



Evaluation the Effect of Adding CNT and CuO to the Base Fluid on the Health surface of Inconel 718 MQL Grinding

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Chaleshtari A. A.¹,
Saraeian P.^{2*},
Haghighi S. E.¹,
Shakouri E.²

How to cite this article

Chaleshtari A. A., Saraeian P., Haghighi S. E., Shakouri E. Evaluation the Effect of Adding CNT and CuO to the Base Fluid on the Health surface of Inconel 718 MQL Grinding. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(05):335-345.

¹ Department of Mechanical Engineering, College of mechanic, electronic, computer, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

² Department of Mechanical Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

*Correspondence

P_saraeian@iau-tnb.ac.ir

Article History

Received: December 26, 2021

Accepted: January 05, 2021

ePublished: March 30, 2022

ABSTRACT

Due to the difficulties and limitations in grinding hard materials, the use of nanoparticles in the Minimum Quantity Lubrication method can be effective as an appropriate solution to improve the efficiency of lubricating fluids. In this study, the effect of using a combination of carbon nanotubes and copper nano oxide on the surface quality of Inconel 718 alloy during grinding by Minimum Quantity Lubrication has been investigated.

The results showed that the use of nanoparticles in Rapeseed oil reduced the roughness and improved the surface health of the samples. The best surface topography with the least number of pits and Furrows was obtained by combining nanoparticles with 3wt% in rapeseed oil, so that the surface roughness of the samples was reported 0.243 μm during this method, which is compared to the net use of CNT and CuO decreased by 14% and 7% respectively. Also, during the use of nanoparticles in minimum quantity lubrication, the amount of surface roughness compared to dry, flood and minimum quantity lubrication with rapeseed oil, decreased by about 35%, 13% and 18%, respectively.

Keywords Grinding, Inconel 718, Minimum Quantity Lubrication, Surface Roughness and Topography, Carbon Nanotube, CuO nanofluid

CITATION LINKS

[1] Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining. [2] A review on influence of nano-fluid MQL in machining processes. [3] Specific grinding energy and surface roughness... [4] Experimental evaluation of MoS₂ nanoparticles in jet MQL grinding... [5] Experimental study on the effect of nanoparticle concentration... [6] Heat transfer performance of MQL grinding with different nanofluids... [7] Influence of water-based copper nanofluid on wheel loading... [8] Tribological performance of SiO₂-based nanofluids in minimum quantity lubrication grinding... [9] Investigation into the performance of eco-friendly graphite nanofluid... [10] Processing characteristics of different vegetable oil-based nanofluid... [11] Application of MQL technique using TiO₂ nanoparticles compared to MQL... [12] Study on grinding of inconel 625 and 718 alloys with cutting fluid enriched... [13] Study on surface integrity and material removal mechanism in eco-friendly grinding... [14] Experimental evaluation of the lubrication performance of MoS₂/TiO₂ nanoparticles... [15] Lubricating property of MQL grinding of Al₂O₃/SiC mixed nanofluid... [16] Effect of different grinding fluids applied in minimum quantity... [17] Machining performance of Inconel-718 alloy... [18] Performance evaluation of Inconel 718 under vegetable oils based nanofluids... [19] Experimental investigations on the tribological and lubrication behavior... [20] Experimental investigation of graphene nanoplatelets-based minimum quantity... [21] www.specialmetals.com [22] www.fine-nano.ir [23] www.amdoilsales.com [24] Processing characteristics of vegetable oil-based nanofluid MQL... [25] Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface... [26] Experimental evaluation of the lubrication performance... [27] Experimental investigation into lubrication properties... [28] Finite difference simulation and experimental investigation: effects of physical synergetic properties of nanoparticles...

ارزیابی کیفیت سطح در سنگ زنی اینکونل ۷۱۸ به روش روانکاری کمینه در حضور نانولوله کربنی و نانواکسیدمس

امیرحسین اکبری چالشتی

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، برق، کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پیام سرائیان*

گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

شهرام اعتمادی حقیقی

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، برق، کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

احسان شکوری

گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

با توجه به دشواری ها و محدودیت های موجود در سنگ زنی مواد سخت، استفاده از نانوذرات در روش روانکاری کمینه، می تواند به عنوان راهکاری مناسب، در بهبود کارایی سیالات روانکار تأثیرگذار باشد. در این پژوهش، به بررسی تأثیر استفاده از ترکیب نانولوله کربنی و نانو اکسید مس بر روی کیفیت سطح آلیاژ اینکونل ۷۱۸، طی سنگ زنی به روش روانکاری کمینه پرداخته شده است. نتایج نشان داد که در مقایسه با روغن سویا، استفاده از ترکیب نانو ذرات در روغن پایه کلزا، بهبود کیفیت سطح نمونه را در بر داشته است. بهترین توپوگرافی سطح با کمترین میزان حفره و شیار، با افزودن ۳ درصد حجمی از ترکیب نانو ذرات در روغن پایه کلزا حاصل شد. به طوری که زبری سطح نمونه ها در این حالت، $0.243 \mu m$ میکرومتر گزارش گردید که در مقایسه با کمترین زبری سطح حاصل شده در حالت استفاده از نانولوله کربنی و نانو اکسید مس به طور مجزا، به ترتیب در حدود ۱۴٪ و ۷٪ کاهش نشان داد. همچنین مقدار زبری سطح طی استفاده از ترکیب نانو ذرات در روانکاری کمینه، نسبت به حالت خشک، سیلابی و روانکاری کمینه با روغن پایه کلزا، به ترتیب در حدود ۳۵٪، ۱۳٪ و ۱۸٪ کاهش نشان داد.

کلیدواژه ها: سنگ زنی، اینکونل ۷۱۸، روانکاری کمینه، زبری و توپوگرافی سطح، نانولوله کربنی، نانو اکسید مس

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۰

*نویسنده مسئول: P.saraeian@iau-tnb.ac.ir

۱- مقدمه

با توجه به وضع قوانین سخت گیرانه و مشکلات زیست محیطی ناشی از مصرف سیالات برشی، تقاضا برای استفاده از روش هایی جهت کاهش مصرف سیالات برشی و جایگزین نمودن سیالات برشی تجدید پذیر در حال افزایش است. تولید گرما در منطقه برش، به دلیل اصطکاک میان ابزار و قطعه کار، عاملی تعیین کننده بر کیفیت سطح قطعات ماشین کاری شده می باشد، بنابراین آگاهی از شرایط مختلف ماشین کاری و عملکرد انواع سیالات برشی جهت به حداکثر رساندن کارایی سیالات برش و بهبود کیفیت سطح

قطعات، حائز اهمیت می باشد. در راستای کاهش مصرف سیالات برشی، تا کنون روش های متنوعی از جمله ماشین کاری خشک (DRY)، روانکاری کمینه (MQL) و خنک کاری برودتی (Cryogenic Cooling) مورد توجه قرار گرفته است [2,1].

فرآیند سنگ زنی، بخشی از عملیات پرداخت پایانی محصول محسوب می شود که در آن به دلیل کوچک تر بودن عمق برش در مقایسه با سایر فرآیندهایی نظیر برش و فرزکاری، مقدار انرژی ویژه بزرگ تر می باشد. از این رو، روانکاری در این فرآیند باید با توجه بیشتری انجام شود. روش روانکاری کمینه حد وسط روش های روانکاری خشک و سیلابی متداول (Flood) محسوب می گردد که در آن از سیال روانکار به همراه جت گاز با فشار بالا بهره گرفته می شود. همچنین طی روش روانکاری کمینه، سایش ابزار و نیروهای برشی نسبت به سنگ زنی خشک کمتر و کیفیت سطح پایانی نیز مطلوب تر می باشد [3,4].

