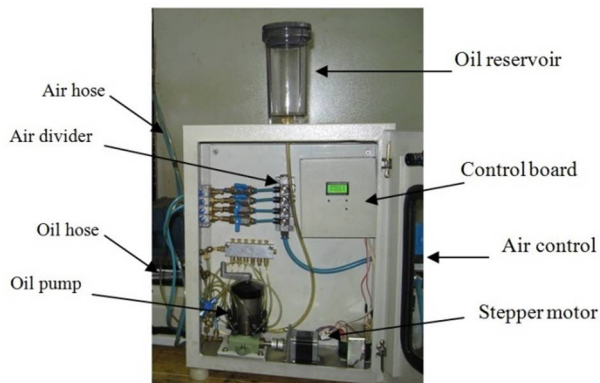


Fig. 3 The MQL system

شکل 3 سیستم روان کاری کمینه

60°C با همزن مکانیکی حل شده است. ساختار شیمیایی آنتی‌اکسیدان BHT در شکل 2 نشان داده شده است. این آنتی‌اکسیدان از دسته فنول‌ها و به شکل پودر کریستالی سفید رنگ است. آنتی اکسیدان BHT برای بیشتر انواع روغن‌ها قابل استفاده است و به راحتی در روغن‌های پایه گیاهی، معدنی و یا مصنوعی حل می‌شود. آنتی اکسیدان‌ها افزودنی‌هایی هستند که با افزایش مقاومت به اکسیداسیون روغن پایه، طول عمر روان کار را افزایش می‌دهند و از تشکیل رسوب لجن روغن جلوگیری می‌کنند. آنتی اکسیدان‌ها دمای کارکرد روغن را افزایش می‌دهند. اکسیداسیون مخرب روغن‌ها یک فرایند دوره‌ای شامل مراحل آغاز، انتشار، انشعاب و خاتمه اکسیداسیون است. تا زمانی که این چرخه شکسته نشود یا به پایان نرسد، اکسیداسیون ادامه پیدا می‌کند تا در نهایت روان کار ناپایدار شود و قابل استفاده نباشد. به طور متداول از دو نوع آنتی اکسیدان در روغن‌ها استفاده می‌شود: 1- آنتی اکسیدان‌های اولیه و 2- آنتی اکسیدان‌های ثانویه. آنتی اکسیدان‌های اولیه معمولاً از آمین‌های آروماتیک و یا از فنول‌ها تشکیل می‌شوند. آنتی اکسیدان‌های ثانویه نیز عموماً شامل فسفیت‌ها و برخی ترکیبات حاوی گوگرد مانند تیو اترها و تیو استرها است. عملیات اکسیداسیون روغن با فاز آغازین یعنی هنگامی که رادیکال‌های آزاد تشکیل می‌شود، شروع می‌شود. آنتی اکسیدان‌های اولیه زداینده رادیکال‌های آزاد هستند.

جدول 3 ترکیبات اسیدهای چرب روغن گیاهی کنجد خالص مورد استفاده در تست‌های فرزکاری با روان کاری کمینه [13]

Table 3 Fatty acid composition of the pure sesame vegetable oil applied in the MQL milling tests

روغن گیاهی کنجد	
درصد وزنی %	نوع اسید چرب
9/51	اسید پالمیتیک (C16:0) - اشباع
5/72	اسید استیریک (C18:0) - اشباع
0/57	اسید آراشیدیک (C20:0) - اشباع
38/69	اسید اولئیک (C18:1) - غیر اشباع
43/24	اسید لینولینیک (C18:2) - غیر اشباع
0/39	اسید لینولینیک گاما (C18:3) - غیر اشباع
1/88	سایر اسیدهای چرب

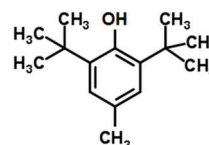


Fig. 2 Chemical structure of anti-oxidant BHT

شکل 2 ساختار شیمیایی آنتی‌اکسیدان BHT [14]

¹ Ecocut 615 LE

روان کاری کمینه با روغن پایه معدنی، 4- روان کاری کمینه با روغن پایه گیاهی خالص (کنجد)، 5- روان کاری کمینه با روغن پایه گیاهی (کنجد) و 3% wt افزودنی آنتی اکسیدان BHT.

جدول 5 طراحی آزمایش

Table 5 Design of experiments

شماره آزمایش	تعداد دوران ابزار (rpm)	متغیرهای براده برداری	
		عمق برش (mm)	سرعت پیشروی (mm/min)
1	1000	1	100
2	1500	1	100
3	2000	1	100
4	2500	1	100
5	3000	1	100
6	2000	1/5	100
7	2000	1/25	100
8	2000	0/75	100
9	2000	0/5	100
10	2000	1	50
11	2000	1	75
12	2000	1	125
13	2000	1	150

بنابراین در مجموع 65 آزمایش در این پژوهش انجام شده است. خروجی‌های فرایند نیز عبارتند از 1- نیروهای ماشین کاری، 2- زبری سطح نمونه‌ها، 3- توپوگرافی سه بعدی سطح نمونه‌ها، 4- تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی از سطح نمونه‌ها. در حین انجام آزمایش‌ها نیروهای فرزکاری توسط دینامومتر در سه محور xyz اندازه‌گیری شدند. سپس در نرم افزار داینوویر نمودار داده‌های نیرو مشاهده شد و مقدار متوسط نیروهای فرزکاری در جهات x، y و z محاسبه شد. از طرف دیگر به منظور ارزیابی کیفیت سطح ماشین کاری شده نمونه‌ها مراحل زیر روی نمونه‌ها صورت پذیرفت. 1- زبری سطح نمونه‌های فرزکاری شده توسط زبری سنج اندازه‌گیری شد. 2- تصاویر توپوگرافی و پارامترهای سه بعدی سطح نمونه‌ها تهیه شد. 3- به منظور مشاهده بافت سطح نمونه‌های ماشین کاری شده و ارزیابی عیوب حاصل از براده برداری، از سطح تعدادی از نمونه‌ها که در شرایط روان کاری مختلف فرزکاری شده‌اند، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تصویربرداری انجام شد.

3- نتایج

نتایج آزمایش‌های این پژوهش در چهار بخش زیر ارائه شده است. 1- نیروهای فرزکاری، 2- زبری سطح، 3- توپوگرافی سه

در این آزمایش‌ها روغن با نرخ جریان $Q_t = 100 \text{ ml/h}$ و گاز (هوا) با فشار $P_g = 3 \text{ bar}$ از طریق نازل دستگاه به ناحیه هدف روان کاری پاشش شد. موقعیت هدف روان کاری در آزمایش‌های این پژوهش، ناحیه نوک ابزار فرز انگشتی در محل تماس با قطعه کار می‌باشد. نازل با زاویه 40 درجه نسبت به محور ابزار قرار گرفته و فاصله خروجی آن تا لبه ابزار 30 mm تنظیم شد. نیروهای برش در فرایند فرزکاری در سه راستای x,y,z بوسیله دینامومتر پیزوالکتریک سه محوره ساخت شرکت کیستلر¹ مدل 9255B و شارژ آمپلی‌فایر کیستلر مدل 5019 اندازه‌گیری شد. همچنین برای ثبت داده‌ها از یک سیستم اکتساب داده از نوع کارت PCI استفاده شد. اطلاعات انتقال یافته از کارت PCI نیز توسط نرم افزار داینوویر² شرکت کیستلر نمایش داده شد و آنالیزهای لازم در محیط آن صورت پذیرفت. زبری سطح نمونه‌های ماشین کاری شده نیز توسط دستگاه زبری‌سنج پرتابل ماهر مدل PS1 اندازه‌گیری شد. زبری سطح نمونه‌ها در راستای پیشروی ابزار اندازه‌گیری شدند. در کلیه تست‌های زبری‌سنجی، طول نمونه‌برداری روی دستگاه زبری‌سنج به میزان 5/6mm تنظیم شد و مقدار زبری متوسط (R_a) ثبت گردید. همچنین برای هر نمونه، زبری‌سنجی در پنج نقطه متفاوت از سطح قطعه کار انجام شد و سپس مقادیر متوسط زبری محاسبه گردید. به منظور کمی کردن بهتر ناهمواری‌های سطح، تصاویر توپوگرافی سه بعدی سطح و پارامترهای متناظر آن با استفاده از دستگاه پروفایلمتر سه بعدی شرکت نانوفوکوس³ و نرم افزار مایکروسرف⁴ تهیه شدند. همچنین با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی تصاویر با وضوح و کیفیت بالا از سطح نمونه‌های ماشین کاری شده تهیه شد.

