



Comparison of Machined Surface Integrity in 304L Stainless Steel Turning Under Minimum Quantity Lubrication (MQL) and Cryogenic (CO₂) Conditions

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Dinarvand S.^{1*},
Jabbaripour B.¹

How to cite this article

Dinarvand S, Jabbaripour B. Comparison of Machined Surface Integrity in 304L Stainless Steel Turning under Minimum Quantity Lubrication (MQL) and Cryogenic (CO₂) Conditions. Modares Mechanical Engineering; 2023;23(11):577-585.

ABSTRACT

In the current research, the effect of cutting depth and speed on surface topography, microhardness and microstructural changes in cross-sectional surface of turned parts under dry, wet, MQL and cryogenic cooling (CO₂) conditions, on 304L stainless steel has been investigated. The main origin of surface topography defects was the formation of built up edge (BUE) on the cutting tool and its removal again. Also, the increase in cutting speed causes instability in the formation of BUE, as a result the volume of accumulated BUE decreases. Considering the improvement of surface topography, in the order of priority, the efficiency of MQL, wet and cryogenic methods has been from the highest to the lowest compared to the dry method. The cross section of machined samples were prepared and it was observed that subsurface hardness of the samples decreases with the distance from the surface up to 34% and approaches the hardness of the bulk material. The hardness value in cross sections of machined samples is directly related to the work hardening caused by severe plastic deformation on machined surface. With increase of cutting speed, the intensity of plastic deformation increases and the hardness under the surface increases. Different cooling and lubrication methods had a direct effect on thickness of the microstructural deformed layer. Under the highest cutting speed used in this research, the maximum reduction in thickness of the deformed layer of the microstructure in cryogenic and MQL conditions compared to the dry method was equal to 62% and 28%, respectively.

Keywords 304L Stainless Steel, Turning, Surface Integrity, Minimum Quantity Lubrication, Cryogenic.

CITATION LINKS

1- Stainless and heat resistance steel turning with AlCrN PVD coatings for machining of austenitic stainless steel. 3- A review of cryogenic cooling in machining processes. 4- Investigation of cooling and lubrication strategies for surface integrity in machining. 6- A study on droplets sizes, their ... 7- Investigating surface roughness, material removal rate ... 8- Investigating the Effects of Powder Mixed Electrical Discharge Machining ... 9- Experimental study of tool wear and surface roughness on high speed ball milling in D2 steel. 10- Next generation high performance ... 11- The effect of cryogenic cooling and minimum quantity lubrication on end milling of ... 12- Cryogenic high speed machining of cobalt chromium alloy. 13- Evaluation of machining performance in cryogenic ... 14- Comparison of surface integrity, tool wear and chip morphology of CO₂ ... 15- Influence of nano- minimum quantity lubrication with MoS₂ and CuO ... 16- Thermal analysis during turning of AZ31 magnesium... 17- Experimental investigation on the feasibility of dry and cryogenic machining as sustainable strategies... 18- Experimental investigation on the ... 19- State-of-the-art in surface integrity in machining ... 20- A study on the surface integrity aspects of... 21- Comparison between Dry, MQL ... 22- Investigation of effects of dry and near dry ... 23- Effect of liquid nitrogen cooling on surface...

¹ Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

sae.dinarvand@iauctb.ac.ir

Article History

Received: September 26, 2023
Accepted: November 2, 2023
ePublished: November 13, 2023

مقایسه یکپارچگی سطح ماشینکاری شده در تراشکاری فولاد ضدزنگ 304L تحت حالات روانکاری کمینه (MQL) و کرایوژنیک (CO₂)

سعید دیناروند^{۱*}، بهزاد جباری پور^۱

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

چکیده

در تحقیق جاری تاثیر پارامترهای عملیاتی بر برش و فرآیند تراشکاری، تغییرات ریزسختی و فرآیند تراشکاری در سطح مقطع عرضی قطعات تراشکاری شده تحت حالات روانکاری کمینه (MQL) و خنک‌کاری کرایوژنیک (CO₂)، روی فولاد ضدزنگ 304 L بررسی شده است. منشاء اصلی عیوب در توپوگرافی سطوح ماشینکاری شده لایه انباشته روی سطح ابزار و جدا شدن مجدد آن بود، همچنین افزایش برش باعث ناپایداری تشکیل لایه انباشته و در نتیجه کاهش حجم کاری می‌گردد. در بحث بهبود توپوگرافی سطح ماشینکاری شده، به تاثیرات مختلف روش‌های MQL، تر و کرایوژنیک، نسبت به روش خشک، از پیش‌ساخته شده است. برش عرضی از نمونه‌های ماشینکاری شده تهیه و مقایسه مقدار سختی زیرسطحی نمونه‌ها با فاصله گرفتن از سطح تا حداکثر عمق انجام یابد و به سختی ماده پایه قطعه کار نزدیک می‌شود. میزان سختی عرضی نمونه‌های ماشینکاری شده، ارتباط مستقیم با کارسختی و فرآیند تراشکاری بر اثر تغییر شکل پلاستیک شدید روی سطح قطعه دارد. با افزایش سرعت برش، شدت تغییر شکل پلاستیک در قطعه نیز افزایش یافته و میزان برش در زیر سطح بیشتر می‌شود. فرآیندهای خنک‌کاری و روانکاری مختلف مستقیم بر ضخامت لایه تغییر شکل یافته ریزساختاری دارد. تحت بیشترین سرعت برشی استفاده شده در تحقیق جاری، حداکثر کاهش ضخامت لایه تغییر شکل یافته ریزساختاری در حالات کرایوژنیک و روانکاری کمینه نسبت به حالت خشک، به ترتیب برابر با ۶۲٪ و ۲۸٪ بوده است.

