مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1396، دوره 17، شماره 5، ص‌ص 305-315

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بهبود عملکرد تکنیک روانکاری کمینه در فرآیند سنگزنی با استفاده از نانوسیال ترکیبی و ارتعاشات التراسونیک

فرشاد ربیعی[1]، عبدالرضا رحیمی[2*]، محمدجعفر حداد[3]

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
* تهران، صندوق پستی 15875-4413، rahimi@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 04 اسفند 1395
پذیرش: 08 فروردین 1396
ارائه در سایت: 23 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:
تکنیک روانکاری کمینه
سنگزنی با ارتعاشات التراسونیک
نانوسیال ترکیبی
دمای سنگزنی
کیفیت سطح

چکیده

تکنیک روانکاری کمینه در فرآیند سنگزنی دارای مزایای متعدد فنی و اقتصادی است. این تکنیک نه تنها عملکرد فرآیند سنگزنی شامل یکپارچگی سطح، نیروهای سنگزنی و سایشِ چرخ سنگ را بهبود می‌بخشد، بلکه به دلیل مصرف بسیار پایین سیال برشی، تکنیکی سازگار با محیط است. با وجود چنین مزایایی، این تکنیک به دلیل مصرف پایین سیال برشی، دارای مشکل جدی افزایش حرارت و در نتیجه سوختگی قطعه‌کار است. به منظور رفع این مشکل استفاده همزمان از نانوسیال ترکیبی و ارتعاشات التراسونیک پیشنهاد شده است. نانوسیال به دلیل ظرفیت انتقال حرارت بالا، می‌تواند حرارت بیشتری را از منطقه تماس دانه/ قطعه‌کار خارج کند. ارتعاشات التراسونیک نیز به دلیل مکانیزم سیکلی و کاهش زمان و طول تماس دانه/ قطعه‌کار، حرارت کمتری تولید می‌کند. در این تحقیق، نانوسیال پایه آبی حاوی ترکیب نانولوله کربنی چندجداره (با رسانندگی حرارتی بالا) و آلومینیم اکسید (با اثر روانکاری بالا) مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که استفاده همزمان نانوسیال ترکیبی با ارتعاشات التراسونیک منجر به کاهش 60.2 درصدی دمای سنگزنی (از 254 به 101 درجه سانتیگراد) نسبت به حالت خشک می‌گردد. همچنین ضریب اصطکاک و نیروی مماسی به ترتیب تا 35.9 و 69.2 درصد کاهش می‌یابند. ضمن اینکه هیچ‌گونه علائم سوختگی بر روی قطعه‌کار مشاهده نشد در حالی که در سنگزنی خشک قطعه‌کار دچار سوختگی شدید گردید. مورفولوژی سطح نیز کاهش عیوب سطحی نظیر تغییرشکل پلاستیک و جریان مواد به اطراف را نشان می‌دهد. براده‌های حاصله تشابه مکانیزم براده‌برداری در این تکنیک با تکنیک‌های متداول استفاده از سیال برشی را نشان می‌دهد.

Performance improvement of eco-friendly MQL technique by using hybrid nanofluid and ultrasonic assisted grinding

Farshad Rabiei[1], Abdolreza Rahimi[1*], Mohamadjafar Hadad[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
* P.O.B. 15875-4413, Tehran, Iran, rahimi@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 23 January 2017
Accepted 28 March 2017
Available Online 13 May 2017

Keywords:
Minimum quantity lubrication
ultrasonic assisted grinding
hybrid nanofluid
grinding temperature
surface quality

ABSTRACT

Minimum quantity lubrication (=MQL) technique has many technological and economic advantages in grinding operation. It not only improves general grinding performance such as surface integrity, grinding forces and wheel wear, but also, it is an eco-friendly technique because of its low consumption of cutting fluid. Despite these advantages, MQL technique has a serious thermal problem in grinding operations due to small amount of cooling. To overcome this problem combination of hybrid nanofluid and ultrasonic vibration has been suggested. Nanofluid can increase heat transfer from workpiece/wheel interface due to its high thermal conductivity. Also, ultrasonic machining can decrease heat generation due to its reciprocating mechanism and reduction of time and length of contact between grain and workpiece. In this research hybrid Multi Walled Carbon Nano Tubes (=MWCNT) (with high thermal conductivity) and Al_2O_3 (with good lubrication effect) nanofluid have been utilized. The results have shown that combination of MQL and UAG leads to decrease of maximum grinding temperature up to 60.2% in comparison to dry grinding (from 254ºC to 101 ºC). Moreover, friction coefficient and tangential grinding force have been reduced up to 35.9 and 69.2 percent respectively. Furthermore, no burning has been observed with combinations of these techniques while severe burning has been observed in dry grinding. Surface morphology analysis has shown decrease of plastic deformation and side flow. Finally, the generated chips have shown similarity of cutting mechanism in in the utilized techniques and conventional cutting fluids.

1- مقدمه

سیال‌های برشی نقش مهمی در خنک‌کاری، روانکاری و دور کردن براده از منطقه سنگزنی ایفا می‌کنند که منجر به بهبود کیفیت سطح و جلوگیری از سوختگی قطعه‌کار می‌گردد. علی‌رغم مزایای متعدد سیال‌های برشی، استفاده از آن‌ها با مشکلات زیست‌محیطی و سلامتی اپراتور همراه است (شکل 1 الف). از سوی دیگر خواص و کیفیت سیال برشی با گذشت زمان تغییر می-

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

F. Rabiei, A. Rahimi, M. Hadad, Performance improvement of eco-friendly MQL technique by using hybrid nanofluid and ultrasonic assisted grinding, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 305-315, 2017 (in Persian)

کند. علاوه بر این مسائل، تحقیق‌های انجام شده نشان می‌دهد اگر سیال برشی با فشار و دبی مناسب به منطقه ماشینکاری تزریق نشود، نمی‌تواند در انتقالِ حرارتِ تولیدِ شده مؤثر باشد [2,1].

از سوی دیگر هزینه سیال برشی، پمپ و فیلتر کردن آن، از هزینه ابزار[1] بیشتر است و می‌تواند سهم زیادی در هزینه کل داشته باشد [3]. گزارش شده است که در صنایع خودروسازی، 30-15 درصد از هزینه‌های تولید به استفاده از سیال برشی مربوط می‌باشد [4] (شکل 1 ب).

به منظور کاهش هزینه و مسائل زیست‌محیطی، دو روش روانکاری ارائه گردیده است: استفاده از سنگزنی خشک و استفاده از تکنیک روانکاری کمینه[2]. استفاده از سنگزنی خشک اگرچه مصرف سیال برشی را کاهش می‌دهد، اما میزان خنک‌کاری و روانکاری آن مناسب نیست. این محدودیت می‌تواند منجر به سایش شدید چرخ‌سنگ، کاهش کیفیت سطح و افزایش شدید درجه حرارت و سوختگی قطعه‌کار گردد. تکنیک روانکاری کمینه از هوای فشرده پرفشار به منظور اتمیزه کردن سیال برشی و دستیابی به قطرات بسیار ریز و نیز انتقال آن به منطقه سنگزنی بهره می‌برد [5]. محققان زیادی گزارش کرده‌اند که این تکنیک به دلیل روانکاری مؤثر و به‌موقع، دارای مزایای فنی متعددی می‌باشد. این عامل باعث بهبود کیفیتِ سطح و نیز کاهش ضریب اصطکاک و نیروهای سنگزنی می‌گردد. از سوی دیگر تکنیک روانکاری کمینه تکنیکی سازگار با محیط است که مصرف سیال برشی در آن به 0.001 تکنیک‌های متداول روانکاری کاهش یافته است. این تکنیک پتانسیلِ جایگزینی با تکنیک متداول پاشش پیوسته سیال برشی را دارا می‌باشد.

ربیعی و همکاران تکنیک روانکاری کمینه را برای سنگزنی فولادهای سخت و نرم مورد استفاده قرار دادند. آنها گزارش دادند که در مورد فولادهای

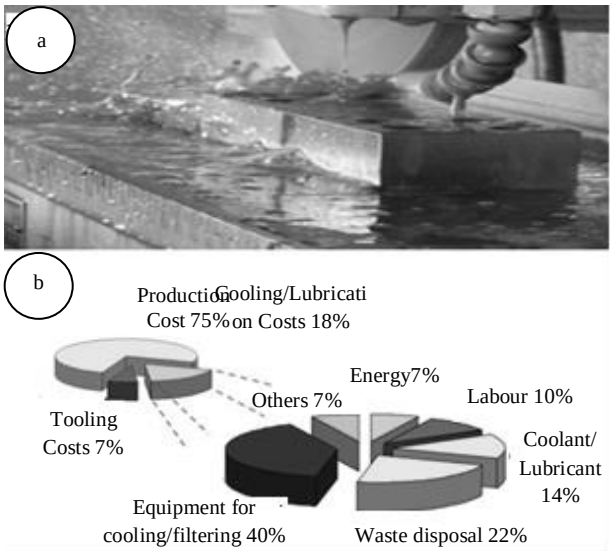

Fig 1 Disadvantages of Metal Cutting Fluids: a) Operators health risks and environmental concerns, b) High cost: Distribution of cooling/lubricant costs in machining operations in the automotive industry [4]

شکل 1 محدودیت‌های سیال‌های برشی: الف) ریسک‌های سلامتی اپراتور و نگرانی‌های زیست‌محیطی، ب) هزینه بالا: توزیع هزینه‌های خنک‌کاری روانکاری در فرآیندهای ماشینکاری در صنایع اتومبیل‌سازی [4]

[1] Tool cost
[2] Minimum Quantity Lubrication (=MQL)

سخت، تکنیک روانکاری کمینه به صورت همزمان منجر به بهبود کیفیت سطح و کاهش نیروهای سنگزنی و اصطکاک می‌گردد [7,6].