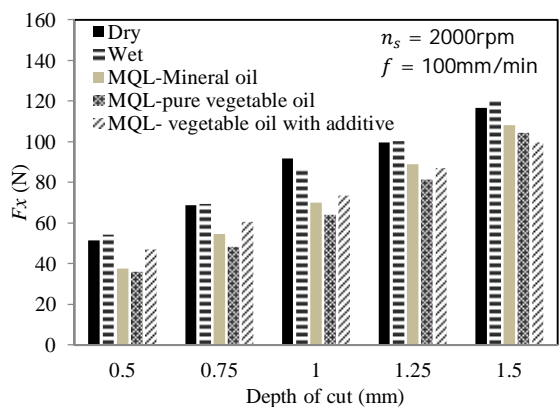
همان گونه که در شکل 1 نشان داده شده است، جهت انجام آزمایش، نمونه قطعه کار توسط گیره روی صفحه دینامومتر محکم می‌شود. دینامومتر نیز به میز ماشین فرز توسط پیچ بسته شده است. فرزکاری هر نمونه در راستای طول قطعه کار و به طول 82mm انجام می‌شود. آزمایش‌های فرزکاری نمونه‌های فولادی بر اساس جدول 5 طراحی شده است. در این طرح آزمایش متغیرهای براده برداری عبارتند از: 1- سرعت برش (v_s)، 2- سرعت پیشروی (f) و 3- عمق براده برداری (a_p). همچنین هر آزمایش فرزکاری در پنج شرایط مختلف روان کاری انجام شد که عبارتند از: 1- ماشین کاری خشک، 2- ماشین کاری تر، 3-

¹ Kistler

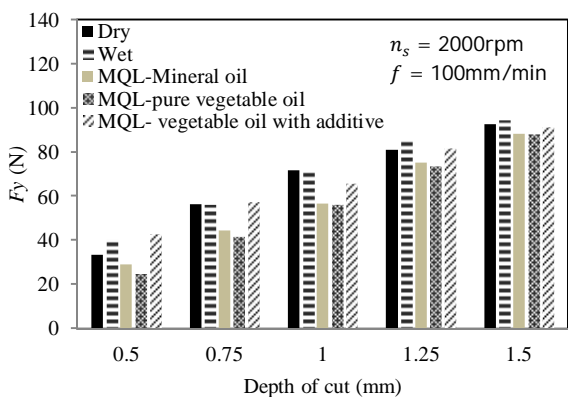
² Dynoware

³ Nanofocus

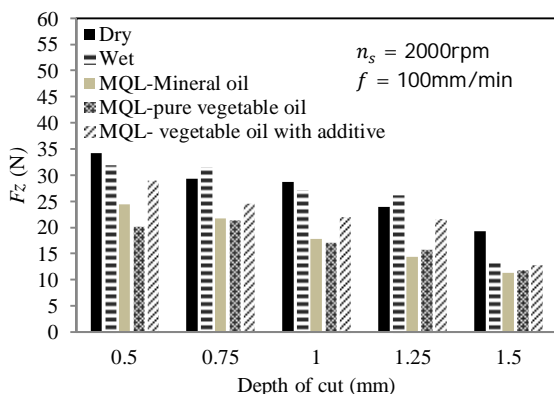
⁴ usurf



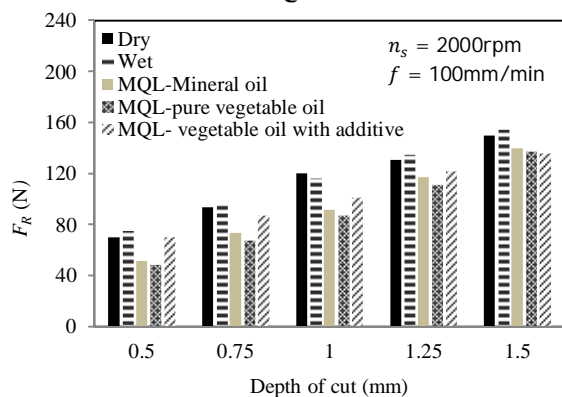
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

Fig. 5 (a), (b), and (c) milling force versus depth of cut in x, y and z directions respectively.

شکل 5 الف تا ج به ترتیب نیروهای فرزکاری نسبت به عمق براده برداری در جهت های x, y و z.

بعدی سطح و 4- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی از سطح ماشین کاری شده نمونه ها.

3-1- نیروهای فرزکاری

در حین عملیات برش در فرایند فرزکاری، بین ابزار و قطعه کار نیروهای مکانیکی بوجود می آید. در واقع به دلیل چرخش ابزار با سرعت برشی v_s و پیشروی قطعه کار با سرعت نسبی f لبه های برشی ابزار از سطح کار شروع به جدا کردن براده می کنند. فرایند برش که در آن یک ابزار از جنس سخت از سطح قطعه کار نرم تر براده را جدا می نماید یک فرایند مکانیکی است و در این فرایند نیروهای مکانیکی شکل می گیرد. معمولاً نیروهای فرزکاری به روش تجربی توسط دینامومتر اندازه گیری می شود. در ماشین کاری شیار توسط ابزار فرز انگشتی که در آزمایش های این تحقیق انجام شده است، نیروهای فرزکاری در سه راستای x, y, z دستگاه مختصات کارتزین بوجود می آید. نیروهای F_x و F_y در صفحه افقی و نیروی F_z در راستای محور ابزار وارد می شود. در شکل 4 یک نمونه از نمودارهای نیرو که توسط دینامومتر اندازه گیری و توسط نرم افزار داینوویر ترسیم شده، نمایش داده شده است. از آنجایی که در عملیات ماشین کاری شیار توسط ابزار انگشتی، عمده براده برداری توسط لبه جانبی ابزار صورت می پذیرد، لذا مقدار نیروها در جهت های x و y بیشتر از محور z می باشد.

در اینجا برای هر آزمایش، متوسط مقدار نیرو در هر محور توسط نرم افزار داینوویر محاسبه می شود. همچنین نیروی برآیند F_R که به ابزار یا قطعه کار وارد می شود نیز از رابطه (1) محاسبه می شود.

$$F_R = \sqrt{(F_x^2 + F_y^2 + F_z^2)} \quad (1)$$

در شکل 5 نمودار نیروهای فرزکاری نسبت به عمق براده برداری نشان داده شده است.

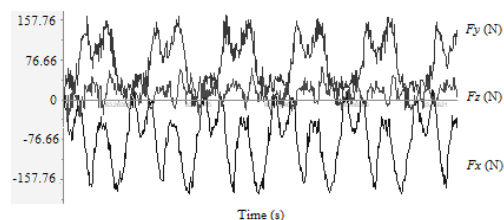


Fig. 4 A milling force graph in x, y, and z directions obtained by the dynamometer when $n_s = 2000 \text{ rpm}$, $f = 100 \text{ mm/min}$, $a_p = 1 \text{ mm}$

شکل 4 یک نمونه نمودار نیروهای فرزکاری در جهت های x, y, z که توسط دینامومتر در شرایط $v_s = 2000 \text{ rpm}$ و $f = 100 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$, $a_p = 1 \text{ mm}$ آمده است.

