



مطالعه تأثیر نوع روان کار و جنس ابزار (چرخ سنگ) در عملکرد روان کاری کمینه در فرآیند سنگ زنی سرامیک های پیشرفته

محسن امامی^{1*}، محمد حسین صادقی²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص) بهبهان، بهبهان

2- استاده، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* بهبهان، صندوق پستی 63616-47189، dr.emami@bkatu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 04 آذر 1396

پذیرش: 30 دی 1396

ارائه در سایت: 12 بهمن 1396

کلید واژگان:

سنگ زنی

سرامیک های پیشرفته

روان کاری کمینه

چکیده

سرامیک های پیشرفته دسته ای از مواد هستند که به دلیل دارا بودن خواصی از جمله پایداری در دماهای بالا، استحکام زیاد، مقاومت به سایش زیاد و مقاومت بالا در برابر خوردگی در بسیاری از صنایع کاربرد پیدا کرده اند. فرآیند سنگ زنی از جمله مهمترین و متداول ترین روش های براده برداری و پرداخت سرامیک ها محسوب می شود. با این وجود قابلیت ضعیف ماشین کاری، عیوب سطحی زیاد در قطعه کار که به دلیل تردی سرامیک ها و نیروهای زیاد در سنگ زنی آن ها بوجود می آید، نرخ سایش زیاد چرخ سنگ الماس (ابزار)، هزینه های بالای ناشی از استفاده از سیال خنک کننده، زمان بر بودن فرآیند، راندمان پایین براده برداری (نرخ تولید پایین) از جمله مشکلات سنگ زنی سرامیک ها می باشد. تکنیک جدید روان کاری کمینه از جمله روش هایی است که اخیراً در فرآیندهای ماشین کاری با هدف بهبود عملکرد روان کاری سیال، کاهش مصرف سیال و ترویج استفاده از سیالات کم خطر و حافظ محیط زیست معرفی شده است. در این پژوهش به جهت بررسی اثر تکنیک روان کاری کمینه بر قابلیت سنگ زنی سرامیک ها از این تکنیک در فرآیند سنگ زنی سرامیک زیرکونیا استفاده شده است. همچنین از آنجایی که نوع روان کار و جنس چرخ سنگ می تواند بر عملکرد روان کاری کمینه در این فرآیند تأثیرگذار باشد، از این رو نوع روان کار و جنس چرخ سنگ الماس به عنوان متغیر در آزمایش ها استفاده شده است. نیروهای سنگ زنی، زبری سطح و بافت سطح سنگ زده شده در این فرآیند مورد ارزیابی قرار گرفته اند. نتایج نشان می دهد که در شرایط روان کاری کمینه، انتخاب مناسب نوع روان کار و جنس ابزار می تواند به طور قابل ملاحظه ای بر قابلیت سنگ زنی سرامیک زیرکونیا تأثیرگذار باشد.

Study of the effect of lubricant type and tool (grinding wheel) material on the performance of minimum quantity lubrication in grinding of advanced ceramics

Mohsen Emami^{1*}, Mohammad Hossein Sadeghi²

1- Department of Mechanical Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 25 November 2017

Accepted 20 January 2018

Available Online 01 February 2018

Keywords:

Grinding

Advanced ceramics

Minimum Quantity Lubrication (MQL)

ABSTRACT

Advanced ceramics are a group of materials that have been used in many industries due to their properties such as high temperature stability, high strength, high abrasion resistance and high corrosion resistance. Grinding process is one of the most important and most commonly used techniques for machining and polishing of ceramics. However, poor grindability, high surface defects in the workpiece due to the brittleness of ceramics and the high grinding forces, high wear rate of diamond wheel (tool), high costs due to the use of cutting fluid, low cutting productivity (low production rate), are of the problems of ceramics grinding. The minimum quantity lubrication (MQL) new technique is one of the methods recently introduced in machining processes aimed at improving lubrication performance of cutting fluids, reducing fluid consumption and promoting the use of low-hazard and environmentally friendly fluids. In this study, the minimum quantity lubrication technique was used in the grinding process of zirconia ceramic in order to investigate its effects on the grindability of ceramics. Also, since the type of lubricant and grinding wheel can affect the performance of minimum quantity lubrication in this process, the type of lubricant and diamond wheel were used as variables in the experiments. The grinding forces, surface roughness and surface texture of the grinded samples have been evaluated. The results show that under the minimum quantity lubrication conditions, applying the appropriate type of lubricant and grinding wheel can significantly affect the grindability of zirconia ceramic.

Please cite this article using:

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. 02, pp. 281-292, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

سرامیک‌های پیشرفته به دلیل داشتن استحکام بالا، مقاومت به سایش و خوردگی عالی و پایداری شیمیایی و حرارتی فوق العاده، پتانسیل بالایی جهت کاربرد در صنایع مختلف از جمله هوافضا، ایتیک، و مهندسی پزشکی دارند. سرامیک‌های پیشرفته به دو دسته عمده سرامیک‌های اکسیدی و سرامیک‌های غیراکسیدی تقسیم‌بندی می‌شوند. سرامیک‌های اکسید آلومینیوم و اکسیدزیرکونیوم که از سرامیک‌های اکسیدی هستند و سرامیک‌های سیلیکون‌نایتراید و سیلیکون‌کارباید که از سرامیک‌های غیراکسیدی هستند، از جمله متداول‌ترین و پرکاربردترین سرامیک‌های پیشرفته محسوب می‌شوند [1]. در فرآیند ساخت سرامیک‌های پیشرفته برای تولید قطعات مهندسی، به جهت رسیدن به تolerانس‌های ابعادی دقیق و صافی سطح مطلوب، نیاز به عملیات ماشین‌کاری می‌باشد. با این وجود به دلیل سختی بالا و چقرمگی شکست پایین سرامیک‌ها، عملیات ماشین‌کاری این مواد دارای محدودیت‌هایی است. تولید قطعات سرامیکی دقیق و بدون عیب با استفاده از تکنولوژی‌های ماشین‌کاری متداول، همراه با دشواری‌هایی است. نرخ تولید پایین، سایش بالای ابزار و هزینه‌های بالای ماشین‌کاری، عیوب سطحی که صافی سطح قطعه را کاهش داده و عیوب زیرسطحی که عملکرد قطعه را تحت تأثیر قرار می‌دهند، از جمله محدودیت‌های ماشین‌کاری سرامیک‌ها محسوب می‌شوند. در میان فرآیندهای مختلف ماشین‌کاری، تاکنون فرآیند سنگ‌زنی با استفاده از چرخ سنگ الماس، متداول‌ترین روش براده‌برداری از سرامیک‌های پیشرفته بوده است. انرژی مخصوص (انرژی واحد حجم براده‌برداری) در فرآیند سنگ‌زنی بیشتر از سایر فرآیندهای ماشین‌کاری است [2]. در حین سنگ‌زنی این انرژی تبدیل به حرارت می‌شود و دمای فصل مشترک ابزار-قطعه‌کار را افزایش می‌دهد. همچنین اصطکاک موجود در فصل مشترک چرخ سنگ-قطعه‌کار سبب سایش ابزار (کند شدن دانه‌های الماس چرخ‌سنگ)، افزایش نیروهای سنگ‌زنی، کاهش نرخ براده‌برداری و تولید حرارت بیشتر می‌گردد. از آن‌جا که مقاومت حرارتی سرامیک‌های پیشرفته بسیار بالاست، لذا افزایش حرارت در موضع سنگ‌زنی بیشتر بر چرخ سنگ تأثیرگذار است و روند سایش دانه‌های چرخ سنگ را تسریع می‌بخشد. از طرف دیگر در سنگ‌زنی سرامیک‌های پیشرفته، سختی بالای قطعه‌کار سبب سایش سریع‌تر ابزار (دانه‌های الماس چرخ سنگ) می‌گردد و از آن‌جا که چرخ سنگ الماس نسبت به سایر انواع چرخ سنگ قیمت بسیار بالاتری دارد، از این‌رو در این فرآیند موضوع سایش چرخ سنگ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. علاوه بر آن با سایش چرخ‌سنگ، قابلیت براده‌برداری دانه‌های سنگ کاهش یافته و لازم است مجدداً سطح سنگ را تیزکاری نمود. از این‌رو کند شدن چرخ سنگ نرخ تولید را کاهش داده و هزینه‌های ماشین‌کاری را افزایش می‌دهد. از دیگر جنبه‌های قابلیت ضعیف سنگ‌زنی سرامیک‌ها این است که در مقایسه با سایر مواد مهندسی نیروهای عمودی سطح تماس چرخ سنگ-قطعه‌کار در عملیات براده‌برداری از این مواد، بسیار بیشتر از سایر مواد است. بالا بودن نیروهای عمودی در سنگ‌زنی سرامیک‌ها به معنی زیاد بودن تنش موضعی هر دانه الماس بر سطح قطعه‌کار و افزایش احتمال ایجاد ترک‌های سطحی و عمقی در قطعه‌کار می‌باشد. کاهش عیوب سطحی و زیرسطحی حاصل از سنگ‌زنی در سرامیک‌ها یک ضرورت است، زیرا این عیوب تحت بارهای مکانیکی گسترش پیدا کرده و می‌توانند سبب شکست زود هنگام قطعه‌کار شوند. با توجه به موارد ذکر شده بالا در رابطه با قابلیت ضعیف سنگ‌زنی سرامیک‌های پیشرفته می‌توان به لزوم به‌کارگیری روش‌های مناسب جهت

بهبود ماشین‌کاری این مواد پی برد. کتاب‌ها و مقالات مهمی که به بحث تکنولوژی سنگ‌زنی سرامیک‌های پیشرفته پرداخته‌اند، همگی بر موضوع پایین بودن راندمان سنگ‌زنی سرامیک‌ها و لزوم به‌کارگیری تکنیک‌های مؤثرتر و استراتژی‌های مناسب‌تر در این فرآیند به جهت بهبود راندمان و کاهش هزینه‌های ساخت این مواد، تأکید داشته‌اند [2-9]. از این رو لزوم به‌کارگیری روش‌هایی جهت بهبود قابلیت سنگ‌زنی پاندولی سرامیک‌ها احساس می‌شود. به طوری که بتوان نیرو و انرژی سنگ‌زنی را کاهش و نرخ براده‌برداری را افزایش داده، صافی سطح بهتر و بافت سطحی با عیوب کمتری ایجاد کرد.