علی‌رغم مزایای متعدد تکنیک روانکاری کمینه، این تکنیک به دلیل خنک‌کاری نامناسب، منجر به افزایش دما، آسیب‌های حرارتی و سوختگی قطعه‌کار می‌گردد. در فرآیند سنگزنی به دلیل تولید حرارت بالا، در صورت عدم استفاده از سیال برشی با قابلیت خنک‌کاری و روانکاری مناسب، ضمن ایجاد آسیب‌های حرارتی، خطاهای ابعادی نیز بروز می‌یابد. بنابراین تکنیک‌های سنگزنی خشک و سنگزنی با استفاده از تکنیک روانکاری کمینه همچنان قابلیت حضور مؤثر در صنایع مورد استفاده را به دست نیاورده‌اند. در این شرایط، کاربرد مؤثر تکنیک روانکاری کمینه در فرآیندهای با اصطکاک بالا نظیر سنگزنی، به بهبود شرایط ترمومکانیکی در منطقه سنگزنی وابسته شده است [3].

حداد و همکاران[8]، دمای منطقه سنگزنی را برای چرخ‌سنگ‌های آلومینیم‌اکسید و نیترید بور مکعبی[3] با استفاده از تکنیک روانکاری کمینه مورد مطالعه قرار دادند. آنها گزارش دادند که برای کاهش دما در منطقه سنگزنی با استفاده از تکنیک روانکاری کمینه، می‌بایست خواص خنک‌کاری/روانکاری سیال برشی بهبود یابد. آنها گزارش دادند که بیشینه دمای منطقه سنگزنی با استفاده از چرخ‌سنگ نیترید بور مکعبی و تکنیک روانکاری کمینه 110 درجه سانتیگراد می‌باشد. این درحالی است که دمای منطقه سنگزنی برای حالت خشک 130 و برای سیال‌های برشی با پاشش پیوسته 50 درجه سانتیگراد می‌باشد[8]. در تحقیق دیگر، حداد و همکاران به صورت تحلیلی و تجربی نشان دادند که تکنیک روانکاری کمینه در مقایسه با تکنیک‌های پرمصرفِ پاشش پیوسته سیال برشی نمی‌تواند نیازهای خنک‌کاری را تأمین کند. این عامل اصلی‌ترین عامل محدودکننده کاربرد تکنیک روانکاری کمینه در صنایع می‌باشد[9]. شن و همکاران گزارش دادند که تکنیک روانکاری کمینه از نظر روانکاری بسیار مؤثر می‌باشد اما از نظر خنک‌کاری توان بالایی ندارد [10].

برای غلبه بر این مشکل، توکلی، صادقی و حداد تست‌های تجربی و تحلیل‌های متعددی را انجام دادند. آنها با بهینه‌سازی پارامترهای سنگزنی، سیال‌های گوناگون و چرخ‌سنگ‌های متعدد، عملکرد تکنیک روانکاری بهینه را بهبود بخشیدند [11,8,3]. صابری و همکاران از دستگاه خنک‌کن هوای چرخشی برای بهبود خاصیت خنک‌کاری تکنیک روانکاری کمینه استفاده کردند. آنها نشان دادند که استفاده از دستگاه خنک‌کن هوای چرخشی منجر به کاهش نیروهای سنگزنی و ضریب اصطکاک نسبت به حالت پاشش پیوسته سیال برشی می‌گردد [13,12].

یک پیشنهاد مؤثر دیگر برای بهبود قابلیت‌های تکنیک روانکاری کمینه در کاربردهای صنعتی، استفاده از نانوسیال می‌باشد. نانوسیال می‌تواند با بهبود خواص خنک‌کاری/روانکاری سیال برشی، عملکرد تکنیک روانکاری کمینه را بهبود بخشد. نانوذرات نه تنها منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت سیال برشی می‌شوند بلکه خواص روانکاری سیال را نیز بهبود می‌بخشد. از این رو نانوسیال‌ها برای کاهش نیروهای ماشینکاری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. انتقال حرارت نانوسیال به دلیل وجود نانوذرات با ضریب رسانندگی حرارتی بالا و نسبت سطح به حجم بالا، بالاتر از سیال پایه می‌باشد [15,14]. ضریب رسانندگی حرارتی نانولوله‌های کربنی چندجداره[4] به مقدار چشمگیری نسبت به نانوذرات‌های متداول بیشتر است بنابراین می تواند در انتقال حرارت

[3] Cubic Boron Nitride (=CBN)
[4] Multi walled carbon nano tube (=MWCNT)

تولیدشده در سنگزنی مؤثر باشد [16]. از سوی دیگر نانوذرات آلومینیم‌اکسید دارای بهترین روانکاری نسبت به نانوذرات متداول می‌باشد از این رو می‌تواند با روانکاری مؤثر، حرارت تولیدشده در سنگزنی را کاهش دهد [17]. انتظار می‌رود تولید نانوسیال ترکیبی از نانولوله‌های کربنی چندجداره و نانوذرات آلومینیم‌اکسید بتواند خواص خنک‌کاری/روانکاری منحصربفردی را ایجاد کند. تکنیک دیگری که می‌تواند عملکرد تکنیک روانکاری کمینه را بهبود بخشد استفاده از ارتعاشات التراسونیک می‌باشد. مولایی و همکاران گزارش دادند که استفاده از ارتعاشات التراسونیک می‌تواند به طرز چشمگیری نیروهای عمودی سنگزنی را کاهش دهد[18].

با توجه به پیشینه ادبیات مذکور، می‌توان دریافت که کاهش آسیب‌های حرارتی به طرز چشم‌گیری می‌تواند کاربردهای صنعتی تکنیک محیط‌دوست روانکاری کمینه را افزایش دهد. از این رو هدف اصلی تحقیق حاضر، بهبود خواص خنک‌کاری/روانکاری تکنیک روانکاری کمینه می‌باشد که نتیجه آن کاهش درجه حرارت و آسیب‌های حرارتی می‌باشد. به این منظور، از نانوسیال ترکیبی پایه آبی نانولوله کربنی چندجداره/آلومینیم‌اکسید به عنوان سیال برشی در تکنیک روانکاری کمینه و نیز ارتعاشات التراسونیک استفاده شده است. به دلیل ماهیت متفاوت و مستقل تکنیک‌های مورد اشاره در کاهش حرارت، کاهش قابل توجه درجه حرارت قابل انتظار است.

2- چگونگی بهبود عملکرد فرآیند سنگزنی با استفاده از تکنیک روانکاری کمینه، نانوسیال و ارتعاشات التراسونیک

2-1- مکانیزم بهبود روانکاری در تکنیک روانکاری کمینه

تکنیک روانکاری کمینه از مقدار بسیار ناچیزی سیال برشی استفاده میکند (حدود 1000 برابر کمتر از سیال برشی با پاشش پیوسته). در این تکنیک مخلوط هوا- روغن (یا هوا- آب) که ایروسول خوانده می‌شود در نازل با یکدیگر ترکیب می‌شوند. فشارِ بالایِ هوا منجر به اتمیزه شدن قطرات روغن می‌گردد و سرعت بالایی به آن می‌بخشد. این قطرات بسیار ریز روغن به وسیله هوا مستقیماً به منطقه تماس دانه ساینده/ قطعه‌کار تزریق می‌شوند (شکل 2 الف). نفوذ مؤثر قطرات روغن به وسیله مخازن روانکاری از قبیل تخلخل چرخ سنگ و شکستگی‌های دانه منجر به روانکاری مؤثر می‌گردد (شکل 2 ب). روانکاری مؤثر ایجاد شده در تکنیک روانکاری کمینه را می‌توان به قطرات بسیار ریز روغن، سرعت بسیار بالای آنها و مخازن روانکاری نسبت داد. از این رو قطرات روغن به صورت مؤثری به منطقه سنگزنی نفوذ می‌کنند. با نفوذ قطرات روغن به منطقه سنگزنی، به دلیل واکنش قطرات روغن با قطعه‌کار، لایه‌ای پایدار با استحکام برشی پایین تولید می‌شود که منجر به کاهش اصطکاک و نیروهای سنگزنی می‌گردد.

مزایای اصلی تکنیک روانکاری کمینه عبارتند از: سیستم انتقال سیال سازگار با محیط زیست، حذف سیستم گردش[1] و فیلتر کردن روغن، کاهش هزینه نهایی ماشینکاری و کارگاه پاک‌تر و ایمن‌تر.

2-2- سینماتیک سنگزنی با ارتعاشات التراسونیک

شکل 3 شماتیک برشکاری با ارتعاشات التراسونیک را برای یک دانه در یک سیکل ارتعاشی نشان می‌دهد. در این مکانیزم برشکاری، دانه ساینده فقط در نیم سیکل با قطعه کار درگیر می‌شود. این مکانیزم نوسانی منجر به تفاوت-های اساسی با برشکاری متداول می‌گردد. این تفاوت‌ها شامل کاهش طول و زمان تماس دانه ساینده/ قطعه‌کار، مسیر حرکتی متفاوت دانه ساینده و نیز تولید براده تعییرشکل نیافته غیریکنواخت می‌باشد.

با استفاده از ارتعاشات التراسونیک، مکانیزم برداشت براده به دلیل تماس فرکانس بالای دانه ساینده/ قطعه‌کار و شتاب بالای قطعه‌کار سهولت می‌یابد و براده‌ها راحت‌تر جدا می‌گردند. به دلیل ضربات نوسانی دانه به قطعه کار، میکروترک‌هایی در منطقه سنگزنی ایجاد می‌گردد که جداشدن براده از قطعه‌کار و برداشت براده را سهولت می‌بخشد. از این رو نیروی برشی و ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد.

در این مکانیزم، به دلیل مسیر حرکتی متفاوت و در نتیجه ضخامت براده تغییرشکل نیافته متفاوت، براده‌های نازک‌تر و کوچک‌تری تولید می‌گردد (شکل 4). از این رو، نیروی متوسط برای برداشت حجم کمتر، کاهش می‌یابد.