روغن برش معدنی مورد استفاده در روان کاری کمینه، یک نوع روغن برش تجاری مخصوص ماشین کاری فلزات است که از مشتقات نفتی بدست آمده و به آن افزودنی‌های تحمل فشار زیاد¹ جهت جلوگیری از سایش قطعات و کاهش چسبندگی و افزودنی‌های قطبی جهت بهبود خواص روان کنندگی² اضافه شده است. نتایج بدست آمده از نیروهای فرزکاری نشان می‌دهد که روان کاری کمینه با روغن برش معدنی نیروهای کمتری نسبت به ماشین کاری تر ایجاد می‌کند. این کاهش نیرو را می‌توان به قابلیت روان کاری بهتر روغن برش معدنی غیر حل شونده نسبت به امولسیون بکار رفته در ماشین کاری تر نسبت داد. از طرف دیگر نیروهای فرزکاری بدست آمده در آزمایش‌های روان کاری کمینه با روغن گیاهی خالص، عموماً کمتر از نیروهایی هستند که در تست‌های روان کاری کمینه با روغن برش معدنی بدست آمده‌اند. این نتیجه با توجه به شرایط این روغن که کاملاً طبیعی و بدون افزودنی تهیه شده است، قابل توجه است. از این رو در این پژوهش نمونه دیگری از روغن گیاهی تهیه شد و به هدف ارتقاء خواص شیمیایی آن، به آن افزودنی آنتی اکسیدان BHT اضافه شد. با این وجود نمودارهای شکل 5 نشان می‌دهد که افزودن این نوع آنتی اکسیدان نتیجه مطلوبی در کاهش نیروهای فرزکاری نداشته است و حتی نیروها افزایش نیز یافته است.

شکل‌های 6- الف تا ج نیز به ترتیب نمودارهای مربوط به نیروی فرزکاری نسبت به سرعت پیشروی ابزار را در جهت‌های x ، y و z نشان می‌دهد. شکل 6- د نیز برآیند نیروهای فرزکاری را نسبت به سرعت پیشروی در شرایط مختلف روان کاری نشان می‌دهد. نمودار نیروی برآیند نشان می‌دهد که با افزایش سرعت پیشروی نیروهای فرزکاری افزایش می‌یابند. در اینجا شرایط روان کاری که به ترتیب سبب کاهش نیروهای برآیند فرزکاری شده است به صورت زیر می‌باشد: 1- روغن گیاهی خالص، روغن معدنی، روغن گیاهی با افزودنی، ماشین کاری تر و ماشین کاری خشک. در این پژوهش نیروهای بدست آمده در محور z (محور اسپیندل ابزار) در حالت‌های ماشین کاری با پارامترهای مختلف (عمق براده‌برداری، سرعت پیشروی و سرعت اسپیندل) تغییرات چندانی را نشان نمی‌دهد. زیرا در اینجا نیروهای برش در صفحه xy - وارد می‌شوند و تغییر پارامترهای برش عملاً بر نیروی وارد شده به قطعه کار در راستای محور ابزار (F_z) تأثیر چندانی ندارد.

شکل‌های 5 الف تا ج به ترتیب نمودارهای نیروهای F_y ، F_x و F_z را در حالت‌های مختلف روان کاری نشان می‌دهند. شکل 5- د نیز مقایسه نیروی برآیند فرزکاری را در حالت‌های مختلف روان کاری نشان می‌دهد. با توجه به نمودار شکل 5d، شرایط روان کاری که به ترتیب سبب کاهش نیروهای برآیند فرزکاری شده است به صورت زیر می‌باشد: روغن گیاهی خالص، روغن معدنی، روغن گیاهی با افزودنی، ماشین کاری تر و ماشین کاری خشک. همچنین با مشاهده نمودارهای نیرو- عمق براده‌برداری در شکل 5 این نتیجه بدست می‌آید که به طور کلی نیروهای ماشین کاری خشک و تر در مقایسه با نیروهایی که از فرایند فرزکاری با روان کاری کمینه حاصل شده‌اند، بیشتر می‌باشد. بالا بودن نیروهای فرزکاری در این حالت‌ها نشان دهنده این است که در فرایند برش لبه ابزار از سطح قطعه کار، میزان اصطکاک بالا بوده و در نتیجه تنش‌های بیشتر و متناظراً نیروهای بیشتری به ابزار وارد می‌شود. این بدین معناست که در حین برش توان مصرفی ماشین ابزار هم افزایش می‌یابد.

علاوه بر آن بالا بودن نیروهای ماشین کاری می‌تواند احتمال بروز عیوب سطحی را نیز در سطح قطعه کار افزایش دهد. کاهش اصطکاک بیشتر در این روش در اثر نفوذ مؤثرتر روان کار (روغن) در ناحیه برش و کاهش چسبندگی اجزای در تماس حاصل می‌شود. در واقع اجزای مهم فرایند ماشین کاری که در تماس و سایش هستند عبارتند از: 1- ناحیه تماس ابزار-براده و 2- ناحیه تماس سطح آزاد ابزار با قطعه کار. در این نواحی اصطکاک و سایش به شدت بالاست و از این رو روان کاری مؤثر این ناحیه می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش اصطکاک و سایش اجزا ایفا کند. در روش روان کاری کمینه از روغن‌های غیر حل شونده در آب (روغن خالص) جهت روان کاری و خنک کاری ناحیه براده‌برداری استفاده می‌شود. قابل توجه است که روغن‌های غیر حل شونده خالص نسبت به روغن‌های حل شونده در آب (امولسیون‌ها) توانایی بالاتری در کاهش اصطکاک و سایش از خود نشان می‌دهند. در روش روان کاری کمینه از نرخ حجمی بسیار کم روغن جهت روان کاری استفاده می‌شود. با این وجود این جریان روغن در نازل دستگاه روان کاری کمینه توسط جریان هوای فشرده با سرعت بالا به ذرات بسیار ریز میکرونی تبدیل می‌شود و با خروج از دهانه نازل توسط جت هوای حامل به سمت ناحیه هدف روان کاری پاشش می‌شود. از این رو با موقعیت دهی مناسب نازل می‌توان سیال روان کار را به طور بهینه به ناحیه هدف هدایت نموده و با کاهش اتلاف و پراکندگی سیال، روان کاری مؤثرتری در ناحیه برش انجام داد. در اینجا

¹ Extreme Pressure

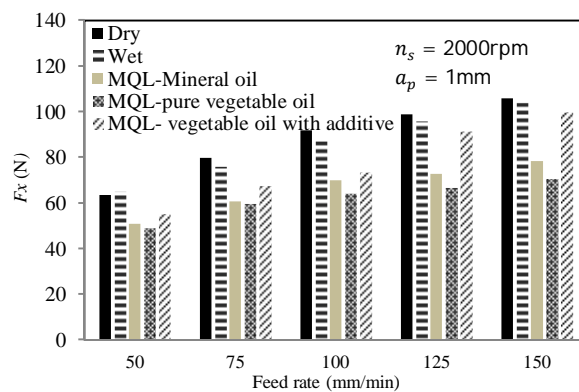
² Lubricity

همچنین شکل 6-د نشان می‌دهد که با افزایش سرعت پیشروی ابزار به مقادیر 125، 150mm/min قابلیت روان کاری روغن گیاهی دارای افزودنی، به میزان قابل توجهی کاهش یافته و نیروهای برآیند در آنها افزایش پیدا کرده‌اند.

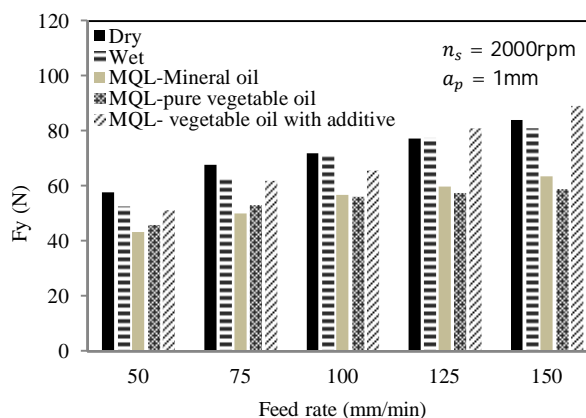
در شکل‌های 7-الف تا ج به ترتیب نمودارهای مربوط به نیروی فرزکاری نسبت به سرعت اسپیندل ابزار در جهت‌های x، y و z نشان داده شده است. در شکل 7-د نیز نمودار نیروی برآیند فرزکاری نسبت به سرعت اسپیندل ماشین نشان داده شده است. نمودار نیروی برآیند نشان می‌دهد که با افزایش سرعت اسپیندل، نیروی وارد بر لبه‌های ابزار کاهش می‌یابد. این موضوع می‌تواند ناشی از نرم شدگی حرارتی¹ ماده قطعه‌کار در اثر افزایش دمای برش در سرعت‌های بالاتر اسپیندل و همچنین کاهش اصطکاک بین ابزار، براده و قطعه‌کار در دماهای بالاتر باشد [16]. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در سرعت‌های 1000-2000rpm نیروهای ماشین‌کاری خشک و تر بیشتر از نیروهای بدست آمده از روان‌کاری کمینه هستند. در حالی که در سرعت‌های بالاتر (به عبارت دیگر در سرعت‌های 2500rpm و 3000rpm مقدار نیروی ماشین‌کاری خشک کمتر از سایر حالت‌های روان‌کاری بدست آمده است. از آنجا که این نتیجه در سرعت‌های بالا و به ویژه در سرعت 3000rpm با شدت بیشتری رخ داده است، می‌توان آن را احتمالاً به دلیل پدیده نرم شدگی ماده به علت افزایش بسیار زیاد دمای ناحیه برش در سرعت‌های بالا دانست. همچنین به طور کلی در سرعت‌های 2500 rpm و 3000rpm تغییرات نیروی فرزکاری حاصل از استفاده از سیال روان‌کار چندان قابل ملاحظه نیست. دلیل این موضوع می‌تواند به علت کاهش اثر روان‌کار در سرعت‌های بالا (دماهای بالا) و تبخیر آن در ناحیه برش باشد.