کلیدواژه‌ها: فولاد ضدزنگ 304 L، تراشکاری، یکپارچگی سطح، روانکاری کمینه، کرایوژنیک.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۱

* نویسنده مسئول: sae.dinarvand@iauctb.ac.ir

۱- مقدمه

فولادهای ضدزنگ، آلیاژی از آهن با حداقل ۱۱٪ کروم می‌باشند. کروم در فولاد باعث ایجاد خاصیت محافظت در مقابل خوردگی می‌گردد. علت به وجود آمدن این خاصیت، تشکیل لایه اکسید-کروم بر روی سطح فولاد می‌باشد که اکسیژن موجود در هوا برای ایجاد آن کافی است. خاصیت محافظت با افزایش درصد کروم افزایش می‌یابد [1]. استحکام بالای فولاد ضدزنگ سبب افزایش اعمال بارهای مکانیکی به ابزار برشی در حین فرآیندهای ماشینکاری می‌شود و از طرفی هدایت حرارتی پایین سبب افزایش دما در موضع برشی است و حرارت نمی‌تواند به‌طور مطلوب از طریق

قطعه‌کار و براده دفع شود. از طرفی ضعف شکست براده در حین ماشینکاری این نوع فولادها، باعث سایش شدید ابزار شده و کیفیت سطح قطعه‌کار را کاهش می‌دهد. فولادهای ضدزنگ آستنیتی علیرغم داشتن نرخ پایین هدایت حرارتی، کارسختی (Work hardening) بالایی دارند، این ویژگیها باعث می‌شود تا فولادهای ضدزنگ نسبت به فولادهای کربنی، فولادهای آلیاژی کم‌کربن و فولادهای ضدزنگ غیرآستنیتی، سخت‌تر ماشینکاری شوند. چقرمگی و شکل‌پذیری بالا باعث شکل‌گیری براده‌های بلند همراه با چسبیدن مواد قطعه‌کار به ابزار شده که منجر به افزایش سایش چسبنده (Adhesive wear) می‌شود. علاوه بر این، حرارت زیاد در موضع برش باعث نفوذ (Diffusion) و سایش شیمیایی (Chemical wear) روی ابزار می‌شود. به علاوه، تشکیل لایه انباشته (Built up edge) در حین برش می‌تواند منجر به ناپایداری نیروهای ماشینکاری شود که باعث لب‌پر شدن (Chipping) ابزار برشی می‌گردد [2].

استفاده از خنک‌کاری و روانکاری در عملیات ماشینکاری نقش مهمی را ایفا می‌کند. عموماً استفاده از سیال خنک‌کار و روانکار در فرآیند برشی، عمر ابزار و دقت ابعادی را افزایش، دما و اصطکاک در موضع برش را کاهش، زبری سطح و میزان انرژی مصرفی در فرآیند برش را بهبود می‌بخشد. استفاده از سیالات برشی مرسوم در صنعت مشکلات زیست محیطی فراوانی ایجاد می‌کند [3]. به منظور کاهش مشکلات زیست محیطی ماشینکاری آلیاژهای سخت ماشینکاری (difficult to cut alloys) مثل فولادهای ضدزنگ، انتخاب خنک‌کاری و روانکاری مناسب بسیار حایز اهمیت است. استفاده از تکنیک خنک‌کاری یا روانکاری مدرن مانند خنک‌کاری تحت فشار (High pressure cooling)، خنک‌کاری کرایوژنیک (کرایوژنیک کمینه Minimum (MQL)) و روانکاری خشک آبروسل (Quality Lubrication (ADL)) علاوه بر بهبود قابلیت ماشینکاری، بهبود یکپارچگی سطح قطعه‌کار و کاهش سایش ابزار، بهره‌وری را نیز افزایش می‌دهد [4].

کرایوژنیک علم استفاده از مواد در دماهای بسیار پایین است. وظیفه اصلی خنک‌کاری کرایوژنیک در برش فلزات، دفع حرارت از منطقه برش و کاهش اصطکاک در فصل مشترک ابزار و براده و قطعه‌کار می‌باشد. نیتروژن مایع LN₂ پرکاربردترین سیال در خنک‌کاری کرایوژنیک است و نقطه جوش آن ۱۹۸/۸- درجه سانتیگراد است. گاز دی‌اکسیدکربن دیگر سیال کرایوژنیک استفاده شده است و نقطه جوش آن ۷۸/۵- درجه سانتیگراد است. گاز دی‌اکسیدکربن در مخازن با فشار متوسط تحت دمای محیط نگهداری می‌شود [5].

روانکاری کمینه روشی است که در آن با استفاده از یک نازل، جت هوای حاوی ذرات ریز روغن با فشار، مستقیماً به سر ابزار و لبه‌های

سطح در عملیات ماشینکاری می‌باشند^[13]. کایناک و همکاران در تحقیقی به ارزیابی عملکرد ماشینکاری Inconel718 و مقایسه آن در روشهای خشک و تر، کرایونیک و روانکاری کمینه پرداختند. در طی این آزمایشات، پدیده شکست ناگهانی ابزار مشاهده نشد اما در فرآیند خشک و کرایونیک، لبه انباشته بسیار بزرگی نسبت به روش MQL به وجود آمد. در ماشینکاری خشک نرخ فرسایش سطح آزاد بسیار زیاد بود و در روش کرایونیک این نرخ به کمترین حالت رسید^[14].