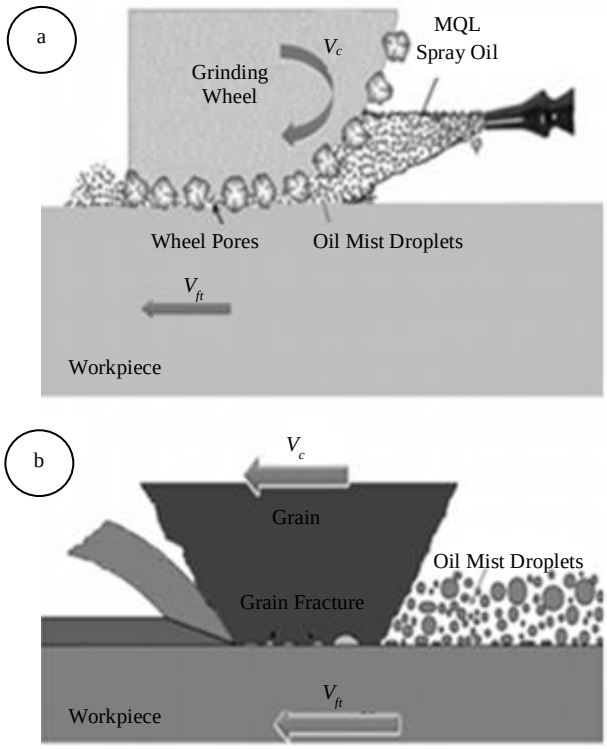

Fig. 2 a) Schematic of oil mist spray in MQL grinding and b) lubricant sources at the interface of grain and workpiece surface [19]

شکل 2 الف) شماتیک اسپری آیروسول در تکنیک روانکاری کمینه و ب) مخازن روانکاری در منطقه تماس دانه و قطعه‌کار [19]

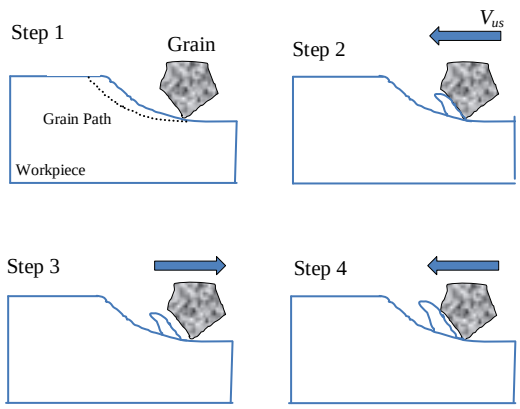

Fig. 3 Schematic of ultrasonic assisted machining: periodic grain/workpiece separation

شکل 3 شماتیک برشکاری آلتراسونیک: جدایی سیکلی دانه ساینده/ قطعه‌کار

[1] Circulation

از سوی دیگر، در این تکنیک، سرعت دانه ساینده، از سرعت براده بیشتر می‌شود که این امر منجر به ایجاد نیروی اصطکاک معکوس بین دانه ساینده/قطعه‌کار می‌گردد که نیروی مماسی را کاهش می‌دهد.

2-3- نانوسیال

نانوسیال‌ها کلاس جدید سیال‌های مهندسی می‌باشند که از شناورسازی مواد با اندازه نانو (نانوذرات) در یک سیال پایه (از قبیل روغن، هوا، الکل و ...) منجر به افزایش خواص حرارتی و اصطکاکی سیال می‌گردد. نانوسیال‌ها دارای چندین مشخصه بارز و نوین شامل ضریب رسانندگی حرارتی بالا، خنک‌کاری و روانکاری بهتر نسبت به سیال پایه می‌باشند. این مزایا منجر به افزایش کاربرد نانوسیال‌ها در کاربردهای انتقال حرارت از قبیل سلول‌های سوختی، فرآیندهای ساخت و ... گردیده است. نانوسیال‌ها حاوی نانوذراتی از جنس اکسیدها، کاربیدها، نیتریدها با اندازه حدود 100-1 نانومتر می‌باشند. هر نوع نانوذره دارای مشخصه‌های مولکولی و شیمیایی متفاوت بوده از این رو دارای اثرات متفاوتی بر روی روانکاری و انتقال حرارت هستند [21].

2-3-1- رسانندگی حرارتی نانولوله کربنی چندجداره

نانولوله‌های کربنی چندجداره به طرز قابل‌توجهی رسانندگی حرارتی سیال برشی را افزایش می‌دهند. رسانندگی حرارتی نانوسیال‌های با نانوذرات استوانه‌ای (به عنوان مثال نانولوله کربنی چندجداره) به وسیله لانگ مدل گردید [22]. بر این اساس رسانندگی حرارتی نانوسیال‌های حاوی نانولوله‌های کربنی چندجداره بر اساس معادله (1) قابل محاسبه می‌باشد:

$$K_e = \frac{\{(K_p-K_{lr})\emptyset_P K_{lr}[\gamma_1{}^2-\gamma^2+1]+(K_p+K_{lr})\times\gamma_1{}^2[\emptyset_P\gamma^2(K_{lr}-K_f)+K_f]}{\gamma_1{}^2(K_p+K_{lr})-(K_p-K_{lr})\emptyset_P[\gamma_1{}^2+\gamma^2-1]} \quad (1)$$

که K_p ضریب رسانندگی حرارتی نانوذره، K_{lr} ضریب رسانندگی حرارتی لایه تشکیل شده بین نانوذره و محیط سیال، K_f ضریب رسانندگی حرارتی سیال پایه، $\emptyset_P$ درصد حجمی نانوذره در سیال، $\gamma = 1 + h/a$ ، $\gamma_1 = 1 +$ $h/2a$، که h و a ضخامت لایه میانی و شعاع نانوسیال می‌باشد که برای نانولوله کربنی چندجداره مورد استفاده به ترتیب برابر 2 و 15 نانومتر است. در این مطالعه ضریب رسانندگی حرارتی برای نانولوله کربنی چندجداره، روغن و لایه میانی به ترتیب برابر 3000، 1 و 1.25 وات بر متر بر درجه کلوین است. از این رو بر اساس معادله (1) ضریب رسانندگی حرارتی

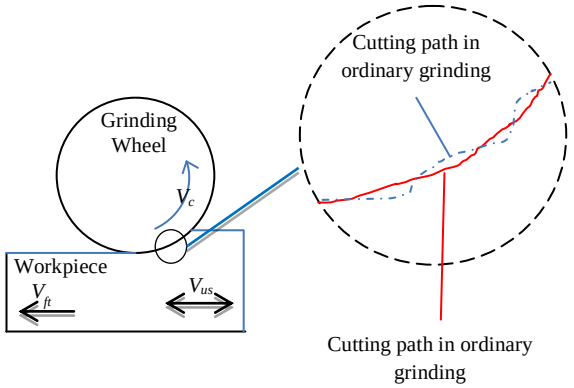

Fig. 4 Cutting path of single grain under no ultrasonic and under ultrasonic vibration [20]

شکل 4 مسیر برشی یک دانه برشی بدون اعمال ارتعاشات آلتراسونیک و با اعمال ارتعاشات التراسونیک [20]

نانوسیال برابر 5.2 وات بر متر بر درجه کلوین است که 5.2 برابر سیال پایه می‌باشد.

2-3-2- بهبود روانکاری توسط نانوذرات آلومینیم‌اکسید

نانوذرات با ساختار، شکل و اندازه متفاوت، دارای مشخصه‌های فیزیکی و موفولوژیکی متفاوتی هستند که دارای عملکرد روانکاری متفاوتی می‌باشند. اثر صفحه‌ای نانوذرات در شکل 5 نشان داده شده است. نانوذرات اگرچه دارای اندازه کوچکی می‌باشند اما دارای سطح مخصوص بالا، انرژی پیوند سطحی بالا و نیز اتم‌های بیشماری در سطح می‌باشد. به علاوه در مناطق پایین‌تر از اتم‌های سطحی، اتم‌های دیگری نبوده و در عوض جاهای خالی بسیاری موجود است. از این رو نانوذرات اشباع نشده و ناپایدار بوده و به راحتی با سایر اتم‌ها ترکیب می‌شود. این اتم‌ها به راحتی با اتم‌های قطبی روغن‌های معدنی ترکیب می‌شوند و نانوسیال‌هایی با انرژی سطحی بالاتری تولید می‌کنند. از این رو نانوسیال به داخل قطعه‌کار و چرخ‌سنگ محکم‌تر جذب می‌گردد و منجر به بهبود اثر روانکاری می‌گردد[23].

روانکاری مناسب نانوسیال آلومینیم‌اکسید به ساختار و مشخصه‌های آن مربوط می‌باشد. نانوذرات آلومینیم‌اکسید کروی بوده و دارای استحکام، سختی و مقاومت بالا هستند. نانوذرات آلومینیم‌اکسید دارای فاز سختی هستند که در فرآیند اصطکاکی مانند یک دانه ساینده می‌باشند. این نانوذرات به صورت پراکنده در فیلم روانکار که سطح واقعی آن کاهش یافته است قرار دارند. این نانوذرات به دلیل شکل کروی خود اصطکاک را از حالت لغزشی به لغزشی- غلتشی تغییر می‌دهند. از این رو ضریب اصطکاک لغزشی و تنش برشی را در فرآیند برشکاری کاهش می‌دهند. به علاوه، نانوذرات آلومینیم-اکسید دارای مقاومت بالایی در دمای بالا می‌باشند. نقطه ذوب فیلم روغن میتواند تا 2200 درجه سانتیگراد برسد از این رو می‌تواند در مقابل حرکت نابجایی‌ها و رشد دانه‌های کریستالی جلوگیری کند. از این رو مقاومت حرارتی فیلم روانکار افزایش می‌یابد [17].

3- چیدمان تجهیزات و انجام تست‌های تجربی

در تحقیق حاضر، اثر چهار محیط خنک‌کار- روانکار بر روی خواص خنک-کاری/روانکاری فرآیند سنگزنی مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصه‌های عمومی این محیط‌ها در جدول 1 لیست شده است.

