مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1397، دوره 18، شماره 02، ص‌ص 281-292

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه تأثیر نوع روان‌کار و جنس ابزار (چرخ سنگ) در عملکرد روان‌کاری کمینه در فرآیند سنگ‌زنی سرامیک‌های پیشرفته

محسن امامی[1*]، محمد حسین صادقی[2]

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

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

* بهبهان، صندوق پستی63616-47189، 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:

سنگ‌زنی

سرامیک‌های پیشرفته

روان‌کاری کمینه

چکیده

سرامیک‌های پیشرفته دسته ای از مواد هستند که به‌دلیل 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 کرده‌اند. فرآیند سنگ‌زنی از جمله مهمترین و متداول‌ترین روش‌های براده-برداری و پرداخت سرامیک‌ها محسوب می‌شود. با این وجود قابلیت ضعیف ماشین‌کاری، عیوب سطحی زیاد در قطعه‌کار که به دلیل تردی سرامیک‌ها و نیروهای زیاد در سنگ‌زنی آن‌ها بوجود می‌آید، نرخ سایش زیاد چرخ سنگ الماس (ابزار)، هزینه‌های بالای ناشی از استفاده از سیال خنک‌کننده، زمان‌بر بودن فرآیند، راندمان پایین براده‌برداری (نرخ تولید پایین) از جمله مشکلات سنگ‌زنی سرامیک‌ها می‌باشد. تکنیک جدید روان‌کاری کمینه از جمله روش‌هایی است که اخیراً در فرآیندهای ماشین‌کاری با هدف بهبود عملکرد روان‌کاری 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 روان‌کاری کمینه بر قابلیت سنگ‌زنی سرامیک‌ها از این تکنیک در فرآیند سنگ‌زنی سرامیک زیرکونیا استفاده شده است. همچنین از آنجایی که نوع روان‌کار و جنس چرخ سنگ می‌تواند بر عملکرد روان‌کاری کمینه در این فرآیند تأثیرگذار باشد، از این‌رو نوع روان‌کار و جنس چرخ سنگ الماس به عنوان متغیر در آزمایش‌ها استفاده شده است. نیروهای سنگ‌زنی، زبری سطح و بافت سطح سنگ زده شده در این فرآیند مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط روان‌کاری کمینه، انتخاب مناسب نوع روان‌کار و جنس ابزار می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای بر قابلیت سنگ‌زنی 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 Sadeghi[2]

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:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.11.0]

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، اپتیک، 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 سیلیکون‌نایترایدو 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 تولرانس‌های ابعادی دقیق و صافی سطح مطلوب، نیاز به عملیات ماشین‌کاری می باشد. 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. علاوه‌بر 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 زودهنگام 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 مبحث تکنولوژی سنگ‌زنی سرامیک‌های پیشرفته پرداخته‌اند، همگی بر موضوع پایین بودن راندمان سنگ‌زنی سرامیک‌ها و لزوم بکارگیری 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 خنک کننده‌های (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 کمینه[1] 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 غیرحل شونده در آب و یا حل شونده در آب باشد. در این روش روغن با دبی بسیار کم ($10-150\,\mathrm{mlh^{-1}}$) از یک مسیر و جریان هوای فشرده با فشار ($1-7$ 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 می شوند. ذرات بسیار ریز روغن با برخورد به سطح ناحیه هدف در آنجا مجدداً تجمیع 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 [12,11]. 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)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.11.0]

و بدترین عملکرد را در سنگ‌زنی با روان‌کاری کمینه داشته‌اند. علاوه بر آن در این فرآیند سنگ اکسیدآلومینیوم اس‌جی نسبت به سایر سنگ‌ها میزان بارگیری کمتری داشته و از این‌رو صافی سطح بهتر و آسیب‌های حرارتی کمتری با استفاده از آن حاصل شده است. کومار و همکاران [13] به منظور بهبود فرآیند سنگ‌زنی سرامیک سیلیکون‌نایتراید از روش روان‌کاری کمینه به همراه نانوسیال استفاده کردند. در آن پژوهش، ابزار چرخ سنگ الماس با چسب رزینی جهت براده‌برداری از سرامیک به‌کار رفته است. همچنین نانوسیال‌های استفاده شده در آزمایش‌ها با مخلوط کردن سه نوع نانوذره (گرافیت، تنگستن دی سولفاید[1] ومولیبدن دی سولفاید[2]) در آب دیونیزه شده تهیه شده‌اند. نتایج آن پژوهش نشان داده است که نانوسیال‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای عملکرد فرآیند را از نظر نیروهای سنگ‌زنی، صافی سطح و عیوب زیرسطحی بهبود می‌بخشند.

پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که روش روان‌کاری کمینه پتانسیل بسیار خوبی جهت به‌کارگیری در فرآیند سنگ‌زنی سرامیک‌های 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 قطعه‌کار و متغیرهای روان‌کاری کمینه می‌باشد، صورت پذیرد تا ویژگی‌ها و نقاط ضعف و قوت فرآیند بهتر مشخص شود. در همین راستا در پژوهش حاضر، روش روان‌کاری کمینه در فرآیند سنگ‌زنی سرامیک زیرکونیا مورد استفاده قرار گرفته و در آن به بررسی تأثیر نوع روان‌کار و جنس ابزار (چرخ سنگ) بر نیروهای سنگ‌زنی، زبری سطح و بافت سطح سنگ‌زنی شده پرداخته شده است. نوع روغن روان‌کار از جمله متغیرهای مهم روان‌کاری کمینه می‌باشد و در موفقیت این روش بسیار تأثیرگذار است. از این رو ابتدا به طور مختصر به معرفی روغن‌های برش پرداخته می‌شود و سپس معیار لحاظ شده جهت انتخاب روغن‌های مختلف در این پژوهش بیان می‌شود.

روغن‌های برش معمولاً از دو جزء روغن پایه و افزودنی‌ها تشکیل می شوند. روغن پایه جزء اصلی یک روغن برش محسوب می‌شود و معمولاً بیش از 95% از حجم آن را تشکیل می‌دهد. روغن‌های پایه معدنی از مشتقات نفت خام هستند و از جمله متداول‌ترین روغن‌های پایه محسوب می‌شوند. این روغن‌های پایه از هیدروکربن‌های با ساختار پارافینی، نفتانیکی یا آروماتیکی تشکیل شده‌اند. مزیت اصلی روغن‌های پایه معدنی هزینه پایین آن‌ها است. با این وجود از نظر زیست محیطی روغن‌های پایه معدنی چندان مطلوب نیستند زیرا سطح تجزیه پذیری پایینی دارند (10-40%). همچنین بسیاری از افزودنی‌هایی که به روغن‌های پایه معدنی اضافه می‌گردند یا سمی بوده و یا حداقل برای محیط زیست مضر هستند. این روغن‌ها مقاومت اکسیداسیون متوسطی دارند. زیرا بسیاری از ترکیبات آن‌ها که در مقابل حرارت ناپایدار هستند در دماهای بالا تبخیر شده و اکسید می شوند. رویکرد جدید علم به سمت توسعه روغن‌های پایه با کارایی بالا و دوست‌دار محیط زیست است که از جمله آن‌ها می‌توان به روغن‌های پایه معدنی اصلاح شیمیایی شده، روغن‌های پایه مصنوعی و روغن‌های پایه زیستی اشاره نمود [14]. از جمله روغن‌های پایه معدنی اصلاح شیمیایی شده، می‌توان به روغن-های هیدروکرک شده اشاره نمود. روغن‌های هیدروکرک شده نسبت به روغن‌های پایه معدنی متداول دارای سطح خلوص بالاتر، درصد اشباع بالاتر (بیش از 90%)، محتوای آروماتیک کمتر، شاخص سیالیت بیشتر و پایداری حرارتی بالاتر هستند. هیدروکرکینگ عبارتست از هیدروژنه‌کردن روغن به‌وسیله هیدروژن و کاتالیزورهای مخصوصی، در شرایط دما و فشار بالا، جهت تبدیل ترکیبات سنگین‌تر روغن به محصولات سبک‌تری که مطلوب‌تر هستند. در هیدروکرکینگ مولکول‌های ناپایدار با زدوده شدن اتم‌های سولفور، اکسیژن و نیتروژن پایدار شده و از طرف دیگر هیدروژنه کردن شدید می‌تواند ترکیبات آروماتیک را به ساختارهای اشباع شده نفتانیکی یا پارافینی تبدیل کند. روغنهای هیدروکرک شده به‌دلیل کاهش ناخالصی دارای مواد سمی کمی هستند، همچنین شفاف و بی رنگ هستند و در مقایسه با روغن‌های معدنی تجزیه پذیرترند (تا 80%). کاربرد روغن‌های هیدروکرک شده در صنایع مختلف و همچنین در فرآیندهای ماشین‌کاری به سرعت در حال افزایش است [15]. روغن‌های پایه مصنوعی توسط سنتز شیمیایی تولید می‌شوند و دارای خواص فیزیکی، شیمیایی و تجزیه‌پذیری عالی می‌باشند. پلی آلفا الفین‌ها، استرها و سیلیکون‌ها انواع متداول روغن‌های پایه مصنوعی هستند [16]. پلی آلفا الفین‌ها متداول‌ترین نوع سیالات پایه مصنوعی هستند که در روغن‌ها استفاده می‌شوند. روغن‌های پایه پلی‌آلفا الفین دارای پایداری اکسیداسیون عالی، پایداری حرارتی بالا، شاخص سیالیت بسیار بالا و تجزیه پذیری بالا (تا 80%) هستند و غیرسمی می‌باشند. روغن‌های پایه مصنوعی به‌دلیل این‌که به روش سنتز ساخته می‌شوند دارای ملکول‌های هم شکل، هم اندازه و کاملاً اشباع شده‌ای هستند. دو محدودیت عمده روغن‌های پایه پلی آلفا الفین، قیمت بالا و قابلیت ضعیف آن‌ها در انحلال افزودنی‌ها است. روغن‌های پایه مصنوعی نیز اخیراً در فرآیندهای ماشین‌کاری ورود پیدا کرده‌اند [17]. روغن‌های پایه گیاهی منابع مناسبی از روان‌کارهای تجدیدپذیر و تجزیه‌پذیر برای کاربردهای صنعتی هستند. روغن‌های پایه گیاهی دارای خاصیت روان‌کنندگی بالا، نقطه اشتعال بالا و پایداری برشی بالا هستند. روغن‌های پایه گیاهی از روغن‌های معدنی گران‌تر و از روغن‌های مصنوعی ارزان‌تر هستند. خواص فیزیکی-شیمیایی روغن‌های پایه گیاهی به اسیدهای چرب اشباع شده و غیراشباع شده موجود در آن‌ها بستگی دارد. هر چه میزان اسیدهای چرب غیراشباع در روغن‌های پایه گیاهی کمتر باشد، پایداری اکسیداسیون آن‌ها بیشتر خواهد بود. در سال‌های اخیر به دلایل زیست محیطی، روغن‌های گیاهی جهت کاربردهای صنعتی و بویژه در فرآیندهای ماشین‌کاری بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [18]. با توجه به توضیحات بالا، در این پژوهش روان‌کارهای بررسی شده براساس نوع روغن پایه انتخاب شده‌اند. این روغن‌ها عبارتند از: 1- روغن معدنی، 2- روغن هیدروکرک‌شده، 3- روغن مصنوعی پلی آلفا الفین و 4- روغن گیاهی دانه پالم. چرخ سنگ‌های استفاده شده نیز براساس جنس چسب مورد استفاده در ساخت آن‌ها انتخاب شده‌اند 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 آزمایش‌های تجربی