جباری پور و همکاران در تحقیقی تاثیر تغییرات پارامترهای مختلف برشی بر سایش ابزار و یکپارچگی سطح در حالات فرزکاری خشک و کرایونیک با سیال دی اکسیدکربن، بر روی فولاد ضدزنگ 304L را بررسی نمودند. آنها بیان کردند که در فرزکاری خشک، بر روی توپوگرافی سطح قطعه کار عیوبی همچون خراشیدگی، پارگی سطحی، تورم، ترکهای ریز، حفره‌ها و رسوب مجدد مواد براده‌برداری شده، پدید آمد. در شرایط کرایونیک، بافت سطحی یکنواخت‌تری ایجاد شد و برای عمق برش، سرعت برشی و پیشروی پایین، عیوب به صورت ریزحفره‌ها و تحت شرایط خشن‌تر، عیوب به صورت حفره و پارگی سطحی ظاهر شده‌اند. فرزکاری کرایونیک زبری سطح قطعه کار را نسبت به حالات متناظر خشک، از ۴٪ تا ۷۱٪ بهبود داده است. در تمامی موارد، سختی سطح ماشینکاری شده در حالت خشک از کرایونیک بیشتر است. افزایش پارامترهای برشی و یا ماشینکاری خشک، سبب تشدید تغییر شکل پلاستیک و فشردگی شدن و پدید آمدن ترک‌های ریز در مجاورت سطح ماشینکاری می‌شود. همکاران در این تحقیق نشان دادند که در فرزکاری کرایونیک نسبت به خشک، سایش ابزار کمتر است و تغییر شکل یافته در کرایونیک نسبت به خشک ۱۶٪ بود^[15].

همکاران در این تحقیق فرآیند سنگ‌زنی فولاد ابزار سردکار D2 با استفاده از مایع MQL با افزودن نانوذرات MoS₂ و CuO به دو روش روغن گیاهی و با غلظت‌های مختلف و تاثیر آنها بر نیروهای برشی و زبری سطح را بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که مقدار سایش و زبری در مایع با استفاده از پودر نانو اکسید مس نسبت به روغن گیاهی ۴ درصد و نانو پودر MoS₂ در روغن پایه سویا با غلظت ۲ درصد به ترتیب ۱۹ و ۳۵ درصد کاهش یافت. همچنین هنگام استفاده از نانو پودر CuO در روغن پایه کلزا و با غلظت ۲ درصد، زبری سطح در مقایسه با روغن خالص به عنوان سیال برشی، ۷۷ درصد کاهش داشت^[16].

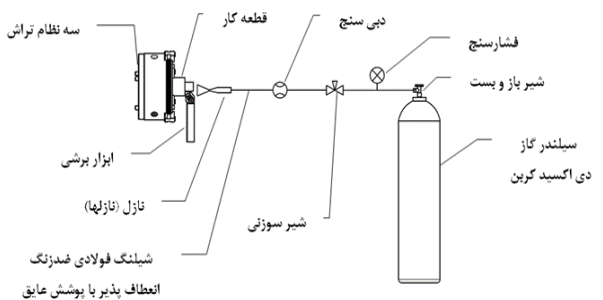
بیشتر تحقیقات انجام شده در حوزه ماشینکاری کرایونیک مربوط به استفاده از سیال نیتروژن مایع بوده است و تحقیقات بسیار محدودی با استفاده از سیال کرایونیک دی‌اکسیدکربن در فرآیندهای ماشینکاری انجام شده است. بر اساس آخرین اطلاع نویسندگان تحقیق جاری، تاکنون تحقیقات بسیار محدودی در زمینه تراشکاری کرایونیک با استفاده از سیال خشک‌کار دی‌اکسیدکربن و همچنین تراشکاری با روانکاری کمینه و مقایسه این تکنیکهای خشک‌کاری و روانکاری جدید با یکدیگر و با حالات

برشی برخورد کرده و علاوه بر خنک کردن قطعه‌کار و ابزار، باعث روانکاری سطح و کاهش اصطکاک نیز می‌گردد. سیال برشی اغلب از نوع روغن گیاهی بوده و مصرف معمول آن در این روش در حد چند میلی‌لیتر در دقیقه می‌باشد که در مقایسه با مصرف چند لیتر در دقیقه در روش‌های سنتی خشک‌کاری بسیار قابل توجه می‌باشد^[6].

یکپارچگی سطح (Surface integrity) مفهومی است که علاوه بر بیان خواص هندسی، به معرفی خواص مکانیکی، متالورژیکی، فیزیکی و شیمیایی نیز می‌پردازد. اصطلاح یکپارچگی سطح در ماشینکاری، وضعیت و خواص سطح ماشینکاری شده و رابطه آن با کارکرد قطعه را توصیف می‌کند. به طور کلی یکپارچگی سطح در قالب وضعیت توپوگرافی، خواص مکانیکی، شیمیایی و متالورژیکی سطح ماشینکاری شده را توصیف می‌کند. به علاوه، متالورژیکی سطح را توصیف می‌شود. ویژگی‌های سطحی که به یکپارچگی سطح بستگی دارد، شامل استحکام خستگی، استحکام شکست، نرخ خوردگی و خواص تریبولوژیکی می‌باشد^[7-9].