خواص خنک‌کاری فرآیند سنگزنی به وسیله اندازه‌گیری دما تعیین می‌شود. دمای سنگزنی با استفاده از دوربین مادون قرمز سرعت بالای CTLF-SF50-C3 به همراه دو پرتو لیزر راهنما اندازه‌گیری گردیده است. زمان پاسخ

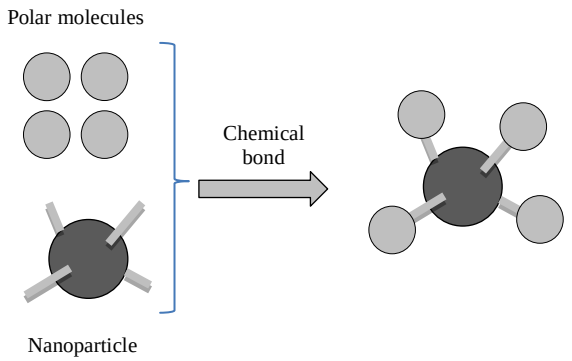

Fig. 5 Schematic of nanoparticle surface effect[23]

شکل 5 شماتیک اثر صفحه‌ای نانوذرات [23]

جدول 1 مشخصه‌های محیط‌های خنک‌کار/ روانکار

Table 1 Coolant – lubricant environments specifications

محیط خنک‌کار/روانکار	مشخصات
سنگزنی خشک	
سنگزنی با ارتعاشات آلتراسونیک	دامنه 30 میکرون و فرکانس 25 کیلوهرتز
سنگزنی با تکنیک روانکاری کمینه با نانوسیال ترکیبی	2.5 درصد وزنی
سنگزنی با ترکیب تکنیک رونکاری کمینه با نانوسیال ترکیبی و ارتعاشات آلتراسونیک	

این دوربین 9 میلی‌ثانیه بوده و میزان رزولوشن آن 0.5 ثانیه است از این رو توانایی اندازه‌گیری بیشینه دمای سنگزنی را دارا می‌باشد (نرخ افزایش و کاهش درجه حرارت در سنگزنی بسیار بالا بوده و بیشینه دما فقط با دوربین-های سرعت بالا قابل اندازه‌گیری است). خواص روانکاری محیط‌های خنک-کار/روانکار به وسیله محاسبه ضریب اصطکاک (تقسیم نیروی مماسی بر نیروی عمودی) اندازه‌گیری و مقایسه گردیده است. این نیروها با استفاده از دینامومتر سه مؤلفه‌ای کیستلر[1] اندازه گیری شده است.

ذرات نانولوله‌های کربنی چندجداره هیدروفوبیک[2] (آب گریز) می‌باشند. به این معنی که از مولکول‌های آب فاصله می‌گیرند و توانایی ایجاد ارتباط با آن را ندارند. از این رو برای ایجاد نانوسیال پایدار، به عناصر واسطه تحت عنوان فعالساز سطحی[3] نیاز است. فعالسازهای سطحی دارای دو بخش آبدوست و آب‌گریز هستند و به عنوان واسط، شرایط را برای پیوند دو ماده مهیا می‌کنند. در این تحقیق از سدیم دودسیل سولفات[4] به عنوان ماده فعالساز سطحی استفاده گردید. نانوذرات آلومینیم‌اکسید را می‌توان با و بدون استفاده از فعالساز در آب پایدار کرد، با این وجود در حالت استفاده از فعالساز سطحی، نانوسیال تا چند ماه پایدار بوده و نانوذرات ته‌نشین نمی‌شوند. در این تحقیق برای تولید نانوسیال ترکیبی، ابتدا نانولوله و آلومینیم‌اکسید به صورت مجزا به آب دی‌یونیزه اضافه شده و سپس به مدت 30 دقیقه در حمام التراسونیک قرار گرفت. سدیم دی دسیل سولفات نیز با آب دی‌یونیزه ترکیب شده و به مدت 30 دقیقه به صورت دستی هم زده شد. در انتها محلول‌های حاصل با یکدیگر مخلوط گردیده و به مدت 30 دقیقه در حمام التراسونیک قرار گرفت. شکل 6 تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی[5] مربوط به نانولوله کربنی چندجداره و نانوذرات آلومینیم‌اکسید (با متوسط اندازه ذرات 20 نانومتر) استفاده شده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

قطعه‌کار مورد استفاده، فولاد 52100 سخت شده (2±50 راکول سی) با ابعاد 130 میلیمتر در 20 میلیمتر در 20 میلیمتر می‌باشد و تست‌ها بر روی سطح با عرض 20 میلیمتر انجام شده است. تست‌ها با استفاده از دستگاه سنگ 2.5 محوره به صورت پاندولی و با استفاده از چرخ‌سنگ آلومینیم‌اکسید انجام شده است. برای یکنواختی توپوگرافی چرخ‌سنگ و یکسان‌سازی تست-ها، قبل از هر تست، چرخ‌سنگ با استفاده الماس تک لبه دِرِس شده است. پارامترهای دِرِس عبارتند از عمق برش 60 میکرون، سرعت برشی چرخ‌سنگ 15 متر بر ثانیه و سرعت پیشروی 500 میلیمتر بر دقیقه. از دستگاه میکرو روانکار ساخت شرکت رویال صنعت خاوران جهت انجام تست‌ها استفاده شده است. پارامترهای تکنیک روانکاری کمینه عبارتند از دبی 150 میلی‌لیتر بر ساعت و فشار 0.5 مگاپاسکال. شکل 7 چیدمان تجهیزات مورد استفاده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

شکل 8 چیدمان ترانسدیوسر التراسونیک را نشان می‌دهد. سیستم ارتعاشی از پیزوالکتریک، بوستر، هورن و فیکسچر تشکیل شده است. منبع تغذیه التراسونیک، فرکانس برق شهری 50 هرتز را به پالس‌های الکتریکی با فرکانس‌های بسیار بالا تبدیل می‌کند. این پالس‌های فرکانس بالای الکتریکی به پیزوالکتریک ترانسدیوسر منتقل شده و به ارتعاش‌های مکانیکی با فرکانس بالا تبدیل می‌شود (فرکانس تشدید: 25 کیلوهرتز). در ادامه، دامنه ارتعاش با استفاده از بوستر و سپس هورن افزایش می‌یابد و سپس به قطعه‌کار منتقل می‌شود. دامنه قطعه‌کار در فرکانس تشدید 25 کیلوهرتز به 30 میکرومتر می-رسد (این مقدار با دستگاه گپ سنسور اندازه‌گیری شده است). ارتعاشات اعمالی به قطعه‌کار در جهت طولی و در راستای حرکت پیشروی قطعه‌کار می‌باشد.

پارامترهای سنگزنی و شرایط اجرای تست‌های تجربی در جدول 2 لیست شده است.

4- نتایج و بحث

4-1- ضریب اصطکاک

شکل 9 تغییرات ضریب اصطکاک نسبت به نرخ برداشت براده را برای محیط-های مختلف خنک‌کار/روانکار نشان می‌دهد. شکل 9 نشان می‌دهد که روانکاری کمینه منجر به کاهش قابل توجه ضریب اصطکاک می‌شود. این اثر مهمترین عملکرد تکنیک روانکاری کمینه را نشان می‌دهد و اثبات می‌کند که قطرات بسیار ریز سیال برشی به موقع و به صورت مؤثر وارد منطقه سنگزنی شده و با ایجاد لایه روانکار با استحکام برشی پایین ضریب اصطکاک را کاهش می‌دهند. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از نانوسیال ترکیبی منجر به کاهش ضریب اصطکاک به میزان 32.1 ، 26.5، 27.9 و 20.2 درصد نسبت به سنگزنی خشک در عمق‌های برشی مختلف می‌گردد (جدول 3). نانوذرات آلومینیم-

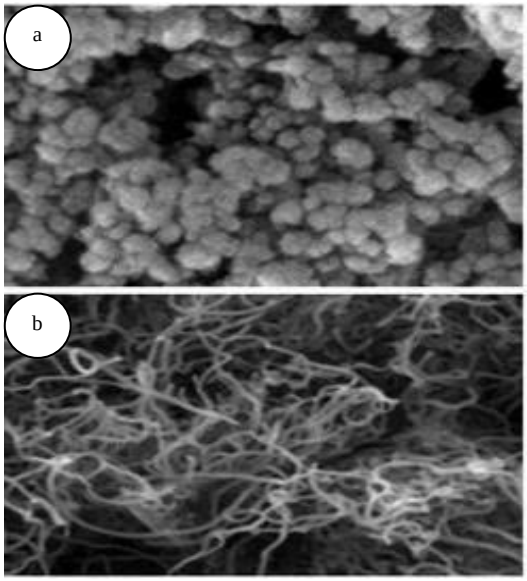

Fig. 6 SEM analysis of the nanoparticles a) MWCNTs and b) Al_2O_3 (Magnification: 50000).

شکل 6 آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوذرات: الف) نانولوله کربنی چندجداره، ب) نانوذرات آلومینیم‌اکسید (با بزرگنمایی 50000 برابر)

[1] KISTLER
[2] Hydrophobic
[3] Surfactant
[4] Sodium Dodecyl Sulfate (= SDS)
[5] Scanning Electron Microscope (= SEM)

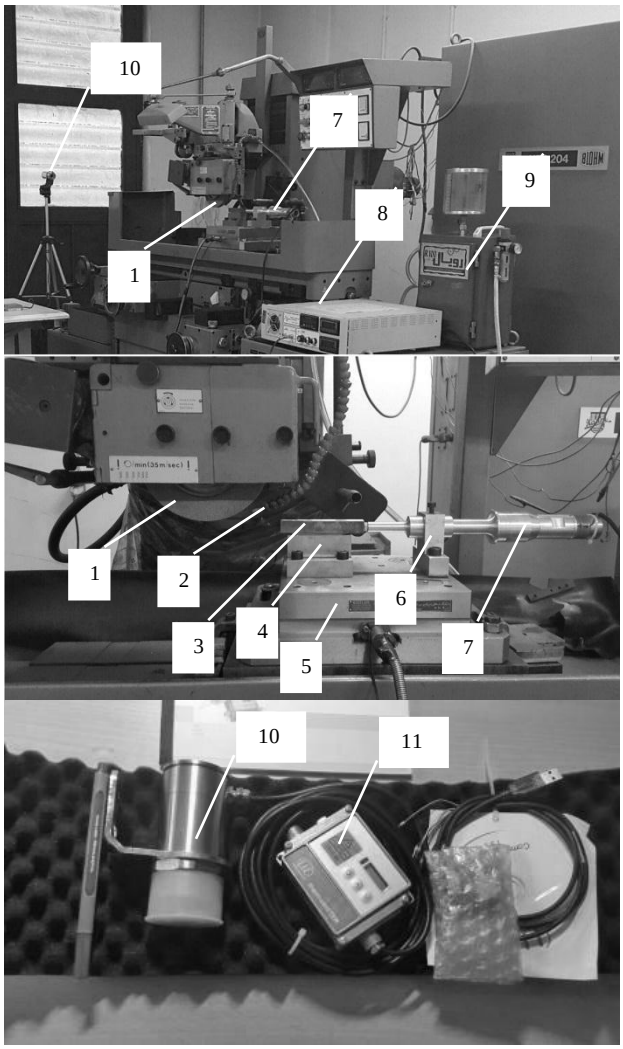

Fig. 7 Experimental Setup: 1) Grinding Wheel, 2) MQL Nozzle, 3) Workpiece, 4) Workpiece fixtures 5) Dynamometer, 6) Transducer fixtures, 7) Transducer, 8)Ultrasonic pulse generator, 9) MQL System 10)Infrared camera, 11) Infrared camera controller