در "شکل 1" ستاپ آزمایشگاهی استفاده شده برای انجام آزمایش‌های تجربی این پژوهش نشان داده شده است. اجزای این ستاپ آزمایشگاهی عبارتند از: ماشین سنگ‌زنی، چرخ‌سنگ، قطعه‌کار، دستگاه روان‌کاری کمینه با سیال روان‌کار، نازل پاشش سیال، دینامومتر، آمپلی‌فایر، سیستم پردازش داده و ابزار تراش چرخ سنگ. در پژوهش حاضر از ماشین سنگ‌زنی تخت افقی دقیق ناگاایچی[3] مدل NI 50AV2 به‌منظور انجام آزمایش‌ها استفاده شده است.

همچنین از سرامیک زیرکونیا به عنوان ماده قطعه‌کار برای انجام

[1] WS_2
[2] MoS_2
[3] Naga Ichi

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.11.0]

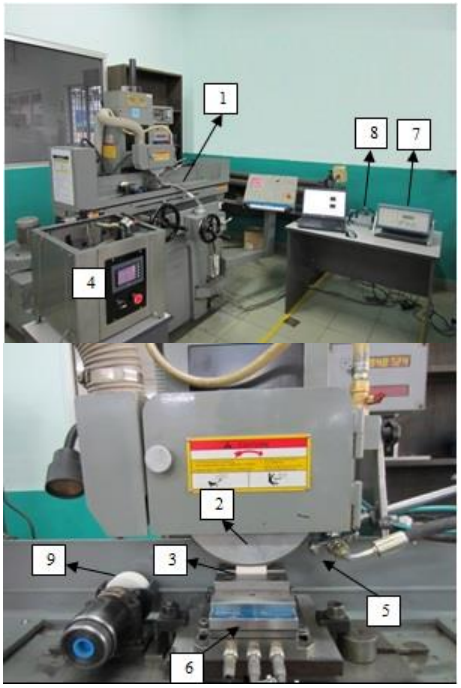


Fig. 1 Experimental setup (1-grinding machine, 2- grinding wheel, 3-workpiece, 4-MQL system, 5-Nozzle, 6-Dynamometer, 7-Amplifier, 8-DAQ system, 9- Truing device)

شکل 1 ستاپ آزمایشگاهی (1- ماشین سنگ‌زنی، 2- چرخ سنگ، 3- قطعه‌کار، 4- دستگاه روان‌کاری کمینه، 5- نازل پاشش سیال، 6- دینامومتر، 7- آمپلی‌فایر، 8- سیستم پردازش داده، 9- ابزار تراش چرخ سنگ)

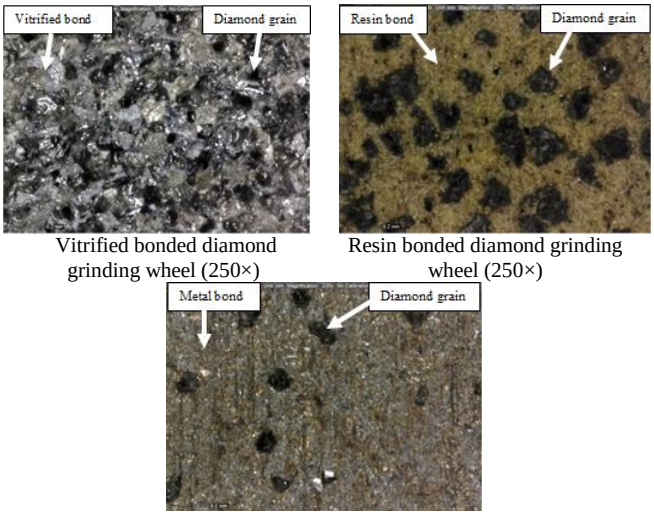
آزمایش‌های تجربی سنگ‌زنی استفاده شده است. ماده اولیه نمونه‌ها با اضافه نمودن 3 درصد مولی ییتریا به پودر زیرکونیای خالص تهیه و سپس با استفاده از روش پرس خشک و پخت به مدت 2 ساعت در کوره با اتمسفر هوا و در دمای 1500°C (سینترکردن) ساخته شدند. در جدول 1 خواص فیزیکی، خواص مکانیکی و ابعاد نمونه‌های تهیه شده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

با توجه به این‌که جنس ابزار (چرخ سنگ) از جمله متغیرهای مورد مطالعه در این پژوهش است، از این رو سه نوع چرخ سنگ الماس با دانه‌بندی یکسان $D91$ (اندازه دانه 91 میکرون) و زمینه (چسب سنگ) متفاوت شامل: 1- زمینه رزینی 2- زمینه ویتریفاید و 3- زمینه فلزی، برای براده‌برداری از سطح نمونه‌های سرامیکی تهیه شد. تصاویر سطح چرخ سنگ‌های 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 سنگ‌زنی، چرخ سنگ الماس توسط بلوک آلومینا با گرید 38A150-18VBE (ساخت شرکت نورتون) تیزکاری شد.