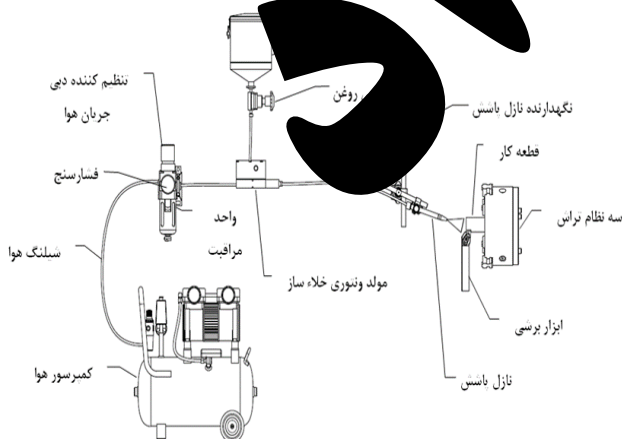
همکاران به بررسی کرایونیک به وسیله دی‌اکسیدکربن در فرزکاری فولاد 6Al-4V با استفاده از مایع نیتروژن پرداختند. بررسی‌های آنها نشان داد که در فرزکاری خشک و در مقایسه با روش خشک و MQL کاهش ۳۳٪ سایش ابزار را به همراه دارد. همچنین با استفاده از این روش می‌توان سایش ابزار را به برداری را نسبت به سایر روش‌ها تا ۷۳٪ افزایش داد. همکاران تحقیقی در مورد تاثیر خشک‌کاری کرایونیک و نیتروژن مایع و روانکاری کمینه در فرزکاری آلیاژ 6Al-4V انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که ترکیب حالت روانکاری کمینه خشک‌کاری کرایونیک منجر به افزایش عمر ابزار تا ۳۲٪ می‌شود. همچنین در روش کرایونیک، در عمق برشی بالا ممکن است به دلیل عدم روانکاری مطلوب، در سطح ابزار چسبندگی ایجاد شود^[11]. شکرانی و همکاران به بررسی تاثیر خشک‌کاری کرایونیک نیتروژن مایع در ماشینکاری سرعت بالای آلیاژ کبالت کروم پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از روش کرایونیک به ترتیب سبب کاهش ۳۵٪ و ۴۲٪ زبری سطح نسبت به روشهای MQL و تر می‌شود. همچنین مشخص شد سایش سطح آزاد در حالت MQL و تر به ترتیب ۲۶ و ۱۷ برابر بیشتر از حالت کرایونیک است^[12]. خانا و همکاران به بررسی شرایط ماشینکاری و سایش ابزار در آلیاژ 15-5-PH پرداختند. نتایج آنها نشان داد که میزان عیوب تشکیل شده در ابزارهای برشی در روش‌های کرایونیک و تر نسبت به روش خشک و روانکاری کمینه کاهش پیدا کرده است. در این تحقیق عامل اصلی به وجود آمدن تمامی عیوب در ابزار، تشکیل لبه انباشته بر روی سطح برنده ابزارها معرفی شد. بررسی زبری سطح نشان داد که با توجه به میزان کاهش عیوب ابزار در روش تر، کمترین مقدار زبری نیز در این روش تشکیل شده است. پس از حالت تر، روش کرایونیک، روانکاری کمینه و خشک دارای بیشترین میزان زبری

تصویر شماتیک مدار طراحی و ساخته شده در تحقیق جاری به منظور انجام عملیات خنک کاری کرایوژنیک دی اکسیدکربن، در شکل ۱ نشان داده شده است. از مزایای این مدار می توان به پیوستگی جریان سیال کرایوژنیک، عدم یخ زدگی شیلنگ ها، عدم انسداد مسیر حرکت سیال به دلیل یخ زدگی، انعطاف کافی و مناسب شیلنگ ها برای تنظیم کردن در محل ماشین کاری و افزایش بازه تنظیمی دبی اشاره کرد. این مدار توسط کلمپ هیدرولیکی و پایه مگنت، در محل مورد نظر بر روی ماشین ابزار بسته می شود.



شکل ۱) تصویر شماتیک مدار خنک کاری کرایوژنیک CO₂

برای انجام آزمایشات MQL، یک مدار مجزای دیگر با استفاده از منبع تامین هوا با فشار ثابت (کمپرسور)، واحد تغذیه و اختلاط روغن و هوا (واحد مراقبت) با قابلیت تنظیم مقدار دبی و فشار پاشش روغن (مخلوط هوا و روغن)، نازل پاشش ایروسول، شیلنگ های انتقال، شیلنگ های لوله های انتقال هوا و ایروسول، ساخته و استفاده از تصویر شماتیک این مدار نیز در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲) تصویر شماتیک مدار روانکاری کمینه (MQL)

قبل از انجام تست های تراشکاری کرایوژنیک و روانکاری کمینه، ابتدا با انجام تعداد زیادی پیش تست، تنظیمات مختلف و متنوع بر روی این مدارها آزمایش شدند و در نهایت پارامترهای بهینه

ماشینکاری متداول خشک و تر، بر روی فولاد ضدزنگ آستنیتی ۳۰۴L گزارش شده است. در این پژوهش، به بررسی و مقایسه شاخصهای یکپارچگی سطح همچون توپوگرافی سطح ماشینکاری شده، تغییرات ریزسختی و تغییرات ریزساختاری در سطح مقطع عرضی (Cross section) نمونه های تراشکاری شده فولاد ضدزنگ ۳۰۴L تحت روشهای خشک، تر (آب صابون)، خنک کاری کرایوژنیک با استفاده از سیال دی اکسیدکربن و روانکاری کمینه پرداخته می شود. در تحقیق جاری جهت ماشینکاری کرایوژنیک با استفاده از سیال دی اکسیدکربن و همچنین تکنیک روانکاری کمینه، دو نوع مدار مخصوص و مجزا برای ماشینکاری کرایوژنیک و روانکاری کمینه، طراحی، ساخته و استفاده شده است.

۲- مواد، تجهیزات و طراحی

در این آزمایشات از دستگاه برش CNC مدل STM2000 ساخت کشور آلمان، با توان خروجی ۱۵ کیلووات و حداکثر سرعت اسپیندل ۴۰۰۰ دور بر دقیقه استفاده شده است. برای انجام عملیات تراشکاری از اینسرت های ZN250 ساخت کشور آلمان با کد استاندارد CNMG120412-DM از جنس YP استفاده شده است. لازم به ذکر است که برای هر تست یک لایه یک لایه جدید اینسرت ابزار استفاده شده است. ابزار اینسرت MARQ DCLNL-2020-K12 بوده است. برای بررسی توپوگرافی ماشینکاری شده از میکروسکوپ نوری مدل BX51M استفاده شده است. برای انجام تست ریزسختی دستگاه SHIMADZU Micro Hardness Tester ساخت کشور ژاپن با بار ۱۰۰ گرم نیرو و مدت زمان ۵ ثانیه استفاده گردید. برای بررسی ریزساختار از میکروسکوپ نوری OLYMPUS PME3 استفاده شده است.