شکل 7 چیدمان انجام تست‌های تجربی: 1) چرخ‌سنگ، 2) نازل سیستم روانکاری کمینه، 3) قطعه‌کار، 4) فیکسچر قطعه‌کار، 5) دینامومتر، 6) فیکسچر ترانسدیوسر، 7) ترانسدیوسر، 8) ژنراتور پالس التراسونیک، 9) سیستم روانکاری کمینه، 10) دوربین مادون قرمز، 11) کنترلر دوربین مادون قرمز

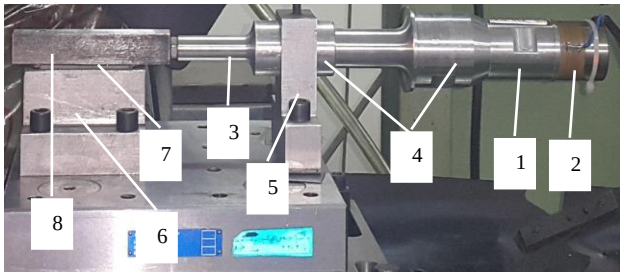

Fig. 8 Ultrasonic assisted grinding setup: 1) transducer, 2) piezoelectric rings, 3) horn, 4) booster, 5) transducer fixture, 6) workpiece fixture, 7) linear bearing, 8) workpiece.

شکل 8 چیدمان سنگزنی با ارتعاشات آلتراسونیک: 1)ترانسدیوسر، 2)رینگ‌های پیزوالکتریک، 3) هورن، 4) بوستر، 5) فیکسچر تراسدیوسر، 6) فیکسچر قطعه‌کار، 7) بلبرینگ خطی، 8) قطعه‌کار.

جدول 2 شرایط سنگزنی

Table 2 Grinding parameters

شرایط سنگزنی	شرح
نوع سنگزنی	سنگزنی تخت (موافق)
چرخ‌سنگ	چرخ‌سنگ اکسید آلومینیم
جنس قطعه‌کار	فولاد 52100 سختکاری شده (2±50 راکول سی)
ابعاد قطعه کار	عرض (20 میلیمتر)، طول (130 میلیمتر)
ماشین سنگزنی	دستگاه سنگزنی تخت، شرکت بوهلم آلمان
دستگاه روانکاری کمینه	ساخت شرکت رویال صنعت خاوران
اندازه گیری دما	دوربین مادون قرمز ساخت شرکت میکرواپسیلون
دستگاه نیروسنج	ساخت شرکت کیستلر، مدل 92558
سرعت چرخ‌سنگ	30 متر بر ثانیه
پیشروی طولی	3000 میلی‌متر بر دقیقه
عمق برش	10، 20، 30، 40 میکرومتر
تعداد پاس برش	5 پاس
محیط‌های خنک‌کار- روانکار	خشک، آلتراسونیک، روانکاری کمینه با نانوسیال ترکیبی، روانکاری کمینه با نانوسیال ترکیبی و ارتعاشات آلتراسونیک
سیال روانکاری کمینه	آب دی یونیزه
دبی روانکاری کمینه	150 میلی‌لیتر بر ساعت
فشار هوای فشرده	0.5 مگاپاسکال
ابزار دِرِس	ابزار تک‌لبه

اکسید کره‌ای شکل بوده و به سهولت به فضای بین دانه‌ها و داخل چرخ‌سنگ نفوذ می‌کنند. از این رو اصطکاک بین دانه و قطعه‌کار از حالت لغزشی به غلتشی تغییر یافته و اثر روانکاری تقویت می‌گردد.

شکل 9 نشان می‌دهد که استفاده از ارتعاشات التراسونیک نیز منجر به کاهش ضریب اصطکاک می‌گردد. چراکه ارتعاشات التراسونیک منجر به شکستن جوش خوردگی‌های دانه به قطعه‌کار می‌گردد. از سوی دیگر جدایش سیکلی دانه از قطعه‌کار یک گپ سیکلی بین آنها ایجاد می‌کند که شرایط را برای نفوذ مؤثرتر سیال و نیز خنک‌کاری فراهم می‌آورد. علاوه بر این عوامل، مکانیزم برشکاری در ارتعاشات التراسونیک منجر به تشکیل براده‌هایی نازک‌تر و کوچکتر گردیده که منجر به کاهش نیروهای سایشی و شخم‌زنی و ضریب اصطکاک می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ارتعاشات التراسونیک منجر به کاهش ضریب اصطکاک تا 11.5 درصد می‌گردد (جدول 3).

به دلیل متفاوت بودن مکانیزم کاهش حرارت تکنیک‌های روانکاری کمینه، نانوسیال ترکیبی و نیز ارتعاشات التراسونیک انتظار میرفت که عملکرد سنگزنی بهبود یابد. نتایج نیز نشان می‌دهند که استفاده همزمان از این تکنیک‌ها، منجر به کاهش ضریب اصطکاک تا 35.9 میگردد (جدول 3).

4-2- نیروهای سنگزنی

زمانی که یک دانه ساینده با قطعه‌کار درگیر می‌شود سه حالت تغییرشکل اتفاق می‌افتد: سایش، شخمزنی و برش. این مراحل در شکل 10 برای یک دانه ساینده و قطعه‌کار نشان داده شده است. در حالت سایشی، برداشت ماده ناچیز است در حالی که اصطکاک بالا است. در این مرحله نیروی وارده بر هر دانه به اندازه‌ای کم است که نمی‌تواند نفوذ زیادی در قطعه کار داشته باشد. مرحله پس از سایش، مرحله شخمزنی است. این مرحله زمانی اتفاق می‌افتد که نفوذ دانه به قطعه‌کار افزایش یابد. در این مرحله، علائم شیار به دلیل نفوذ زیاد مشخص است اما نرخ برداشت ماده همچنان بسیار پایین است. در واقع

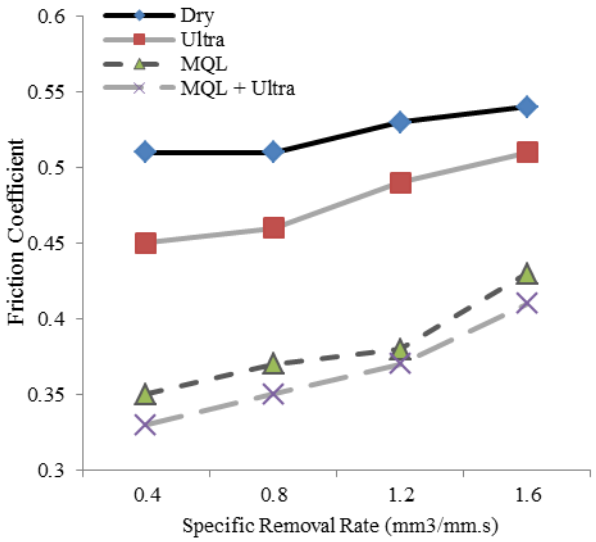

Fig. 9 Friction coefficient vs. specific removal rate for eight coolant-lubricant environment

شکل 9 ضریب اصطکاک نسبت به نرخ برداشت براده برای محیط‌های مختلف خنک-کار/ روانکار

جدول 3 میزان درصدی کاهش ضریب اصطکاک نسبت به سنگزنی خشک

Table 3 Friction coefficient decrease percent in comparison to dry grinding

نرخ برداشت براده (mm^3/m.s)		0.4	0.8	1.2	1.6
محیط خنک‌کار/ روانکار	ارتعاشات آلتراسونیک	11.5	8.8	8.1	4.9
	روانکاری کمینه با نانوسیال ترکیبی	32.1	26.5	27.9	20.2
	روانکاری کمینه با نانوسیال ترکیبی و آلتراسونیک	35.9	30.8	30.0	22.5

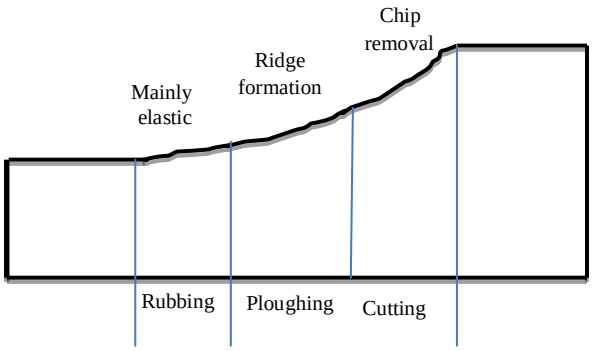

Fig. 10 Rubbing, plowing and cutting regimes of deformation in abrasive machining [24]

شکل 10 نواحی تغییرشکل سایش، شخمزنی و برشی در ماشینکاری با ذرات ساینده [24]

در این مرحله برش مواد انجام نمی‌شود بلکه دانه، مواد را به اطراف هدایت می‌کند. با افزایش نفوذ دانه به قطعه‌کار نرخ برداشت براده سریعاً افزایش یافته و براده بیشتری تولید میشود (شکل 10).