طی پژوهشی تأثیر درصد حجمی نانو ذرات دی سولفید مولیبدن (MoS_2) و نانولوله های کربنی (CNTs) بر زبری سطح و نسبت نیروی سنگ زنی آلیاژ پایه نیکل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ترکیب این دو نانو ذره در سیال، کاهش نسبت نیروی سنگ زنی و افزایش کیفیت سطح را در پی داشته است [5]. نتایج حاصل از مطالعه توپوگرافی سطح و بازدهی انتقال حرارت در فرآیند سنگ زنی به روش روانکاری کمینه با نانو ذرات مختلف بر روی آلیاژ پایه نیکل با استفاده از روغن پالم نشان داد که سطح نمونه سنگ زنی شده با استفاده از نانولوله کربنی، به دلیل کشش سطحی پایین و زاویه تماس و انتقال حرارت بالاتر، کمترین حفره و ترک را دارا می باشد [6].

طی مطالعه تأثیر استفاده از نانو ذرات مس بر میزان بارگذاری سنگ و زبری سطح اینکونل ۷۳۸، نتایج نشان دهنده بهبود چشمگیر زبری سطح نسبت به سنگ زنی خشک و روش سیلابی متداول بود. در این پژوهش، افزایش غلظت نانو ذرات به بالاتر از (150 ppm)، به دلیل پدیده کلوخه شدن نانوذرات و در پی آن کاهش انتقال حرارت و کارایی نانوسیال، افزایش بارگذاری چرخ سنگ و زبری سطح نمونه ها را دربر داشت [7]. نتایج حاصل از مطالعه تأثیر استفاده از روانکاری کمینه با نانو ذرات دی اکسید سیلیسیم (SiO_2) بر زبری سطح نمونه ها، طی سنگ زنی سرامیک نیتريد سیلیسیم (Si_3N_4) نشان داد، افزایش غلظت نانو ذرات در سیال، بر کاهش شیارها، ریزترک ها و زبری سطح نمونه ها تأثیرگذار بوده است [8]. طی بررسی تأثیر استفاده از روش روانکاری کمینه با نانوسیال گرافیت بر زبری سطح فولاد ۱۰۴۵، نتایج نشان داد که در مقایسه با روش های خشک، روانکاری کمینه و روانکاری سیلابی متداول، استفاده از نانو ذرات در سرعت های بالا، کاهش حرارت ایجاد شده در قطعه کار را در پی داشته است. ایجاد لایه

حرارت و انرژی ویژه سنگ زنی را در مقایسه با حالت خشک در پی دارد[20].

سوپر آلیاژهای مبتنی بر نیکل، به دلیل خواص مکانیکی و حرارتی مطلوب، کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف دارند. این سوپرآلیاژ، از ترکیب نیکل، کرم، آهن و غیره تهیه می‌شود و به دلیل حفظ خواص منحصر به فرد آنها تا دماهای بالا، شکل پذیری مناسب، مقاومت به خوردگی و سایش، استحکام بالا و قابلیت جوشکاری مطلوب، در صنایع هسته‌ای، هوافضا، موتورهای توربینی گازی، پمپ ها، مخازن برودتی و ابزارآلات کاربردهای فراوان دارد. دستیابی به کیفیت سطح و تلورانس مطلوب در محصولات ساخته شده از سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ مستلزم انجام عملیات پایانی نظیر سنگ‌زنی می‌باشد، این در حالی است که انرژی ویژه بالای سنگ‌زنی، ایجاد حرارت و در پی آن سایش سریع چرخ سنگ، کاهش کیفیت سطح محصولات را سبب می‌شود. بنابراین، انتخاب یک روش روانکاری مناسب جهت کاهش اصطکاک و حرارت ایجاد شده طی این فرآیند، ضروری می‌باشد. در این راستا، تحقیقات بسیاری در زمینه استفاده از ترکیب نانو ذرات مختلف در پایه روغن های گیاهی مختلف جهت سنگ‌زنی آلیاژ اینکونل ۷۱۸ انجام شده است. با توجه به اهمیت کاهش اصطکاک و حرارت طی فرآیند سنگ زنی و خواص ویژه نانو ذرات اکسید مس (کاهش اصطکاک) و نانو لوله کربنی (ضریب بالای انتقال حرارت) و همچنین با توجه به عدم وجود پژوهشی پیرامون بررسی تأثیر استفاده از نانو لوله‌های کربنی، نانو اکسید مس بر سلامت و زبری سطح سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ طی سنگ‌زنی با استفاده از روش روانکاری کمینه، در این پژوهش به این مهم پرداخته شده است. همچنین، مطالعه اثر هم افزایی نانو اکسید مس و نانولوله کربنی بر کیفیت سطح اینکونل ۷۱۸ نیز از دیگر جوه تمایز این پژوهش می باشد.

۲- روش تجربی

قطعه‌کار مورد استفاده در این پژوهش، سوپر آلیاژ اینکونل (UNS N07Y18) می‌باشد. جهت تعیین درصد عناصر تشکیل دهنده این آلیاژ، از آزمون پراش اشعه ایکس (EDS) استفاده شد و نتایج آن در جدول ۱ ارائه گردید.

در جدول ۲ نیز، مشخصات مکانیکی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ ارائه شده است. در این پژوهش، از ۱۴ قطعه استوانه‌ای شکل به قطر ۳۰ و ارتفاع ۱۹ میلی‌متر (در مجموع ۲۸ سطح) استفاده گردیده است.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی اینکونل ۷۱۸

گوگرد (S)	فسفر (P)	بور (B)	مس (Cu)	منگنز (Mn)	کربن (C)	کبالت (Co)
۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۰۰۷	۰/۰۲	۰/۰۲۴	۰/۰۲۶
سیلیسیم (Si)	آلومینیم (Al)	تیتانیوم (Ti)	مولیبدن (Mo)	نیوبیم (Nb)	کروم (Cr)	نیکل (Ni)
۰/۰۵۶	۰/۴۴۲	۰/۹۵۳	۲/۹۷	۵/۱۵	۱۷/۶۱	۵۲/۹

تریبوفیلیم (tribofilm) در منطقه تماس، بهبود زبری سطح را حتی به ازای عمق برش و سرعت بالا به دنبال داشته است[9].

نتایج حاصل از بررسی تأثیر استفاده از روش روانکاری کمینه توسط نانوسیال با پایه روغن‌های گیاهی طی سنگ‌زنی آلیاژ Ni-Cr نشان داد، استفاده از نانوسیال طی روانکاری کمینه با فشار بالا، تأثیر چشمگیری بر کاهش انرژی سنگ‌زنی، حرارت ایجاد شده و زبری سطح نمونه‌ها دارد[10]. طی مقایسه تأثیر استفاده از روانکاری کمینه با نانوذرات دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) و روش روانکاری سیلابی متداول طی سنگ‌زنی فولاد ۴۳۴۰، نتایج نشان داد که ترکیب جت پاک کننده چرخ سنگ و استفاده از روش سیال کمینه، کاهش سایش چرخ سنگ و زبری سطح نمونه‌ها را در پی داشته است[11]. مقایسه مورفولوژی و کیفیت سطح سوپر آلیاژ اینکونل ۶۲۵ و اینکونل ۷۱۸ طی فرآیند سنگ‌زنی با استفاده از روش روانکاری کمینه با سیال غنی شده با نانو صفحات گرافن چند لایه نشان داد، بر خلاف اینکونل ۶۲۵، استفاده از نانو صفحات گرافن، بهبود مورفولوژی سطح و کاهش زبری سطح اینکونل ۷۱۸ را سبب شده است[12,13]. ارزیابی نتایج استفاده از ترکیب نانوذرات اکسید تیتانیوم و سولفید مولیبدن (MoS_2/TiO_2) طی سنگ زنی با استفاده از روش روانکاری کمینه نشان داد، استفاده از درصد مناسب از نانو ذرات، کاهش چسبندگی میان ذرات ساینده چرخ سنگ و قطعه‌کار و در پی آن کاهش اصطکاک و زبری سطح نمونه‌ها را در پی دارد[14].