2-3- زبری سطح

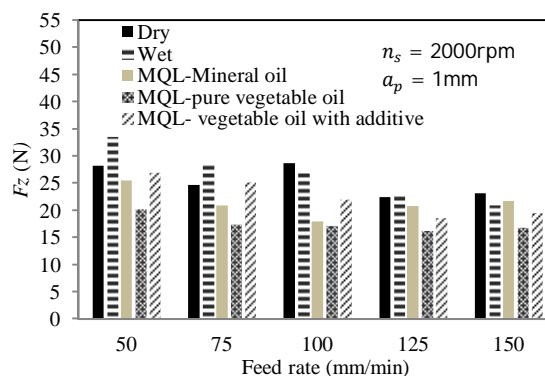
در این بخش به منظور بررسی تأثیر شرایط روان‌کاری بر کیفیت سطح ماشین‌کاری قطعات، از آن‌ها زبری سنجی به عمل آمده است. شکل‌های 8-الف تا ج به ترتیب نمودار زبری نسبت به عمق براده‌برداری، سرعت پیشروی، و سرعت اسپیندل را نشان می‌دهد. بررسی نمودارهای 8-الف و ب نشان می‌دهند که در مجموع سطوح فرزکاری شده در شرایط روان‌کاری کمینه با روغن‌های گیاهی خالص و روغن گیاهی دارای افزودنی به ترتیب کمترین زبری سطح را ایجاد نموده‌اند و در مقایسه با آن‌ها، سایر شرایط روان‌کاری سطوح زبرتری را بدست می‌دهند.



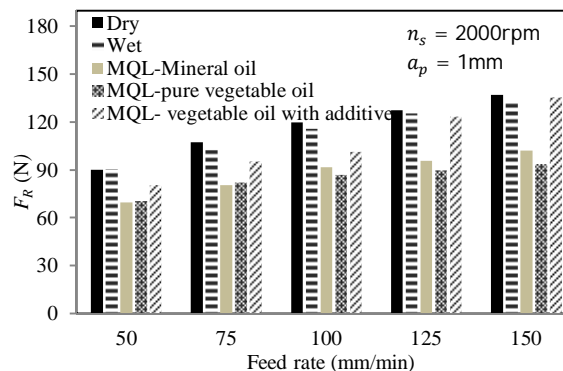
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

Fig. 6 (a), (b), and (c) milling force versus feed rate in x, y and z directions respectively.

شکل 6 الف، ب و ج به ترتیب نیروهای فرزکاری نسبت به سرعت پیشروی در جهت‌های x، y و z.

¹ Thermal softening

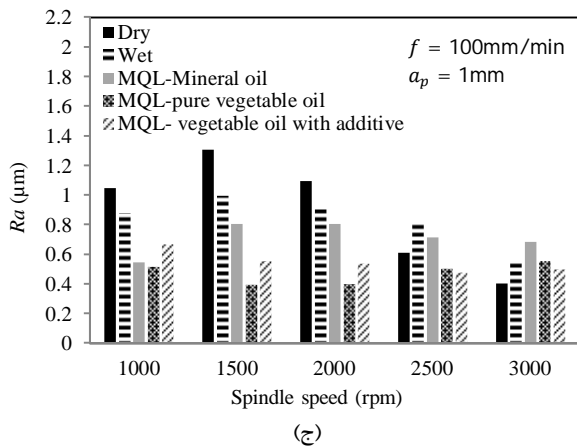
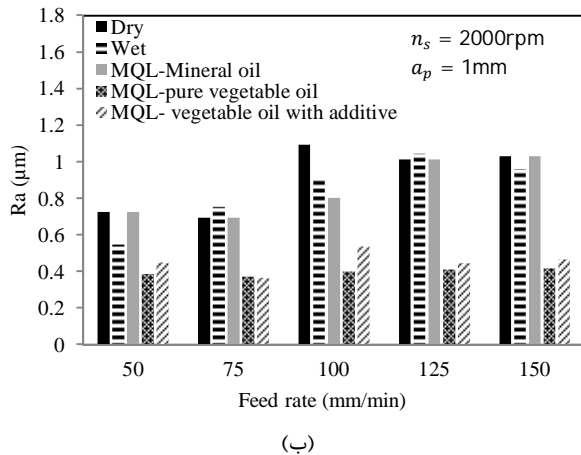
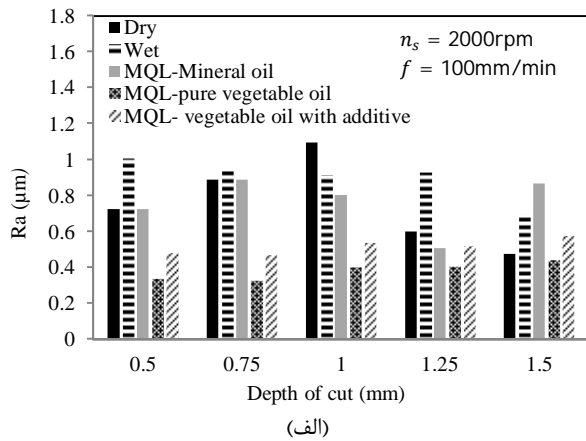


Fig. 8 Surface roughness results, (a: the Ra roughness versus depth of cut. b: the Ra roughness versus feed rate. c: the Ra roughness versus spindle speed.

شکل 8 نتایج زبری سطح (الف) نمودار زبری Ra نسبت به عمق بار. (ب) نمودار زبری Ra نسبت به سرعت پیشروی. (ج) نمودار زبری Rz نسبت به سرعت اسپیندل).

اما نمودار شکل 8-ج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت اسپیندل $n_s \geq 2500\text{rpm}$ و به عبارت دیگر با افزایش دمای ناحیه ماشین کاری عملکرد روان کارها در رابطه با زبری سطح مطلوب نخواهد بود. در واقع دلیل آن اینست که با افزایش دمای ناحیه برش عملاً سیال نمی‌تواند خاصیت روان کاری خود را