جدول 1 خواص فیزیکی، خواص مکانیکی و ابعاد نمونه‌های 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 v	0.25
سختی H (GPa)	13.2
چقرمگی شکست K_{IC} (MPam$^{0.5}$)	5.1



Vitrified bonded diamond grinding wheel (250×)

Resin bonded diamond grinding wheel (250×)

Metal bonded diamond grinding wheel (250×)

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 سنگ‌های الماس با زمینه رزینی، ویتریفاید و فلزی که در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند

همچنین از چهار نوع روان‌کار با روغن پایه متفاوت جهت انجام آزمایش‌های روان‌کاری کمینه استفاده شد که عبارتند از: 1- روغن مصنوعی پلی‌آلفا الفین، 2- روغن هیدروکرک شده 3- روغن معدنی و 4- روغن گیاهی. مشخصات شرکت سازنده و خواص فیزیکی روان‌کارهای مورد استفاده در جدول 2 نشان داده شده است. علاوه بر آن به منظور شناسایی عناصر موجود در روغن‌های 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 دانهٔ پالم[1] و بدون اضافه نمودن افزودنی تهیه شده است. ترکیبات (ساختار شیمیایی) روغن‌های گیاهی از اسیدهای چرب می‌باشد. در جدول 4 انواع اسیدهای چرب موجود در روغن گیاهی دانهٔ پالم و درصد وزنی آن‌ها نشان داده شده است. آنالیز شیمیایی تعیین نوع و درصد اسیدهای چرب موجود در روغن گیاهی دانهٔ پالم در آزمایشگاه تحقیقاتی یونیپک[2] دانشگاه کبانگسان[3] مالزی انجام شده است. قابل ذکر است که روغن گیاهی دانه پالم با حدود 80% اسیدهای چرب اشباع شده از جمله روغن‌های گیاهی با درصد بالای اسیدهای چرب اشباع شده می‌باشد [19]. اسیدهای چرب اشباع شده پایداری حرارتی و پایداری اکسیداسیون بیشتری دارند و جهت کاربردهای روان‌کاری در دمای بالا مناسب‌تر هستند [20]. سیستم روان‌کاری کمینه مورد استفاده در این آزمایش‌ها (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 روان‌کار می‌باشد. در این دستگاه روغن و جریان هوا با نرخ جریان کنترل شده وارد نازل اتمیزه کننده می‌شوند.

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

[1] Palm kernel oil
[2] UNIPEQ
[3] UKM

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.11.0]

جدول 2 مشخصات و خواص فیزیکی روغن‌های مورد استفاده در فرآیند سنگ‌زنی با روان‌کاری کمینه

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

نوع روغن روان‌کار	شرکت سازنده	گرید محصول	چگالی در دمای 15°C (gcm^{-3})	خواص فیزیکی روغن: ویسکوزیته سینماتیک (در 40°C)	نقطه اشتعال (°C)	نقطه ریزش (°C)
روغن معدنی پارافینی	گلف وسترن اویل[1]	سایی-[2] 40 [21]	0.901	140	220	-18
روغن هیدروکرک شده	اویلهلد[3]	تول‌گرایند تی[4] 600 [22]	0.84	7.1	150<	-15
روغن مصنوعی پلی آلفا الفین	اویلهلد	سینتوگرایند تی‌تی‌کی [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 بورد روغن پالم مالزی[6] انجام شده است.

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

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

عناصر	نوع روغن: روغن معدنی درصد وزنی%	روغن هیدروکرک شده درصد وزنی%	روغن مصنوعی درصد وزنی%	عناصر	نوع روغن: روغن معدنی درصد وزنی%	روغن هیدروکرک شده درصد وزنی%	روغن مصنوعی درصد وزنی%
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	روتنیم	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 تست‌های سنگ‌زنی با روان‌کاری 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

نتایج آن تحقیق نشان داده است که در شرایط آزمایشگاهی بررسی شده، متغیرهای بهینه پاشش سیال در روان‌کاری کمینه عبارتند از: نرخ جریان روغن روان‌کار $Q_l = 150mlh^{-1}$، نرخ جریان گاز $Q_g = 30lmin^{-1}$، زاویه نازل $\alpha = 15°$ و فاصله نازل تا محل هدف پاشش $L = 30mm$. در "شکل 5" شماتیک نازل، چرخ سنگ و نقطه هدف پاشش روان‌کار نشان داده شده است. نقطه هدف روان‌کاری در ارتفاع H=15mm از سطح قطعه‌کار و فاصله L=30mm از نوک نازل قرار دارد و روی چرخ سنگ واقع شده است. قابل توجه است که انتخاب بهینه متغیرهای روان‌کاری کمینه، موجب ارتقای عملکرد این روش در کاهش نیروهای سنگ‌زنی، کاهش زبری سطح و بهبود کیفیت سطح قطعه‌کار می‌شود. در این‌جا نیز از این مقادیر برای ستآپ آزمایشگاهی استفاده شد.

نیروهای مماسی و عمودی سنگ‌زنی به‌وسیله دینامومتر پیزوالکتریک سه محوره کیستلر مدل A9257 و شارژ آمپلی‌فایر کیستلر مدل 5019 اندازه‌گیری شد. همچنین برای ثبت داده‌ها از یک سیستم اکتساب داده

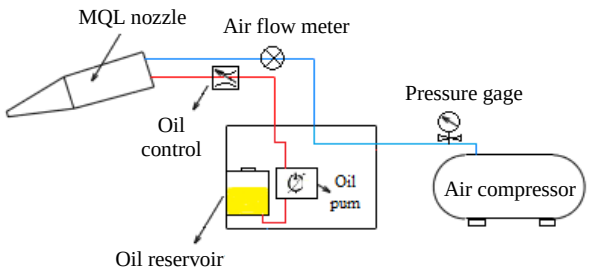


Fig. 3 Schematic of the MQL system

شکل 3 شماتیک سیستم روان‌کاری کمینه

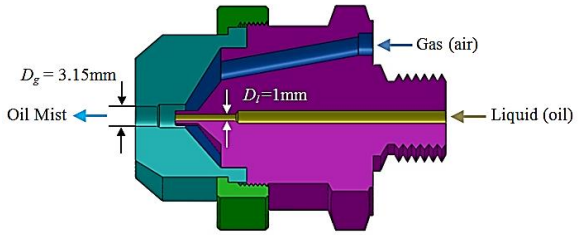


Fig. 4 Schematic of the nozzle of the MQL system

شکل 4 شماتیک نازل سیستم روان‌کاری کمینه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.11.0]

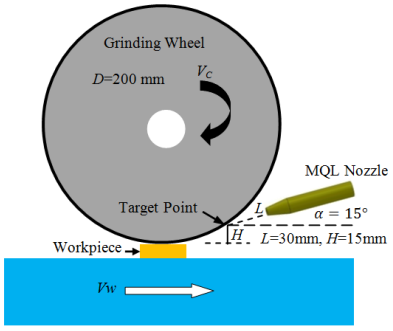


Fig. 5 Schematic of the MQL nozzle, grinding wheel and lubrication target point

شکل 5 شماتیک نازل، چرخ سنگ و نقطه هدف روان‌کاری

مناسب با مدل NI cDAQ-9174 استفاده شد. زبری سطح نمونه‌های سنگ‌زنی توسط دستگاه زبری‌سنج پرتابل میتوتویو مدل SJ-201 اندازه‌گیری شد. زبری سطح نمونه‌ها در دو حالت: 1- در راستای سنگ‌زنی و 2- عمود بر راستای سنگ‌زنی اندازه‌گیری شدند. در کلیه تست‌های زبری‌سنجی، طول نمونه‌برداری روی دستگاه زبری‌سنج به میزان 1.75 mm تنظیم شد. در این آزمایش‌ها دو مقدار زبری متوسط (R_a) و زبری متوسط ده نقطه (R_z) اندازه‌گیری شد. همچنین برای هر نمونه، زبری‌سنجی در پنج نقطه متفاوت از سطح قطعه‌کار انجام شد و سپس مقادیر متوسط زبری محاسبه گردید. قابل ذکر است که هر آزمایش سنگ‌زنی، پنج مرتبه با شرایط یکسان تکرار شد و مقدار متوسط نتایج آن‌ها به عنوان نتیجه نهایی ثبت گشت. در آزمایش‌های این پژوهش متغیرهای براده‌برداری شامل عمق براده‌برداری، سرعت پیشروی و سرعت محیطی چرخ سنگ (سرعت برش)، و همچنین متغیرهای پاشش سیال، ثابت نگه داشته شدند و تنها نوع روغن در روان‌کاری کمینه و جنس چرخ سنگ تغییر داده شد. مقادیر متغیرهای براده‌برداری، متغیرهای روان‌کاری کمینه، و مشخصات کلیه تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها در جدول 5 به‌طور خلاصه نشان داده شده است.

3- نتایج

3-1- نیروهای سنگ‌زنی

به‌طور کلی در فرآیند سنگ‌زنی تخت سه مؤلفه نیرو وجود دارد. این مؤلفه‌های نیرو عبارتند از: 1- نیروی مماسی (F_t)، 2- نیروی عمودی (F_n) و 3- نیروی محوری (F_a). در "شکل 6" مؤلفه‌های نیروهای سنگ‌زنی نشان داده شده است. نیروی مماسی در سطح تماس سنگ- قطعه‌کار و در راستای سرعت محیطی سنگ بوجود می‌آید و حاصل نیروی برش دانه‌ها و نیروی اصطکاک بین دانه‌ها و قطعه‌کار است و نقش اصلی را در مقدار توان مصرفی سنگ‌زنی (P) دارد.