اجزای فرآیند سنگ‌زنی سرامیک‌ها که مستقیماً بر خواص فرآیند و خروجی‌های آن تأثیرگذارند عبارتند از: 1- ماشین ابزار 2- قطعه‌کار 3- ابزار (چرخ‌سنگ) 4- سیال خنک‌کننده (روان‌کار). یکی از اجزای سنگ‌زنی سرامیک‌ها که می‌تواند بر قابلیت این فرآیند تأثیرگذار باشد، بحث خنک‌کننده‌های (روان‌کارهای) مورد استفاده است. سیالات مورد استفاده در صنعت ماشین‌کاری بر دو نوع هستند: 1- سیالات پایه آب، 2- سیالات پایه روغن. سیالات پایه آب شامل روغن‌های حل‌شونده در آب (امولسیون‌ها) هستند که بیشتر نقش خنک‌کنندگی و کمتر نقش روان‌کاری دارند. اما سیالات پایه روغن بیشتر نقش روان‌کاری و کمتر نقش خنک‌کنندگی دارند. تحقیقاتی که اخیراً در زمینه سیالات ماشین‌کاری صورت می‌گیرد بیشتر در رابطه با کاهش یا حذف آثار مخرب زیست محیطی مصرف سیالات آلاینده و جایگزینی روش‌ها و سیالات سازگار با محیط زیست است [10]. روش روان‌کاری کمینه¹ یک روش سازگار با محیط زیست است که در آن از روغن و جریان هوای فشرده جهت روان‌کاری و خنک‌کاری ناحیه ماشین‌کاری استفاده می‌شود. بسته به کاربرد، روغن مورد استفاده می‌تواند غیرحل‌شونده در آب و یا حل‌شونده در آب باشد. 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 اتمیزه‌کننده 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 ماشین‌کاری (ناحیه هدف) هدایت می‌شوند. ذرات بسیار ریز روغن با برخورد به سطح ناحیه هدف در آنجا مجدداً تجمع شده و سطح موردنظر را آغشته به روغن می‌کنند. از آن‌جا که عملیات روان‌کاری در این روش با مقدار مصرف بسیار کمتری از سیال صورت می‌پذیرد، این روش را روان‌کاری کمینه می‌نامند. اخیراً روش روان‌کاری کمینه در بسیاری از فرآیندهای ماشین‌کاری اعم از تراش‌کاری، فرزکاری، سوراخ‌کاری و سنگ‌زنی مورد مطالعه قرار گرفته است [11,12]. توکلی و همکاران [12] در فرآیند سنگ‌زنی فولاد سخت شده 100Cr6 در شرایط روان‌کاری کمینه، تأثیر نوع روان‌کار و نوع سنگ سایشی را به طور تجربی بررسی کردند. در آن تحقیق از 7 نوع روغن غیرحل‌شونده با ترکیبات مختلف و ویسکوزیته‌های متفاوت و 3 نوع روغن حل‌شونده با ترکیبات پایه مختلف استفاده شده است. همچنین سه نوع سنگ سایشی اکسیدآلومینیوم متفاوت شامل 1- سنگ اکسیدآلومینیوم کروندوم با باند ویتریفاید 2- سنگ اکسیدآلومینیوم با باند ویتریفاید اس‌جی و 3- سنگ اکسیدآلومینیوم کروندوم با باند رزینی در آزمایش‌های آن پژوهش استفاده شده است. نتایج آن‌ها نشان داده است که در سنگ‌زنی فولاد سخت شده 100Cr6، استفاده از روغن‌های غیرحل‌شونده نسبت به سایر سیالات، خاصیت روان‌کاری مؤثرتری داشته است و سبب کاهش بیشتر نیروهای سنگ‌زنی می‌شود. سنگ اکسید آلومینیوم اس‌جی و سنگ اکسیدآلومینیوم با باند رزینی نیز به ترتیب بهترین

¹ Minimum Quantity Lubrication (MQL)

به وسیله هیدروژن و کاتالیزورهای مخصوصی، در شرایط دما و فشار بالا، جهت تبدیل ترکیبات سنگین تر روغن به محصولات سبک تری که مطلوب تر هستند. در هیدروکریکنگ مولکول های ناپایدار با زوده شدن اتم های سولفور، اکسیژن و نیتروژن پایدار شده و از طرف دیگر هیدروژنه کردن شدید می تواند ترکیبات آروماتیک را به ساختارهای اشباع شده نفتانیک یا پارافینی تبدیل کند. روغن های هیدروکرک شده به دلیل کاهش ناخالصی دارای مواد سمی کمی هستند، همچنین شفاف و بی رنگ هستند و در مقایسه با روغن های معدنی تجزیه پذیرترند (تا 80%). کاربرد روغن های هیدروکرک شده در صنایع مختلف و همچنین در فرآیندهای ماشین کاری به سرعت در حال افزایش است [15]. روغن های پایه مصنوعی توسط سنتز شیمیایی تولید می شوند و دارای خواص فیزیکی، شیمیایی و تجزیه پذیری عالی می باشند. پلی آلفا الفین ها، استرها و سیلیکون ها انواع متداول روغن های پایه مصنوعی هستند [16]. پلی آلفا الفین ها متداول ترین نوع سیالات پایه مصنوعی هستند که در روغن ها استفاده می شوند. روغن های پایه پلی آلفا الفین دارای پایداری اکسیداسیون عالی، پایداری حرارتی بالا، شاخص سیالیت بسیار بالا و تجزیه پذیری بالا (تا 80%) هستند و غیرسمی می باشند. روغن های پایه مصنوعی به دلیل این که به روش سنتز ساخته می شوند دارای ملکول های هم شکل، هم اندازه و کاملاً اشباع شده ای هستند. دو محدودیت عمده روغن های پایه پلی آلفا الفین، قیمت بالا و قابلیت ضعیف آن ها در انحلال افزودنی ها است. روغن های پایه مصنوعی نیز اخیراً در فرآیندهای ماشین کاری ورود پیدا کرده اند [17]. روغن های پایه گیاهی منابع مناسبی از روان کارهای تجدیدپذیر و تجزیه پذیر برای کاربردهای صنعتی هستند. روغن های پایه گیاهی دارای خاصیت روان کنندگی بالا، نقطه اشتعال بالا و پایداری برشی بالا هستند. روغن های پایه گیاهی از روغن های معدنی گران تر و از روغن های مصنوعی ارزان تر هستند. خواص فیزیکی-شیمیایی روغن های پایه گیاهی به اسیدهای چرب اشباع شده و غیراشباع شده موجود در آن ها بستگی دارد. هر چه میزان اسیدهای چرب غیراشباع در روغن های پایه گیاهی کمتر باشد، پایداری اکسیداسیون آن ها بیشتر خواهد بود. در سال های اخیر به دلایل زیست محیطی، روغن های گیاهی جهت کاربردهای صنعتی و بویژه در فرآیندهای ماشین کاری بسیار مورد توجه قرار گرفته اند [18]. با توجه به توضیحات بالا، در این پژوهش روان کارهای بررسی شده براساس نوع روغن پایه انتخاب شده اند. این روغن ها عبارتند از: 1- روغن معدنی، 2- روغن هیدروکرک شده، 3- روغن مصنوعی پلی آلفا الفین و 4- روغن گیاهی دانه پالم. چرخ سنگ های استفاده شده نیز براساس جنس چسب مورد استفاده در ساخت آن ها انتخاب شده اند و عبارتند از: 1- چرخ سنگ الماس با زمینه رزینی، 2- چرخ سنگ الماس با زمینه فلزی و 3- چرخ سنگ الماس با زمینه ویتریفاید.

2- مواد و آزمایش های تجربی

در "شکل 1" ستاپ آزمایشگاهی استفاده شده برای انجام آزمایش های تجربی این پژوهش نشان داده شده است. اجزای این ستاپ آزمایشگاهی عبارتند از: ماشین سنگ زنی، چرخ سنگ، قطعه کار، دستگاه روان کاری کمینه با سیال روان کار، نازل پاشش سیال، دینامومتر، آمپلی فایر، سیستم پردازش داده و ابزار تراش چرخ سنگ. در پژوهش حاضر از ماشین سنگ زنی تخت افقی دقیق ناگایچی³ مدل NI 50AV2 به منظور انجام آزمایش ها استفاده شده است.

همچنین از سرامیک زیرکونیا به عنوان ماده قطعه کار برای انجام

و بدترین عملکرد را در سنگ زنی با روان کاری کمینه داشته اند. علاوه بر آن در این فرآیند سنگ اکسید آلومینیوم اس جی نسبت به سایر سنگ ها میزان بارگیری کمتری داشته و از این رو صافی سطح بهتر و آسیب های حرارتی کمتری به استفاده از آن حاصل شده است. کومار و همکاران [13] به منظور بهبود فرآیند سنگ زنی سرامیک سیلیکون نایتراید از روش روان کاری کمینه به همراه نانوسیال استفاده کردند. در آن پژوهش، ابزار چرخ سنگ الماس با چسب رزینی جهت براده برداری از سرامیک به کار رفته است. همچنین نانوسیال های استفاده شده در آزمایش ها با مخلوط کردن سه نوع نانوذره (گرافیت، تنگستن دی سولفاید¹ و مولیبدن دی سولفاید²) در آب دیونیزه شده تهیه شده اند. نتایج آن پژوهش نشان داده است که نانوسیال ها به طور قابل ملاحظه ای عملکرد فرآیند را از نظر نیروهای سنگ زنی، صافی سطح و عیوب زیرسطحی بهبود می بخشند.

پیشینه پژوهش نشان می دهد که روش روان کاری کمینه پتانسیل بسیار خوبی جهت به کارگیری در فرآیند سنگ زنی سرامیک های پیشرفته دارد. با این وجود لازم است مطالعات بیشتری در رابطه با متغیرهای این فرآیند که شامل: متغیرهای برش (سرعت برش، سرعت پیشروی، عمق برش)، نوع چرخ سنگ، جنس قطعه کار و متغیرهای روان کاری کمینه می باشد، صورت پذیرد تا ویژگی ها و نقاط ضعف و قوت فرآیند بهتر مشخص شود. در همین راستا در پژوهش حاضر، روش روان کاری کمینه در فرآیند سنگ زنی سرامیک زیرکونیا مورد استفاده قرار گرفته و در آن به بررسی تأثیر نوع روان کار و جنس ابزار (چرخ سنگ) بر نیروهای سنگ زنی، زبری سطح و بافت سطح سنگ زنی شده پرداخته شده است. نوع روغن روان کار از جمله متغیرهای مهم روان کاری کمینه می باشد و در موفقیت این روش بسیار تأثیرگذار است. از این رو ابتدا به طور مختصر به معرفی روغن های برش پرداخته می شود و سپس معیار لحاظ شده جهت انتخاب روغن های مختلف در این پژوهش بیان می شود.