4-2-1- نیروهای مماسی سنگزنی

نیروی مماسی نیروی مورد نیاز برای برش و برداشتن براده از روی قطعه کار می‌باشد. این نیرو نیروی اصلی در سنگزنی بوده که مقدار توان مصرفی دستگاه سنگزنی را تعیین می‌کند (معادله 2):

$$P = F_t V_c \quad (2)$$

که P توان مصرفی دستگاه سنگزنی، F_t نیروی مماسی سنگزنی و V_c سرعت برشی چرخ‌سنگ است. از این رو هر چه نیروی مماسی کاهش یابد انرژی کمتری برای فرآیند سنگزنی موردنیاز بوده و حرارت کمتری وارد قطعه‌کار می‌گردد. این نیرو از سه مؤلفه اصلی تشکیل شده است: نیروی سایشی، نیروی شخم‌زنی و نیروی برشی (معادله 3):

$$F_t = F_{t\,\text{Cutting}} + F_{t\,\text{rubbing}} + F_{t\,\text{plowing}} \quad (3)$$

نتایج مربوط به نیروهای مماسی در شکل 11 نشان داده شده است که برای تمامی تست‌ها نیروی مماسی در حالت استفاده از تکنیک روانکاری کمینه کمتر از سنگزنی خشک است. علت این امر روانکاری مؤثر و به موقع در منطقه سنگزنی می‌باشد. نفوذ مؤثر قطرات بسیار ریز و پر سرعت سیال برشی به منطقه سنگزنی منجر به ایجاد لایه روانکار با استحکام برشی کمتر از فلز پایه می‌گردد. هر چه این لایه روانکار دارای استحکام برشی کمتری باشد نیروهای سنگزنی و خصوصاً نیروی مماسی کاهش می‌یابد [25].

نتایج نشان می‌دهند که استفاده از تکنیک روانکاری کمینه با استفاده از نانوسیال ترکیبی نه تنها منجر به کاهش مصرف سیال برشی می‌گردد بلکه نیروی مماسی و متعاقباً توان مصرفی را کاهش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که این تکنیک منجر به کاهش 65.4، 53.3، 55.1 و 48.9 درصدی نسبت به حالت سنگزنی خشک می‌شود (شکل 11، جدول 4).

استفاده از ارتعاشات التراسونیک منجر به تغییر در مکانیزم براده‌برداری می‌گردد. این تکنیک منجر به تولید براده‌های نازک‌تر و کوچکتر می‌گردد که نیروهای غیرمطلوب سایشی و شخمزنی را کاهش می‌دهد. از این رو نیروی مماسی کل کاهش می‌یابد (معادله 3). از سوی دیگر در سنگزنی التراسونیک که سرعت دانه بیش از سرعت براده می‌گردد یک اصطکاک معکوس ایجاد می‌گردد که نیروی مماسی را کاهش می‌دهد. این عوامل منجر به کاهش 13.0، 12.5، 16.9 و 9.8 درصدی نیروی مماسی در نرخ‌های برداشت براده متفاوت نسبت به سنگزنی خشک می‌گردد (شکل 11، جدول 4).

استفاده همزمان از تکنیک روانکاری کمینه با نانوسیال ترکیبی و ارتعاشات التراسونیک منجر به کمترین نیروی مماسی می‌گردد. بنا بر نتایج به دست آمده، در این حالت نیروی مماسی 69.2، 60.0، 58.0 و 52.2 درصد کاهش می‌یابد. مکانیزم‌های خنک‌کاری/روانکاری متفاوت در تکنیک روانکاری کمینه، نانوسیال ترکیبی و نیز ارتعاشات التراسونیک منجر به بهبود عملکرد سنگزنی و کاهش نیروهای سنگزنی گردیده است (شکل 11، جدول 4).

4-3-دمای منطقه سنگزنی

در فرآیند سنگزنی، شار حرارتی میانگین Q در منطقه سنگزنی از رابطه (4) قابل محاسبه است:

$$Q = \frac{F_t V_c}{b\, l_c} \quad (4)$$

که F_t نیروی مماسی، V_c سرعت برشی چرخ‌سنگ، b عرض قطعه‌کار و l_c طول تماس دانه با قطعه‌کار است. با توجه به معادله (4) هر چه نیروی مماسی کاهش پیدا کند شار حرارتی تولید شده و در نتیجه بیشینه درجه حرارت سنگزنی کاهش می‌یابد.

در این تحقیق، درجه حرارت ناحیه سنگزنی با استفاده از دوربین غیرتماسی مادون قرمز که دارای دو پرتو لیزر برای مشخص کردن نقطه هدف است اندازه‌گیری گردید. زمان پاسخ دوربین مادون قرمز 9 میلی ثانیه می‌باشد

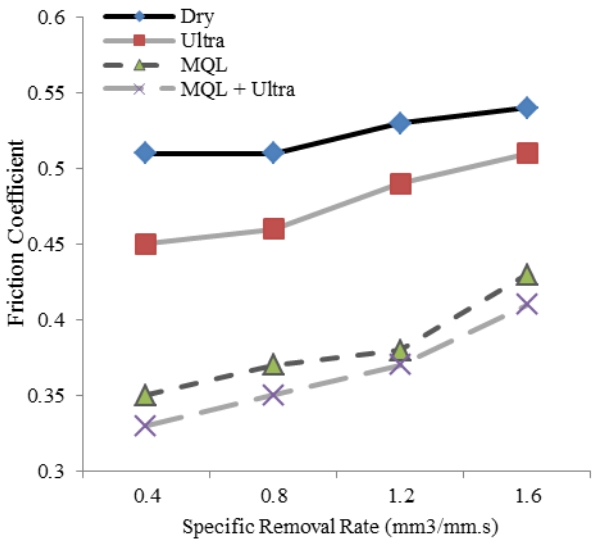

Fig. 11 Tangential grinding force vs. specific removal rate for coolant-lubricant environment

شکل 11 نیروی مماسی نسبت به نرخ برداشت براده برای محیط‌های مختلف خنک-کار /روانکار

جدول 4 میزان درصدی کاهش نیروی مماسی نسبت به سنگزنی خشک

Table 4 Tangential grinding force decrease percent in comparison to dry grinding

نرخ برداشت براده ($mm^3/m.s$)		0.4	0.8	1.2	1.6
محیط خنک‌کار/ روانکار	ارتعاشات آلتراسونیک	13.0	12.5	16.9	9.8
	روانکاری کمینه با نانوسیال ترکیبی	65.4	53.3	55.1	48.9
	روانکاری کمینه با نانوسیال و آلتراسونیک	69.2	60.0	58.0	52.2

از این رو درجه حرارت بیشینه قابل اندازه‌گیری است. شکل 12 بیشینه دمای اندازه‌گیری شده در فرآیند سنگزنی را برای محیط‌های مختلف نشان داده است. نتایج نشان می‌دهد که تکنیک روانکاری کمینه با استفاده از نانوسیال ترکیبی به واسطه کاهش حرارت تولیدی، دمای بیشینه در فرآیند سنگزنی راکاهش می‌دهد. این کاهش درجه حرارت برای نرخ‌های مختلف برداشت براده به ترتیب 57.5، 55.7، 52.3 و 50.0 درصد می‌باشد (جدول 5). کاهش درجه حرارت در این تکنیک به دلیل کاهش ضریب اصطکاک و نیروی مماسی می‌باشد. نفوذ مؤثر قطرات سیال برشی به منطقه سنگزنی منجر به تشکیل لایه روانکار با استحکام برشی می‌گردد. از این رو نیروی لازم برای برداشت ماده (نیروی مماسی) کاهش می‌یابد. با کاهش نیروی مماسی مطابق معادله 4 حرارت تولید شده در منطقه سنگزنی و در نتیجه بیشینه دمای سنگزنی کاهش می‌یابد.

جدول 5 نشان می‌دهد که استفاده از ارتعاشات التراسونیک منجر به کاهش 12.4، 14.0، 10.6 و 12.6 درصدی بیشینه درجه حرارت سنگزنی نسبت به سنگزنی خشک در نرخ‌های براده‌برداری مختلف می‌گردد. این تکنیک به دلیل طول و زمان تماس کمتر دانه ساینده با قطعه‌کار، منجر به کاهش حرارت تولید شده می‌گردد (شکل 12، جدول 5). در فرآیند سنگزنی، طول تماس l_c و زمان تماس t_c مربوط به یک دانه از روابط (5) و (6) به دست می آید:

$$l_c = \sqrt{d_s \times a_e} \quad (5)$$

$$t_c = \frac{l_c}{V_c} \quad (6)$$

که d_s قطر چرخ‌سنگ و a_e عمق برش می‌باشد. در این مطالعه برای سنگزنی خشک و برای حالت عمق برش 40 میکرون، طول تماس و زمان تماس به ترتیب برابرند با: 2.8 میلیمتر و 9×10^{-5} ثانیه. استفاده از ارتعاشات التراسونیک منجر به کاهش طول و زمان تماس دانه با قطعه کار می‌گردد. هر سیکل از ارتعاشات التراسونیک در حالتی که فرکانس ارتعاشات 25 کیلوهرتز است 4×10^{-5} ثانیه طول می‌کشد. از این رو در حالت استفاده از ارتعاشات التراسونیک زمان تماس کمتر از حالت سنگزنی خشک است. از طرفی با توجه به رابطه (6) و با توجه به ثابت بودن سرعت چرخ‌سنگ در هر دو حالت، طول تماس در حالت استفاده از ارتعاشات التراسونیک به 1.2 میلیمتر کاهش می یابد (57 درصد). نتیجه کاهش طول و زمان تماس، کاهش حرارت تولید شده و کاهش درجه حرارت است. از سوی دیگر، حرکت نوسانی دانه منجر به ایجاد یک گپ نوسانی می‌گردد که علاوه بر اینکه فرصت خنک شدن به دانه و قطعه کار می‌دهد، منجر به نفوذ راحت‌تر نانوسیال‌ها به منطقه برشی می-گردد. علاوه بر این موارد، به دلیل کاهش نیروهای سایشی و شخمزنی در سنگزنی التراسونیک، آسیب‌های حرارتی به قطعه‌کار کاهش می‌یابد. با توجه به این موارد، بیشینه درجه حرارت در سنگزنی التراسونیک تا 14.0 درصد نسبت به حالت خشک کاهش می‌یابد (شکل 12، جدول 5).

بیشترین کاهش در درجه حرارت مربوط برابر 60.2 درصد است که مربوط به استفاده همزمان از تکنیک روانکاری کمینه با نانوسیال ترکیبی و ارتعاشات التراسونیک می‌باشد (شکل 12، جدول 5).