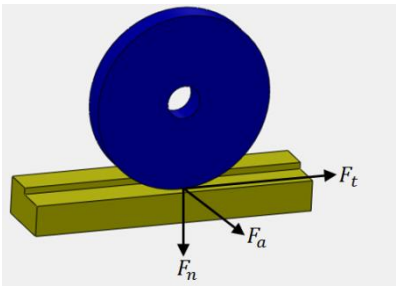


Fig. 6 Tangential, normal and axial forces in grinding process

شکل 6 نیروهای مماسی، عمودی و محوری در فرآیند سنگ‌زنی

جدول 5 تجهیزات و متغیرهای آزمایش

Table 5 Experimental setup and parameters

نوع تجهیزات و متغیرهای آزمایش	توضیحات
ماده قطعه‌کار	نمونه‌های سرامیک زیرکونیا (ZrO_2 + 3 mol% Y-TZP) با ابعاد 24×10×3.6 mm
ماشین سنگ‌زنی	ماشین سنگ‌زنی تخت ناگاایچی 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 سنگ‌زنی	سنگ‌زنی مخالف
سرعت چرخ سنگ (v_s)	30 ms^{-1}
سرعت قطعه‌کار (v_w)	20 m/min و 15
عمق براده‌برداری (a_p)	25 µm و 15
نوع خنک کاری/روان‌کاری	روان‌کاری کمینه
نوع روغن در روان‌کاری 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 اتمیزه‌کننده	30 l/min
فاصله نازل از نقطه هدف (L)	30 mm
زاویه نازل (α)	15°
ابزار تراش چرخ سنگ	ابزار تراش ترمزدار نورتون مدل4597 همراه با چرخ سنگ گرید: 38A60-MVBE
ابزار تیزکاری چرخ سنگ	بلوک اکسیدآلومینیوم نورتون- گرید: 38A150-I8VBE

با توجه به رابطه (1) توان مصرفی سنگ‌زنی (P) از حاصل‌ضرب نیروی مماسی سنگ‌زنی (F_t) و سرعت برش (v_s) به‌دست می‌آید [25].

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

نیروی عمودی سنگ‌زنی (F_n) در ناحیه تماس سنگ- قطعه‌کار و عمود بر سطح تماس وارد می‌شود. مقدار نیروی عمودی بسیار بزرگتر از نیروی مماسی سنگ‌زنی است. بنابراین نیروی عمودی می‌تواند باعث تغییر شکل الاستیک قطعه‌کار، ابزار (چرخ سنگ) و سازه ماشین در جهت عمود بر سطح تماس شود. نیروی عمودی سنگ‌زنی (F_n) بستگی زیادی به کندی یا تیزی دانه‌های سنگ و مقدار سختی سطح قطعه‌کار دارد. نیروی محوری سنگ‌زنی (F_a) زمانی ایجاد می‌شود که ابزار ساینده حرکت نسبی جانبی نیز داشته باشد. اما با توجه به این‌که در آزمایش‌های این پژوهش حرکت جانبی بین چرخ‌سنگ و قطعه‌کار وجود ندارد، از این‌رو تنها دو مؤلفه نیروی مماسی (F_t) و نیروی عمودی (F_n) در عملیات سنگ‌زنی نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. در نمودارهای "شکل 7 و 8" نتایج اندازه‌گیری نیروهای مماسی و عمودی سنگ‌زنی به ترتیب نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها می‌توان در شرایط روان‌کاری کمینه، تأثیر نوع روغن و جنس چرخ سنگ را بر نیروهای فرآیند سنگ‌زنی سرامیک زیرکونیا نشان داد. در نمودار نیروی مماسی سنگ‌زنی، مشاهده می‌شود که سنگ الماس با زمینه رزینی، زمینه ویتریفاید و زمینه فلزی به‌ترتیب بیشترین نیروهای مماسی سنگ‌زنی را ایجاد می‌کنند.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.11.0]

اما در نمودار نیروی عمودی، چرخ سنگ با زمینه فلزی بیشترین نیروی عمودی سنگ‌زنی را ایجاد می‌کند و سنگ‌های رزینی و ویتریفاید به ترتیب در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. نیروی مماسی سنگ‌زنی ارتباط مستقیمی با اصطکاک سطح تماس سنگ-قطعه‌کار دارد. هر چه اصطکاک سطح تماس سنگ-قطعه‌کار کمتر باشد، نیروی مماسی نیز کمتر خواهد بود. اصطکاک سنگ فلزی-قطعه‌کار (سرامیک) کمتر از اصطکاک سنگ ویتریفاید-سرامیک است و اصطکاک سنگ ویتریفاید-سرامیک نیز کمتر از اصطکاک سنگ رزین-سرامیک می‌باشد. اما بیشترین مقدار نیروی عمودی مربوط به چرخ سنگ الماس با زمینه فلزی است.

در واقع این نوع سنگ زمانی که در تماس با قطعه‌کار سرامیکی قرار می‌گیرد به‌دلیل فلزی بودن زمینه آن و داشتن سفتی بالا، جابه‌جایی الاستیک عمودی چندانی نداشته و از این‌رو نیروهای عمودی بیشتری توسط آن ایجاد می‌شود. در حالی که سنگ رزینی نسبت به سنگ فلزی، سفتی کمتری دارد و از این رو نیروهای عمودی کمتری در تماس با آن ایجاد می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که کمترین نیروهای عمودی سنگ‌زنی مربوط به چرخ سنگ ویتریفاید می باشد. دلیل این موضوع این است که

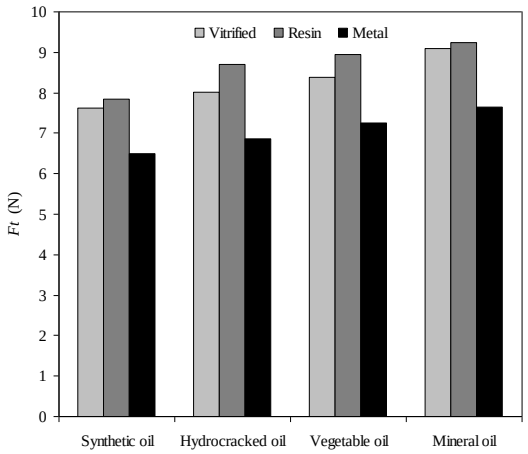


Fig. 7 Effect of oil type and grinding wheel material on tangential forces in MQL grinding process

شکل 7 تأثیر نوع روغن و جنس چرخ سنگ بر نیروهای مماسی در فرآیند سنگ‌زنی با روان‌کاری کمینه

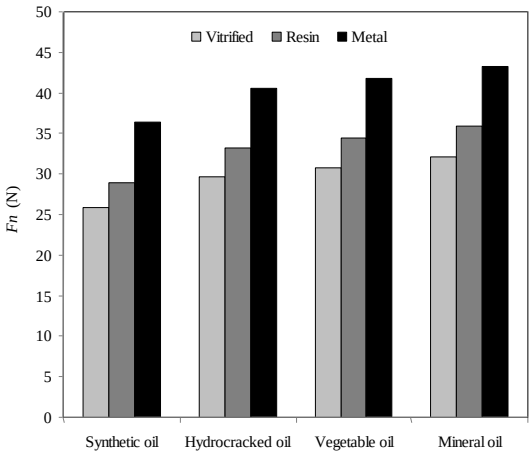


Fig. 8 Effect of oil type and grinding wheel material on normal forces in MQL grinding process

شکل 8 تأثیر نوع روغن و جنس چرخ سنگ بر نیروهای عمودی در فرآیند سنگ‌زنی با روان‌کاری کمینه