روغن های برش معمولاً از دو جزء روغن پایه و افزودنی ها تشکیل می شوند. روغن پایه جزء اصلی یک روغن برش محسوب می شود و معمولاً بیش از 95% از حجم آن را تشکیل می دهد. روغن های پایه معدنی از مشتقات نفت خام هستند و از جمله متداول ترین روغن های پایه محسوب می شوند. این روغن های پایه از هیدروکربن های با ساختار پارافینی، نفتانیک یا آروماتیک تشکیل شده اند. مزیت اصلی روغن های پایه معدنی هزینه پایین آن ها است. با این وجود از نظر زیست محیطی روغن های پایه معدنی چندان مطلوب نیستند زیرا سطح تجزیه پذیری پایینی دارند (40%-10%). همچنین بسیاری از افزودنی هایی که به روغن های پایه معدنی اضافه می گردند یا سمی بوده و یا حداقل برای محیط زیست مضر هستند. این روغن ها مقاومت اکسیداسیون متوسطی دارند. زیرا بسیاری از ترکیبات آن ها که در مقابل حرارت ناپایدار هستند در دماهای بالا تبخیر شده و اکسید می شوند. رویکرد جدید علم به سمت توسعه روغن های پایه با کارایی بالا و دوست دار محیط زیست است که از جمله آن ها می توان به روغن های پایه معدنی اصلاح شیمیایی شده، روغن های پایه مصنوعی و روغن های پایه زیستی اشاره نمود [14]. از جمله روغن های پایه معدنی اصلاح شیمیایی شده، می توان به روغن های هیدروکرک شده اشاره نمود. روغن های هیدروکرک شده نسبت به روغن های پایه معدنی متداول دارای سطح خلوص بالاتر، درصد اشباع بالاتر (بیش از 90%)، محتوای آروماتیک کمتر، شاخص سیالیت بیشتر و پایداری حرارتی بالاتر هستند. هیدروکریکنگ عبارتست از هیدروژنه کردن روغن

¹ WS₂

² MoS₂

³ Naga Ichi

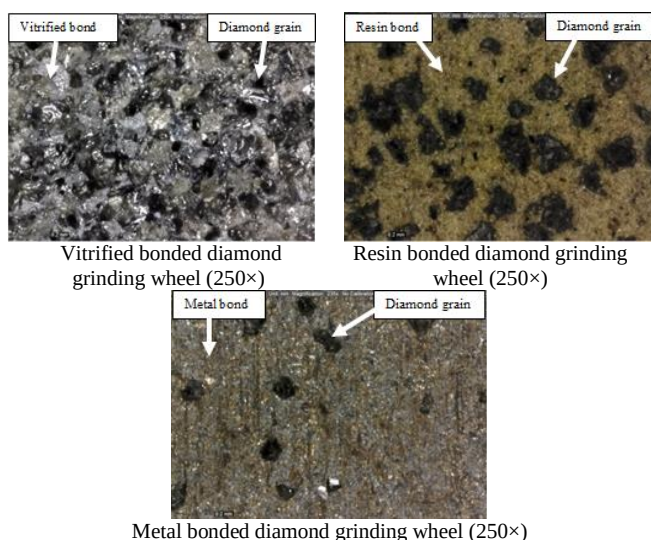


Fig. 2 The images of the surface of resin, vitrified and metal bonded diamond grinding wheels applied in the experiments

شکل 2 تصاویر سطح چرخ سنگ های الماس با زمینه رزینی، ویتریفاید و فلزی که در آزمایش ها مورد استفاده قرار گرفته اند

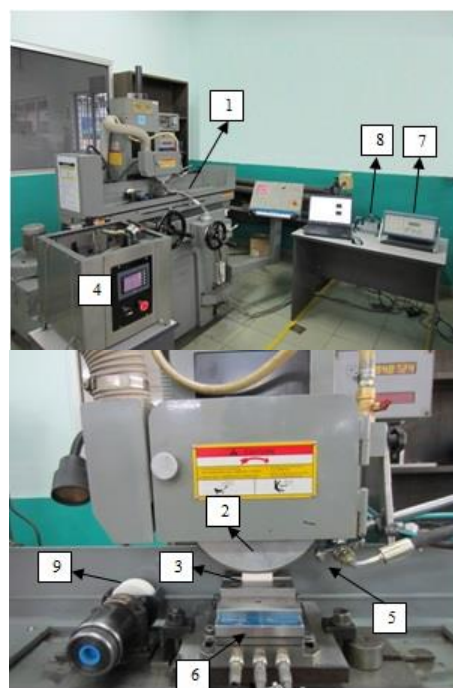


Fig. 1 Experimental setup (1-grinding machine, 2- grinding wheel, 3- workpiece, 4-MQL system, 5-Nozzle, 6-Dynamometer, 7-Amplifier, 8-DAQ system, 9- Truing device)

شکل 1 ستاپ آزمایشگاهی (1- ماشین سنگ زنی، 2- چرخ سنگ، 3- قطعه کار، 4- دستگاه روان کاری کمینه، 5- نازل پاشش سیال، 6- دینامومتر، 7- آمپلی فایر، 8- سیستم پردازش داده، 9- ابزار تراش چرخ سنگ)

همچنین از چهار نوع روان کار با روغن پایه متفاوت جهت انجام آزمایش های روان کاری کمینه استفاده شد که عبارتند از: 1- روغن مصنوعی پلی آلفا الفین، 2- روغن هیدروکرک شده 3- روغن معدنی و 4- روغن گیاهی. مشخصات شرکت سازنده و خواص فیزیکی روان کارهای مورد استفاده در جدول 2 نشان داده شده است. علاوه بر آن به منظور شناسایی عناصر موجود در روغن های معدنی، هیدروکرک شده و مصنوعی، آنالیز عنصری (ایکس آر- اف) انجام شد. نتایج آنالیز عنصری در جدول 3 نشان داده شده است. همچنین روغن گیاهی فراهم شده، از روغن خالص دانه پالم¹ و بدون اضافه نمودن افزودنی تهیه شده است. ترکیبات (ساختار شیمیایی) روغن های گیاهی از اسیدهای چرب می باشد. در جدول 4 انواع اسیدهای چرب موجود در روغن گیاهی دانه پالم و درصد وزنی آن ها نشان داده شده است. آنالیز شیمیایی تعیین نوع و درصد اسیدهای چرب موجود در روغن گیاهی دانه پالم در آزمایشگاه تحقیقاتی یونیک² دانشگاه کبکسان³ مآلزی انجام شده است. قابل ذکر است که روغن گیاهی دانه پالم با حدود 80% اسیدهای چرب اشباع شده از جمله روغن های گیاهی با درصد بالای اسیدهای چرب اشباع شده می باشد [19]. اسیدهای چرب اشباع شده پایداری حرارتی و پایداری اکسیداسیون بیشتری دارند و جهت کاربردهای روان کاری در دمای بالا مناسب تر هستند [20]. سیستم روان کاری کمینه مورد استفاده در این آزمایش ها (شکل 3) شامل یک پمپ روغن با نرخ جریان قابل تنظیم، واحد کنترل جریان گاز و یک نازل پاشش سیال است که از نوع اتمیزه کننده با کمک گاز جهت تولید اسپری روان کار می باشد. در این دستگاه روغن و جریان هوا با نرخ جریان کنترل شده وارد نازل اتمیزه کننده می شوند.

و جریان هوا در نوک نازل سبب شکسته شدن جریان روغن گشته و روغن را به قطرات بسیار ریز میکرونی تبدیل می کند. شماتیک نازل سیستم روان کاری کمینه در "شکل 4" نشان داده شده است. قطرات بسیار ریز روغن توسط جریان هوای حامل به ناحیه هدف روان کاری هدایت می شوند. در این آزمایش ها متغیرهای پاشش سیال براساس نتایج پژوهش [24] انتخاب شدند.

آزمایش های تجربی سنگ زنی استفاده شده است. ماده اولیه نمونه ها با اضافه نمودن 3 درصد مولی بیتریا به پودر زیرکونیای خالص تهیه و سپس با استفاده از روش پرس خشک و پخت به مدت 2 ساعت در کوره با اتمسفر هوا و در دمای 1500°C (سینترکردن) ساخته شدند. در جدول 1 خواص فیزیکی، خواص مکانیکی و ابعاد نمونه های تهیه شده نشان داده شده است.

با توجه به این که جنس ابزار (چرخ سنگ) از جمله متغیرهای مورد مطالعه در این پژوهش است، از این رو سه نوع چرخ سنگ الماس با دانه بندی یکسان D91 (اندازه دانه 91 میکرون) و زمینه (چسب سنگ) متفاوت شامل: 1- زمینه رزینی 2- زمینه ویتریفاید و 3- زمینه فلزی، برای براده برداری از سطح نمونه های سرامیکی تهیه شد. تصاویر سطح چرخ سنگ های مذکور در "شکل 2" نشان داده شده است. پس از نصب، جهت اصلاح و مدور کردن اولیه چرخ سنگ از دستگاه تراش ترمزدار چرخ سنگ استفاده شد. علاوه بر آن در شروع هر تست سنگ زنی، چرخ سنگ الماس توسط بلوک آلومینا با گرید 38A150-18VBE (ساخت شرکت نورتون) تیزکاری شد.

جدول 1 خواص فیزیکی، خواص مکانیکی و ابعاد نمونه های زیرکونیا

Table 1 Physical properties, mechanical properties and dimensions of zirconia samples

خواص ماده سرامیک زیرکونیا	مقدار
ابعاد (mm)	24×10×3.6
چگالی ρ (kgm ⁻³)	5.99
مدول الاستیسیته E (GPa)	205
ضریب پواسون ν	0.25
سختی H (GPa)	13.2
چقرمگی شکست K_{IC} (MPam ^{0.5})	5.1

¹ Palm kernel oil

² UNIQEQ

³ UKM

جدول 2 مشخصات و خواص فیزیکی روغن های مورد استفاده در فرآیند سنگ زنی با روان کاری کمینه

Table 2 Specifications and physical properties of the applied oils in MQL grinding

نوع روغن روان کار	شرکت سازنده	گرید محصول	چگالی در دمای 15°C (gcm ⁻³)	ویسکوزیته سینماتیک (در 40°C)	نقطه اشتعال (°C)	نقطه ریزش (°C)
روغن معدنی پارافینی	گلف وسترن اویل ¹	سای-40 [21]	0.901	140	220	-18
روغن هیدروکرک شده	اویلهد ³	تول گراند تی 600 ⁴ [22]	0.84	7.1	150<	-15
روغن مصنوعی پلی آلفا الفین	اویلهد	سینتوگراند تی تی کی [23] ⁵	0.81	5.5	160	-50>
روغن گیاهی دانه پالم ^(*)	-	-	0.89	28.89	205.4	21

(*) آنالیز خواص فیزیکی روغن گیاهی دانه پالم در آزمایشگاه مورد روغن پالم مالزی⁶ انجام شده است.

جدول 3 نتایج آنالیز عنصری (ایکس آر اف) روغن های معدنی، هیدروکرک شده و مصنوعی

Table 3 XRF elemental analysis of the mineral, hydrocracked and synthetic oils

عناصر	روغن معدنی	روغن هیدروکرک شده	روغن مصنوعی	عناصر	روغن معدنی	روغن هیدروکرک شده	روغن مصنوعی
درصد وزنی %	درصد وزنی %	درصد وزنی %	درصد وزنی %	عناصر	روغن معدنی	روغن هیدروکرک شده	روغن مصنوعی
هیدروژن	14.4100	14.7700	14.7700	مس	0.0006	0.0006	0.0006
کربن	82.5600	84.6200	84.6200	روی	0.0538	-	-
اکسیژن	1.6500	0.2983	0.2988	نیوبیم	-	-	0.0008
منیزیم	0.0320	-	-	مولیبدن	0.0031	0.0037	0.0037
سیلیسیم	0.0030	0.0032	0.0036	روتینیم	0.0110	0.0120	0.0100
فسفر	0.0780	0.0920	0.0900	پالادیم	0.0047	0.0046	0.0048
گوگرد	0.9700	0.1110	0.1120	آنتیموان	0.0140	-	0.0130
کلر	0.0120	-	-	ید	0.0510	0.0490	0.0440
کلسیم	0.1330	0.0092	0.0095	ایتربیم	0.0019	0.0021	0.0023
آهن	0.0019	0.0019	0.0014	هافنیم	-	-	0.0027

جدول 4 ترکیبات روغن گیاهی دانه پالم مورد استفاده در تست های سنگ زنی با

روان کاری کمینه

Table 4 Components of the palm kernel vegetable oil applied in the MQL grinding tests

نوع اسید چرب	روغن گیاهی دانه پالم
درصد وزنی %	
اسید کاپریلیک (C8:0) - اشباع	3.16
اسید کاپریک (C10:0) - اشباع	3.25
اسید لوریک (C12:0) - اشباع	48.06
اسید میریستیک (C14:0) - اشباع	16.17
اسید پالمیتیک (C16:0) - اشباع	8.57
اسید استیریک (C18:0) - اشباع	2.58
اسید اولئیک (C18:1) - غیر اشباع	15.3
اسید لیولئیک (C18:2) - غیر اشباع	2.61
سایر اسیدهای چرب	0.3

کیفیت سطح قطعه کار می شود. در این جا نیز از این مقادیر برای ستاپ آزمایشگاهی استفاده شد.