4-4- کیفیت سطح

شکل 13 نتایج کیفی مربوط به کیفیت سطح قطعه‌کار برای دو حالت سنگزنی خشک (نامطلوب‌ترین وضعیت) و سنگزنی با ترکیب تکنیک روانکاری کمینه با نانوسیال ترکیبی و ارتعاشات التراسونیک (مطلوب‌ترین وضعیت) را نشان

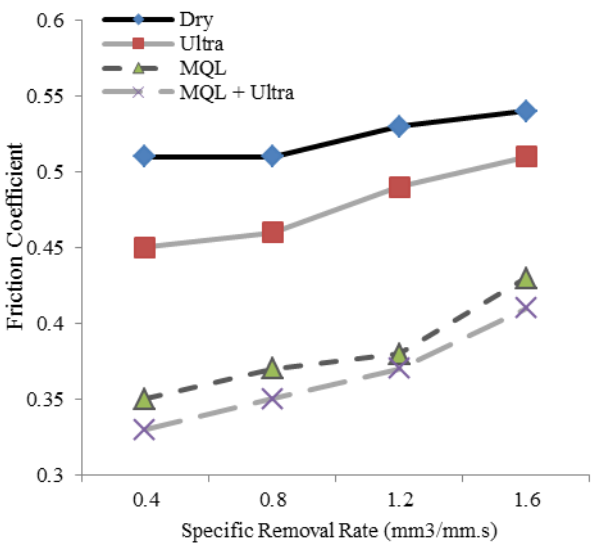

Fig. 12 Grinding temperature vs. specific removal rate for coolant-lubricant environment

شکل 12 دمای سنگزنی نسبت به نرخ برداشت براده برای محیط‌های مختلف خنک-کار/ روانکار

جدول 5 میزان درصدی کاهش درجه حرارت نسبت به سنگزنی خشک

Table 5 Grinding temperature decrease percent in comparison to dry grinding

نرخ برداشت براده (mm^3/m.s)		0.4	0.8	1.2	1.6
محیط خنک‌کار/ روانکار	ارتعاشات آلتراسونیک	12.5	14.0	10.6	12.6
	روانکاری کمینه با نانوسیال ترکیبی	57.5	55.7	52.3	50.0
	روانکاری کمینه با نانوسیال و ارتعاشات	60.2	58.8	54.8	53.4

می‌دهد. شرایط انجام آزمایش عبارتند از: عمق برش 60 میکرون، سرعت برشی چرخ‌سنگ 30 متر بر ثانیه و سرعت پیشروی قطعه کار 3000 میلیمتر بر دقیقه. شکل 13 الف مربوط به وضعیت ظاهری سطح قطعه‌کار (با اندازه واقعی) می‌باشد. حرارت بالای ناشی از اصطکاک دانه ساینده با قطعه‌کار و عدم انتقال حرارت تولید شده به خارج از منطقه سنگزنی منجر به افزایش درجه حرارت و سوختگی سطحی قطعه‌کار گردیده است. این درحالی است که روانکاری مناسب تکنیک روانکاری کمینه، خنک‌کاری مناسب نانوسیال و کاهش زمان و طول تماس دانه ساینده/ قطعه‌کار حاصل از ارتعاشات التراسونیک منجر به کاهش حرارت در منطقه سنگزنی شده و سطح قطعه‌کار عاری از هر گونه سوختگی می‌باشد. شکل 13 ب تصویر مورفولوژی سطح قطعه‌کار را نشان می‌دهد که با استفاده از میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی 1000 برابر تهیه شده است. برای حالت سنگزنی خشک، عیوب سطحی شامل تغییرشکل پلاستیک و جریان مواد به اطراف به مراتب بیشتر از حالت سنگزنی با نانوسیال ترکیبی و ارتعاشات التراسونیک می‌باشد. در حالت استفاده از تکنیک ترکیبی، به دلیل روانکاری مناسب، تغییرشکل الاستیک و پلاستیک کاهش می‌یابد و انرژی سنگزنی صرف برش ماده و تشکیل براده می‌گردد. ضمن اینکه تماس متناوب دانه ساینده با قطعه‌کار به دلیل استفاده از ارتعاشات التراسونیک، تشکیل براده را تسریع می‌بخشد. در حالی که در سنگزنی خشک، انرژی سنگزنی به دلیل اصطکاک بالا و روانکاری نامناسب، صرف تغییرشکل الاستیک و پلاستیک و جریان مواد به اطراف می‌گردد.

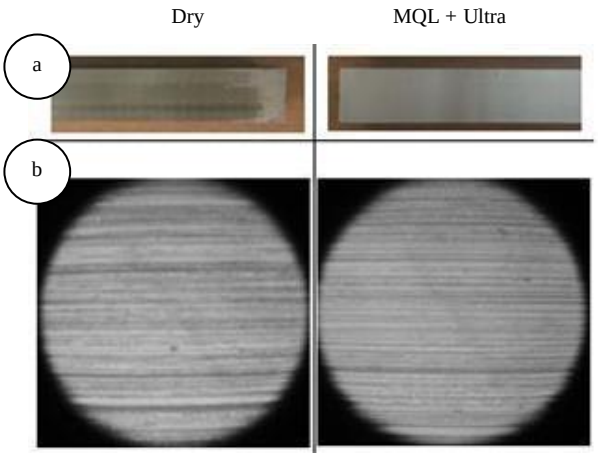

Fig. 13 Surface quality: a) grounded surface (actual size), b) surface morphology (magnification =1000X)

شکل 13 کیفیت سطح: الف) سطح سنگزنی شده (سایز واقعی)، ب) مورفولوژی سطح (بزرگنمایی 1000 برابر)

5-4- شکل ظاهری براده های تشکیل شده

با بررسی وضعیت ظاهری، شکل، اندازه و انحنای براده‌های تولید شده در فرآیند سنگزنی می‌توان اطلاعاتی را در مورد مکانیزم براده‌برداری به دست آورد. شکل 14 مربوط به براده‌های تشکیل شده در فرآیند سنگزنی برای دو حالت سنگزنی خشک (نامطلوب‌ترین وضعیت) و سنگزنی با ترکیب تکنیک روانکاری کمینه با نانوسیال ترکیبی و ارتعاشات التراسونیک (مطلوب‌ترین وضعیت) می‌باشد. این تصاویر با میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی 1000 برابر تهیه شده است. شکل 14 نشان می‌دهد که براده‌های تشکیل شده در سنگزنی خشک، کروی و بسیار کوچک است. علت این امر حرارت بسیار بالای ایجاد شده در منطقه سنگزنی است. در حالی که در حالت سنگزنی با ترکیب تکنیک روانکاری کمینه با نانوسیال ترکیبی و ارتعاشات التراسونیک براده‌های تشکیل شده دارای انحنای بیشتری بوده و از حالت کروی خارج شده‌اند. براده‌های تشکیل شده در این حالت بسیار مشابه با براده‌های تشکیل شده در فرآیند سنگزنی با پاشش پیوسته سیال برشی می‌باشند که در تحقیق قبلی استخراج شده‌اند [7]. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که مکانیزم براده‌برداری در حالت روانکاری کمینه بسیار مشابه با روش متداول سیال برشی با پاشش پیوسته می‌باشد با این برتری که مصرف سیال 1000 برابر کاهش یافته است.

5-نتیجه‌گیری

تکنیک روانکاری کمینه به دلیل مزایای تکنولوژیکی و اقتصادی جایگزین مناسبی برای سیال‌های برشی با پاشش پیوسته در فرآیند سنگزنی می باشد. این تکنیک قادر است عملکرد کلی فرآیند از قبیل یکپارچگی سطح، نیروها و توان مصرفی و نیز سایش چرخ‌سنگ را بهبود بخشد. از سوی دیگر تکنیک روانکاری کمینه تکنیکی محیط‌دوست و سازگار با محیط زیست است که می‌تواند مصرف سیال برشی را به 0.001 حالت استفاده از سیال برشی با پاشش پیوسته برساند. علی‌رغم این مزایای متعدد، تکنیک روانکاری کمینه به دلیل مصرف پایین سیال برشی غالباً منجر به افزایش درجه حرارت و در نتیجه آسیب‌های حرارتی و سوختگی می‌گردد. این محدودیت منجر به کاهش کاربرد صنعتی این تکنیک گردیده است. به منظور رفع این مشکل، استفاده همزمان از نانوسیال ترکیبی و ارتعاشات التراسونیک پیشنهاد شده

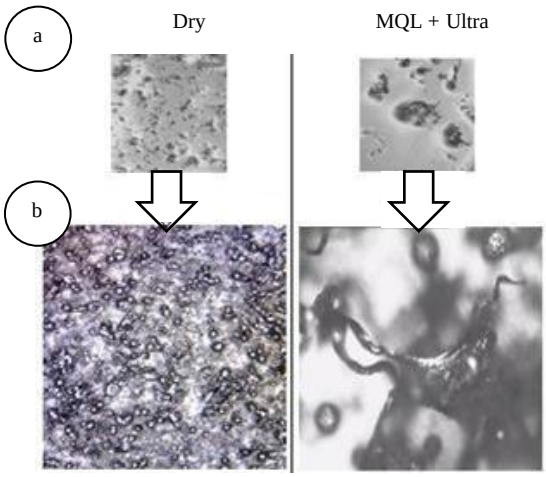

Fig. 14 Generated chips for dry and combined hybrid nanofluid MQL and UAG (1000X)

شکل 14 براده‌های تشکیل شده برای سنگزنی خشک و سنگزنی با ترکیب تکنیک روانکاری کمینه با نانوسیال ترکیبی و ارتعاشات التراسونیک (بزرگنمایی 1000 برابر).

است. نانوسیال به دلیل ظرفیت انتقال حرارت بالا، می‌تواند حرارت بیشتری را از منطقه تماس دانه/ قطعه‌کار خارج کند. ارتعاشات التراسونیک نیز به دلیل مکانیزم متناوب و کاهش زمان و طول تماس دانه/ قطعه‌کار، حرارت کمتری تولید می‌کند.

از این رو در تحقیق حاضر، نانوسیال پایه آبی حاوی ترکیب نانولوله کربنی چندجداره (با رسانندگی حرارتی بالا) و آلومینیم‌اکسید (با اثر روانکاری بالا) به عنوان سیال تکنیک روانکاری کمینه به همراه ارتعاشات التراسونیک مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج این تحقیق به صورت خلاصه ارائه شده است:

1) مکانیزم خنک‌کاری/روانکاری متفاوت و مستقل از هم برای تکنیک‌های روانکاری کمینه، نانوسیال ترکیبی و ارتعاشات التراسونیک، منجر به بهبود خواص اصطکاکی دانه/قطعه‌کار می‌گردد. در این حالت مقدار ضریب اصطکاک نسبت به حالت سنگزنی خشک تا 35.9 کاهش می‌یابد. استفاده جداگانه از تکنیک روانکاری کمینه و ارتعاشات التراسونیک به ترتیب موجب کاهش 32.1 و 11.5 درصدی ضریب اصطکاک گردیده است.