ساختار زمینه سنگ ویتریفاید از جنس شیشه است و در حین تماس با قطعه و براده‌برداری به تدریج شکسته می‌شود. در این نوع سنگ معمولاً به دانه‌های کندتر الماس که سایش بیشتری پیدا کرده‌اند، نیروی بیشتری وارد شده و در نتیجه شکست زمینه در این نقاط بیشتر اتفاق می‌افتد. با شکست مداوم زمینه سنگ ویتریفاید، پیوسته دانه‌های جدید و تیز الماس ظاهر می‌شود. این خاصیت را خاصیت خودتیزکنندگی چرخ سنگ ویتریفاید می‌نامند. به‌دلیل خاصیت خودتیزکنندگی، این چرخ سنگ دارای کمترین نیروی عمودی سنگ‌زنی می‌باشد. در حالی که در سنگ‌های الماس با زمینه رزینی و فلزی خاصیت خودتیزکنی بسیار ضعیف است و دانه‌ها پس از مدتی براده‌برداری، کند شده و نیروهای عمودی را افزایش می‌دهند. همچنین "شکل‌های 5 و 6" تأثیر نوع روغن بر نیروهای سنگ‌زنی را نیز نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که در شرایط روان‌کاری کمینه، به ترتیب روغن مصنوعی پلی آلفا الفین، روغن هیدروکرک شده، روغن گیاهی و روغن معدنی همراه با کمترین نیروهای سنگ‌زنی می‌باشند. تأثیر نوع روغن بر نیروهای سنگ‌زنی را می‌توان با خواص روان‌کاری روغن‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها توضیح داد. در فرآیند سنگ‌زنی سرامیک‌ها، دانه‌های الماس توزیع شده بر سطح چرخ سنگ با سرعت زیاد (برابر با سرعت محیطی چرخ سنگ) از سطح قطعه‌کار براده-برداری می‌کنند. در زمان براده‌برداری درگیرشدن چرخ سنگ با قطعه‌کار سبب افزایش دما و فشار در ناحیهٔ تماس سنگ-قطعه‌کار می‌شود. از این‌رو، پایداری اکسیداسیون روغن پایه در دمای بالا (یا پایداری حرارتی آن) در حفظ عملکرد روان‌کاری یا روان‌کنندگی روغن بسیار مهم است. به همین منظور از روغن‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها تست پایداری اکسیداسیون به عمل آمد. نتایج تست پایداری اکسیداسیون روغن‌ها در "شکل 7" نشان داده شده است. این تست براساس استاندارد ASTM D2272 انجام می‌شود و به تست آر پی وی اُ تی[1] یا تست آر بی اُ تی[2] معروف است. در این تست نمونه روغن مورد آزمایش همراه با مقداری آب و یک کاتالیزور کویل مس در یک ظرف شیشه‌ای قرار داده شده و سپس ظرف شیشه‌ای در یک مخزن تحت فشار گذاشته می‌شود. سپس مخزن تا 90 psi به‌وسیله اکسیژن خالص پر شده و تحت فشار گاز اکسیژن قرار می‌گیرد. پس از آن مخزن استوانه‌ای تحت فشار در دستگاه تست آر بی اُ تی در محل استقرار خود قرار داده می‌شود. در آنجا در یک محیط با دمای ثابت 150℃ با سرعت 100 rpm حول محور خود چرخانده می‌شود. هنگامی که دمای مخزن و محتویات آن افزایش می‌یابد، فشار مخزن نیز افزایش پیدا می‌کند. در این حالت فشار به یک مقدار ماکزیمم می‌رسد (P_{max}) و سپس به‌دلیل اکسیداسیون روغن و مصرف اکسیژن، رفته رفته فشار مخزن کاهش می‌یابد. نقطه‌ای که در آن نسبت به فشار ماکزیمم، افت فشار 25 psi (1.75 bar) به‌وجود آمده است به عنوان نقطه (P_{set}) ثبت می‌شود. براساس این استاندارد، مدت زمان لازم برای رسیدن از نقطه P_{max} به P_{set}، زمان آر بی اُ تی نامیده می‌شود. پایداری روغن در برابر اکسیداسیون به پایه روغن و افزودنی‌های آنتی‌اکسیدان روغن بستگی دارد. ترکیبات آلی حاوی فسفر، گوگرد و نیتروژن با دور کردن اکسیژن، مانع از تسریع در روند اکسید شدن روغن می‌شوند. جواب تست پایداری اکسیداسیون روغن‌ها به دقیقه گزارش می‌شود و عدد آر بی اُ تی پایین نشان از کم بودن میزان آنتی اکسیدان موجود در روغن می‌باشد. با توجه به "شکل 9" پایداری اکسیداسیون روغن مصنوعی پلی آلفا الفین، روغن هیدروکرک شده، روغن معدنی و روغن گیاهی به ترتیب 1023، 1005،

[1] Rotary Pressure Vessel Oxidation Test (RPVOT)
[2] Rotating Bomb Oxidation Test (RBOT)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.11.0]

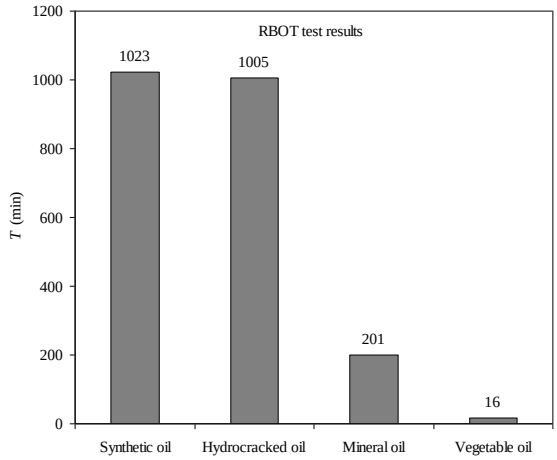


Fig. 9 The oxidation stability test results of the applied oils in the experiments

شکل 9 نتایج آزمایش پایداری اکسیداسیون روغن‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها

201 و 16 دقیقه به‌دست آمده است.

مشخص است که روغن مصنوعی پلی‌آلفاالفین و روغن هیدروکرک شده نسبت به بقیهٔ روغن‌ها از جمله روغن معدنی و گیاهی پایداری اکسیداسیون بسیار بیشتری دارند. نتیجه آن قابلیت عالی این روغن‌ها در روان‌کاری مرزی ناحیهٔ تماس سنگ-قطعه‌کار در دماهای بالا و کاهش نیروهای سنگ‌زنی می‌باشد. در حالی که روغن‌های معدنی و گیاهی استفاده شده در شرایط سخت دمای بالای ناحیه تماس سنگ-قطعه‌کار دارای پایداری حرارتی کمتری بوده و نیروهای بیشتری ایجاد می‌کنند. از این‌رو همچنان که در "شکل‌های 7 و 8" مشاهده می‌شود، به ترتیب روغن مصنوعی پلی آلفا الفین، روغن هیدروکرک شده، روغن گیاهی و روغن معدنی کمترین نیروی سنگ‌زنی را ایجاد می‌کنند. قابل توجه است که روغن معدنی با وجود داشتن پایداری حرارتی بالاتر نسبت به روغن گیاهی، نیروهای سنگ‌زنی 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- قطعه‌کار می‌باشد.

3-2- زبری سطح

زبری سطح کمیتی است که میزان ناهمواری‌ها (پستی‌ها و بلندی‌های) حاصل از برش دانه‌های سنگ از سطح قطعه‌کار را نمایان می‌سازد و در بررسی وضعیت کیفیت سطح سنگ‌زنی شده، شاخص بسیار مهمی است. در "شکل 10 و 11" به ترتیب نتایج اندازه‌گیری زبری سطح Ra و Rz در راستای سنگ‌زنی نشان داده شده است. "شکل 12 و 13" نیز به ترتیب نتایج اندازه‌گیری زبری سطح Ra و Rz در حالت عمود بر راستای سنگ‌زنی را نشان می‌دهند.

نمودارهای زبری، تأثیر نوع روغن و جنس چرخ سنگ را بر ناهمواری‌های سطح سنگ‌زنی شده نشان می‌دهند. به‌طور کلی مشاهده می‌شود که چرخ سنگ الماس با زمینه رزینی بهترین صافی سطح (کمترین ناهمواری) را ایجاد می‌کند و سنگ‌های با زمینه ویتریفاید و فلزی در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. این نتیجه نشان می‌دهد که چسب رزینی چرخ سنگ در محیط روان‌کاری کمینه با روغن غیرحل‌شونده، صافی سطح نمونه را بهبود می‌بخشد. سنگ زمینه ویتریفاید به دلیل خاصیت خودتیزکنی خود و داشتن دانه‌های تیز، در حین سنگ‌زنی معمولاً شیارهای براده‌برداری عمیق‌تری

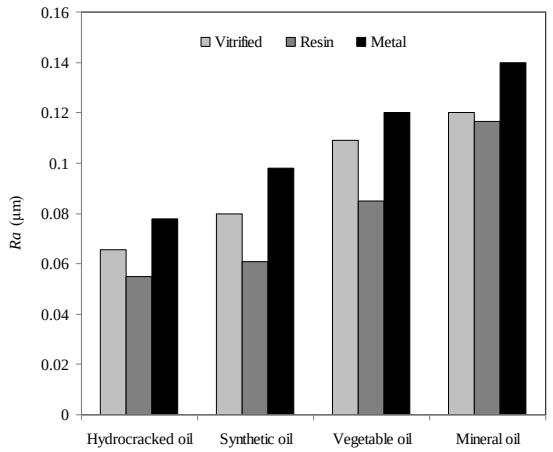


Fig. 10 Effect of oil type and grinding wheel material on surface roughness values R_a along the grinding direction