در تحقیق جاری، با توجه به اینکه مطابق جدول ۱، سرعت برشی و عمق برش شعاعی هر کدام در سه سطح تغییر می کنند و با توجه به چهار حالت ماشینکاری خشک، تر (آب صابون)، روانکاری کمینه و کرایوژنیک، در مجموع تعداد ۳۶ تست ماشینکاری، طراحی و اجرا شده است. در هر تست تراشکاری، یک قطعه میلگرد فولادی ضدزنگ L304 با قطر ۳۵ میلی متر و طول ۱۴۰ میلی متر استفاده گردیده است. نوع تست های تراشکاری، روتراشی بوده است و تعداد پاس روتراشی، روی هر نمونه قطعه کار، ۴ پاس و هر پاس به طول ۷۰ میلی متر بوده است. تمامی قطعات به طول ۱۰۰ میلی متر بیرون از کارگیر ماشین تراش بسته شدند. مقدار بیرون آمدگی هولدر از ابزارگیر دستگاه برابر با ۵۰ میلی متر بوده است.

جدول ۱) پارامترهای برشی مورد استفاده در تست های ماشینکاری

سرعت برشی (Vc) (متر بر دقیقه)	۱۵۰، ۱۰۰، ۵۰
سرعت پیشروی (f) (میلی متر بر دور)	۰/۲ (ثابت)
عمق برش شعاعی (ap) (میلی متر)	۰/۵، ۰/۱۵، ۰/۲/۵

(عمق برشی ۱/۵ میلیمتر، سرعت پیشروی ۰/۲ میلیمتر بر دور و سرعت برشی ۱۰۰ متر بر دقیقه)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- توپوگرافی سطوح ماشینکاری شده

هدف از بررسی توپوگرافی، بررسی عیوب در مقیاس میکرو روی سطوح ماشینکاری است که امکان دیدن آنها با چشم غیرمسلح تقریباً امکان پذیر نیست. در این بخش به عنوان نمونه، تصاویر توپوگرافی سطوح ماشینکاری شده، تحت حالات مختلف خنک-کاری و روانکاری، تحت شرایط عمق برشی ۱/۵ میلیمتر، سرعت پیشروی ۰/۲ میلیمتر بر دور و سرعت برشی ۵۰ متر بر دقیقه، در شکل ۴، ارائه و تحلیل شده است.

با توجه به تصاویر شکل ۴، به ازای این مقادیر پارامترهای برشی، عیب لبه انباشته در تمامی سطوح ماشینکاری شده تحت انواع حالات خنک کاری و روانکاری به چشم می خورد. مقدار و تراکم این عیب در روش MQL در کمترین حالت ممکن در مقایسه با سایر روش ها قرار دارد. فرایند تر، کرایوژنیک و خشک در مقایسه با روش MQL در رده های بعدی قرار دارند. کم بودن لبه انباشته در حالت تر به دلیل سرعت برشی پایین و امکان نفوذ سیال خنک کار به موضع تماس لبه برنده ابزار و سطح قطعه است. در فرآیند خشک به دلیل نبود هیچ گونه سیال خنک کار، پدیده لبه انباشته به صورت پخش شده (Adhering Layer) به وجود می آید. در این نوع عیب لبه انباشته در سطح دچار ذوب موضعی شده و پس از سرد شدن در سطح به صورت گسترده پخش می گردد [۱۷].

مدارها مطابق جداول ۲ و ۳، به ترتیب در تست های تراشکاری روان کاری کمینه و کرایوژنیک، تعیین، تنظیم و استفاده شدند.

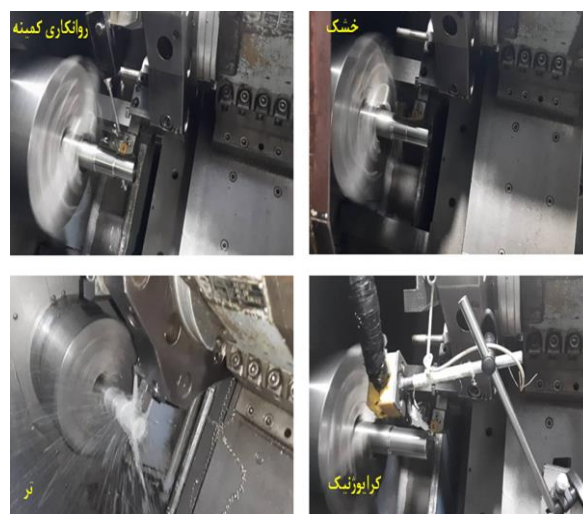
جدول ۲) تنظیمات بهینه مدار MQL

فشار هوای کمپرسور (بار)	۵/۴
دبی پاشش سیال برشی (میلی لیتر بر ساعت)	۶۵
نوع روغن مصرفی	روغن برشکاری حفظان CU 637
سطح پاشش ایروسل	سطح براده ابزار
زاویه پاشش ایروسل نسبت به سطح براده (درجه)	۶۰
زاویه پاشش ایروسل نسبت به سطح براده (درجه)	۱۵
فاصله نازل تا سطح (میلی متر)	۳۰