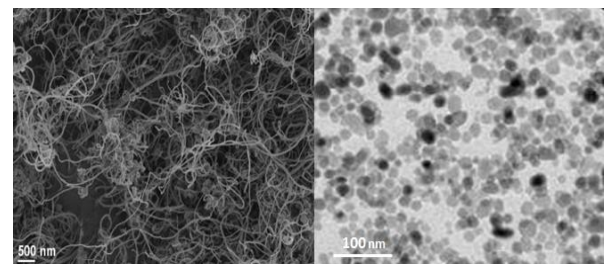
نتایج حاصل از بررسی تأثیر درصد وزنی ترکیب نانو ذرات بر مورفولوژی و زبری سطح اینکونل ۷۱۸، طی فرآیند سنگ زنی به روش روانکاری کمینه نشان داد که استفاده از ترکیب نانو ذرات (Al_2O_3/SiC) به نسبت ۳۰:۷۰، کمترین زبری سطح را در پی دارد. همچنین، تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی نیز بهترین کیفیت سطح را به ازای این نسبت نشان داد[15]. طی تحقیقی، تأثیر استفاده از روغن خالص و ترکیب روغن با نانو ذرات مختلف (MOS_2)، (WS_2) و (HBN)، بر کیفیت سطح اینکونل ۷۱۸، طی فرآیند سنگ زنی به روش روانکاری کمینه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از نانو ذرات (WS_2)، کمترین زبری سطح (Ra) را به دنبال داشته و کمترین نسبت (R_q/Ra)، در حالت استفاده از روغن خالص حاصل گردیده است[16].

طی پژوهشی، عملکرد اینکونل ۷۱۸ طی سنگ زنی به روش روانکاری کمینه با استفاده از روغن های گیاهی حاوی نانوذرات (Al_2O_3)، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از ۵/۰ درصد وزنی نانوذرات (Al_2O_3) در ترکیب با روغن های گیاهی مختلف، کاهش ضریب اصطکاک، بهبود زبری سطح و کاهش انرژی سنگ زنی را به دنبال دارد[17-19]. نتایج حاصل از بررسی تأثیر استفاده از نانو ذرات گرافن بر کیفیت سطح اینکونل ۷۱۸ طی سنگ زنی به روش روانکاری کمینه نشان داد که حضور نانو ذرات گرافن با ۳ درصد حجمی، کاهش چشمگیر زبری سطح، نیروی سنگ زنی،

جدول ۲) مشخصات مکانیکی اینکونل ۷۱۸^[21]

خواص	مقدار
استحکام کششی (مگاپاسکال)	۱۲۸۷
استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	۹۵۶
ازدیاد طول (درصد)	۲۳
سختی (راکول سی)	۳۸

سیال روانکار مورد نیاز، با افزودن نانو لوله‌های کربنی و نانو اکسید مس محصول کشور آمریکا، در دو نوع روغن گیاهی کلزا سویا تهیه گردید. به این منظور، از نانو لوله‌های کربنی با طول میانگین ۳۰-۱۰ نانومتر، قطر خارجی میانگین ۳۰-۲۰ نانومتر، قطر داخلی ۱۰-۵ نانومتر و چگالی تقریبی ۲/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده گردید. اندازه میانگین و چگالی تقریبی نانو اکسید مس استفاده شده نیز به ترتیب، ۴۰ نانومتر و ۶/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد^[22]. در شکل ۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نانو اکسید مس و نانو لوله کربنی ارائه گردیده است. مشخصات روغن‌های کلزا و سویا نیز طی جدول ۳ ارائه گردیده است.



شکل ۱) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نانو اکسید مس و نانو لوله کربنی^[22]

جهت توزین مواد و محاسبه درصد حجمی نانو ذرات در روغن پایه، از ترازوی دیجیتالی (Sartorius) مدل LA ۲۲۰۰ P Master Pro، با دقت ۰/۰۱ گرم استفاده گردید و به منظور ترکیب یکنواخت و همگن نانوذرات با روغن پایه، از دستگاه همزن مکانیکی Heidolph مدل RZR ۲۰۴۱ استفاده شد. به این ترتیب که ترکیب حاصل، توسط دستگاه همزن مکانیکی با سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه، به مدت ۳ دقیقه مخلوط گردید. عملیات سنگ زنی با استفاده از دستگاه Siemens & Halske مدل JUNG ۱۳۰۰۵۶ ساخت کشور آلمان و با ثابت نگه‌داشتن عوامل ارائه شده در جدول ۴، انجام گردید. مقادیر عوامل ذکر شده، با توجه به نتایج حاصل از پیش آزمایش‌های انجام شده و پیشینه تحقیقات انتخاب گردیده است^[24, 5].

در این پژوهش، بر اساس پیشینه مقالات مطالعه شده در این زمینه، از چرخ سنگ کوراندوم WA۸۰H۱۲۷ از جنس نرم و با دانه بندی سایز ۸۰ و ابعاد ۳۰۰×۲۰×۷۶/۲ میلی‌متر استفاده شده است^[5, 15, 25]. به منظور فراهم آوردن شرایط روانکاری، از دستگاه روانکاری کمینه با بیشترین دبی خروجی سیال ۲۱۶ میلی لیتر بر ساعت با حجم مخزن ۲ لیتر استفاده گردید.

جدول ۳) مشخصات روغن پایه^[23]

کلزا	سویا	روغن
۲۰۴ درجه سانتی‌گراد	۲۳۲ درجه سانتی‌گراد	نقطه دود
۳۱۲ درجه سانتی‌گراد	۳۱۵ درجه سانتی‌گراد	نقطه اشتعال
۱۳/۷	۸/۵	ویسکوزیته

جدول ۴) پارامترهای سنگ زنی

پارامتر	مقدار
سرعت چرخ سنگ	۳۰ متر بر ثانیه
سرعت میز کار	۳ متر بر دقیقه
عمق برش	۴۰ میکرومتر
نرخ روانکاری	۵۰ میلی‌لیتر بر ثانیه
فشار گاز	۶ بار
فاصله نازل دستگاه	۱۲ میلی‌متر
زاویه نازل دستگاه	۱۵ درجه

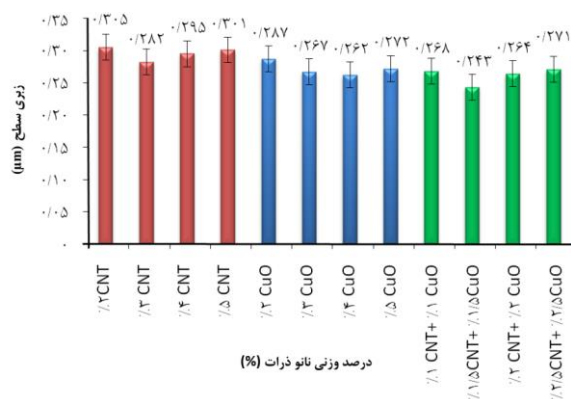
عملیات سنگ‌زنی مطابق با پارامترها و سطوح معرفی شده در جدول ۵ انجام شد. انتخاب پارامترها و سطوح آزمایش، ضمن بررسی نتایج حاصل از انجام پیش‌آزمایش‌ها و مراجعه به پیشینه تحقیقات انجام شده است^[3, 5].

جدول ۵) پارامترها و سطوح آزمایش

پارامترها	سطوح	روغن پایه
سویا	کلزا	سویا
–	–	–
نانو ذرات	نانو اکسید مس	نانو لوله کربنی
غلظت نانو ذرات در روغن	۲	۳
پایه	۴	۵

با توجه به تعداد عوامل و سطوح تعیین شده، جمعاً ۲۴ آزمایش انجام شد. همچنین، جهت مقایسه نتایج حاصل از شرایط مختلف روانکاری، ۴ آزمایش دیگر نیز در قالب سنگ‌زنی خشک، روانکاری سنتی متداول (سیلابی)، روانکاری با روغن خالص کلزا و روانکاری با روغن خالص سویا نیز انجام شد که جمعاً ۲۸ آزمایش را شامل گردید.