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

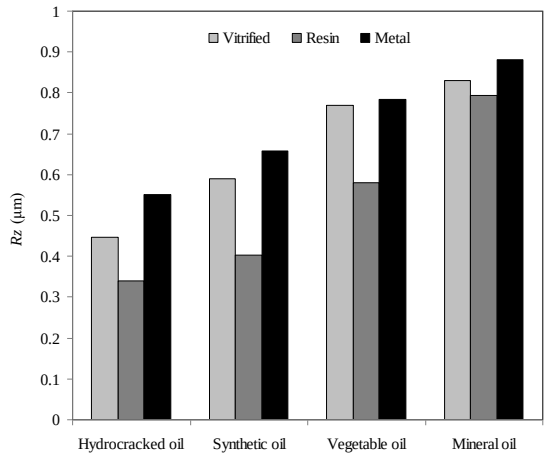


Fig. 11 Effect of oil type and grinding wheel material on surface roughness values R_z along the grinding direction

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

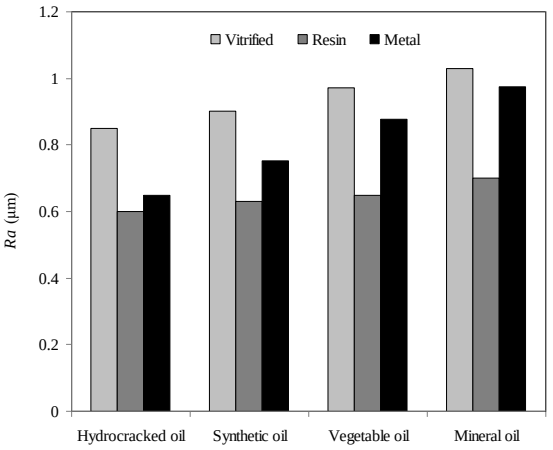


Fig. 12 Effect of oil type and grinding wheel material on surface roughness values R_a across the grinding direction

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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.11.0]

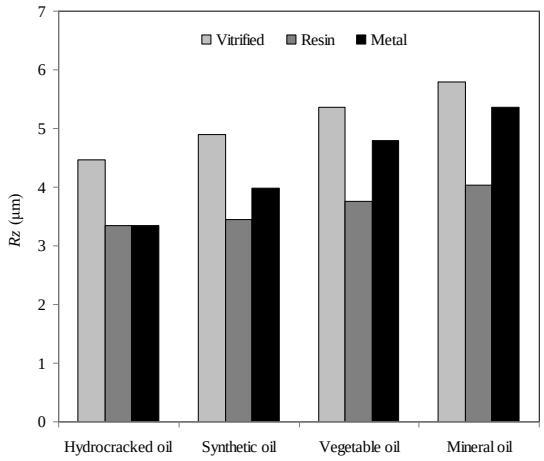


Fig 13 Effect of oil type and grinding wheel material on surface roughness values R_z across the grinding direction

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

نسبت به سنگ رزینی روی سطح قطعه‌کار ایجاد می‌کند و از این رو زبری سطح بیشتری نسبت به سنگ رزینی دارد. اما سنگ الماس زمینه فلزی نسبت به دو سنگ قبلی دارای مستحکم‌ترین جنس زمینه است. سفتی بالای زمینه سنگ فلزی در تماس با قطعه‌کار سرامیکی نیروهای عمودی سطح تماس را افزایش داده و موجب پیدایش نواحی شکست ترد روی سطح قطعه می‌شود. عمدتاً سرامیک‌های 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-قطعه‌کار، تشکیل میکروترک‌ها، انتشار آن‌ها و ایجاد حفره‌های عمیق را تشدید می‌کند. از این‌رو سنگ‌زنی سرامیک زیرکونیا با چرخ سنگ الماس زمینه فلزی همراه با بیشترین زبری سطح می‌باشد. همچنین با توجه به نمودارهای "شکل‌های 10 تا 13" مشخص است که در فرآیند سنگ‌زنی نمونه‌های زیرکونیا و در شرایط روان‌کاری کمینه، به ترتیب روغن هیدروکرک شده، روغن مصنوعی پلی‌آلفاالفین، روغن گیاهی و روغن معدنی بیشترین اثرگذاری را در کاهش زبری سطح نمونه‌ها دارند. این ترتیب با ترتیب مشاهده شده برای کاهش نیروهای سنگ‌زنی کمی تفاوت دارد. در واقع روغن‌های هیدروکرک‌شده و مصنوعی پلی‌آلفاالفین هر دو نتایج بسیار خوبی در رابطه با زبری سطح نمونه‌ها نشان داده‌اند. اما در این‌جا روغن هیدروکرک شده نسبت به روغن مصنوعی پلی‌آلفاالفین زبری سطح کمتری ایجاد نموده است. نتایج آنالیز عنصری (ایکس آر اف) روغن‌ها در جدول 3 نشان می‌دهد که نوع و درصد وزنی عناصر موجود در این دو روغن بسیار شبیه به هم هستند. قابل توجه است که افزودنی‌های فشار شدید[1] که معمولاً از ترکیبات فسفر، سولفور وکلر تشکیل شده‌اند از جمله مهمترین افزودنی‌هایی است که به روغن‌های پایه ماشین‌کاری اضافه می‌گردد. بنابراین تفاوت عملکرد این دو روغن در بهبود صافی سطح سنگ‌زنی احتمالاً مربوط به انحلال افزودنی‌های آن در روغن پایه می‌باشد. انحلال افزودنی‌ها در روغن مصنوعی پلی‌آلفاالفین نسبت به روغن هیدروکرک‌شده کمتر می‌باشد. تحقیقات نشان داده است که هر چه قابلیت انحلال روغن پایه کمتر باشد احتمال اینکه افزودنی‌های اضافه شده به روغن قبل از آن‌که عملکرد موردنظر را انجام دهند، از روان‌کار جدا شوند بیشتر می‌شود [26]. از این‌رو روغن مصنوعی پلی‌آلفاالفین نسبت به روغن هیدروکرک شده قابلیت انحلال کمتری در رابطه با افزودنی‌ها داشته و زبری سطح بیشتری ایجاد می‌کند. پس از دو روغن ذکر شده، روغن گیاهی بیشترین تأثیر را بر کاهش زبری سطح نمونه‌های سرامیک زیرکونیا نشان داده است. قابل توجه است که روغن گیاهی دانه پالم مورد استفاده در آزمایش‌ها، تنها از اسیدهای چرب (بیش از 81% از اسیدهای چرب اشباع شده و مابقی آن از اسیدهای چرب غیراشباع) تشکیل شده است و هیچ‌گونه افزودنی به آن اضافه نشده است (جدول 4). تحقیقات نشان داده است که اسیدهای چرب موجود در روغن گیاهی دارای خاصیت ترکنندگی بالا بوده و می‌توانند با جذب بر سطح فلزات و تشکیل فیلم روان‌کاری مرزی، ضریب اصطکاک را کاهش بدهند [27]. در این ارتباط گروه‌های قطبی موجود در اسیدهای چرب روغن گیاهی با پیوندهای (COOH-) به‌صورت فیزیکی جذب سطح فلزات می‌شوند. علاوه بر فلزات، جذب فیزیکی اسیدهای چرب در سرامیک‌های اکسیدی نیز تأیید شده است. پژوهشی که توسط اشتات [28] در مورد سرامیک‌ها انجام شد، نشان می‌دهد که اسیدهای چرب از طریق پیوندهای هیدروژنی خود به یون‌های اکسیدی سرامیک آلومینا جذب می‌شوند. در این‌جا نیز روغن گیاهی دانه پالم که از اسیدهای چرب تشکیل شده است، می‌تواند به‌صورت فیزیکی یک فیلم روان‌کننده جذب شده روی سطح سرامیک اکسیدی زیرکونیا ایجاد کند. با این حال، این فیلم روان‌کننده دارای استحکام حرارتی و ظرفیت تحمل فشار محدود است. در این مطالعه، زبری سطح به‌دست آمده از روغن گیاهی به احتمال زیاد به دلیل عدم ثبات فیلم روان‌کننده در شرایط سخت تماس سنگ- قطعه‌کار (دمای بالا، فشار بالا و سرعت برش زیاد) می‌باشد. از این رو لازم است که رفتار تریبولوژیکی و پایداری حرارتی روغن گیاهی بهبود یابد تا در شرایط روان‌کاری کمینه در فرآیند سنگ‌زنی سرامیک‌های سخت عملکرد روان‌کاری بهتری نشان دهد. اصلاح خواص تریبولوژیکی روغن‌های گیاهی می‌تواند به عنوان مثال با اضافه کردن افزودنی‌های فشار شدید یا ضد سایش[2] انجام شود. همچنین روش‌های متعددی برای بهبود پایداری حرارتی روغن‌های گیاهی مانند اصلاح مواد افزودنی، اصلاح شیمیایی روغن‌های پایه گیاهی (به‌عنوان مثال، اپوکسی کردن روغن پایه) و اصلاح ژنتیکی دانه‌های روغنی ارائه شده است [30,29]. علاوه بر آن از مقایسه متناظر نمودارهای "شکل‌های 10 و 11" به ترتیب با نمودارهای "شکل‌های 12 و 13" این نتیجه به‌دست می‌آید که مقادیر زبری در راستای سنگ‌زنی بسیار کمتر از مقادیر زبری در جهت عمود بر راستای سنگ‌زنی می‌باشد. این موضوع به این دلیل رخ می‌دهد که براده‌برداری دانه‌های سنگ در راستای سنگ‌زنی صورت می‌پذیرد و شیارهای حاصل از براده‌برداری همگی در راستای سنگ‌زنی ایجاد می‌شوند. شیارهای برش در راستای سنگ‌زنی، مستقیم هستند و پستی و بلندی ندارند. در حالی‌که میزان ناهمواری‌های سطح سنگ‌زده شده، در جهت عرضی (عمود بر راستای سنگ‌زنی) بواسطه وجود شیارهای متوالی بسیار بیشتر است. از این رو مقادیر زبری سطح در جهت عرضی، بسیار بیشتر از زبری سطح در راستای سنگ‌زنی به‌دست آمده است.