نیروهای مماسی و عمودی سنگ زنی به وسیله دینامومتر پیزوالکتریک سه محوره کیستلر مدل A9257 و شارژ آمپلی فایر کیستلر مدل 5019 اندازه گیری شد. همچنین برای ثبت داده ها از یک سیستم اکتساب داده

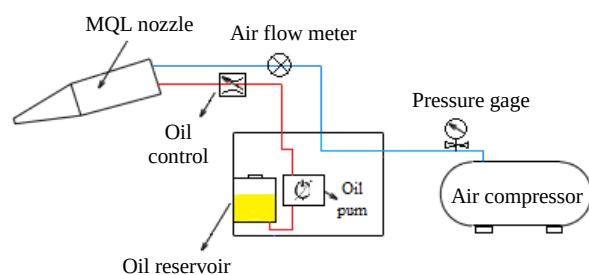


Fig. 3 Schematic of the MQL system

شکل 3 شماتیک سیستم روان کاری کمینه

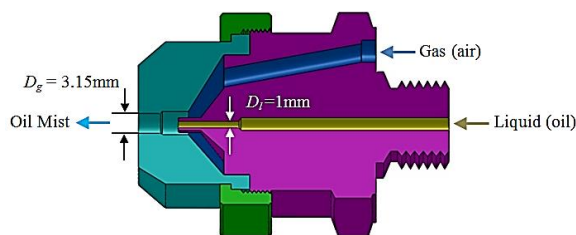


Fig. 4 Schematic of the nozzle of the MQL system

شکل 4 شماتیک نازل سیستم روان کاری کمینه

نتایج آن تحقیق نشان داده است که در شرایط آزمایشگاهی بررسی شده، متغیرهای بهینه پاشش سیال در روان کاری کمینه عبارتند از: نرخ جریان روغن روان کار $Q_l = 150 \text{ mlh}^{-1}$ ، نرخ جریان گاز $Q_g = 30 \text{ lmin}^{-1}$ ، زاویه نازل $\alpha = 15^\circ$ و فاصله نازل تا محل هدف پاشش $L = 30 \text{ mm}$. در "شکل 5" شماتیک نازل، چرخ سنگ و نقطه هدف پاشش روان کار نشان داده شده است. نقطه هدف روان کاری در ارتفاع $H = 15 \text{ mm}$ از سطح قطعه کار و فاصله $L = 30 \text{ mm}$ از نوک نازل قرار دارد و روی چرخ سنگ واقع شده است. قابل توجه است که انتخاب بهینه متغیرهای روان کاری کمینه، موجب ارتقای عملکرد این روش در کاهش نیروهای سنگ زنی، کاهش زبری سطح و بهبود

جدول 5 تجهیزات و متغیرهای آزمایش

Table 5 Experimental setup and parameters

نوع تجهیزات و متغیرهای آزمایش	توضیحات
ماده قطعه کار	نمونه های سرامیک زیرکونیا (ZrO ₂ + 3 mol% Y-TZP) با ابعاد 24×10×3.6 mm
ماشین سنگ زنی	ماشین سنگ زنی تخت ناگایچی مدل NI-450AV2
نوع چرخ سنگ	1- سنگ الماس با زمینه رزینی گرید 1A1 200×10×32 D91N C75 B 2- سنگ الماس با زمینه فلزی گرید 1A1 200×10×32 D91 N C75 M 3- سنگ الماس با زمینه ویتریفاید گرید 1A1 200×10×32 D91N C75 V
مد سنگ زنی	سنگ زنی مخالف
سرعت چرخ سنگ (v_s)	30 ms ⁻¹
سرعت قطعه کار (v_w)	20 و 15 m/min
عمق براده برداری (a_p)	25 و 15 μ m
نوع خنک کاری/روان کاری	روان کاری کمینه
نوع روغن در روان کاری کمینه	1- روغن معدنی، 2- روغن هیدروکرک شده، 3- روغن مصنوعی پلی آلفا الفین، 4- روغن گیاهی
نرخ جریان روغن (Q_l)	150 ml/h
نرخ جریان گاز اتمیزه کننده (Q_g)	30 l/min
فشار گاز اتمیزه کننده	30 l/min
فاصله نازل از نقطه هدف (L)	30 mm
زاویه نازل (α)	15°
ابزار تراش چرخ سنگ	ابزار تراش ترمزدار نورتون مدل 4597 همراه با چرخ سنگ گرید: 38A60-MVBE
ابزار تیزکاری چرخ سنگ	بلوک اکسید آلومینوم نورتون - گرید: 38A150-I8VBE

با توجه به رابطه (1) توان مصرفی سنگ زنی (P) از حاصل ضرب نیروی مماسی سنگ زنی (F_t) و سرعت برش (v_s) به دست می آید [25].

$$P = F_t v_s \quad (1)$$

نیروی عمودی سنگ زنی (F_n) در ناحیه تماس سنگ-قطعه کار و عمود بر سطح تماس وارد می شود. مقدار نیروی عمودی بسیار بزرگتر از نیروی مماسی سنگ زنی است. بنابراین نیروی عمودی می تواند باعث تغییر شکل الاستیک قطعه کار، ابزار (چرخ سنگ) و سازه ماشین در جهت عمود بر سطح تماس شود. نیروی عمودی سنگ زنی (F_n) بستگی زیادی به کندی یا تیزی دانه های سنگ و مقدار سختی سطح قطعه کار دارد. نیروی محوری سنگ زنی (F_a) زمانی ایجاد می شود که ابزار ساینده حرکت نسبی جانبی نیز داشته باشد. اما با توجه به این که در آزمایش های این پژوهش حرکت جانبی بین چرخ سنگ و قطعه کار وجود ندارد، از این رو تنها دو مؤلفه نیروی مماسی (F_t) و نیروی عمودی (F_n) در عملیات سنگ زنی نمونه ها اندازه گیری می شود. در نمودارهای "شکل 7 و 8" نتایج اندازه گیری نیروهای مماسی و عمودی سنگ زنی به ترتیب نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها می توان در شرایط روان کاری کمینه، تأثیر نوع روغن و جنس چرخ سنگ را بر نیروهای فرآیند سنگ زنی سرامیک زیرکونیا نشان داد. در نمودار نیروی مماسی سنگ زنی، مشاهده می شود که سنگ الماس با زمینه رزینی، زمینه ویتریفاید و زمینه فلزی به ترتیب بیشترین نیروهای مماسی سنگ زنی را ایجاد می کنند.

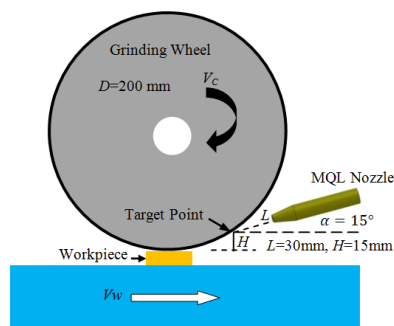


Fig. 5 Schematic of the MQL nozzle, grinding wheel and lubrication target point

شکل 5 شماتیک نازل، چرخ سنگ و نقطه هدف روان کاری

مناسب با مدل NI cDAQ-9174 استفاده شد. زبری سطح نمونه های سنگ زنی توسط دستگاه زبری سنج پرتابل میتوتویو مدل SJ-201 اندازه گیری شد. زبری سطح نمونه ها در دو حالت: 1- در راستای سنگ زنی و 2- عمود بر راستای سنگ زنی اندازه گیری شدند. در کلیه تست های زبری سنجی، طول نمونه برداری روی دستگاه زبری سنج به میزان 1.75 mm تنظیم شد. در این آزمایش ها دو مقدار زبری متوسط (R_a) و زبری متوسط ده نقطه (R_z) اندازه گیری شد. همچنین برای هر نمونه، زبری سنجی در پنج نقطه متفاوت از سطح قطعه کار انجام شد و سپس مقادیر متوسط زبری محاسبه گردید. قابل ذکر است که هر آزمایش سنگ زنی، پنج مرتبه با شرایط یکسان تکرار شد و مقدار متوسط نتایج آن ها به عنوان نتیجه نهایی ثبت گشت. در آزمایش های این پژوهش متغیرهای براده برداری شامل عمق براده برداری، سرعت پیشروی و سرعت محیطی چرخ سنگ (سرعت برش)، و همچنین متغیرهای پاشش سیال، ثابت نگه داشته شدند و تنها نوع روغن در روان کاری کمینه و جنس چرخ سنگ تغییر داده شد. مقادیر متغیرهای براده برداری، متغیرهای روان کاری کمینه، و مشخصات کلیه تجهیزات مورد استفاده در آزمایش ها در جدول 5 به طور خلاصه نشان داده شده است.

3- نتایج

3-1- نیروهای سنگ زنی

به طور کلی در فرآیند سنگ زنی تخت سه مؤلفه نیرو وجود دارد. این مؤلفه های نیرو عبارتند از: 1- نیروی مماسی (F_t)، 2- نیروی عمودی (F_n) و 3- نیروی محوری (F_a). در "شکل 6" مؤلفه های نیروهای سنگ زنی نشان داده شده است. نیروی مماسی در سطح تماس سنگ-قطعه کار و در راستای سرعت محیطی سنگ وجود می آید و حاصل نیروی برش دانه ها و نیروی اصطکاک بین دانه ها و قطعه کار است و نقش اصلی را در مقدار توان مصرفی سنگ زنی (P) دارد.