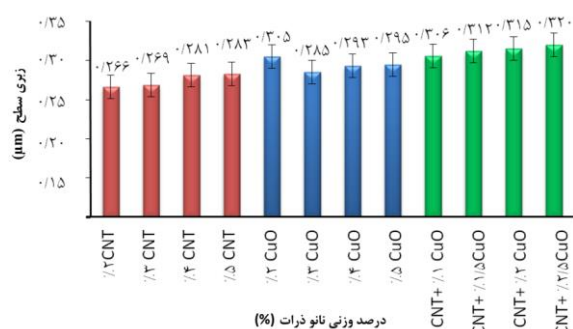
پس از سنگ زنی نمونه‌ها، جهت بررسی سلامت سطوح و توپوگرافی سطح، از میکروسکوپ الکترونی روبشی FEI مدل Quanta با بزرگنمایی تا ۱۰۰۰۰۰۰ برابر استفاده گردید. همچنین، زبری سطح نمونه‌ها نیز با استفاده از دستگاه زبری سنج Mahr مدل Marsurf ps۱ مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. اندازه‌گیری میانگین زبری سطح نمونه‌ها، طی حرکت رفت و برگشتی نوک سوزنی شکل دستگاه، در ۵ قسمت به طول ۰/۸ میلی‌متر انجام گردید^[24]. به این ترتیب، اندازه‌گیری میانگین زبری سطح برای هر حالت فرآیندی، در جهت عمود بر راستای سنگ‌زنی انجام گردید و جهت اطمینان از درستی نتایج، هر آزمون ۳ بار تکرار شد. در شکل ۲ نمایی از نحوه انجام آزمایش‌ها ارائه شده است.



شکل ۳) میانگین زبری سطح نمونه‌های سنگ‌زنی شده به روش روانکاری کمینه به ازای درصدهای حجمی مختلف از نانو ذرات در روغن پایه کلزا

میان نانو لوله‌ها و نسبت بالای طول به قطر در این ذرات، افزایش درصد حجمی آنها در سیال پایه، سبب آگلومره شدن (agglomeration) و ایجاد خوشه‌هایی (clusters) با استحکام و سختی بالا شده که با پیچیدن در بین ذرات ساینده چرخ سنگ، افزایش زبری سطح نمونه‌ها را سبب می‌شوند. همچنین رخداد پدیده آگلومره شدن و تبدیل نانو لوله‌های کربنی به میکرو خوشه‌های کربنی، سبب کاهش یکپارچگی سیال و شکسته شده فیلم روانکار در سطح تماس ابزار با نمونه شده و افزایش زبری سطح را به دنبال دارد [5, 26]. طی شکل ۴ نمایشی از توپوگرافی سطح نمونه‌ها، طی استفاده از روش روانکاری کمینه با درصدهای حجمی مختلف از نانو لوله‌های کربنی در روغن پایه کلزا ارائه گردیده است.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد، با افزایش درصد حجمی نانو لوله کربنی از ۲٪ به ۳٪ حجمی، در روغن کلزا، میزان حفره‌ها و شیارهای سطحی کاهش یافته است. در حالی که، با ادامه روند افزایش درصد حجمی نانو لوله کربنی در سیال پایه به ۴٪ و ۵٪، حفره‌ها و شیارهای عمیق‌تری روی سطح نمونه‌ها ایجاد گردیده است. خطوط سفید در این تصاویر، برآمدگی‌های حاصل از شیارهای ایجاد شده در اثر تغییر شکل پلاستیک ناشی از عدم کارایی روانکار و افزایش اصطکاک در مرز تماس ابزار و قطعه‌کار



شکل ۴) میانگین زبری سطح نمونه‌های سنگ زنی شده به روش روانکاری کمینه به ازای درصدهای حجمی مختلف از نانو ذرات در روغن پایه سویا



شکل ۲) نمایشی از نحوه انجام آزمایش‌ها

علاوه بر آن، به منظور بررسی تأثیر روش روانکاری بر حرارت ایجاد شده در موضع ماشینکاری در حالت‌های مختلف روانکاری، از دماسنج لیزری مادون قرمز Fluke مدل max ۶۰ با دقت ۰/۱ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. اندازه‌گیری دما، با قرائت میانگین دمای ثبت شده، طی مدت زمان ماشین‌کاری برای سنگ‌زنی هر نمونه، انجام شده است.

۳- نتایج و بحث

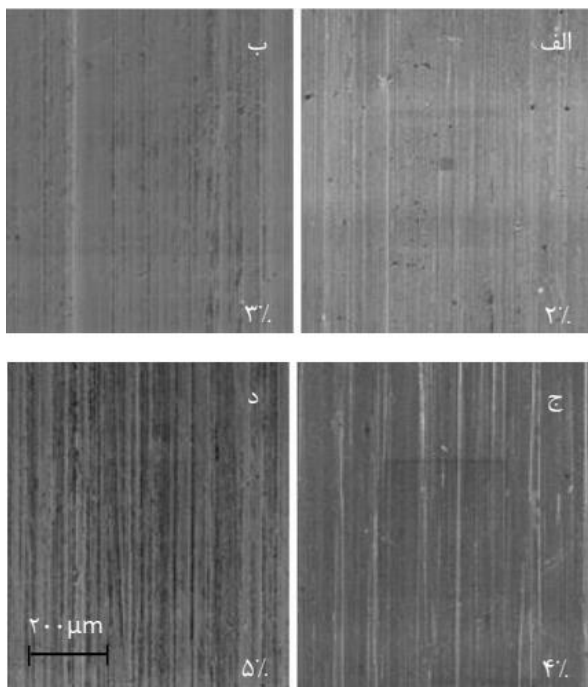
در این قسمت، به بررسی و مقایسه نتایج حاصل از تأثیر استفاده از شرایط روانکاری مختلف بر روی زبری و سلامت سطح نمونه‌ها طی سنگ‌زنی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ پرداخته شده است.

۳-۱- تأثیر افزودن نانو ذرات و ترکیب آنها در روغن پایه بر زبری و سلامت سطح نمونه‌ها:

پس از انجام عملیات سنگ‌زنی نمونه‌ها با استفاده از روش روانکاری کمینه با درصدهای مختلف از نانو لوله‌های کربنی، نانو اکسید مس و ترکیب آنها در روغن پایه کلزا و سویا و اندازه‌گیری میانگین زبری سطح نمونه‌ها مطابق روش ذکر شده، نتایج در قالب نمودار ارائه گردید.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، مقدار زبری سطح به‌زای افزودن ۲ درصد حجمی نانو لوله کربنی به روغن پایه کلزا، ۰/۳۰۵ میکرومتر گزارش گردیده است. با افزایش درصد حجمی نانو لوله کربنی به ۳ درصد حجمی، زبری سطح نمونه‌ها با ۴٪ کاهش، ۰/۲۹۲ میکرومتر ثبت شد که کمترین مقدار زبری سطح به‌دست آمده برای نمونه‌های سنگ‌زنی شده به روش روانکاری کمینه با نانو لوله کربنی است. این در حالی است که ادامه افزایش درصد حجمی نانو لوله کربنی در روغن پایه به ۴ و ۵ درصد حجمی، افزایش مجدد زبری سطح نمونه‌ها را در پی داشت.