3-3- بافت سطح سنگ‌زنی شده نمونه‌ها

در این پژوهش علاوه بر اندازه‌گیری زبری سطح، بافت سطحی نمونه‌ها 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 نمونه‌ها نشان داده شده است. "شکل 14"

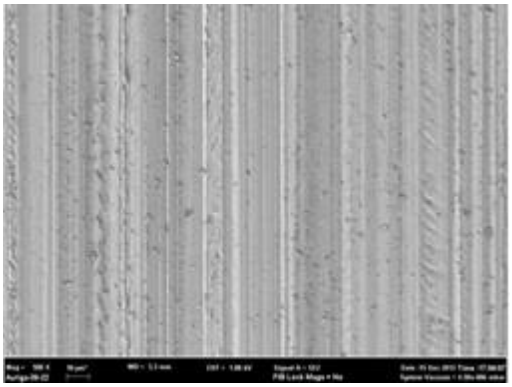
[1] Extreme pressure (EP)

[2] Anti wear (AW)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.11.0]

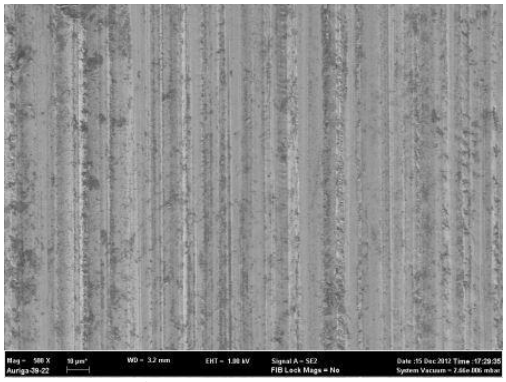
مربوط به سطح نمونه‌هایی است که توسط چرخ سنگ الماس زمینه رزینی و در شرایط روان‌کاری کمینه با روغن‌های مختلف، سنگ‌زنی شده‌اند.

همچنین کلیه نمونه‌ها با عمق براده‌برداری 25μm، سرعت پیشروی 15m/min و سرعت برشی $30ms^{-1}$ سنگ‌زنی شدند. به‌طور کلی هر چه میزان عیوب سطحی (میکروترک‌ها، شکستگی‌ها و حفره‌ها) روی سطح سنگ‌زنی شده نمونه‌ها کمتر باشد به معنای وضعیت بهتر بافت سطحی آن‌ها است. مقایسه "اشکال 14a و 14b" نشان می‌دهد که در فرآیند سنگ‌زنی سرامیک زیرکونیا، نوع روغن بر بافت ظاهری سطح سنگ‌زده شده تأثیرگذار است. همان‌گونه که در بخش 2-3 در مورد تأثیر نوع روغن‌ها بر زبری سطح سنگ‌زنی بحث شد، ترتیب تأثیر روغن‌ها بر زبری سطح زیرکونیا (از زبری کم به زبری زیاد) به‌صورت زیر به‌دست آمد: 1- روغن هیدروکرک شده، 2- روغن مصنوعی پلی‌آلفا الفین، 3- روغن گیاهی، 4- روغن معدنی. این ترتیب با وضعیت بافت ظاهری سطح سنگ‌زنی شده در تصاویر "شکل 14" مطابقت



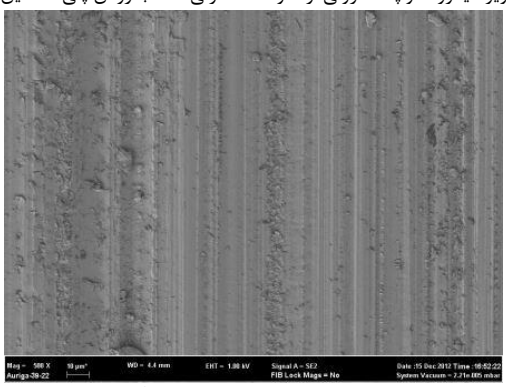
a) SEM micro-graph of the sample grinded with hydrocracked oil

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



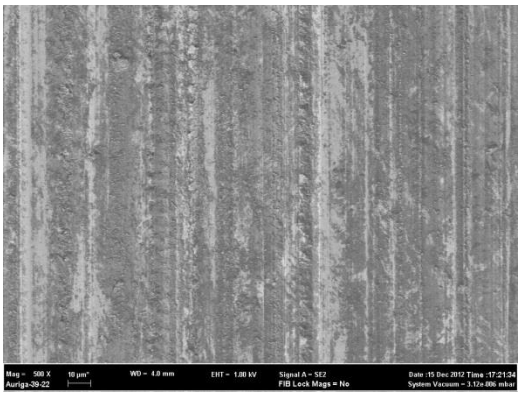
b) SEM micro-graph of the sample grinded with PAO synthetic oil

(ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه سنگ‌زنی شده با روغن پلی‌آلفاالفین



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

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



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

(د) تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه سنگ‌زنی 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: $v_s = 30\ \mathrm{ms}^{-1}, a_p = 25\ \mu\mathrm{m}, v_w = 15\ \mathrm{m/min}$

شکل 14 تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح نمونه‌های زیرکونیایی سنگ‌زنی شده با روغن‌های مختلف در شرایط روان‌کاری کمینه، بزرگنمایی ×500
متغیرهای برش: $v_s = 30\ \mathrm{ms}^{-1}, a_p = 25\ \mu\mathrm{m}, v_w = 15\ \mathrm{m/min}$

دارد. بنابراین از میان چهار روغن مورد بررسی، روغن هیدروکرک شده بهترین بافت سطحی را ایجاد می‌کند و از این رو برای به‌کارگیری در روان‌کاری کمینه برای فرآیند سنگ‌زنی سرامیک‌ها توصیه می‌شود. در "شکل 15" تأثیر جنس زمینه چرخ سنگ الماس بر بافت سطح نمونه‌های زیرکونیایی که در شرایط روان‌کاری کمینه با روغن هیدروکرک‌شده سنگ‌زنی شده‌اند، نشان داده شده است. مقایسه تصاویر "شکل 15a تا 15d" تأثیر قابل ملاحظه جنس زمینه چرخ سنگ الماس را بر بافت سطح نمونه‌های سرامیک زیرکونیا نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که به ترتیب سنگ رزینی (شکل 15a)، سنگ ویتریفاید (شکل 15b) و سنگ فلزی (شکل‌های 15c و 15d) بهترین بافت سطح با کمترین عیوب سطحی را ایجاد می‌کنند. مطلوب بودن سطح نمونه سنگ‌زنی 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 براده‌برداری دانه‌های سنگ نیز بر آن کم است. البته نمونه سنگ‌زنی شده با چرخ سنگ الماس زمینه ویتریفاید نیز دارای ترک و حفره نمی‌باشد، اما با این وجود عمق شیارهای حاصل از براده‌برداری در آن زیادتر است. این موضوع به علت خاصیت خودتیزکنی چرخ سنگ زمینه ویتریفاید و تجدید شدن دانه‌های الماس آن می‌باشد. دانه‌های تیز معمولاً شیارهای عمیق‌تری روی سطح ایجاد می‌کنند و از این‌رو زبری سطح را تا حدودی افزایش می‌دهند اما نیروهای سنگ‌زنی با آن‌ها کاهش می‌یابد. در تصاویر "شکل 15c و 15d" مشاهده می‌شود که سنگ فلزی به‌دلیل اعمال نیروهای عمودی بسیار زیاد بر سطح قطعه‌کار میکروترک‌های زیادی به‌وجود می‌آورد.