2)کمترین مقدار نیروی مماسی و توان مصرفی در حالت ترکیب تکنیک روانکاری کمینه با نانوسیال ترکیبی و ارتعاشات التراسونیک ثبت گردیده است. نتایج حاکی از کاهش 69.2 درصدی نیروی مماسی نسبت به حالت سنگزنی خشک می‌باشد. استفاده جداگانه از تکنیک روانکاری کمینه و ارتعاشات التراسونیک به ترتیب منجر به بیشینه کاهش نیروی مماسی تا 65.4 و 16.9 درصد می‌گردد.

3) استفاده همزمان از تکنیک روانکاری کمینه با نانوسیال ترکیبی و ارتعاشات التراسونیک منجر به کاهش بیشینه درجه حرارت سنگزنی تا 60.2 درصد می‌گردد (از 254 به 101 درجه سانتیگراد). این کاهش شدید درجه حرارت منجر به کاهش آسیب‌های حرارتی و کاهش سوختگی قطعه‌کار می‌گردد. علت این کاهش، مکانیزم‌های خنک‌کاری/روانکاری متفاوت و مستقل تکنیک روانکاری کمینه، نانوسیال ترکیبی و ارتعاشات التراسونیک می‌باشد. میزان بیشینه کاهش درجه حرارت در حالت استفاده از تکنیک روانکاری کمینه و استفاده از ارتعاشات التراسونیک نسبت به حالت خشک 57.5 و 12.6 درصد می‌باشد.

4) کیفیت سطح برای حالت سنگزنی با تکنیک روانکاری کمینه با نانوسیال ترکیبی و ارتعاشات التراسونیک بسیار مطلوب‌تر از سنگزنی خشک می‌باشد. با اعمال شرایط ترکیبی استفاده شده در تحقیق حاضر، می‌توان سطحی عاری از سوختگی به دست آورد. در حالی که در همان شرایط، سنگزنی خشک با سوختگی شدید قطعه‌کار همراه است.

5) عیوب سطحی شامل تغییرشکل پلاستیک و جریان مواد به اطراف در حالت استفاده از سنگزنی با تکنیک روانکاری کمینه با نانوسیال ترکیبی و ارتعاشات التراسونیک به مراتب کمتر از سنگزنی خشک می‌باشد. در حالت استفاده از تکنیک ترکیبی به دلیل روانکاری مناسب، تغییرشکل الاستیک و پلاستیک کاهش می‌یابد و انرژی سنگزنی صرف برش ماده و تشکیل براده می‌گردد. ضمن اینکه تماس متناوب دانه ساینده با قطعه‌کار به دلیل استفاده از ارتعاشات التراسونیک تشکیل براده را تسریع می‌بخشد. در حالی که در سنگزنی خشک، انرژی سنگزنی به دلیل اصطکاک بالا و روانکاری نامناسب، صرف تغییرشکل الاستیک و پلاستیک و جریان مواد به اطراف می‌گردد.

6) مکانیزم براده‌برداری در سنگزنی با استفاده از تکنیک روانکاری کمینه با نانوسیال ترکیبی و ارتعاشات التراسونیک بسیار مشابه با سنگزنی با پاشش پیوسته سیال برشی می‌باشد. ضمن اینکه مصرف سیال برشی حدود 1000 برابر کاهش یافته است. براده‌های ایجاد شده دارای انحنا بوده و از حالت کروی ناشی از حرارت بالا (مشابه سنگزنی خشک) خارج شده‌اند.

6- مراجع

[1] M. N. Kumar, S. Subbu, V. Krishna, A. Venugopal, Vibration assisted conventional and advanced machining: A review, *Procedia Engineering*, Vol. 97, No. 5, pp. 1577 – 1586, 2014.

[2] P. Kalita, A. P. Malshe, S. A. Kumar, V. G. Yoganath, T. Gurumurthy, Study of specific energy and friction coefficient in minimum quantity lubrication grinding using oil-based nanolubricants, *Journal of Manufacturing Process*, Vol. 14, No. 2, pp. 160–166, 2012.

[3] T. Tawakoli, M. J. Hadad, M. H. Sadeghi, A. Daneshi, S. Stockert, A. Rasifard, An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication -MQL grinding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, No.7, pp. 924–932, 2009.

[4] A. Yui, M. Terashima, Development of coolant-less grinding system, *Abrasive Technology: Current Development and Applications*, Vol. 1, No. 3, pp. 394, 1999.

[5] L. C. Silva, E.C.S. Brandao, J.R. Avila, Environmentally friendly manufacturing: Behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process, *International Journal of Cleaner Production*, Vol. 11, No. 2, pp. 394, 1999.

[6] F. Rabiei, A. R. Rahimi, M. J. Hadad, M. Ashrafijou, Performance improvement of minimum quantity lubrication (MQL) technique in surface grinding by modeling and optimization, *International Journal of Cleaner Production*, Vol. 86, No. 2, pp. 447–460, 2015.

[7] A. R. Rahimi, F. Rabiei, M. J. Hadad, M. Ashrafijou, Investigation of the effect of minimum quantity lubrication technique on performance of the grinding of HSS, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 1-12, 2013. (in Persian فارسی)

[8] M. J. Hadad, T. Tawakoli, M. H. Sadeghi, B. Sadeghi, Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 54, No. 3, pp. 54-55, 2012.

[9] B. L. Li, Ch. Zhang, Y. Wang,Y. Yang, M. Jia, D. Zhang, N. Wu, Q. , Effect of the physical properties of different vegetable oil-based nanofluids on MQLC grinding temperature of Ni-based alloy, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 36, No. 2, pp. 103-121, 2016.

[10] B. Shen, S. C. Tung, A. J. Shih, Application of nanofluids in minimum quantity lubrication grinding, *Tribology Transaction*, Vol. 51, No. 6, pp. 730–737, 2008.

[11] T. Tawakoli, M. J. Hadad, M. H. Sadeghi, A. Daneshi, Stockert, S., Rasifard, A, Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication – MQL grinding process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* , Vol. 50, No. 5, pp. 521–531, 2010.

[12]A. Saberi, A. R. Rahimi, H. Parsa, M. Ashrafijou, F. Rabiei, Improvement of surface grinding process performance of CK45 soft steel by Minimum Quantity Lubrication (MQL) technique using compressed cold air jet from vortex tube, *International Journal of Cleaner Production*, Vol. 131, No, 3, pp. 728–738, 2016.

[13] A. Saberi. A.R. Rahimi, H. Parsa, M. Ashrafijou, Improvement of grinding process performance by minimum quantity lubrication technique -using compressed cold air jet from vortex tube, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 201-211, 2015. (in Persian فارسی)

[14]C. Mao, J. Zhang, Y. Huang, H. Zou, X. Huang, Z. Zhou, Investigation on the effect of nanofluid parameters on MQL grinding, *Material Manufacturing Process*, Vol. 28, No. 4, pp. 436-442, 2013.

[15]M. Sayuti, A. D. Sarhan, S. Faheem, Novel uses of SiO_2 nano-lubrication system in hard turning process of hardened steel

AISI4140 for less tool wear, surface roughness and oil consumption, *International Journal of Cleaner Production*, Vol. 18, No. 4, pp. 265-276, 2014.

[16]S. Choi, ZG. Zhang, W. Yu, F. E. Lockwood, E.A. Grulke, Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions, *Applied Physics Letters*, Vol. 79. No. 14, pp. 2252-2254, 2001.

[17]Y. Wang, C. Li, Y. Zhang, B. Li, M. Yazng, X. Zhang, S. Guo, G. Liu, Experimental Evaluation of the Lubricat ion Propert ies of the Wheel /Workpiece Interface in MQL Grinding with Different Nanofluids, *Tribiology International*, Vol. 99, No. 5, pp. 198–210, 2016.

[18]M. M. Molaie, J. Akbari, M. R. Movahhedy, Ultrasonic assisted grinding process with minimum quantity lubrication using oil-based nanofluids, *International Journal of Cleaner Production*, Vol. 129, No. 8, pp. 212-222, 2016.

[19] T. Tawakoli, M. J. Hadad, M. H. Sadeghi, A. Daneshi, , B. Sadeghi, Minimum quantity lubrication in grinding: effects of abrasive and coolant-ubricant types, *International Journal of Cleaner Production*, Vol. 19, No. 7, pp. 2088-2099, 2011.

[20] A. Abdullah, A. Farhadi, A. Pak, Ultrasonic-Assisted Dry Creep-Feed Up-Grinding of Superalloy Inconel738LC, *Experimental Mechanics*, Vol. 52, No. 2, pp. 843–853, 2012.

[21] M. K. Sinha, R. Madarkar, S. Ghosh, V.P. Rao, Application of eco-friendly nanofluids during grinding of Inconel 718 through small quantity lubrication, *International Journal of Cleaner Production*, Vol. 141, No. 3, pp. 1359-1375, 2017.

[22] K. C. Leong, C. Yang, S. M. S. Murshed, A model for the thermal conductivity of nanofluidsethe effect of interfacial layer, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 8, No. 7, pp. 245-254, 2006.

[23] Y. Wang, CH. Li, Y. Zhang, B. Li, M. Yang, X. Zhang, S. Guo, G. Liu, Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in MQL grinding with different nanofluids, *Tribiology International*, Vol. 127, No. 8, pp. 487-499, 2016.

[24] D. Ioan, W. Marinescu, B. Rowe, B. Dimitrov, I. Inasaki, *Tribology of Abrasive Machining Processes*, pp. 121-130, German: William Andrew, 2004.

[25] R. S. Alberdi, J. Pombo, A. I. Ortega, N. B. Izquierdo, S. Plaza, D. Barrenetxea, Strategies for optimal use of fluids in grinding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 51, No. 5, pp. 491–499, 2011.