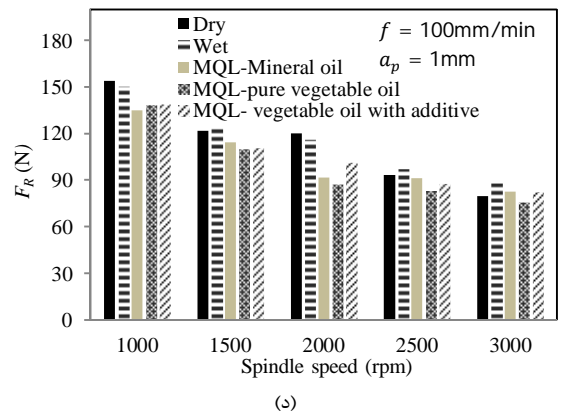
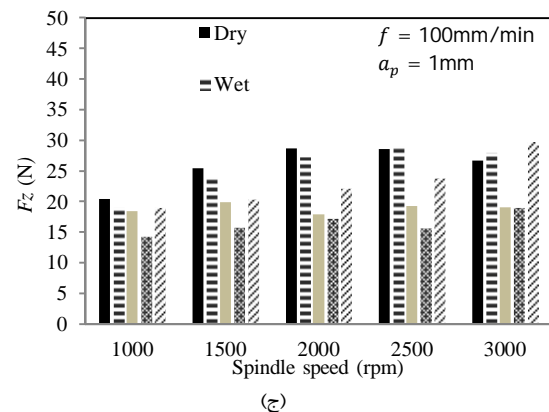
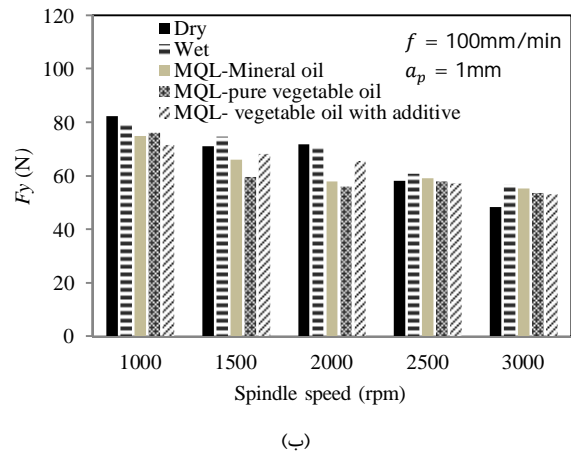
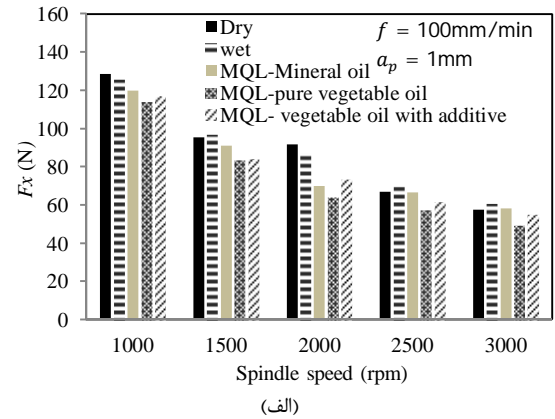


Fig. 7 (a), (b), and (c) milling force versus spindle speed in x, y and z directions respectively.

شکل 7 الف، ب و ج به ترتیب نیروهای فرزکاری نسبت به سرعت اسپیندل در جهت‌های x، y و z.

مربعات ارتفاع ناهمواری‌های سطح. این پارامتر بر اساس داده‌های بدست آمده از ارتفاع ناهمواری‌های سطح تعیین می‌شود و جهت متمایز نمودن سطوح مختلف و همچنین نمایش پایداری و ثبات فرایند ساخت قطعه به کار می‌رود. S_q از رابطه (2) بدست می‌آید [17].

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^2(x_i, y_i)} \quad (2)$$

در این رابطه x, y نقاط روی سطح مورد بررسی در دستگاه مختصات کارتزین و z ارتفاع ناهمواری‌ها می‌باشد. شماره‌های M و N نیز به تعداد نقاط اندازه‌گیری شده از سطح (داده‌های سطح) بستگی دارد. در مطالعه حاضر نمونه‌های فرزکاری شده با پارامترهای برشی $a_p = 1\text{mm}$ ، $f = 100\text{mm/min}$ و $n_s = 2000\text{rpm}$ جهت انجام تست‌های توپوگرافی سه بعدی انتخاب شدند. سپس با استفاده از دستگاه پروفایلومتر سه بعدی، سطح نمونه‌ها اسکن شد و توپوگرافی سطح آن‌ها بدست آمد. همچنین توسط نرم افزار دستگاه آنالیز کمی ناهمواری‌های سطح نمونه‌ها صورت پذیرفت. در نمودار شکل 9 تصاویر سه بعدی توپوگرافی سطح نمونه‌های مورد بررسی نشان داده شده است.

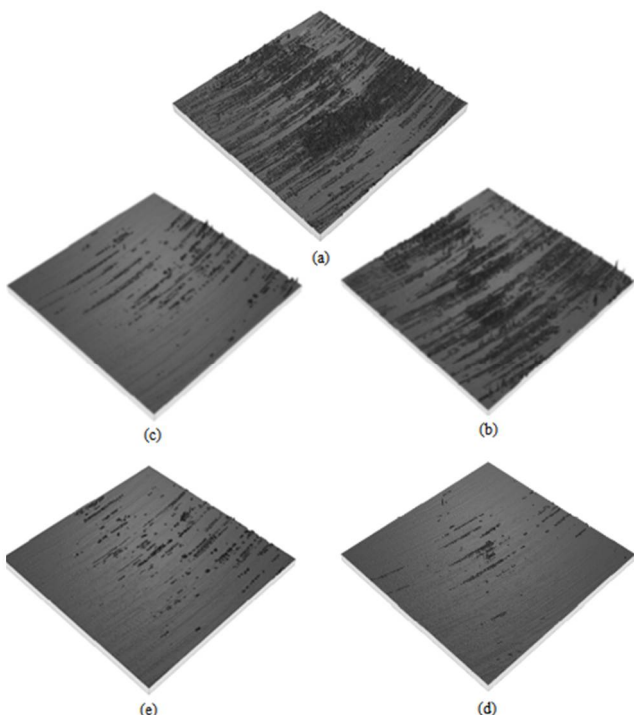


Fig. 9 3D surface topography of the samples machined under different lubrication conditions. (a):dry, (b):wet, (c):MQL with mineral oil, (d):MQL with pure vegetable oil, (e):MQL with vegetable oil and additive.

شکل 9 تصاویر سه بعدی توپوگرافی سطح نمونه‌های ماشین‌کاری شده در شرایط مختلف روان‌کاری. (a): ماشین‌کاری خشک، (b): ماشین‌کاری تر، (c): روان‌کاری کمیینه با روغن معدنی، (d): روان‌کاری کمیینه با روغن گیاهی خالص، (e): روان‌کاری کمیینه با روغن گیاهی و افزودنی.

حفظ کند و به سرعت تبخیر می‌شود و از این رو تأثیر زیادی بر زبری سطح نشان نمی‌دهد.

3-3- اندازه‌گیری توپوگرافی سه بعدی سطح

معمولاً بیشتر آنالیز ناهمواری‌های سطوح ماشین‌کاری شده توسط زبری سنج و به صورت دوبعدی صورت می‌پذیرد. زبری سنج‌های متداول دارای یک پروب (دندانه) با اندازه میکرونی و از جنس الماس مصنوعی هستند. پروب زبری سنج به صورت دو بعدی اندازه‌گیری زبری سطوح را انجام می‌دهد. بدین صورت که در زبری سنجی سوزن (پروب) دستگاه در راستای افقی (محور x) روی سطح حرکت کرده و به دلیل وجود ناهمواری‌های سطح، در راستای محور عمودی (محور z) جابه‌جایی دارد. در این روش زبری سطح در راستای یک خط اندازه‌گیری می‌شود و با انجام این عملیات در چند نقطه از سطح و محاسبه میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، مقدار متوسط زبری محاسبه می‌شود. با این وجود، محدودیت این روش اندازه‌گیری این است که قادر به اسکن یک ناحیه از سطح نیست. در حالی که با اسکن یک ناحیه از سطح و اندازه‌گیری سه بعدی ناهمواری‌های سطح می‌توان تصویر و مقدار دقیقتری از زبری سطح قطعه کار بدست آورد. در واقع با استفاده از دستگاه‌های پیشرفته جدید می‌توان به روش‌های غیر تماسی داده‌های بیشتری از سطح را در زمان‌های بسیار کمتری ایجاد نمود. همچنین امروزه کامپیوترها دارای توان محاسباتی بالایی هستند و می‌توانند با هزینه و زمان قابل قبولی داده‌های بسیار زیاد تولید شده در اندازه‌گیری‌های سه بعدی را پردازش کنند. از طرف دیگر سطوح تولید شده توسط فرایندهای ماشین‌کاری بعضاً پیچیده و دارای جزئیات کنترل شده‌ای هستند و برای انجام یک کنترل کیفیت خوب، به سطح بالایی از آنالیز نیاز دارند. از این رو تصویربرداری و اندازه‌گیری سه بعدی سطح می‌تواند دقت کمی‌سازی ناهمواری‌های سطح را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. اندازه‌گیری سه بعدی ناهمواری‌های سطح را اندازه‌گیری سه بعدی توپوگرافی سطح نیز می‌نامند. در واقع توپوگرافی مطالعه یا توصیف کامل و دقیق ویژگی‌های ظاهری سطح است.