مطابق با منابع مطالعه شده در این زمینه، نانو لوله‌های کربنی از ضریب انتقال حرارت بالایی برخوردار می‌باشند. به همین دلیل افزودن این ذرات به سیال پایه، کاهش حرارت در موضع ماشین‌کاری و در پی آن کاهش زبری سطح نمونه‌ها را به دنبال دارد. این در حالی است که به دلیل وجود نیروی قوی واندروالس

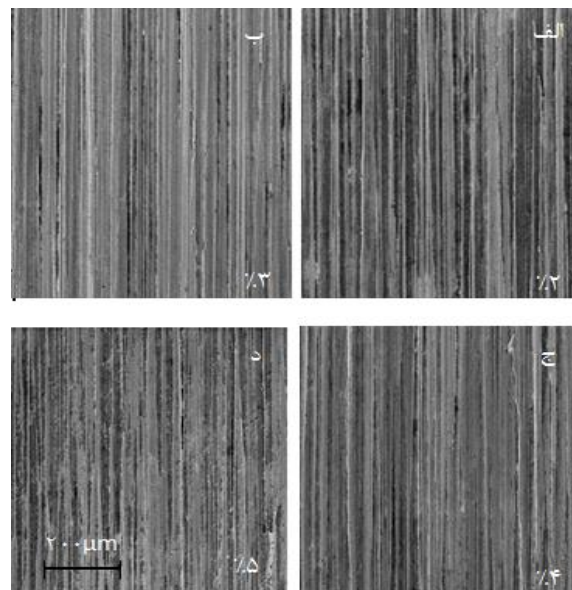


شکل ۶) تصاویر میکروسکوپی از سطح نمونه‌های سنگ‌زنی شده به روش روانکاری کمینه با استفاده از روغن پایه سویا و درصدهای حجمی مختلف از نانو لوله کربنی

در ادامه، طی شکل ۳، نتایج حاصل از اندازه‌گیری زبری سطح نمونه‌ها به‌ازای افزودن درصدهای حجمی مختلف از نانو اکسید مس به روغن پایه کلزا مورد مقایسه قرار گرفت. مقدار زبری سطح به‌ازای ۲ درصد حجمی نانو اکسید مس ۰/۲۸۷ میکرومتر گزارش شد. افزودن نانو اکسید مس به روغن کلزا، ابتدا سبب کاهش زبری سطح نمونه‌ها گردید و ادامه روند افزایش درصد حجمی نانو اکسید مس، افزایش زبری سطح نمونه‌ها را به دنبال داشت. به طوری‌که، با افزایش درصد حجمی نانو اکسید مس از ۲ به ۴ درصد حجمی، زبری سطح نمونه‌ها در حدود ۹٪ کاهش یافت.

ذرات کروی شکل نانو اکسید مس در سیال پایه مانند غلتک عمل نموده و سبب بهبود روانکاری میان لبه برنده ذرات ساینده چرخ سنگ و سطح قطعه‌کار و در پی آن کاهش زبری سطح نمونه‌ها می‌شوند. این در حالی است که افزایش بیش از حد نانو اکسید مس در سیال پایه، سبب رسوب و پر شدن پستی و بلندی‌های موجود در سطح نمونه شده و مانع تشکیل حباب‌های حرارتی در سطح نمونه می‌شود که افزایش حرارت در سطح نمونه و به دنبال آن افزایش زبری سطح و حتی ایجاد تنش‌های سطحی را در پی دارد که در برخی از منابع به آن اشاره شده است [6, 26].

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌گردد، با افزایش درصد حجمی نانو اکسید مس از ۲٪ به ۴٪ حجمی، در روغن پایه کلزا، میزان حفره‌ها و شیارهای سطحی کاهش یافته است. از دلایل کاهش حفره‌ها و شیارهای سطح نمونه‌ها می‌توان به بهبود کارایی روانکاری به واسطه افزایش درصد حجمی نانو اکسید مس و



شکل ۵) تصاویر میکروسکوپی از سطح نمونه‌های سنگ‌زنی شده به روش روانکاری کمینه با استفاده از روغن پایه کلزا و درصدهای حجمی مختلف از نانو لوله کربنی

می‌باشد. از دلایل کاهش کیفیت سطح و افزایش شیارهای ایجاد شده با افزایش درصد حجمی نانو لوله کربنی در سیال می‌توان به آلوده شدن نانو لوله‌های کربنی و افزایش اصطکاک ناشی از شکسته شدن فیلم روانکار طی ایجاد خوشه‌های کربنی اشاره نمود [26].

این روند در شکل ۴ نیز به‌ازای استفاده از روغن پایه سویا به همین منوال بود، با این تفاوت که به دلیل ویسکوزیته پائین‌تر روغن سویا در مقایسه با روغن کلزا، کمترین مقدار برای زبری سطح در این حالت به‌ازای افزودن ۲٪ نانولوله کربنی حاصل گردید. با ادامه روند افزایش درصد حجمی نانو لوله کربنی در روغن سویا، مقدار زبری سطح افزایش یافت، به طوری‌که با افزایش درصد حجمی نانو لوله کربنی در روغن سویا از ۲ به ۵ درصد حجمی، زبری سطح نمونه‌ها در حدود ۶٪ افزایش نشان داد. در شکل ۶ نمایی از توپوگرافی سطح نمونه‌ها، طی استفاده از روش روانکاری کمینه با درصدهای حجمی مختلف از نانو لوله‌های کربنی در روغن پایه سویا ارائه گردیده است.

طی فرآیند سنگ‌زنی به روش روانکاری کمینه، نانو سیال توسط نازل دستگاه به موضع سنگ‌زنی اسپری می‌شود. بنابراین، زاویه تماس میان قطرات نانو سیال و سطح قطعه می‌تواند تعیین‌کننده کیفیت خنک‌کاری و یا روانکاری باشد. زاویه تماس کوچک، به دلیل ایجاد ترشوندگی بیشتر و افزایش قابلیت خنک‌کاری و روان‌کاری، کیفیت سطح مطلوب‌تری را در پی دارد. افزودن نانو ذرات به سیال پایه به میزان بهینه، کاهش زبری سطح نمونه‌ها را در پی دارد، در صورتی‌که ادامه روند افزایش درصد حجمی نانو ذرات در سیال پایه، سبب افزایش ویسکوزیته و زاویه تماس قطره می‌شود که در نتیجه آن، زبری سطح نمونه‌ها افزایش می‌یابد [5, 6].

ترکیب هر دو نانو ذره در روغن پایه کلزا، به مقدار ۰/۲۵۵ میکرومتر گزارش گردید که در مقایسه با کمترین مقدار زبری سطح به دست آمده به ازای استفاده از نانو لوله کربنی و نانو اکسید مس خالص در روغن پایه کلزا، به ترتیب در حدود ۱۴٪ و ۳٪ بهبود یافته است که نشان دهنده کارایی استفاده از روش ترکیب نانوذرات می باشد. همان گونه که در برخی از مقالات اشاره شده، علت بهبود نتایج زبری به ازای استفاده از ترکیب نانو ذرات را می توان به اثر هم افزایی (physical synergistic effect) نسبت داد^[۵]. به این ترتیب که، هم افزایی اثر استفاده از نانو لوله های کربنی با ضریب انتقال حرارت بالا و نانو اکسید مس با قابلیت تسهیل روانکاری به سبب ساختار کروی شکل، کاهش زبری سطح را نسبت به حالت استفاده خالص از نانو ذرات نامبرده سبب شده است. همچنین، مطابق شکل ۴، مقدار زبری سطح نمونه ها به ازای افزودن ۲ درصد حجمی از ترکیب نانو ذرات در روغن پایه سویا، ۰/۳۰۶ میکرومتر ثبت گردید و با ادامه روند افزایش درصد حجمی ترکیب نانو ذرات به ۵ درصد حجمی، زبری سطح نمونه ها به مقدار جزئی افزایش نشان داد که دلیل آن را می توان به ویسکوزیته پائین روغن سویا نسبت داد. به دلیل ویسکوزیته پائین روغن سویا در مقایسه با روغن کلزا و در نتیجه آن رسوب بیشتر نانو اکسید مس در پستی و بلندی سطح نمونه ها و تشکیل بیشتر خوشه های کربنی، استفاده از ترکیب نانو ذرات در روغن سویا، بر بهبود زبری سطح نمونه ها مؤثر واقع نگردید.