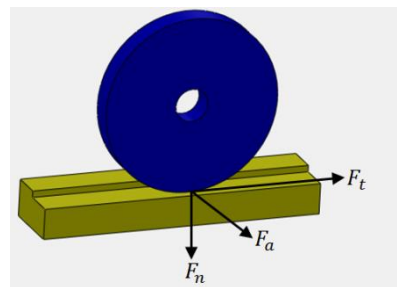


Fig. 6 Tangential, normal and axial forces in grinding process

شکل 6 نیروهای مماسی، عمودی و محوری در فرآیند سنگ زنی

ساختار زمینه سنگ ویتریفاید از جنس شیشه است و در حین تماس با قطعه و براده برداری به تدریج شکسته می شود. در این نوع سنگ معمولاً به دانه های کندتر الماس که سایش بیشتری پیدا کرده اند، نیروی بیشتری وارد شده و در نتیجه شکست زمینه در این نقاط بیشتر اتفاق می افتد. با شکست مداوم زمینه سنگ ویتریفاید، پیوسته دانه های جدید و تیز الماس ظاهر می شود. این خاصیت را خاصیت خودتیزکنندگی چرخ سنگ ویتریفاید می نامند. به دلیل خاصیت خودتیزکنندگی، این چرخ سنگ دارای کمترین نیروی عمودی سنگ زنی می باشد. در حالی که در سنگ های الماس با زمینه رزینی و فلزی خاصیت خودتیزکنی بسیار ضعیف است و دانه ها پس از مدتی براده برداری، کند شده و نیروهای عمودی را افزایش می دهند. همچنین "شکل های 5 و 6" تأثیر نوع روغن بر نیروهای سنگ زنی را نیز نشان می دهند. مشاهده می شود که در شرایط روان کاری کمینه، به ترتیب روغن مصنوعی پلی آلفا الفین، روغن هیدروکرک شده، روغن گیاهی و روغن معدنی همراه با کمترین نیروهای سنگ زنی می باشند. تأثیر نوع روغن بر نیروهای سنگ زنی را می توان با خواص روان کاری روغن های مورد استفاده در آزمایش ها توضیح داد. در فرآیند سنگ زنی سرامیک ها، دانه های الماس توزیع شده بر سطح چرخ سنگ با سرعت زیاد (برابر با سرعت محیطی چرخ سنگ) از سطح قطعه کار براده برداری می کنند. در زمان براده برداری درگیر شدن چرخ سنگ با قطعه کار سبب افزایش دما و فشار در ناحیه تماس سنگ-قطعه کار می شود. از این رو، پایداری اکسیداسیون روغن پایه در دمای بالا (با پایداری حرارتی آن) در حفظ عملکرد روان کاری یا روان کنندگی روغن بسیار مهم است. به همین منظور از روغن های مورد استفاده در آزمایش ها تست پایداری اکسیداسیون به عمل آمد. نتایج تست پایداری اکسیداسیون روغن ها در "شکل 7" نشان داده شده است. این تست براساس استاندارد ASTM D2272 انجام می شود و به تست آر پی وی آ تی¹ یا تست آر بی آ تی² معروف است. در این تست نمونه روغن مورد آزمایش همراه با مقداری آب و یک کاتالیزور کوپل مس در یک ظرف شیشه ای قرار داده شده و سپس ظرف شیشه ای در یک مخزن تحت فشار گذاشته می شود. سپس مخزن تا 90 psi به وسیله اکسیژن خالص پر شده و تحت فشار گاز اکسیژن قرار می گیرد. پس از آن مخزن استوانه ای تحت فشار در دستگاه تست آر بی آ تی در محل استقرار خود قرار داده می شود. در آنجا در یک محیط با دمای ثابت 150 °C با سرعت 100 rpm حول محور خود چرخانده می شود. هنگامی که دمای مخزن و محتویات آن افزایش می یابد، فشار مخزن نیز افزایش پیدا می کند. در این حالت فشار به یک مقدار ماکزیمم می رسد (P_{max}) و سپس به دلیل اکسیداسیون روغن و مصرف اکسیژن، رفته رفته فشار مخزن کاهش می یابد. نقطه ای که در آن نسبت به فشار ماکزیمم، افت فشار 25 psi (1.75 bar) به وجود آمده است به عنوان نقطه (P_{set}) ثبت می شود. براساس این استاندارد، مدت زمان لازم برای رسیدن از نقطه P_{max} به P_{set} ، زمان آر بی آ تی نامیده می شود. پایداری روغن در برابر اکسیداسیون به پایه روغن و افزودنی های آنتی اکسیدان روغن بستگی دارد. ترکیبات آلی حاوی فسفر، گوگرد و نیتروژن با دور کردن اکسیژن، مانع از تسریع در روند اکسید شدن روغن می شوند. جواب تست پایداری اکسیداسیون روغن ها به دقیقه گزارش می شود و عدد آر بی آ تی پایین نشان از کم بودن میزان آنتی اکسیدان موجود در روغن می باشد. با توجه به "شکل 9" پایداری اکسیداسیون روغن مصنوعی پلی آلفا الفین، روغن هیدروکرک شده، روغن معدنی و روغن گیاهی به ترتیب 1005، 1023، 1005،

اما در نمودار نیروی عمودی، چرخ سنگ با زمینه فلزی بیشترین نیروی عمودی سنگ زنی را ایجاد می کند و سنگ های رزینی و ویتریفاید به ترتیب در رده های بعدی قرار می گیرند. نیروی مماسی سنگ زنی ارتباط مستقیمی با اصطکاک سطح تماس سنگ-قطعه کار دارد. هر چه اصطکاک سطح تماس سنگ-قطعه کار کمتر باشد، نیروی مماسی نیز کمتر خواهد بود. اصطکاک سنگ فلزی-قطعه کار (سرامیک) کمتر از اصطکاک سنگ ویتریفاید-سرامیک است و اصطکاک سنگ ویتریفاید-سرامیک نیز کمتر از اصطکاک سنگ رزین-سرامیک می باشد. اما بیشترین مقدار نیروی عمودی مربوط به چرخ سنگ الماس با زمینه فلزی است.

در واقع این نوع سنگ زمانی که در تماس با قطعه کار سرامیکی قرار می گیرد به دلیل فلزی بودن زمینه آن و داشتن سفتی بالا، جابه جایی الاستیک عمودی چندانی نداشته و از این رو نیروهای عمودی بیشتری توسط آن ایجاد می شود. در حالی که سنگ رزینی نسبت به سنگ فلزی، سفتی کمتری دارد و از این رو نیروهای عمودی کمتری در تماس با آن ایجاد می شود. همچنین مشاهده می شود که کمترین نیروهای عمودی سنگ زنی مربوط به چرخ سنگ ویتریفاید می باشد. دلیل این موضوع این است که

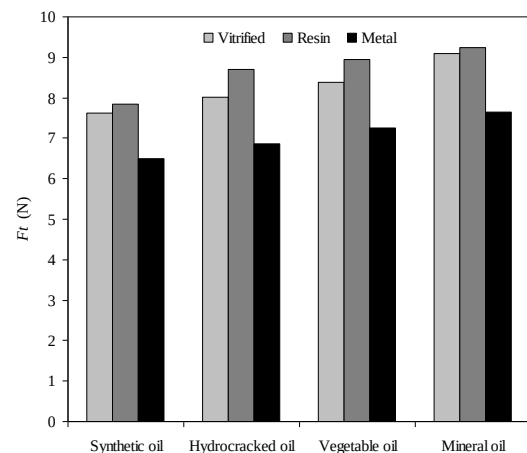


Fig. 7 Effect of oil type and grinding wheel material on tangential forces in MQL grinding process

شکل 7 تأثیر نوع روغن و جنس چرخ سنگ بر نیروهای مماسی در فرآیند سنگ زنی با روان کاری کمینه

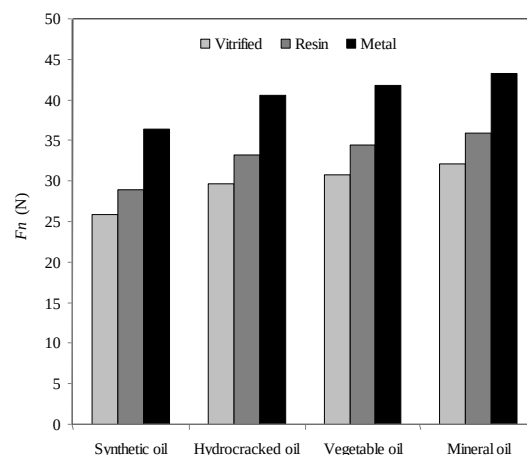


Fig. 8 Effect of oil type and grinding wheel material on normal forces in MQL grinding process

شکل 8 تأثیر نوع روغن و جنس چرخ سنگ بر نیروهای عمودی در فرآیند سنگ زنی با روان کاری کمینه

¹ Rotary Pressure Vessel Oxidation Test (RPVOT)

² Rotating Bomb Oxidation Test (RBOT)

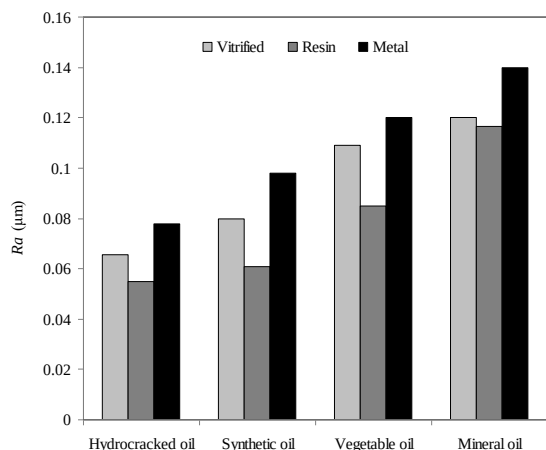


Fig. 10 Effect of oil type and grinding wheel material on surface roughness values R_a along the grinding direction

شکل 10 تأثیر نوع روغن و جنس چرخ سنگ بر مقادیر زبری سطح R_a در راستای سنگ زنی

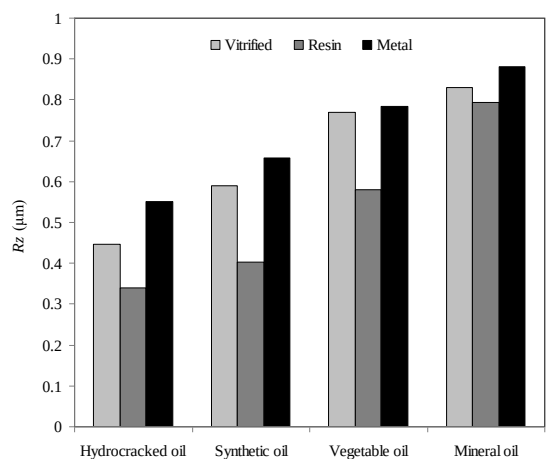


Fig. 11 Effect of oil type and grinding wheel material on surface roughness values R_z along the grinding direction

شکل 11 تأثیر نوع روغن و جنس چرخ سنگ بر مقادیر زبری سطح R_z در راستای سنگ زنی

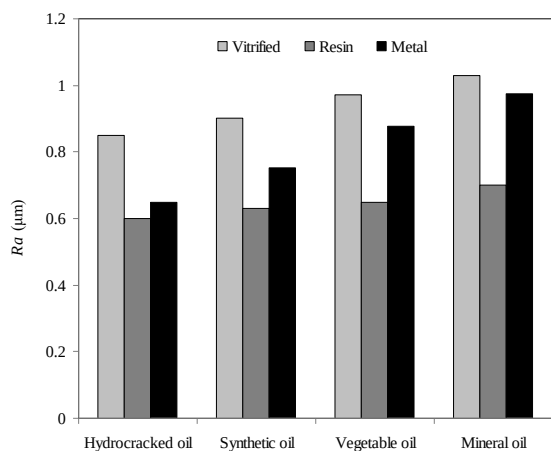


Fig. 12 Effect of oil type and grinding wheel material on surface roughness values R_a across the grinding direction

شکل 12 تأثیر نوع روغن و جنس چرخ سنگ بر مقادیر زبری سطح R_a در راستای عمود بر جهت سنگ زنی

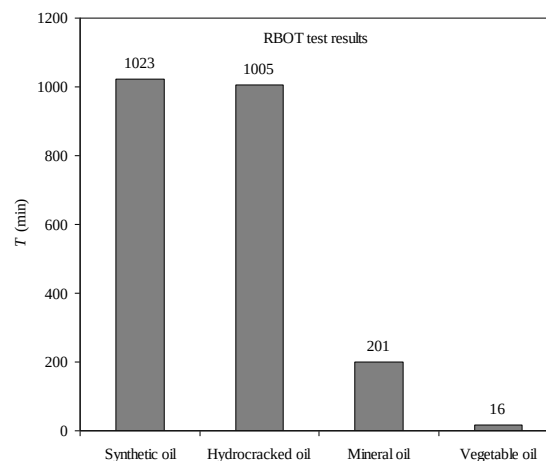


Fig. 9 The oxidation stability test results of the applied oils in the experiments

شکل 9 نتایج آزمایش پایداری اکسیداسیون روغن های مورد استفاده در آزمایش ها

201 و 16 دقیقه به دست آمده است.