3-3-1- پارامترهای سه بعدی سطح

پارامترهای دامنه (ارتفاع ناهمواری‌ها) از جمله مهمترین پارامترهای توپوگرافی سه بعدی سطح هستند. بر اساس استاندارد ISO 25178-2:2012 پارامتر S_q یکی از مهمترین پارامترهای سه بعدی سطح است. S_q عبارتست از ریشه میانگین

نشان داده شده است. بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد که در شرایط ماشین‌کاری خشک (شکل 11a)، عیوب بسیاری بر سطح قطعه بوجود آمده است. این عیوب شامل چاله‌ها¹، ترک‌های میکرونی²، براده‌های جدانشده³ و شیارهای عمیق⁴ می‌باشد. وجود این عیوب نشان دهنده کیفیت ضعیف سطح قطعات ماشین‌کاری شده در شرایط خشک است. در واقع عدم وجود سیال ماشین‌کاری، سبب افزایش اصطکاک و چسبندگی و افزایش حرارت شده و عیوب سطحی را شکل می‌دهد. اما شکل 11b به وضوح نشان می‌دهد که در شرایط ماشین‌کاری تر، عمده عیوب میکروترک‌هایی هستند که احتمالاً به دلیل شوک حرارتی بر سطح قطعه‌کار بوجود آمده‌اند. شوک حرارتی ناشی از داغ شدن سطح قطعه‌کار حین براده‌برداری و سپس سرد شدن سریع آن در اثر خنک‌کاری با سیال امولسیون ایجاد می‌شود. در شکل 11c سطح نمونه فرزکاری شده در شرایط روان‌کاری کمیته با روغن معدنی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که کیفیت این سطح نسبت به موارد قبلی بسیار بهتر شده است و عیوب کمتری روی سطح بوجود آمده است. با این وجود همچنان آثاری از حفره‌های کوچک⁵ بر سطح قطعه‌کار مشاهده می‌شود. شکل 11d سطح نمونه فرزکاری شده در شرایط روان‌کاری کمیته با روغن گیاهی خالص را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که شیارهای به‌جا ماده از حرکت ابزار در مسیر براده‌برداری دارای عمق بسیار کمی هستند و عیوب سطحی از جمله پلیسه‌ها، ترک‌ها و حفره‌های بسیار کمتری نیز بر سطح کار بوجود آمده است. شکل 11e مربوط به نمونه فرزکاری شده در شرایط روان‌کاری کمیته با روغن گیاهی و افزودنی آنتی‌اکسیدان می‌باشد. تصویر این شکل، تشکیل میکروترک‌های پراکنده شده در نقاط مختلف روی سطح را نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی با نتایج قبلی (توپوگرافی سطح و زبری سنجی) در رابطه با کیفیت سطح نمونه‌ها مطابقت خوبی دارد. با این وجود دقت توپوگرافی سه بعدی سطح نسبت به زبری سنجی دوبعدی بالاتر است و بهتر می‌تواند هم به صورت تصویری و هم به صورت کمی میزان ناهمواری‌های سطح را نشان دهد. در واقع باوجود افزودن آنتی‌اکسیدان BHT به روغن گیاهی خالص، نه تنها کیفیت سطح نمونه ماشین‌کاری شده بهتر نشده است بلکه با شکل‌گیری عیوب (میکروترک‌ها)، کیفیت سطح آن تنزل نیز داشته است.

علایم شیارهای موجود در تصاویر توپوگرافی سه بعدی سطح، نشان‌دهنده مسیرهای حرکت ابزار می‌باشد. همچنین میزان ناهمواری‌های (قله‌ها و دره‌های) موجود در تصاویر سه بعدی سطح، گویای وجود عیوب سطحی در فرایند ماشین‌کاری نمونه است. عیوب سطحی ماشین‌کاری شامل آثار رگه‌های مسیر حرکت ابزار، وجود براده‌های لهیده شده و چسبیده به سطح، حفره‌ها و کندگی‌ها و ترک‌ها می‌باشد. هر چه میزان تیرگی‌های موجود در تصاویر توپوگرافی بیشتر باشد به معنای آن است که ناهمواری‌های موجود بر سطح نمونه نیز بیشتر بوده است. البته با آنالیز سطح توسط نرم افزار دستگاه، مقادیر کمی ریشه میانگین مربعات ارتفاع ناهمواری‌ها (S_q) نیز مشخص شده و در شکل 10 نشان داده شده است. مقایسه مقادیر S_q در شکل 10 نشان می‌دهد که کیفیت سطح ماشین‌کاری شده نمونه‌ها به ترتیب از بیشترین میزان ناهمواری (زبرترین سطح) به کمترین میزان ناهمواری (صاف‌ترین سطح) عبارتند از: 1- ماشین‌کاری خشک، 2- ماشین‌کاری تر، 3- روان‌کاری کمیته با روغن معدنی، 4- روان‌کاری کمیته با روغن گیاهی دارای افزودنی، 5- روان‌کاری کمیته با روغن گیاهی خالص. تصاویر توپوگرافی سطح در شکل 10 نیز با مقادیر کمی ذکر شده تطابق دارد.

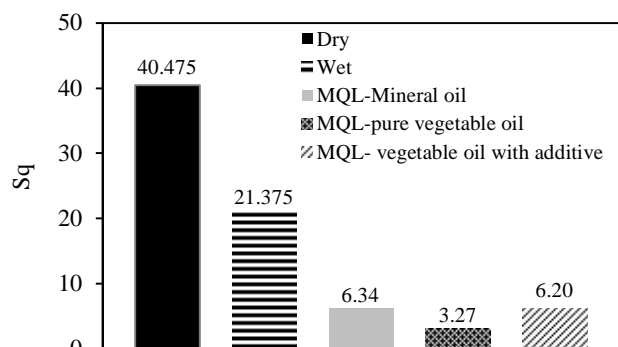


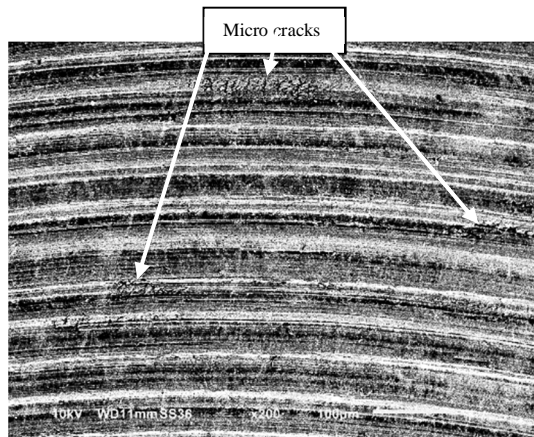
Fig. 10 The obtained root mean square deviations (S_q) for the machined samples under different lubrication conditions.

شکل 10 مقادیر بدست آمده ریشه میانگین مربعات ناهمواری‌های سطح قطعه‌کار (S_q) برای نمونه‌های ماشین‌کاری شده در شرایط مختلف روان‌کاری.

3-4- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

در این بخش به منظور بررسی بافت سطح نمونه‌های فرزکاری شده در شرایط روان‌کاری مختلف، از سطح آن‌ها تصاویر بزرگنمایی شده با میکروسکوپ الکترونی تهیه شده است. برای این منظور نمونه‌هایی که با پارامترهای برش $a_p = 1\text{mm}$, $f = 100\text{mm/min}$, $n_s = 2000\text{rpm}$ و شرایط مختلف روان‌کاری ماشین‌کاری شده‌اند، برای تصویربرداری انتخاب شدند. این تصاویر با بزرگنمایی 200 برابر تهیه شده و در شکل‌های 11a-e

¹ Pits
² Micro cracks
³ Uncut chips
⁴ Grooves
⁵ Voids



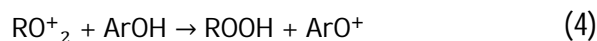
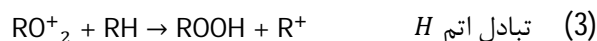
MQL with vegetable oil and additive, × 200 (ه)

Fig. 11 SEM micrograph of the samples machined under different lubrication conditions. Cutting parameters: $a_p = 1\text{mm}$, $f = 100\text{ mm/min}$, $n_s = 2000\text{ rpm}$.