به منظور مقایسه بهترین کیفیت سطوح، طی روانکاری کمینه به ازای افزودن مقادیر مختلف از نانو ذرات و ترکیب آنها در روغن پایه کلزا، تصاویر میکروسکوپی مربوط به نمونه سنگ زنی شده به روش روانکاری کمینه با استفاده از ۳ درصد حجمی نانو لوله کربنی (الف)، تصویر میکروسکوپی مربوط به حالت استفاده از ۴ درصد حجمی نانو اکسید مس (ب) و ۳ درصد حجمی ترکیب نانو ذرات (ج) طی شکل ۸، ارائه شده است. همان طور که در شکل ۹ مشاهده می گردد، سطح سنگ زنی شده به روش روانکاری کمینه با افزودن ترکیب نانو ذرات، دارای کمترین ناهمواری بوده و عاری از حفره و شیارهای عمیق می باشد.

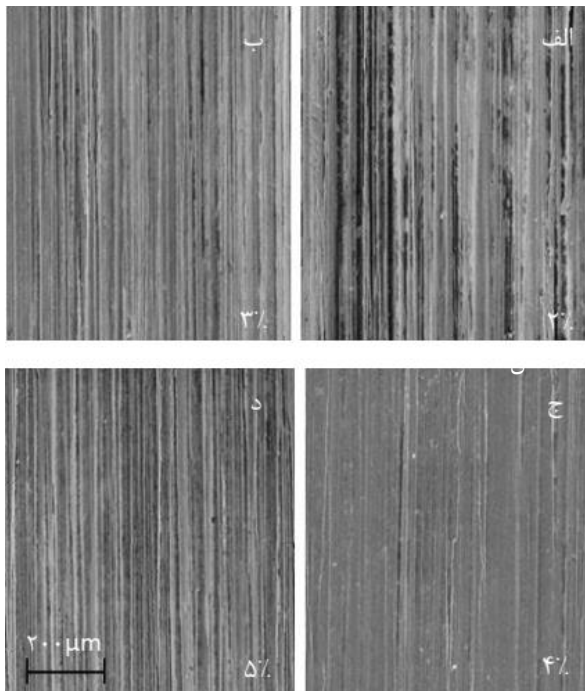
۳-۲- مقایسه شرایط مختلف روانکاری بر زبری سطح نمونه ها

جهت بررسی تأثیر شرایط روانکاری مختلف بر زبری سطح نمونه ها، پس از اندازه گیری مقادیر زبری سطح نمونه ها در محیط های مختلف روانکاری، نتایج در قالب شکل ۱۰، ارائه گردید. همان طور که شکل ۱۰ مشاهده می شود، بیشترین زبری سطح برای حالت خشک و به مقدار ۰/۳۹۳ میکرومتر گزارش شد. این مقدار برای حالت روانکاری سیلابی، روانکاری کمینه و روانکاری کمینه با ترکیب نانو ذرات در روغن پایه کلزا به ترتیب در حدود ۲۵٪، ۲۱٪ و ۳۸٪، نسبت به حالت خشک کاهش یافته است.

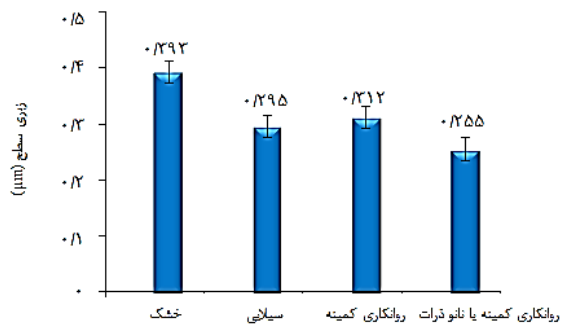
افزایش کیفیت روانکاری طی حرکت غلتک گونه نانو ذرات کروی اکسید مس اشاره نمود.

این روند در شکل ۴ نیز به ازای استفاده از روغن پایه سویا به همین منوال بود، با این تفاوت که به دلیل ویسکوزیته پائین تر روغن سویا در مقایسه با روغن کلزا، کمترین مقدار برای زبری سطح در این حالت به ازای افزودن ۳ درصد وزنی نانو اکسید مس حاصل گردید. به طوری که، با افزایش درصد حجمی نانو اکسید مس از ۲ به ۳ درصد حجمی، زبری سطح نمونه ها در حدود ۷٪ کاهش یافت. همان طور که در شکل ۷ مشاهده می گردد، با افزایش درصد حجمی نانو اکسید مس از ۲٪ به ۳٪ حجمی، در روغن پایه سویا، ابتدا میزان حفره ها و شیارهای سطحی کاهش یافته و ادامه روند افزایش درصد حجمی نانو اکسید مس، کاهش کیفیت سطح نمونه ها را در بر داشته است.

مقایسه کمترین مقدار زبری سطح به ازای استفاده از نانو اکسید مس طی سنگ زنی به روش روانکاری کمینه با روغن پایه کلزا و سویا نشان داد که استفاده از روغن کلزا در حدود ۸٪ بهبود زبری سطح نمونه ها را در پی داشته است که دلیل آن را می توان به ویسکوزیته بالاتر روغن کلزا در مقایسه با روغن سویا نسبت داد^[۴]. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود، مقایسه تأثیر افزودن ترکیب نانو لوله های کربنی و اکسید مس به روغن پایه کلزا نشان داد که مشابه با حالت استفاده از یک نوع نانو ذره در سیال پایه، افزایش درصد حجمی ترکیب نانو ذرات ابتدا کاهش و سپس افزایش زبری سطح نمونه ها را در بر داشته است. به طوری که کمترین مقدار برای زبری سطح، به ازای ترکیب ۳ درصد حجمی از



شکل ۷) تصاویر میکروسکوپی از سطح نمونه های سنگ زنی شده به روش روانکاری کمینه با استفاده از روغن پایه کلزا و درصدهای حجمی مختلف از نانو اکسید مس

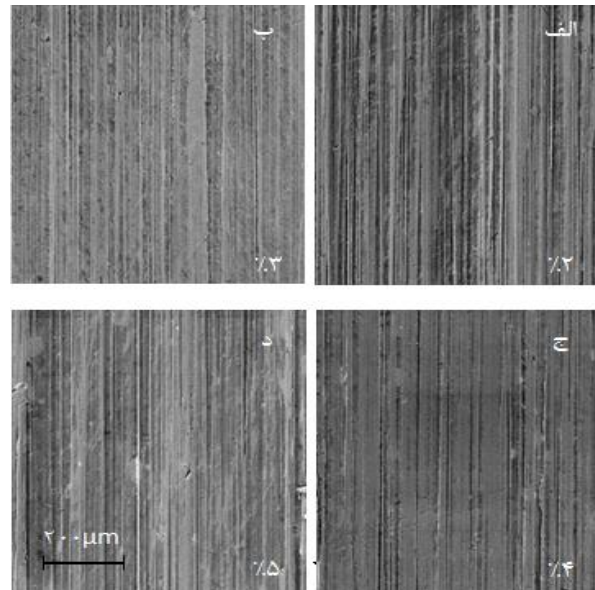


شکل ۱۰) مقایسه حرارت ایجاد شده طی سنگ زنی در محیط‌های مختلف روانکاری

مطابق با منابع مطالعه شده در این زمینه، زبری سطح در حالت سنگ زنی خشک، بالاترین مقدار را دارد که دلیل آن عدم حضور روانکاری مناسب و در پی آن ایجاد حرارت بالا و شکل‌گیری حفره و شیار به دلیل و وقوع تغییر شکل پلاستیک در سطح نمونه می‌باشد. از طرف دیگر، با وجود خنک‌کاری مناسب و کاهش حرارت طی استفاده از روش سیلابی، عدم وجود روانکاری مناسب منجر به زبری سطح قطعه می‌گردد. این در حالی است که به دلیل نفوذ بهتر روانکار با فشار بالا در سطح تماس قطعه و چرخ سنگ، زبری سطح در حالت استفاده از روش روانکاری کمینه از نظر مقدار بین دو حالت خشک و سیلابی قرار می‌گیرد. در حالت استفاده از روش روانکاری کمینه به همراه نانو ذرات، به دلیل جریان پرفشار سیال و تسهیل نفوذ نانو ذرات به موضع سنگ زنی، زبری سطح کاهش می‌یابد. علاوه بر آن طی استفاده از روغن گیاهی در سیال پایه، به دلیل تشکیل فیلم مولکولی متشکل از زنجیره‌های اسید چرب و ایجاد یک محیط ویسکوز در اثر تأثیر تری گلیسیرید موجود در روغن بر سطح فلز، محیط مناسب برای تأثیر بهتر نانو ذرات و کاهش زبری سطح فراهم می‌گردد [28]. به منظور ایجاد امکان مقایسه، طی جدول ۶، نتایج به دست آمده از این پژوهش با پژوهش‌های پیشین مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۶) مقایسه نتایج با پژوهش‌های پیشین