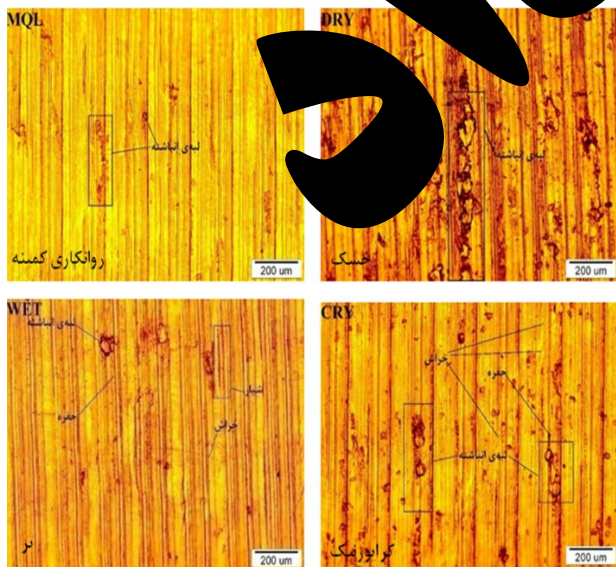
جدول ۳) تنظیمات بهینه مدار کرایوژنیک CO₂

فشار هوای کپسول (بار)	۷۰
دبی پاشش سیال (لیتر بر دقیقه)	۱۸
سطح پاشش سیال	سطح براده ابزار
زاویه پاشش سیال نسبت به سطح براده (درجه)	۶۰
زاویه پاشش سیال نسبت به سطح آزاد اصلی (درجه)	۱۵
فاصله نازل تا سطح ابزار (میلی متر)	۳۰

در شکل ۳ تصاویری از یک سری آزمایشات تراشکاری خشک، تر، روانکاری کمینه و کرایوژنیک، تحت پارامترهای عمق برش شعاعی ۱/۵ میلیمتر، سرعت پیشروی ۰/۲ میلیمتر بر دور و سرعت برشی ۱۰۰ متر بر دقیقه، به عنوان نمونه ارائه شده است.

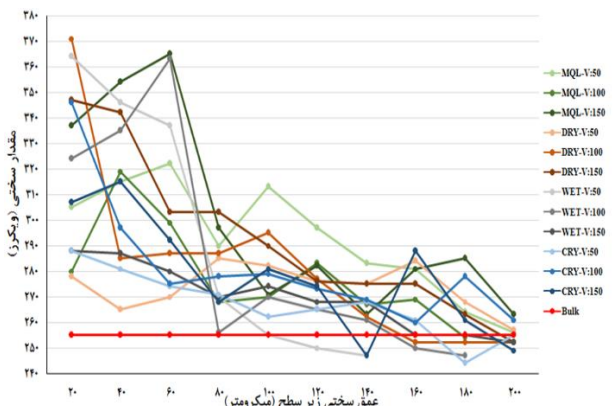


شکل ۳) آزمایشات تراشکاری تحت حالات مختلف خنک کاری و روان کاری



شکل ۴) توپوگرافی سطوح ماشینکاری شده با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر (عمق برشی ۱/۵ میلیمتر، سرعت پیشروی ۰/۲ میلیمتر بر دور و سرعت برشی ۵۰ متر بر دقیقه)

در موضع برش در بیشترین حد ممکن نسبت به سایر روش‌های خنک‌کاری و روانکاری قرار دارد. همچنین در روش MQL نیز بازدهی خنک‌کاری موضع برش کمتر از روش‌های کرایوژنیک و تر بوده است. دلیل افزایش سختی در روش‌های خشک و MQL، افزایش نیروهای ماشینکاری و افزایش میزان در موضع برش به دلیل عدم بازدهی مناسب در کاهش حرارت موضع برش می‌باشد [20] در سرعت برشی ۵۰ متر بر دقیقه، در روش‌های کرایوژنیک و تر مقادیر سختی در فواصل نزدیک به سطح، نسبتاً دارای بیشترین مقدار می‌باشند ولی با افزایش عمق، مقادیر سختی با افت شدیدی همراه بوده و از عمق ۶۰ میکرومتر به بعد، کمتر از روش‌های خشک و MQL است.



شکل ۵) مقایسه کلی تغییرات ریزسختی در نمونه‌های ماشین‌کاری شده تحت شرایط مختلف

مطابق با نتایج [21]، عمق سختی نشان‌دهنده میزان نفوذ حرارت در سطح ماشینکاری می‌باشد. تنش حرارتی یکی از عوامل ایجاد کارسختی در برش است و به همین دلیل است که در روش خشک و MQL، سختی در سطح موضع برش بیشترین مقدار سختی ایجاد می‌شود. در روش‌های تر و کرایوژنیک اعمال سیال خنک‌کاری با بازدهی بالا منجر به کاهش دفعه برش شده و امکان نفوذ حرارت را تا عمق‌های کمتری محدود کرده است. مجموعه این عوامل باعث ایجاد چنانچه در نمودارهای سختی کرایوژنیک و تر می‌باشد.

برای سرعت‌های برشی ۱۰۰ و ۱۵۰ متر بر دقیقه، با افزایش سرعت برشی، مقدار سختی نیز افزایش یافته است. در این سرعت‌های برشی، بیشترین دامنه تغییرات سختی تا رسیدن به سختی پایه، در روش‌های خشک و MQL مشاهده شده است. در فرآیندهای کرایوژنیک و تر با افزایش میزان سرعت برشی، شیب کاهش مقدار سختی نسبت به روش‌های خشک و MQL، بسیار بیشتر است. در واقع در این روش‌ها میزان سختی در محدوده بسیار نزدیکی به سطح، با افت شدیدی مواجه شده است.

سختی در زیر سطوح ماشینکاری حاصل لغزش سطح ابزار بر روی سطح قطعه است. حرکت ابزار به روی قطعه کار و انجام براده‌برداری در سطح قطعه، موجب تغییر شکل پلاستیک در سطح و زیر سطح

برای توپوگرافی سطح در روش کرایوژنیک، عیب لبه انباشته به صورت پخش شده، به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا کرده که دلیل این پدیده کاهش دما در موضع برش توسط گاز دی‌اکسیدکربن است. با کاهش دما، میزان لبه انباشته تشکیل شده در حین براده‌برداری کاهش یافته و در نتیجه ذرات تشکیل شده در سطح کار پخش نخواهد شد [18]. در روش‌های خشک و تر و کرایوژنیک، خراش‌های تصادفی ناشی از اصابت آبی براده‌ها با سطوح به وجود آمده است. این عیب در روش MQL به دلیل اعمال جریان هوا و دور شدن براده‌ها از سطح ماشینکاری تا حد زیادی کاهش یافته است [19]. کمتر شدن نسبی خراش‌های سطحی در فرآیند کرایوژنیک نیز به همین دلیل است.