افزایش نیروهای عمودی در سنگ‌زنی با چرخ سنگ الماس زمینه فلزی و ایجاد میکروترک‌ها در سطح قطعه‌کار به‌دلیل سفتی (مدول الاستیسیته) بالای زمینه فلزی این نوع چرخ سنگ می‌باشد. از این رو با شرایط روان‌کاری کمینه استفاده از این نوع چرخ سنگ در سنگ‌زنی سرامیک‌ها مناسب نیست و تنها در مواردی توصیه می‌شود که نیروهای عمودی کمی ایجاد شود. برای مثال با عمق براده‌برداری بسیار کم و سرعت پیشروی کم می‌توان از بروز ترک‌های سطحی جلوگیری کرد.

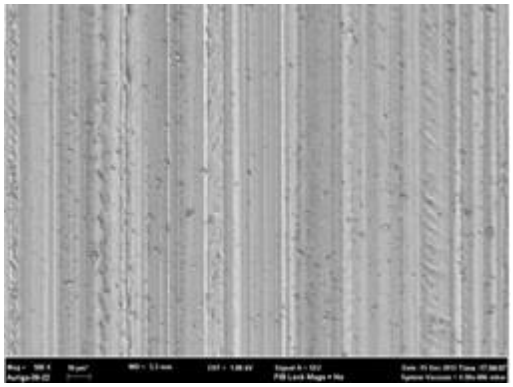
4- نتیجه گیری

در این مقاله روش روان‌کاری کمینه در فرآیند سنگ‌زنی سرامیک زیرکونیا

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

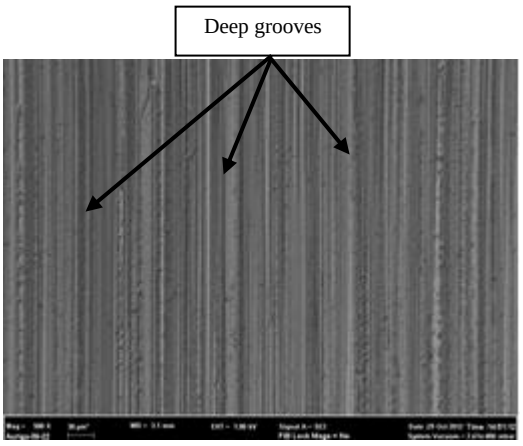
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.11.0]

مورد استفاده قرار گرفت و در آن به بررسی تأثیر نوع روان‌کار و جنس ابزار (چرخ سنگ) بر نیروهای سنگ‌زنی، زبری سطح و وضعیت بافت سطح سنگ‌زنی شده نمونه‌ها پرداخته شد. مهمترین نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به صورت ذیل خلاصه نمود:



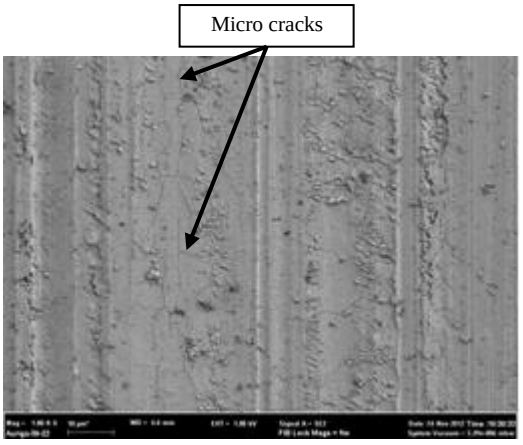
a) SEM micro-graph of the sample grinded with resin bonded diamond wheel (500×)

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



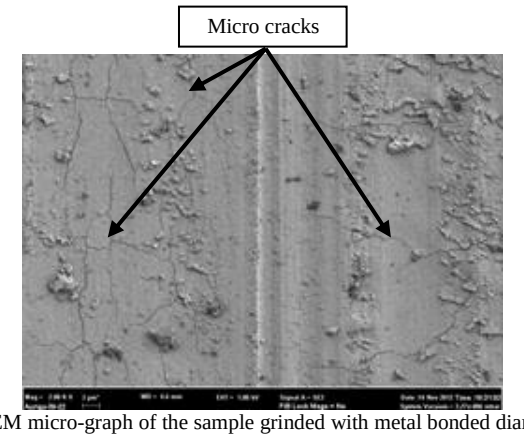
b) SEM micro-graph of the sample grinded with vitrified bonded diamond wheel (500×)

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



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

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

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

شکل 15 تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح نمونه‌های سنگ‌زنی شده زیرکونیا با چرخ سنگ‌های مختلف تحت شرایط روان‌کاری کمینه

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

1- اندازه‌گیری نیروهای فرآیند سنگ‌زنی سرامیک زیرکونیا در شرایط روان‌کاری کمینه، نشان داد که به ترتیب روغن مصنوعی پلی‌آلفا الفین، روغن هیدروکرک شده، روغن گیاهی و روغن معدنی کمترین نیروهای سنگ‌زنی را ایجاد می‌کنند. پایداری اکسیداسیون روغن پایه در دمای بالا (یا پایداری حرارتی آن) تأثیر قابل ملاحظه‌ای در حفظ عملکرد روان‌کاری روغن دارد. در این‌جا روغن مصنوعی پلی‌آلفاالفین و روغن هیدروکرک شده با داشتن بالاترین پایداری اکسیداسیون، موثرترین روغن‌ها در روان‌کاری مرزی ناحیهٔ تماس سنگ- قطعه‌کار در دماهای بالا و کاهش نیروهای سنگ‌زنی می‌باشند.

2- نمودار نیروهای مماسی سنگ‌زنی، نشان می‌دهد که به‌ترتیب چرخ سنگ های الماس با زمینه رزینی، زمینه ویتریفاید و زمینه فلزی بیشترین نیروهای مماسی سنگ‌زنی را ایجاد می‌کنند. نیروی مماسی سنگ‌زنی ارتباط مستقیمی با اصطکاک سطح تماس سنگ-قطعه‌کار دارد. هرچه اصطکاک سطح تماس سنگ-قطعه‌کار کمتر باشد، نیروی مماسی نیز کمتر خواهد بود. اما در نمودار نیروی عمودی، چرخ‌سنگ با زمینه فلزی بیشترین نیروی عمودی سنگ‌زنی را ایجاد می‌کند و سنگ‌های رزینی و ویتریفاید به‌ترتیب در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. به‌دلیل خاصیت خودتیزکنندگی، چرخ سنگ ویتریفاید دارای کمترین نیروی عمودی سنگ‌زنی می‌باشد. همچنین چرخ سنگ الماس زمینه فلزی به‌علت داشتن سفتی بالا (مدول الاستیسیته بالا)، جابه‌جایی الاستیک عمودی چندانی نداشته و از این‌رو بیشترین نیروهای عمودی توسط آن ایجاد می‌شود. ازاین‌رو با شرایط روان‌کاری کمینه استفاده از این نوع چرخ‌سنگ در سنگ‌زنی سرامیک‌ها مناسب نیست و تنها در مواردی توصیه می‌شود که نیروهای عمودی کمی ایجاد شود. برای مثال با عمق براده‌برداری بسیار کم و سرعت پیشروی کم می‌توان از بروز ترک‌های سطحی جلوگیری کرد.

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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.11.0]

کمترین زبری سطح را در سنگ‌زنی سرامیک زیرکونیا ایجاد می‌کند و سنگ‌های با زمینه ویتریفاید و فلزی در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند.

4- در فرآیند سنگ‌زنی نمونه‌های زیرکونیا و در شرایط روان‌کاری کمینه، به ترتیب روغن هیدروکرک شده، روغن مصنوعی پلی‌آلفاالفین، روغن گیاهی و روغن معدنی بیشترین اثرگذاری را در بهبود صافی سطح نمونه‌ها دارند.

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

6- مقایسه تصاویر بافت سطحی نمونه‌ها نشان می‌دهد از میان چهار روغن مورد بررسی، روغن هیدروکرک‌شده بهترین سطح ظاهری با کمترین عیوب و کمترین ناهمواری را ایجاد می‌کند و از این‌رو برای بکارگیری در روان‌کاری کمینه برای فرآیند سنگ‌زنی سرامیک زیرکونیا پیشنهاد می‌شود.

7- مقایسه تصاویر بافت سطحی نمونه‌های زیرکونیا نشان می‌دهد که چرخ‌سنگ‌های الماس زمینه رزینی و ویتریفاید در شرایط روان‌کاری کمینه به ترتیب بهترین صافی سطح با کمترین عیوب سطحی را ایجاد می‌کنند. از این رو این چرخ‌سنگ‌ها 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 می‌شود.

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 Edittion, 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 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 Edittion, 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 Edittion, 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.oelheld.com/products/metalworking-fluids/grinding-oil/toolgrind T600-grinding-oil.

[23] SintoGrind TTK - High-performance grinding fluid, Accessed on 3 March 2014; http://www.oelheld.com/products/metalworking fluids/grinding-oil/sintogrind-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. Adhvaryu, 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.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.11.0]