مشخصات مقاله	جنس نانو ذرات	سیال پایه	زبری سطح (میکرومتر)	کمترین
X. Zhang-2017 [15]	اکسید آلومینیوم / سیلیس	لیپید	۰/۲۹۸	
A. Naskar-2018 [16]	سولفید تنگستن	آب و روغن	۱/۳۷	
R.L.Virdi-2020-2021 [17], [18], [19]	اکسید آلومینیوم	آفتاب گردان / روغن پالم	۰/۵ ۰/۴۲	
R.B. Pavan-2019 [20]	گرافن	آب و روغن	۰/۴۵	
مقاله حاضر	اکسید مس / نانو لوله کربنی	کلزا	۰/۲۴۳	



شکل ۸) تصاویر میکروسکوپی از سطح نمونه‌های سنگ زنی شده به روش روانکاری کمینه با استفاده از روغن پایه سویا و درصدهای حجمی مختلف از نانو اکسید مس



شکل ۹) مقایسه سلامت سطوح نمونه‌ها به ازای افزودن مقادیر مختلف از نانو ذرات در روغن پایه کلزا

سنتی متداول، به دلیل نرخ بالای روانکاری و خنک کاری و در پی آن تسهیل انتقال حرارت در محل تماس چرخ سنگ و قطعه کار، دما به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. طی آزمایش‌های انجام شده به روش روانکاری کمینه، ویسکوزیته بالاتر روغن کلزا نسبت به روغن سویا، کاهش حرارت در موضع سنگ‌زنی را به همراه داشت. همچنین، حضور نانو ذرات در سیال پایه و افزایش کسر حجمی آنها، منجر به افزایش ویسکوزیته سیال و تشکیل فیلم ضخیم‌تر در سطح نمونه می‌شود که با نسبت انتقال حرارت بالاتر به دلیل وجود تعداد بیشتر نانو ذرات موجود در آن، گرا دیان دما را در لایه مرزی با قطعه کار کاهش می‌دهد [9, 27]. نتایج حاصل از مقایسه تأثیر استفاده از نانو ذرات در روغن کلزا نشان داد که دمای اندازه‌گیری شده طی روانکاری کمینه با نانو لوله‌های کربنی به دلیل انتقال حرارت بالای این نوع نانو ذره، مقدار کمتری را به خود اختصاص داده است و استفاده از ترکیب این نانو ذرات با درصد حجمی ۳٪، به دلیل اثر هم‌افزایی، کمترین اختلاف را نسبت به حالت روانکاری سیلابی دارد [26].

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر افزودن نانو لوله‌های کربنی و نانو اکسید مس به سیال پایه کلزا و سویا بر زبری و سلامت سطح، طی فرآیند سنگ‌زنی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ با استفاده از روش روانکاری کمینه مورد بررسی قرار گرفت که اهم نتایج به شرح زیر می‌باشند. ۱- نتایج نشان داد، افزایش درصد حجمی نانو ذرات در روغن پایه، ابتدا کاهش زبری سطح و سپس افزایش زبری سطح نمونه‌ها را در بر داشته است.

۲- مقایسه میزان کارایی دو نوع روغن پایه گیاهی در روش روانکاری کمینه نشان داد که استفاده از روغن پایه کلزا به دلیل ویسکوزیته بالاتر، بهبود کیفیت و سلامت سطح نمونه‌ها را در پی داشته است.

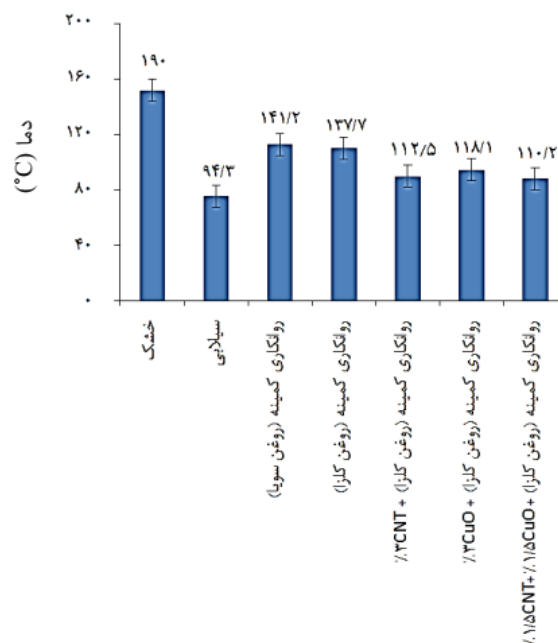
۳- افزودن ترکیبی از نانو لوله کربنی و نانو اکسید مس به سیال پایه، بهبود زبری و سلامت سطح نمونه‌ها را در پی داشت. به نحوی که با افزودن ۳ درصد حجمی از ترکیب نانو ذرات به روغن پایه کلزا، زبری سطح نمونه‌ها در حدود ۳۵٪ نسبت به حالت خشک و ۱۸٪ نسبت به روش استفاده از روانکاری کمینه با روغن پایه کلزا بهبود یافت.

۴- میزان حرارت اندازه‌گیری شده طی سنگ‌زنی به روش روانکاری کمینه به همراه ۳ درصد حجمی از ترکیب نانو ذرات در روغن پایه کلزا، در حدود ۱۱۰/۲ درجه سانتی‌گراد گزارش شد که در مقایسه با حالت خشک و روانکاری کمینه با روغن کلزا، به ترتیب در حدود ۴۲٪ و ۲۰٪ کاهش یافته است.

تشکر و قدردانی: با سپاس از خداوند یکتا و تشکر از اساتید گرانقدری که بنده را در پیشبرد این پژوهش یاری نمودند.

۳-۳- مقایسه حرارت ایجاد شده طی شرایط مختلف روانکاری

پس از اندازه‌گیری حرارت طی حالت‌های سنگ‌زنی خشک، روانکاری سنتی متداول یا سیلابی، روانکاری کمینه با روغن پایه سویا و کلزا، روانکاری کمینه با روغن پایه کلزا به همراه نانو لوله‌های کربنی و نانو اکسید مس و ترکیب این دو نانو ذره، نتایج در قالب شکل ۱۱ ارائه گردید.



شکل ۱۱) مقایسه حرارت ایجاد شده طی سنگ‌زنی در محیط‌های مختلف روانکاری

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، حرارت ایجاد شده در حالت سنگ‌زنی خشک در حدود ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شده که بالاترین مقدار را به خود اختصاص داده است. این مقدار برای حالت سنگ‌زنی به روش سیلابی، با حدود ۵۰٪ کاهش، ۹۴/۳ درجه سانتی‌گراد ثبت شد. مقدار حرارت اندازه‌گیری شده طی استفاده از روش روانکاری کمینه با روغن کلزا، نسبت به روغن سویا کوچک‌تر بود، به طوری که حرارت ثبت شده در این حالت با حدود ۲۷٪ کاهش نسبت به سنگ‌زنی خشک، به مقدار ۱۳۷/۷ درجه سانتی‌گراد ثبت گردید. همچنین حرارت گزارش شده طی استفاده از نانو لوله کربنی در روغن پایه کلزا، با حدود ۱۸٪ کاهش نسبت به حالت روانکاری کمینه با روغن پایه کلزا، مقدار کمتری را نسبت به حالت استفاده از نانو اکسید مس به خود اختصاص داد. همچنین، طی استفاده از ترکیب نانو ذرات، مقدار حرارت گزارش شده در مقایسه با سنگ‌زنی خشک و سنگ‌زنی به روش روانکاری کمینه با روغن پایه کلزا به ترتیب در حدود ۴۲٪ و ۲۰٪ کاهش نشان داد.