۲-۳- ریزسختی در سطح مقطع عرضی نمونه‌های ماشین‌کاری شده

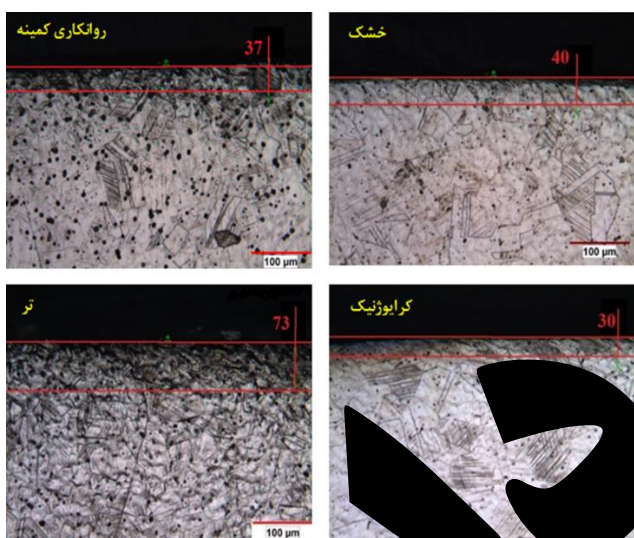
جهت مشاهده تغییرات ریزسختی در سطح مقطع عرضی و همچنین تغییرات ریزساختاری در سطح مقطع عرضی نمونه‌های ماشینکاری شده در بخش‌های مختلف، از پیشانی آزاد میلگرد‌های تراشکاری شده، قطعه‌های دیسکی شکل با ضخامت ۱۰ میلی‌متر بریده شد و تمام این نمونه‌های بریده شده تحت سرد شدن در مرحله بعد، سطح خارجی مانند سطح داخلی در روش خشک و تر و کرایوژنیک، توسط سمباده ۴۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ پرداخت شدند. همچنین برای رفع خراش‌های سطحی حاصل از فرآیند سمباده‌زنی، قطعات توسط دیسک سنباده آلومینیوم و آب به وسیله نمد پولیش شده تا سطح صیقلی به دست آید.

مقدار ریزسختی ماده پایه (Bulk) قبل از ماشینکاری با ۲۵۰ ویکرز می‌باشد. علاوه بر نمونه خام، ریزسختی سطح موضع برش ویکرز برای نمونه‌های ماشینکاری شده تحت سرعت‌های برشی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ متر بر دقیقه، در عمق برشی ۲/۵ میلی‌متر تحت شرایط خنک‌کاری و روانکاری مختلف انجام شده است. به عبارتی مجموعاً ۱۳ نمونه مورد ریزسختی‌سنجی قرار گرفتند. سختی‌سنجی از سطح تا عمق ۲۰۰ میکرومتری در سطح مقطع عرضی نمونه‌ها به فواصل ۲۰ میکرومتری انجام گردید. نتایج ریزسختی‌سنجی در شکل ۵ ارائه شده است.

مطابق با این نمودار بازه سختی به وجود آمده حاصل از ماشینکاری با شرایط مختلف روانکاری و خنک‌کاری و سرعت‌های برشی مختلف، از حدود ۲۴۵ تا ۳۷۰ ویکرز متغیر است. همچنین با افزایش عمق از سطح ماشینکاری شده، میزان سختی، کاهش پیدا کرده و به عدد سختی ماده پایه نزدیک می‌شود. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که در آزمایشات انجام شده بیشترین میزان سختی به وجود آمده، در فاصله نزدیک به سطح و در عمقی کمتر از ۶۰ میکرومتر می‌باشد.

به ازای سرعت برشی ۵۰ متر بر دقیقه، این نتیجه حاصل شد که بیشترین میانگین سختی در روش‌های خشک و MQL می‌باشد. در روش خشک به دلیل عدم وجود سیالات برشی، میزان حرارت

علت تغییر ریزساختار در لایه‌های زیرین سطح مقطع عرضی نمونه‌های ماشینکاری شده، کارسختی ناشی از افزایش مقدار کرنش برشی در حین تغییر شکل پلاستیک است. این تغییرات باعث افزایش میزان سختی در فواصل نزدیک به سطح ماشینکاری می‌شود. با افزایش فاصله از سطح ماشینکاری، این تغییرات کاهش پیدا کرده و ریزساختار، به شکل و فرم ماده پایه نزدیک می‌شود. همچنین در این حالت سختی به وجود آمده به سختی ماده پایه، میل می‌کند [23]. با توجه به استدلال مذکور، برای تحلیل تغییرات ریزساختاری در این بخش، بهترین ابزار و استراتژی تحلیلی، توجه به مقادیر ریزسختی در بخش قبلی است، چرا که ارتباط تنگاتنگی بین تغییرات ریزسختی و تغییرات ریزساختاری در سطح مقطع عرضی نمونه‌های ماشینکاری شده وجود دارد.