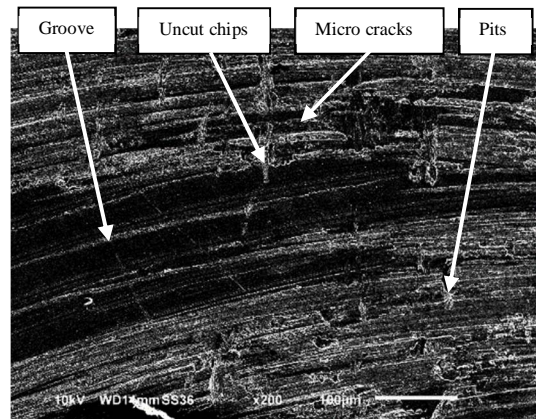
شکل 11 تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های ماشین‌کاری شده در شرایط روان کاری مختلف. پارامترهای براده‌برداری:

$$a_p = 1\text{mm}, f = 100\text{ mm/min}, n_s = 2000\text{rpm}$$

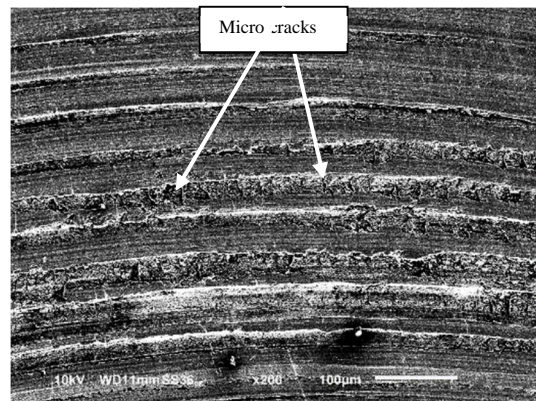
به طور کلی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد نمونه‌هایی که توسط روغن گیاهی دارای افزودنی، ماشین‌کاری شده‌اند نسبت به نمونه‌هایی که با روغن گیاهی خالص ماشین‌کاری شده‌اند، دارای نیروهای فرزکاری بالاتر و کیفیت سطح ضعیف‌تری هستند. دلایل این مشاهده بر اساس واکنش‌های (1 تا 4) آنتی‌اکسیدان BHT با روغن گیاهی [14]، در ادامه تبیین شده است.



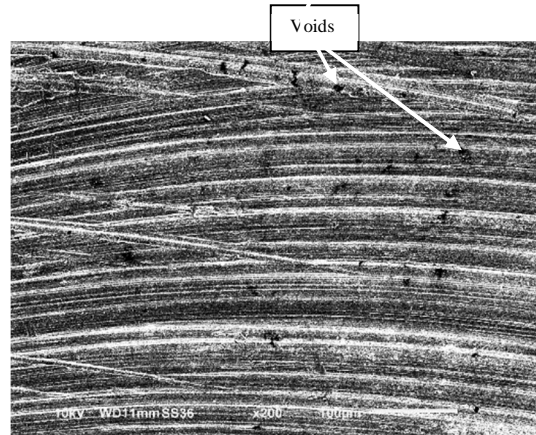
هنگامی که روغن در فرایند ماشین‌کاری در معرض حرارت ناحیه برش قرار می‌گیرد، شروع به تشکیل رادیکال‌های آزاد می‌کند. واکنش (1) نحوه تشکیل رادیکال‌های آزاد را نشان می‌دهد که فاز شروع نامیده می‌شود. در این فاز، از ملکول اسید چرب روغن (RH)، ملکول رادیکال آزاد (R^+) و اتم آزاد هیدروژن (H^+) بوجود می‌آید. لازم به ذکر است که اسیدهای چرب غیراشباع به دلیل داشتن پیوند دوگانه $\text{C} = \text{H}$ ، راحت‌تر از اسیدهای چرب اشباع، ملکول رادیکال آزاد تشکیل می‌دهند. (بر اساس مقادیر نشان داده شده در جدول 3 روغن گیاهی کنجد خالص دارای بیش از 82% اسیدهای چرب غیراشباع است.) پس از آن رادیکال‌های آزاد تشکیل شده با ملکول‌های اکسیژن موجود در محیط واکنش داده و ملکول‌های رادیکال پراکسیل روغن (RO^+_2) را تشکیل می‌دهند. واکنش (2) با سرعت نسبتاً



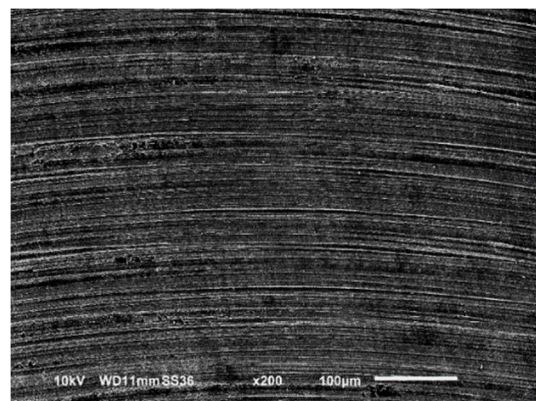
Dry machining, × 200 (الف)



Wet machining, × 200 (ب)



MQL with mineral oil, × 200 (ج)



MQL with pure vegetable oil, × 200 (د)

رادیکال‌های آزاد را متوقف می‌کند. در حالی که استفاده از این نوع آنتی‌اکسیدان‌ها برای روغن‌های گیاهی با مصارف صنعتی دما بالا (ماشین‌کاری) می‌تواند مناسب نباشد زیرا سبب تجزیه بیشتر روان کار در دماهای بالا به محصولات غیر روان کار خواهد شد. از این رو در افزودن آنتی‌اکسیدان به روغن‌های گیاهی جهت مصارف صنعتی باید نکات ذیل را لحاظ نمود:

- با توجه به اینکه اسیدهای چرب غیراشباع به دلیل داشتن پیوند دوگانه $C = H$ ، راحت‌تر از اسیدهای چرب اشباع، در فاز شروع، ملکول رادیکال آزاد تشکیل می‌دهند، از این رو بهتر است ابتدا با استفاده از روش‌های اصلاح ساختار شیمیایی مانند اپوکسی‌کردن (اپوکسیداسیون) روغن، میزان درصد غیراشباع روغن‌های پایه گیاهی را کاهش داد [18].

4- نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده در این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- از نمودارهای نیرو، زبری و توپوگرافی سطح و همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی که نتایج تأثیر استفاده از روش‌ها و روان کارهای مختلف در آزمایش‌های این پژوهش را نشان می‌دهند می‌توان پی برد که به طور کلی روش روان کاری کمینه قادر است در فرایند فرزکاری نمونه‌های فولاد زنگ نزن در مقایسه با ماشین‌کاری خشک و تر، با کاهش نیروها و زبری سطح و کاهش عیوب سطحی قابلیت ماشین‌کاری این دسته از مواد سخت ماشین‌کاری شونده را بهبود بخشد. در حالی که روش‌های خشک و تر از نظر نیروهای ماشین‌کاری و کیفیت سطح نتایج مطلوبی در بر ندارند.

- نوع روغن در روان کاری کمینه تأثیر به سزایی بر خروجی‌های فرایند فرزکاری دارد. در اینجا در مجموع روغن گیاهی خالص بهترین نتیجه را در مقایسه با سایر روغن‌ها، در رابطه با نیروها و کیفیت سطح ماشین‌کاری داشته است. اما در مورد روغن معدنی و روغن گیاهی دارای افزودنی، نمی‌توان به طور قطع یکی را بر دیگری برتری داد. روغن گیاهی دارای افزودنی در زمینه کیفیت سطح نتایج بهتری می‌دهد در حالی که روغن معدنی در آزمایش‌ها نیروهای کمتری ایجاد می‌کند.

- روغن گیاهی خالص دانه کنجد جهت استفاده در فرایند فرزکاری فولاد زنگ نزن قابلیت روان کاری بسیار خوبی دارد و می‌تواند با روان کاری مؤثر ناحیه ماشین‌کاری، نیروهای فرزکاری را کاهش داده و کیفیت سطح را بهبود بخشد.