مشخص است که روغن مصنوعی پلی آلفا الفین و روغن هیدروکرک شده نسبت به بقیه روغن ها از جمله روغن معدنی و گیاهی پایداری اکسیداسیون بسیار بیشتری دارند. نتیجه آن قابلیت عالی این روغن ها در روان کاری مرزی ناحیه تماس سنگ-قطعه کار در دماهای بالا و کاهش نیروهای سنگ زنی می باشد. در حالی که روغن های معدنی و گیاهی استفاده شده در شرایط سخت دمای بالای ناحیه تماس سنگ-قطعه کار دارای پایداری حرارتی کمتری بوده و نیروهای بیشتری ایجاد می کنند. از این رو همچنان که در "شکل های 7 و 8" مشاهده می شود، به ترتیب روغن مصنوعی پلی آلفا الفین، روغن هیدروکرک شده، روغن گیاهی و روغن معدنی کمترین نیروی سنگ زنی را ایجاد می کنند. قابل توجه است که روغن معدنی با وجود داشتن پایداری حرارتی بالاتر نسبت به روغن گیاهی، نیروهای سنگ زنی بیشتری ایجاد کرده است. دلیل این موضوع ویسکوزیته بسیار بیشتر روغن معدنی نسبت به روغن گیاهی و اثر آن در افزایش نیروهای هیدرودینامیکی در ناحیه تماس سنگ-قطعه کار می باشد.

3-2- زبری سطح

زبری سطح کمی است که میزان ناهمواری ها (پستی ها و بلندی های) حاصل از برش دانه های سنگ از سطح قطعه کار را نمایان می سازد و در بررسی وضعیت کیفیت سطح سنگ زنی شده، شاخص بسیار مهمی است. در "شکل 10 و 11" به ترتیب نتایج اندازه گیری زبری سطح R_a و R_z در راستای سنگ زنی نشان داده شده است. "شکل 12 و 13" نیز به ترتیب نتایج اندازه گیری زبری سطح R_a و R_z در حالت عمود بر راستای سنگ زنی را نشان می دهند.

نمودارهای زبری، تأثیر نوع روغن و جنس چرخ سنگ را بر ناهمواری های سطح سنگ زنی شده نشان می دهند. به طور کلی مشاهده می شود که چرخ سنگ الماس با زمینه رزینی بهترین صافی سطح (کمترین ناهمواری) را ایجاد می کند و سنگ های با زمینه ویتریفاید و فلزی در رده های بعدی قرار می گیرند. این نتیجه نشان می دهد که چسب رزینی چرخ سنگ در محیط روان کاری کمینه با روغن غیرحل شونده، صافی سطح نمونه را بهبود می بخشد. سنگ زمینه ویتریفاید به دلیل خاصیت خودتیزکنی خود و داشتن دانه های تیز، در حین سنگ زنی معمولاً شیارهای براده برداری عمیق تری

هیدروکرک شده قابلیت انحلال کمتری در رابطه با افزودنی ها داشته و زبری سطح بیشتری ایجاد می کند. پس از دو روغن ذکر شده، روغن گیاهی بیشترین تأثیر را بر کاهش زبری سطح نمونه های سرامیک زیرکونیا نشان داده است. قابل توجه است که روغن گیاهی دانه پالم مورد استفاده در آزمایش ها، تنها از اسیدهای چرب (بیش از 81% از اسیدهای چرب اشباع شده و مابقی آن از اسیدهای چرب غیراشباع) تشکیل شده است و هیچ گونه افزودنی به آن اضافه نشده است (جدول 4). تحقیقات نشان داده است که اسیدهای چرب موجود در روغن گیاهی دارای خاصیت ترکندگی بالا بوده و می توانند با جذب بر سطح فلزات و تشکیل فیلم روان کاری مرزی، ضریب اصطکاک را کاهش بدهند [27]. در این ارتباط گروه های قطبی موجود در اسیدهای چرب روغن گیاهی با پیوندهای (-COOH) به صورت فیزیکی جذب سطح فلزات می شوند. علاوه بر فلزات، جذب فیزیکی اسیدهای چرب در سرامیک های اکسیدی نیز تأیید شده است. پژوهشی که توسط اشتات [28] در مورد سرامیک ها انجام شد، نشان می دهد که اسیدهای چرب از طریق پیوندهای هیدروژنی خود به یون های اکسیدی سرامیک آلومینا جذب می شوند. در این جا نیز روغن گیاهی دانه پالم که از اسیدهای چرب تشکیل شده است، می تواند به صورت فیزیکی یک فیلم روان کننده جذب شده روی سطح سرامیک اکسیدی زیرکونیا ایجاد کند. با این حال، این فیلم روان کننده دارای استحکام حرارتی و ظرفیت تحمل فشار محدود است. در این مطالعه، زبری سطح به دست آمده از روغن گیاهی به احتمال زیاد به دلیل عدم ثبات فیلم روان کننده در شرایط سخت تماس سنگ-قطعه کار (دمای بالا، فشار بالا و سرعت برش زیاد) می باشد. از این رو لازم است که رفتار تریبولوژیکی و پایداری حرارتی روغن گیاهی بهبود یابد تا در شرایط روان کاری کمینه در فرآیند سنگ زنی سرامیک های سخت عملکرد روان کاری بهتری نشان دهد. اصلاح خواص تریبولوژیکی روغن های گیاهی می تواند به عنوان مثال با اضافه کردن افزودنی های فشار شدید یا ضد سایش² انجام شود. همچنین روش های متعددی برای بهبود پایداری حرارتی روغن های گیاهی مانند اصلاح مواد افزودنی، اصلاح شیمیایی روغن های پایه گیاهی (به عنوان مثال، اپوکسی کردن روغن پایه) و اصلاح ژنتیکی دانه های روغنی ارائه شده است [30,29]. علاوه بر آن از مقایسه متناظر نمودارهای "شکل های 10 و 11" به ترتیب با نمودارهای "شکل های 12 و 13" این نتیجه به دست می آید که مقادیر زبری در راستای سنگ زنی بسیار کمتر از مقادیر زبری در جهت عمود بر راستای سنگ زنی می باشد. این موضوع به این دلیل رخ می دهد که براده برداری دانه های سنگ در راستای سنگ زنی صورت می پذیرد و شیارهای حاصل از براده برداری همگی در راستای سنگ زنی ایجاد می شوند. شیارهای برش در راستای سنگ زنی، مستقیم هستند و پستی و بلندی ندارند. در حالی که میزان ناهمواری های سطح سنگ زده شده، در جهت عرضی (عمود بر راستای سنگ زنی) بواسطه وجود شیارهای متوالی بسیار بیشتر است. از این رو مقادیر زبری سطح در جهت عرضی، بسیار بیشتر از زبری سطح در راستای سنگ زنی به دست آمده است.

3-3- بافت سطح سنگ زنی شده نمونه ها

در این پژوهش علاوه بر اندازه گیری زبری سطح، بافت سطحی نمونه ها توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی تصویربرداری شد. تصاویر بافت سطحی با بزرگنمایی 500 برابر تهیه شدند. در "شکل 14" و "شکل 15" نتایج تصویربرداری از سطح نمونه ها نشان داده شده است. "شکل 14"

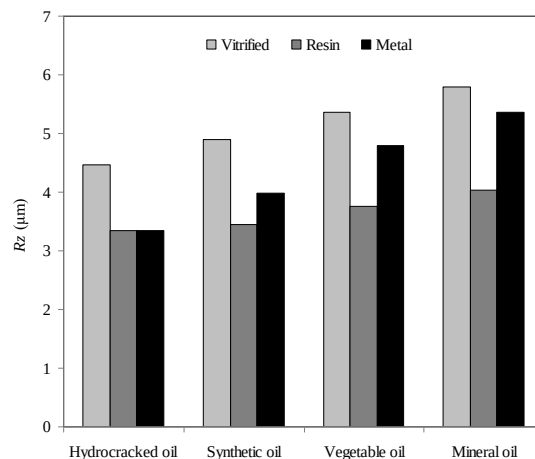


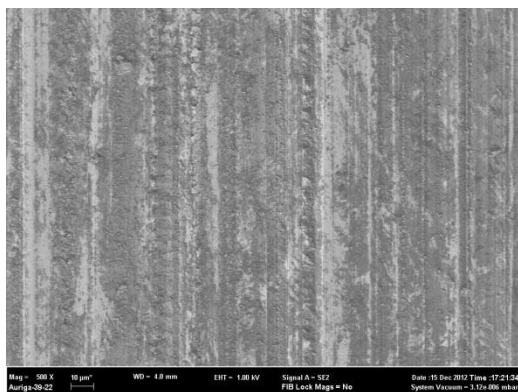
Fig 13 Effect of oil type and grinding wheel material on surface roughness values R_z across the grinding direction

شکل 13 تأثیر نوع روغن و جنس چرخ سنگ بر مقادیر زبری سطح R_a در راستای عمود بر جهت سنگ زنی

نسبت به سنگ رزینی روی سطح قطعه کار ایجاد می کند و از این رو زبری سطح بیشتری نسبت به سنگ رزینی دارد. اما سنگ الماس زمینه فلزی نسبت به دو سنگ قبلی دارای مستحکم ترین جنس زمینه است. سفتی بالای زمینه سنگ فلزی در تماس با قطعه کار سرامیکی نیروهای عمودی سطح تماس را افزایش داده و موجب پیدایش نواحی شکست ترد روی سطح قطعه می شود. عمدتاً سرامیک های پیشرفته و از جمله سرامیک زیرکونیای مورد استفاده در این آزمایش دارای داکتیلیته بسیار کم و تردی بالا هستند. به همین دلیل افزایش نیروهای عمودی سطح تماس سنگ-قطعه کار، تشکیل میکروتکرک ها، انتشار آن ها و ایجاد حفره های عمیق را تشدید می کند. از این رو سنگ زنی سرامیک زیرکونیا با چرخ سنگ الماس زمینه فلزی همراه با بیشترین زبری سطح می باشد. همچنین با توجه به نمودارهای "شکل های 10 تا 13" مشخص است که در فرآیند سنگ زنی نمونه های زیرکونیا و در شرایط روان کاری کمینه، به ترتیب روغن هیدروکرک شده، روغن مصنوعی پلی آلفالین، روغن گیاهی و روغن معدنی بیشترین اثرگذاری را در کاهش زبری سطح نمونه ها دارند. این ترتیب با ترتیب مشاهده شده برای کاهش نیروهای سنگ زنی کمی تفاوت دارد. در واقع روغن های هیدروکرک شده و مصنوعی پلی آلفالین هر دو نتایج بسیار خوبی در رابطه با زبری سطح نمونه ها نشان داده اند. اما در این جا روغن هیدروکرک شده نسبت به روغن مصنوعی پلی آلفالین زبری سطح کمتری ایجاد نموده است. نتایج آنالیز عنصری (ایکس آر اف) روغن ها در جدول 3 نشان می دهد که نوع و درصد وزنی عناصر موجود در این دو روغن بسیار شبیه به هم هستند. قابل توجه است که افزودنی های فشار شدید¹ که معمولاً از ترکیبات فسفر، سولفور و کالر تشکیل شده اند از جمله مهمترین افزودنی هایی است که به روغن های پایه ماشین کاری اضافه می گردد. بنابراین تفاوت عملکرد این دو روغن در بهبود صافی سطح سنگ زنی احتمالاً مربوط به انحلال افزودنی های آن در روغن پایه می باشد. انحلال افزودنی ها در روغن مصنوعی پلی آلفالین نسبت به روغن هیدروکرک شده کمتر می باشد. تحقیقات نشان داده است که هر چه قابلیت انحلال روغن پایه کمتر باشد احتمال اینکه افزودنی های اضافه شده به روغن قبل از آن که عملکرد مورد نظر را انجام دهند، از روان کار جدا شوند بیشتر می شود [26]. از این رو روغن مصنوعی پلی آلفالین نسبت به روغن