مطابق با منابع مطالعه شده، طی فرآیند سنگ‌زنی به روش خشک، به دلیل عدم وجود روانکار و اصطکاک بالا، حرارت در موضع سنگ‌زنی بیشترین مقدار را دارد. طی روانکاری سیلابی یا

- 11- Lopes JC, Garcia MV, Volpato RS, de Mello HJ, Ribeiro FS, de Angelo Sanchez LE, de Oliveira Rocha K, Neto LD, Aguiar PR, Bianchi EC. Application of MQL technique using TiO₂ nanoparticles compared to MQL simultaneous to the grinding wheel cleaning jet. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020;106(5):2205-18.
- 12- de Souza Ruzzi R, de Paiva RL, Gelamo RV, Machado AR, da Silva RB. Study on grinding of inconel 625 and 718 alloys with cutting fluid enriched with multilayer graphene platelets. Wear. 2021;476:1-11.
- 13- Esmaeili H, Adibi H, Rezaei SM. Study on surface integrity and material removal mechanism in eco-friendly grinding of Inconel 718 using numerical and experimental investigations. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021;112(5):1797-818.
- 14- Zhang X, Jiang R, Li C, Shi Z, Wen D, Wang Z, Shi Z, Jiang J. Experimental evaluation of the lubrication performance of MoS₂/TiO₂ nanoparticles for diamond wheel bond in silicon carbide ceramic grinding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021;113(7):2385-93.
- 15- Zhang X, Li C, Zhang Y, Wang Y, Li B, Yang M, Guo S, Liu G, Zhang N. Lubricating property of MQL grinding of Al₂O₃/SiC mixed nanofluid with different particle sizes and microtopography analysis by cross-correlation. Precision Engineering. 2017;47:532-45.
- 16- Naskar A, Singh BB, Choudhary A, Paul S. Effect of different grinding fluids applied in minimum quantity cooling-lubrication mode on surface integrity in cBN grinding of Inconel 718. Journal of Manufacturing Processes. 2018;36:44-50.
- 17- Viridi RL, Chatha SS, Singh H. Machining performance of Inconel-718 alloy under the influence of nanoparticles based minimum quantity lubrication grinding. Journal of Manufacturing Processes. 2020;59:355-65.
- 18- Viridi RL, Chatha SS, Singh H. Performance evaluation of Inconel 718 under vegetable oils based nanofluids using minimum quantity lubrication grinding. Materials Today: Proceedings. 2020;33:1538-45.
- 19- Viridi RL, Chatha SS, Singh H. Experimental investigations on the tribological and lubrication behaviour of minimum quantity lubrication technique in grinding of Inconel 718 alloy. Tribology International. 2021;153:106581.
- 20- Pavan RB, Venu Gopal A, Amrita M, Goriparthi BK. Experimental investigation of graphene nanoplatelets-based minimum quantity lubrication in grinding Inconel 718. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2019;233(2):400-10.
- 21- <https://www.specialmetals.com/techcenter/alloys>.
- 22- <https://fine-nano.ir/>
- 23- <http://www.amdoilsales.com/products>.
- 24- Wang Y, Li C, Zhang Y, Yang M, Li B, Dong L, Wang J. Processing characteristics of vegetable oil-based nanofluid MQL for grinding different workpiece materials. International Journal of Precision

تأییدیه‌های اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. محتوای مقاله منتج از فعالیت علمی خود نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج و متن مقاله برعهده نویسندگان مقاله است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافی با پایان نامه /رساله و طرح پژوهشی ندارد.

سهم نویسندگان: امیرحسین اکبری چالشتی ۲۵٪، پیام سرائیان ۲۵٪، شهرام اعتمادی حقیقی ۲۵٪، احسان شکوری ۲۵٪
منابع مالی: شخصی

فهرست مراجع

- 1- Debnath S, Reddy MM, Yi QS. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. Journal of cleaner production. 2014;83:33-47.
- 2- Bee PH, Devaraj S, Lahari MC, Sai PS, Narayanaswamy KS. A review on influence of nano-fluid MQL in machining processes. In AIP Conference Proceedings 2021 (Vol. 2317, No. 1, p. 020011). AIP Publishing LLC.
- 3- Zhang D, Li C, Jia D, Zhang Y, Zhang X. Specific grinding energy and surface roughness of nanoparticle jet minimum quantity lubrication in grinding. Chinese Journal of Aeronautics. 2015;28(2):570-81.
- 4- Zhang Y, Li C, Jia D, Zhang D, Zhang X. Experimental evaluation of MoS₂ nanoparticles in jet MQL grinding with different types of vegetable oil as base oil. Journal of Cleaner Production. 2015;87:930-40.
- 5- Zhang Y, Li C, Jia D, Li B, Wang Y, Yang M, Hou Y, Zhang X. Experimental study on the effect of nanoparticle concentration on the lubricating property of nanofluids for MQL grinding of Ni-based alloy. Journal of Materials Processing Technology. 2016;232:100-15.
- 6- Li B, Li C, Zhang Y, Wang Y, Jia D, Yang M, Zhang N, Wu Q, Han Z, Sun K. Heat transfer performance of MQL grinding with different nanofluids for Ni-based alloys using vegetable oil. Journal of Cleaner Production. 2017;154:1-11.
- 7- Pashmforoush F, Bagherinia RD. Influence of water-based copper nanofluid on wheel loading and surface roughness during grinding of Inconel 738 superalloy. Journal of Cleaner Production. 2018;178:363-72.
- 8- Dambatta YS, Sayuti M, Sarhan AA, Hamdi M, Manladan SM, Reddy M. Tribological performance of SiO₂-based nanofluids in minimum quantity lubrication grinding of Si₃N₄ ceramic. Journal of Manufacturing Processes. 2019;41:135-47.
- 9- Seyedzavvar M, Shabgard M, Mohammadpourfard M. Investigation into the performance of eco-friendly graphite nanofluid as lubricant in MQL grinding. Machining Science and Technology. 2019:1-7.
- 10- Viridi RL, Chatha SS, Singh H. Processing characteristics of different vegetable oil-based nanofluid MQL for grinding of Ni-Cr alloy. Advances in Materials and Processing Technologies. 2020:1-4.

nanofluid in MQL grinding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017;92(9):3807-23.

28- Shabgard M, Seyedzavvar M, Mohammadpourfard M, Mahboubkhah M. Finite difference simulation and experimental investigation: effects of physical synergetic properties of nanoparticles on temperature distribution and surface integrity of workpiece in nanofluid MQL grinding process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;95(5):2661-79.

Engineering and Manufacturing-Green Technology. 2018;5(2):327-39.

25- Wang Y, Li C, Zhang Y, Li B, Yang M, Zhang X, Guo S, Liu G. Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in MQL grinding with different nanofluids. Tribology International. 2016;99:198-210.

26- Zhang Y, Li C, Jia D, Zhang D, Zhang X. Experimental evaluation of the lubrication performance of MoS₂/CNT nanofluid for minimal quantity lubrication in Ni-based alloy grinding. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2015;99:19-33.

27- Shabgard M, Seyedzavvar M, Mohammadpourfard M. Experimental investigation into lubrication properties and mechanism of vegetable-based CuO