- نتایج نیروهای برش و کیفیت سطح نشان می‌دهد که

زیادی رخ می‌دهد ($109M^{-1}S^{-1}$). سپس فاز انتشار (واکنش 3) آغاز شده و با سرعتی بسیار کمتر از سرعت واکنش (2) ادامه پیدا می‌کند ($0.1-50 M^{-1}S^{-1}$). در فاز انتشار با واکنش ملکول رادیکال پراکسیل روغن (RO_2^+) با یک ملکول دیگر اسید چرب روغن (RH)، ملکول دیگری به نام هیدروپراکسید روغن (ROOH) به همراه یک رادیکال آزاد دیگر (R^+) تشکیل می‌شود. واکنش‌های (1) تا (3) به صورت زنجیروار ادامه پیدا می‌کند تا در نهایت کل روغن اکسید شود. اگر آنتی‌اکسیدان به روغن اضافه شود واکنش (4) رخ می‌دهد. در این واکنش آنتی‌اکسیدان (ArOH) با ملکول رادیکال پراکسیل روغن (RO_2^+) با سرعت بسیار بالا ($10^5 M^{-1}S^{-1} - 10^4$) واکنش داده و محصولات هیدروپراکسید روغن (ROOH) و رادیکال آزاد (ArO^+) را تشکیل می‌دهد. معمولاً ترکیبات آنتی‌اکسیدان‌ها به گونه‌ای است که رادیکال آزاد (ArO^+)، سرعت واکنش بسیار کمی با ملکول‌های اسید چرب روغن (RH) باقی مانده دارد. در واقع آنتی‌اکسیدان به منظور کاهش مقدار رادیکال‌های آزاد و جلوگیری از حمله آن‌ها به اسیدهای چرب اکسیدنشده روغن و همچنین قطع زنجیره تولید آن‌ها، به روغن افزوده می‌شود. مطابق واکنش (4) با افزودن آنتی‌اکسیدان به روغن خوراکی، درصد بالاتری هیدروپراکسید روغن (ROOH) و با سرعت بالایی در محیط تشکیل می‌شود. هیدروپراکسید (ROOH) تنها در دماهای کم پایدار است و خاصیت روان کاری دارد در حالی که این ماده در دماهای بالا (دمای ماشین‌کاری که در موضع برش دماهای بالایی است) دوباره تجزیه شده و به مواد دیگری از جمله آلدئیدها تبدیل می‌شود که خاصیت روان کاری ندارد. اما روغن گیاهی خالص که افزودنی آنتی‌اکسیدان ندارد، دارای مقدار رادیکال‌های آزاد پراکسیل (RO_2^+) بیشتر و میزان هیدروپراکسید (ROOH) کمتری در محیط خود است. در نتیجه در دماهای بالای ماشین‌کاری میزان کمتری از روغن هیدروپراکسید (ROOH) به محصولات غیر روان کار (آلدئیدها) تجزیه می‌شود و کماکان خواص روان‌کنندگی روغن بهتر حفظ می‌شود. در حالی که وجود آنتی‌اکسیدان در اینجا ممکن است سبب تولید هیدروپراکسید بیشتری شده و دماهای بالای ماشین‌کاری نیز سبب تجزیه این مواد گشته و در نهایت خواص روان کاری روغن را کاهش بدهد. عملکرد این نوع آنتی‌اکسیدان‌ها برای روغن‌های گیاهی با مصارف خوراکی مطلوب است زیرا با رادیکال‌های آزاد روغن (RO_2^+) که برای سلامتی مضر هستند به سرعت واکنش می‌دهد و سبب کاهش مقدار آن‌ها در محیط روغن می‌شود و همچنین چرخه تشکیل

- pp. 182-187, 2013.
- [8] C. Bruni, L. d'Apolito, A. Forcellese, F. Gabrielli, M. Simoncini, Surface roughness modelling in finish face milling under MQL and dry cutting conditions. *International Journal of Material Forming*, Vol. 1, No. 1, pp.503-506, 2008.
- [9] A.B. Junior, A.E. Diniz, F. Teixeira Filho, Tool wear and tool life in end milling of 15-5 PH stainless steel under different cooling and lubrication conditions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 43, No. (7-8), p.756, 2009.
- [10] B. Ozcelik, E. Kuram, B.T. Simsek, Comparison of dry and wet end milling of AISI 316 stainless steel. *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 26, No. 8, pp.1041-1049, 2011.
- [11] W.Y.H. Liew, Low-speed milling of stainless steel with TiAlN single-layer and TiAlN/AlCrN nanomultilayer coated carbide tools under different lubrication conditions. *Wear*, Vol. 269, No. (7-8), pp.617-631, 2010.
- [12] Sh. Shajari, M. H. Sadeghi, H. Hassanpour, The Influence of Tool Path Strategies on Cutting Force and Surface Texture during Ball End Milling of Low Curvature Convex Surfaces. *The Scientific World Journal*, 2014.
- [13] C. Kurt, Variation in oil content and fatty acid composition of sesame accessions from different origins. *Grasas y Aceites*, Vol. 69, No.1, p.241, 2018.
- [14] W.A. Yehye, N.A. Rahman, A. Ariffin, S. B. A. Hamid, A. A. Alhadi, F. A. Kadir, M. Yaeghoobi, Understanding the chemistry behind the antioxidant activities of butylated hydroxytoluene (BHT): A review. *European journal of medicinal chemistry*, Vol. 101, pp. 295-312, 2015.
- [15] <https://www.fuchs.com/de/en/special/product/product/126391-ocut-615-le>.
- [16] T.H.C. Childs. Friction modelling in metal cutting. *Wear*, Vol. 260, No. 3, pp.310-318, 2006.
- [17] W. P. Dong, P. J. Sullivan, K. J. Stout. Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography: III: Parameters for characterising amplitude and some functional properties. *Wear*, Vol. 178, no. 1-2, pp. 29-43, 1994.
- [18] B.K. Sharma, A. Adhvaryu, Z. Liu, S. Z. Erhan, Chemical modification of vegetable oils for lubricant applications. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, Vol. 83, No. 2, pp.129-136, 2006.
- افزودن آنتی اکسیدان فنولی BHT به روغن گیاهی خالص دانه کنگد نمی تواند قابلیت این روغن را جهت مصارف روان کاری کمینه در فرایندهای ماشین کاری مواد سخت شونده که معمولاً دماهای برش بالایی دارند، بهبود بخشد. در واقع افزودن این نوع آنتی اکسیدان به روغن گیاهی، سبب تشکیل لیپید هیدروپراکسید با سرعت بالا می شود. از آنجایی که لیپید هیدروپراکسید نیز در دماهای بالا دوباره تجزیه شده و به مواد دیگری از جمله آلدئیدها (مواد غیر روان کار) تجزیه می شود، از این رو افزودن این نوع آنتی اکسیدان به روغن گیاهی جهت مصارف ماشین کاری در دماهای بالا پیشنهاد نمی شود.

5- تقدیر و تشکر

از آزمایشگاه CAD/CAM دانشگاه تربیت مدرس و آزمایشگاه تحقیقاتی ساخت و تولید دانشگاه سابانجی ترکیه به دلیل تأمین تجهیزات آزمایشگاهی مورد نیاز تشکر و قدردانی می شود.

6- مراجع

- [1] M. H. Sadeghi, *Metal Cutting Principles*, Tehran: Abed, 2011. (in Persian)
- [2] S. Debnath, M.M. Reddy, and Q.S. Yi, Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review, *Journal of cleaner production*, Vol. 83, pp.33-47, 2014.
- [3] R.M. Mortier, M.F. Fox, S.T. Orszulik, *Chemistry and Technology of Lubricants*, pp 35-74, Dordrecht: Springer, 2010.
- [4] L. Honary, E. Richter, *Biobased Lubricants and Greases: Technology and Products*, 1st Edition, pp. 1-8, New York: Wiley, 2011.
- [5] M. Emami, M.H. Sadeghi, Study of the effect of lubricant type and tool (grinding wheel) material on the performance of minimum quantity lubrication in grinding of advanced ceramics, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 281-92, 2018. (in Persian)
- [6] M. Emami, M. H. Sadeghi, A. A. D. Sarhan, Investigating the effects of liquid atomization and delivery parameters of minimum quantity lubrication on the grinding process of Al₂O₃ engineering ceramics. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 15, No.3, pp. 374-388, 2013.
- [7] K. Qiu and Z.H. Long, Study on Nonlinear Cutting Forces Phenomenon of Difficult-to-Machining Materials, *Advanced Materials Research*, Vol. 658,