² Anti wear (AW)

¹ Extreme pressure (EP)



d) SEM micro-graph of the sample grinded with mineral oil

(د) تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه سنگ زنی شده با روغن معدنی

Fig 14 SEM micro-graphs of grinded zirconia work samples with different oil types in MQL condition, Magnification 500× cutting parameters: $v_s = 30 \text{ ms}^{-1}$, $a_p = 25 \mu\text{m}$, $v_w = 15 \text{ m/min}$

شکل 14 تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح نمونه های زیرکونیایی سنگ زنی شده

با روغن های مختلف در شرایط روان کاری کمینه، بزرگنمایی 500×

متغیرهای برش: $v_s = 30 \text{ ms}^{-1}$, $a_p = 25 \mu\text{m}$, $v_w = 15 \text{ m/min}$

دارد. بنابراین از میان چهار روغن مورد بررسی، روغن هیدروکرک شده بهترین بافت سطحی را ایجاد می کند و از این رو برای به کارگیری در روان کاری کمینه برای فرآیند سنگ زنی سرامیک ها توصیه می شود. در "شکل 15" تأثیر جنس زمینه چرخ سنگ الماس بر بافت سطح نمونه های زیرکونیایی که در شرایط روان کاری کمینه با روغن هیدروکرک شده سنگ زنی شده اند، نشان داده شده است. مقایسه تصاویر "شکل 15a تا 15d" تأثیر قابل ملاحظه جنس زمینه چرخ سنگ الماس را بر بافت سطح نمونه های سرامیک زیرکونیا نشان می دهد. مشاهده می شود که به ترتیب سنگ رزینی (شکل 15a)، سنگ ویتریفاید (شکل 15b) و سنگ فلزی (شکل های 15c و 15d) بهترین بافت سطح با کمترین عیوب سطحی را ایجاد می کنند. مطلوب بودن سطح نمونه سنگ زنی شده سرامیک با چرخ سنگ الماس زمینه رزینی به این دلیل است که بر روی سطح آن ترک و حفره ایجاد نشده و عمق شیارهای حاصل از براده برداری سنگ نیز بر آن کم است. البته نمونه سنگ زنی شده با چرخ سنگ الماس زمینه ویتریفاید نیز دارای ترک و حفره نمی باشد، اما با این وجود عمق شیارهای حاصل از براده برداری در آن زیادتر است. این موضوع به علت خاصیت خودتیزکنی چرخ سنگ زمینه ویتریفاید و تجدید شدن دانه های الماس آن می باشد. دانه های تیز معمولاً شیارهای عمیق تری روی سطح ایجاد می کنند و از این رو زبری سطح را تا حدودی افزایش می دهند اما نیروهای سنگ زنی با آن ها کاهش می یابد. در تصاویر "شکل 15c و 15d" مشاهده می شود که سنگ فلزی به دلیل اعمال نیروهای عمودی بسیار زیاد بر سطح قطعه کار میکروتورک های زیادی به وجود می آورد.

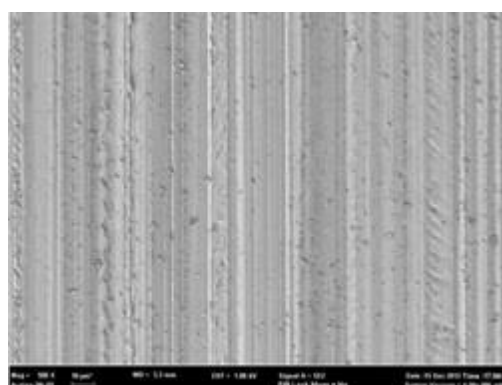
افزایش نیروهای عمودی در سنگ زنی با چرخ سنگ الماس زمینه فلزی و ایجاد میکروتورک ها در سطح قطعه کار به دلیل سفتی (مدول الاستیسیته) بالای زمینه فلزی این نوع چرخ سنگ می باشد. از این رو با شرایط روان کاری کمینه استفاده از این نوع چرخ سنگ در سنگ زنی سرامیک ها مناسب نیست و تنها در مواردی توصیه می شود که نیروهای عمودی کمی ایجاد شود. برای مثال با عمق براده برداری بسیار کم و سرعت پیشروی کم می توان از بروز ترک های سطحی جلوگیری کرد.

4- نتیجه گیری

در این مقاله روش روان کاری کمینه در فرآیند سنگ زنی سرامیک زیرکونیا

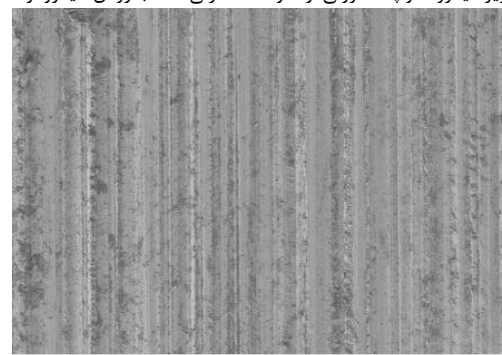
مربوط به سطح نمونه هایی است که توسط چرخ سنگ الماس زمینه رزینی و در شرایط روان کاری کمینه با روغن های مختلف، سنگ زنی شده اند.

همچنین کلیه نمونه ها با عمق براده برداری $25 \mu\text{m}$ ، سرعت پیشروی 15 m/min و سرعت برشی 30 ms^{-1} سنگ زنی شدند. به طور کلی هر چه میزان عیوب سطحی (میکروتورک ها، شکستگی ها و حفره ها) روی سطح سنگ زنی شده نمونه ها کمتر باشد به معنای وضعیت بهتر بافت سطحی آن ها است. مقایسه "اشکال 14a و 14b" نشان می دهد که در فرآیند سنگ زنی سرامیک زیرکونیا، نوع روغن بر بافت ظاهری سطح سنگ زده شده تأثیرگذار است. همان گونه که در بخش 2-3 در مورد تأثیر نوع روغن ها بر زبری سطح سنگ زنی بحث شد، ترتیب تأثیر روغن ها بر زبری سطح زیرکونیا (از زبری کم به زبری زیاد) به صورت زیر به دست آمد: 1- روغن هیدروکرک شده، 2- روغن مصنوعی پلی آلفا الفین، 3- روغن گیاهی، 4- روغن معدنی. این ترتیب با وضعیت بافت ظاهری سطح سنگ زنی شده در تصاویر "شکل 14" مطابقت



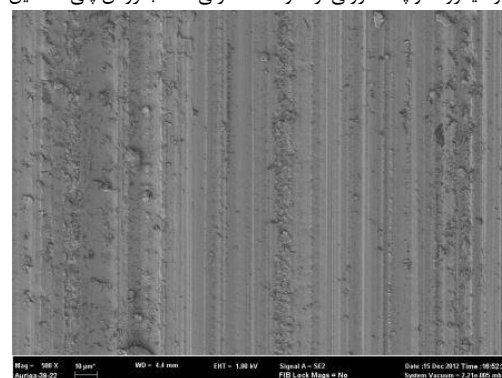
a) SEM micro-graph of the sample grinded with hydrocracked oil

(الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه سنگ زنی شده با روغن هیدروکرک شده



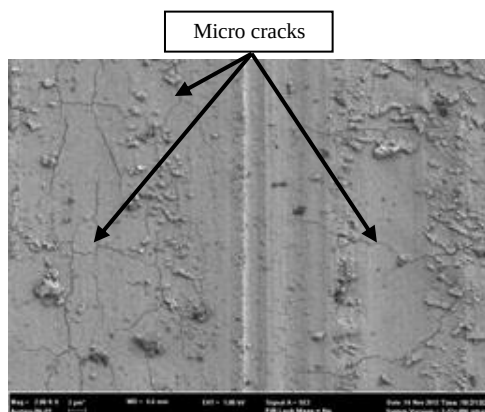
b) SEM micro-graph of the sample grinded with PAO synthetic oil

(ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه سنگ زنی شده با روغن پلی آلفا الفین



c) SEM micro-graph of the sample grinded with vegetable oil

(ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه سنگ زنی شده با روغن گیاهی



d) SEM micro-graph of the sample grinded with metal bonded diamond wheel under MQL condition (2000×)

(د) تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه سنگ زنی شده با چرخ سنگ الماس زمینه فلزی تحت شرایط روان کاری کمینه (2000×)

Fig. 15 SEM micro-graphs of grinded zirconia work samples with different wheel types under MQL condition. cutting parameters: $v_s = 30 \text{ ms}^{-1}$, $a_p = 25 \mu\text{m}$, $v_w = 15 \text{ m/min}$

شکل 15 تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح نمونه های سنگ زنی شده زیرکونیا با چرخ سنگ های مختلف تحت شرایط روان کاری کمینه

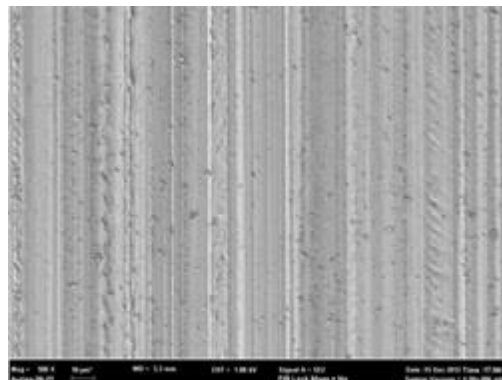
متغیرهای برش: $v_s = 30 \text{ ms}^{-1}$, $a_p = 25 \mu\text{m}$, $v_w = 15 \text{ m/min}$

1- اندازه گیری نیروهای فرآیند سنگ زنی سرامیک زیرکونیا در شرایط روان کاری کمینه، نشان داد که به ترتیب روغن مصنوعی پلی آلفا الفین، روغن هیدروکرک شده، روغن گیاهی و روغن معدنی کمترین نیروهای سنگ زنی را ایجاد می کنند. پایداری اکسیداسیون روغن پایه در دمای بالا (یا پایداری حرارتی آن) تأثیر قابل ملاحظه ای در حفظ عملکرد روان کاری روغن دارد. در این جا روغن مصنوعی پلی آلفا الفین و روغن هیدروکرک شده با داشتن بالاترین پایداری اکسیداسیون، موثرترین روغن ها در روان کاری مرزی ناحیه تماس سنگ-قطعه کار در دماهای بالا و کاهش نیروهای سنگ زنی می باشند.

2- نمودار نیروهای مماسی سنگ زنی، نشان می دهد که به ترتیب چرخ سنگ های الماس با زمینه رزینی، زمینه ویتریفاید و زمینه فلزی بیشترین نیروهای مماسی سنگ زنی را ایجاد می کنند. نیروی مماسی سنگ زنی ارتباط مستقیمی با اصطکاک سطح تماس سنگ-قطعه کار دارد. هرچه اصطکاک سطح تماس سنگ-قطعه کار کمتر باشد، نیروی مماسی نیز کمتر خواهد بود. اما در نمودار نیروی عمودی، چرخ سنگ با زمینه فلزی بیشترین نیروی عمودی سنگ زنی را ایجاد می کند و سنگ های رزینی و ویتریفاید به ترتیب در رده های بعدی قرار می گیرند. به دلیل خاصیت خودتیزکنندگی، چرخ سنگ ویتریفاید دارای کمترین نیروی عمودی سنگ زنی می باشد. همچنین چرخ سنگ الماس زمینه فلزی به علت داشتن سفتی بالا (مدول الاستیسیته بالا)، جابه جایی الاستیک عمودی چندانی نداشته و از این رو بیشترین نیروهای عمودی توسط آن ایجاد می شود. از این رو با شرایط روان کاری کمینه استفاده از این نوع چرخ سنگ در سنگ زنی سرامیک ها مناسب نیست و تنها در مواردی توصیه می شود که نیروهای عمودی کمی ایجاد شود. برای مثال با عمق براده برداری بسیار کم و سرعت پیشروی کم می توان از بروز ترک های سطحی جلوگیری کرد.

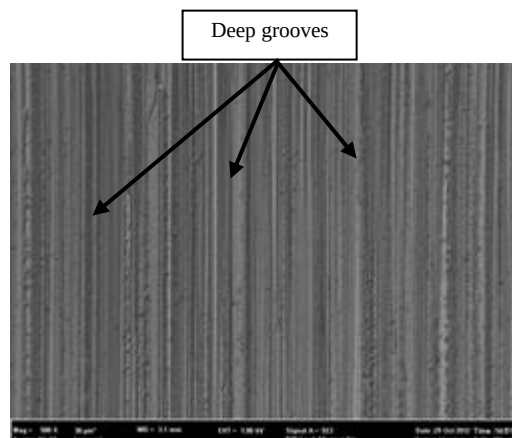
3- در شرایط روان کاری کمینه، چرخ سنگ الماس با زمینه رزینی

مورد استفاده قرار گرفت و در آن به بررسی تأثیر نوع روان کار و جنس ابزار (چرخ سنگ) بر نیروهای سنگ زنی، زبری سطح و وضعیت بافت سطح سنگ زنی شده نمونه ها پرداخته شد. مهمترین نتایج حاصل از این پژوهش را می توان به صورت ذیل خلاصه نمود:



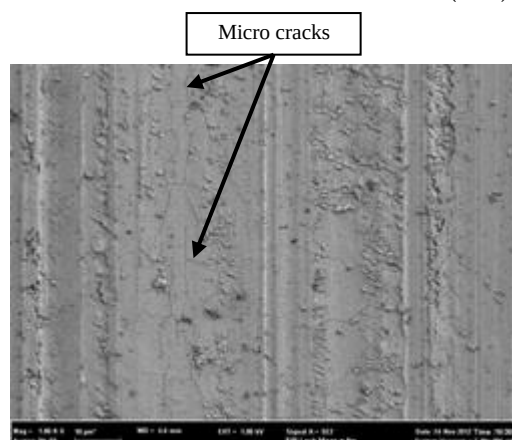
a) SEM micro-graph of the sample grinded with resin bonded diamond wheel (500×)

(الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه سنگ زنی شده با سنگ الماس زمینه رزینی (500×)



b) SEM micro-graph of the sample grinded with vitrified bonded diamond wheel (500×)

(ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه سنگ زنی شده با چرخ سنگ الماس زمینه ویتریفاید (500×)



c) SEM micro-graph of the sample grinded with metal bonded diamond wheel (500×)

(ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه سنگ زنی شده با چرخ سنگ الماس زمینه فلزی (500×)

- advanced ceramics, *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 206, No. 2, pp. 93-99, 1992.
- [9] T. Waida, H. Noguchi, M. Rezaei, T. Suto, Creep feed grinding of ceramics and ceramic-matrix composites with slotted and perforated wheels, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 57, No. 2, pp. 324-329, 1991.
- [10] S. A. Lawal, I. A. Choudhury, Y. Nukman, A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: A case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 41, pp. 210-221, 2013.
- [11] M. H. Sadeghi, M. J. Haddad, T. Tawakoli, M. Emami, Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 44, No. 5-6, pp. 487-500, 2009.
- [12] T. Tawakoli, M. J. Hadad, M. H. Sadeghi, Investigation on minimum quantity lubricant-MQL grinding of 100Cr6 hardened steel using different abrasive and coolant-lubricant types, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 50, No. 8, pp. 698-708, 2010.
- [13] A. Kumar, S. Ghosh, S. Aravindan, Grinding performance improvement of silicon nitride ceramics by utilizing nanofluids, *Ceramics International*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.07.044>.
- [14] L. R. Rudnick (Ed.), *Synthetics, Mineral Oils, and Bio-based Lubricants: Chemistry and Technology*, Second Edition, pp. 314-379, Florida: CRC Press, 2013.
- [15] M. Emami, M. H. Sadeghi, A. A. D. Sarhan, F. Hasani, Investigating the Minimum Quantity Lubrication in grinding of Al_2O_3 engineering ceramic, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 66, pp. 632-643, 2014.
- [16] C. S. Hsu, P. R. Robinson (Eds.), *Practical Advances in Petroleum Processing*, New York: Springer, pp. 108-127, 2006.
- [17] T. Mang, W. Dresel, *Lubricants and Lubrication*, Second Edition, p. 470, Weinheim: Wiley, 2007.
- [18] S. A. Lawal, I. A. Choudhury, Y. Nukman, Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals-A review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 52, No. 1, pp. 1-12, 2012.
- [19] O. J. Alamu, M. A. Waheed, S. O. Jekayinfa, Effect of ethanol-palm kernel oil ratio on alkali-catalyzed biodiesel yield, *Fuel*, Vol. 87, No. 8-9, pp. 1529-1533, 2008.
- [20] L. R. Rudnick (Ed.), *Synthetics, Mineral Oils, and Bio-Based Lubricants: Chemistry and Technology*, p. 378, Florida: CRC Press, 2013.
- [21] Commercial & heavy duty engine oils, Accessed on 3 March 2014; www.gulfwestern.com.au/product-category/products.
- [22] ToolGrind T600-grinding oil, Accessed on 3 March 2014; <http://www.oelhield.com/products/metalworking-fluids/grinding-oil/toolgrind-t600-grinding-oil>.
- [23] SintoGrind TTK - High-performance grinding fluid, Accessed on 3 March 2014; <http://www.oelhield.com/products/metalworking-fluids/grinding-oil/sintogrand-ttk-shpg-grinding-oil>.
- [24] 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 Al_2O_3 engineering ceramics, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 15, No. 3, pp. 374-388, 2013.
- [25] I. D. Marinescu, M. Hitchiner, E. Uhlmann, W. B. Rowe, I. Inasaki, *Handbook of Machining with Grinding Wheels*, pp. 13-14, Florida: CRC Press, 2007.
- [26] E. R. Booser, *Handbook of Lubrication: Theory and Practice of Tribology, Volume II: Theory and Design*, p. 308, Florida: CRC Press, 1988.
- [27] V. Stepina, V. Vesely, *Lubricants and Special Fluids*, p. 610, Amsterdam: Elsevier, 1992.
- [28] P. Studt, Influence of lubricating oil additives on friction of ceramics under conditions of boundary lubrication, *Wear*, Vol. 115, No. 1-2, pp. 185-191, 1987.
- [29] A. Adhvaray, S. Z. Erhan, Epoxidized soyabean oil as a potential source of high temperature lubricants, *Industrial Crops and Products*, Vol. 15, No. 3, pp. 247-254.
- [30] Y. M. Shashidhara, S. R. Jayaram, Vegetable oils as a potential cutting fluid-an evolution, *Tribology International*, Vol. 43, No. 5-6, pp. 1073-1081, 2010.

کمترین زبری سطح را در سنگ زنی سرامیک زیرکونیا ایجاد می کند و سنگ های با زمینه ویتریفاید و فلزی در رده های بعدی قرار می گیرند.

4- در فرآیند سنگ زنی نمونه های زیرکونیا و در شرایط روان کاری کمینه، به ترتیب روغن هیدروکرک شده، روغن مصنوعی پلی آلفالین، روغن گیاهی و روغن معدنی بیشترین اثرگذاری را در بهبود صافی سطح نمونه ها دارند.

5- روغن گیاهی خالص با وجود دارا بودن خواص زیست محیطی مطلوب، پایداری حرارتی ضعیفی دارد. به منظور بهبود عملکرد روان کاری روغن گیاهی خالص در فرآیند روان کاری کمینه، لازم است خواص تریبولوژیکی و پایداری حرارتی آن را بهبود داد.

6- مقایسه تصاویر بافت سطحی نمونه ها نشان می دهد از میان چهار روغن مورد بررسی، روغن هیدروکرک شده بهترین سطح ظاهری با کمترین عیوب و کمترین ناهمواری را ایجاد می کند و از این رو برای بکارگیری در روان کاری کمینه برای فرآیند سنگ زنی سرامیک زیرکونیا پیشنهاد می شود.

7- مقایسه تصاویر بافت سطحی نمونه های زیرکونیا نشان می دهد که چرخ سنگ های الماس زمینه رزینی و ویتریفاید در شرایط روان کاری کمینه به ترتیب بهترین صافی سطح با کمترین عیوب سطحی را ایجاد می کنند. از این رو این چرخ سنگ ها برای عملیات پرداخت سطح مناسب هستند.

5- تقدیر و تشکر

از آقای دکتر احمد سرهان و دپارتمان مهندسی مکانیک دانشگاه UM مالزی به دلیل حمایت از این پژوهش و تأمین تجهیزات آزمایشگاهی مورد نیاز تشکر و قدردانی می شود.

6- مراجع

- [1] Sh. Sōmiya, F. Aldinger, N. Claussen, R. M. Spriggs, K. Uchino, K. Koumoto, M. Kaneno, *Handbook of Advanced Ceramics: Materials, Applications, Processing, and Properties*, Second Edition, pp. 225-266, New York: Academic Press, 2013.
- [2] I. D. Marinescu, *Handbook of Advanced Ceramics Machining*, pp. 111-112, Florida: CRC Press, 2007.
- [3] I. D. Marinescu, H. K. Tonshoff, I. Inasaki, *Handbook of Ceramic Grinding and Polishing*, pp. 203-205, New York: Noyes Publications, 2000.
- [4] I. Inasaki, K. Nakayama, High-efficiency grinding of advanced ceramics, *Annals of the CIRP*, Vol. 35, No.1, pp. 211-214, 1986.
- [5] I. Inasaki, K. Nakayama, Grinding of hard and brittle materials, *Annals of the CIRP*, Vol. 36, No. 2, pp. 463-471, 1987.
- [6] K. Kitajima, G. O. Cai, N. Kurnagai, Y. Tanaka, H. W. Zheng, Study on mechanism of ceramics grinding, *Annals of the CIRP*, Vol. 41, No. 1, pp. 367-370, 1992.
- [7] I. Inasaki, Speed-stroke grinding of advanced ceramics, *Annals of the CIRP*, Vol. 37, No. 1, pp. 299-302, 1988.
- [8] S. M. Rezaei, T. Suto, T. Waida, H. Noguchi, Creep feed grinding of