شکل ۶ تغییرات ریزسختی در سطح مقطع عرضی نمونه‌های ماشینکاری شده (سرعت برش ۵۰ متر بر دقیقه، عمق برش ۰/۲ میلی‌متر و سرعت پیشروی ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه) در شرایط مختلف روانکاری و سرعت برش

نمودار موجود در شکل ۷، تغییرات ریزسختی در لایه‌های زیرین سطح مقطع عرضی نمونه‌های ماشینکاری شده تحت سرعت‌های برشی و شرایط مختلف خنک‌کاری و روانکاری می‌باشد. مطابق شکل ۷، ترتیب بیشترین تا کمترین عمق تغییرات ریزساختاری عبارت از خشک، تر، MQL و کرایوژنیک می‌باشند. همچنین شیب افزایش میزان تغییرات در روش خشک بیشتر از روش‌های MQL و تر می‌باشد. نمودار تغییرات در روش کرایوژنیک به صورت یک خط راست و افقی بسیار نزدیک شده و میزان تغییرات ریزساختاری در سطح مقطع عرضی نمونه‌های ماشینکاری به روش کرایوژنیک در همه سرعت‌های برشی تقریباً یکسان بوده و کمترین میزان در بین تمام روش‌های خنک‌کاری و روانکاری بوده است.

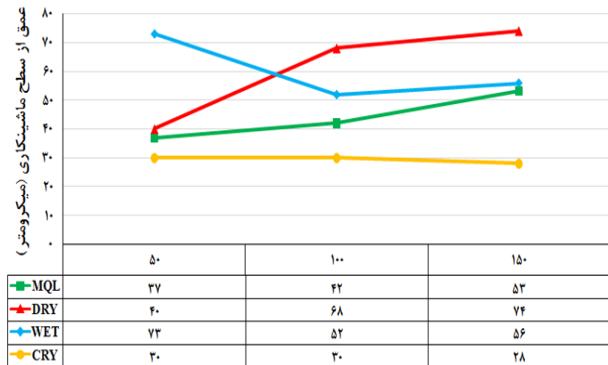
می‌شود. این تغییر شکل همراه با تولید حرارت و افزایش دما می‌باشد که خود عاملی مهم در افزایش مقدار سختی است. با افزایش حرارت و نیروی برشی، میزان کرنش برشی برای ایجاد تغییر شکل پلاستیک افزایش پیدا کرده و این موجب کارسختی در زیر سطح قطعه‌کار می‌باشد [21]. در واقع دلیل عمده سختی ایجاد شده در لایه زیرین سطح قطعات ماشینکاری، کار مکانیکی یا کارسختی می‌باشد [22]. در روش‌های کرایوژنیک و تر، به دلیل اعمال سیال خنک‌کار، امکان نفوذ حرارت به عمق زیاد فراهم نیست که این خود از عوامل کاهش سختی می‌باشد.

۳-۳- تغییرات ریزساختاری در سطح مقطع عرضی نمونه‌های ماشینکاری شده

در عملیات ماشینکاری به روش تراشکاری، نیروی زیاد برای انجام تغییر شکل پلاستیک، ریزسختی‌های موجود در سطح و زیر سطح، تحت تاثیر این نیروی افزایش می‌یابد. این تغییرات حاصل از تغییر شکل پلاستیک قرار گرفته و دچار تغییرات نسبی در منطقه ماشینکاری نشده و ریزساختار پایه ماده می‌ماند. در این جمله این تغییرات ریزساختاری، می‌توان به تغییر شکل ریزساختار ماده در قالب پیچش، له‌شدگی، تغییر جهت و غیره اشاره کرد. در این نمونه‌های مانت شده که در مرحله قبل سختی شده است، در این مرحله برای بررسی تغییرات ریزساختاری به کار می‌رود. در این صورت که پس از اطمینان از صیقلی بودن سطوح و سنباده‌های مانت خراش‌های ناشی از سمباده‌زنی، سطح بیرونی نمونه‌های مانت شده در محلول اتیکال (Ethical) با ترکیب ۱۰٪ اسید (H₂C₂O₄) و ۹۰٪ آب مقطر که به عنوان الکترولیز استفاده شده است، با ولتاژ ۱۰ ولت به مدت ۴۰ ثانیه تحت عملیات اچ الکتروکیمیایی قرار گرفتند. به منظور جلوگیری از خوردگی خارج از کنترل و ایجاد پیت‌های مضاعف در عملیات اچ، نمونه‌ها به محض خروج از محلول الکترولیز، توسط آب مقطر شسته شدند.

در شکل ۶، تصاویر ریزساختاری به ازای سرعت برشی ۵۰ متر بر دقیقه، عمق برشی ۲/۵ میلی‌متر و سرعت پیشروی ۰/۲ میلی‌متر بر دور، تحت حالات خنک‌کاری و روانکاری مختلف ارائه شده است. با توجه به این تصاویر، تغییرات ریزساختاری ناشی از تغییر شکل پلاستیک در سطح مقطع عرضی همه نمونه‌های ماشینکاری شده، فارغ از شرایط روانکاری و خنک‌کاری به وجود آمده است.

از آنجایی که تغییر شکل به وجود آمده ریزساختاری در بیشتر نمونه‌ها فاقد مرز کاملاً مشخص و معین، برای تعیین عمق منطقه متاثر از تغییر شکل پلاستیک می‌باشد، معیار سنجش تغییرات ریزساختاری، کاهش متوسط اندازه دانه (دانه‌بندی)، نسبت به منطقه تغییر شکل نیافته در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است، در تمام تصاویر شکل ۶، عمق تقریبی لایه تغییر شکل یافته ریزساختاری بر مبنای مقیاس ۱۰۰ میکرومتری مندرج در تصاویر، تخمین و در حاشیه بالای تصاویر به صورت یک عدد، درج شده است.



سرعت برشی (متر بر دقیقه) و عمق تغییرات ریزساختاری (میکرومتر)

شکل ۷) نمودار عمق تغییرات ریزساختاری تحت شرایط مختلف (عمق برشی ۱۰۰ میکرومتر و سرعت پیشروی ۰/۲ میلیمتر بر دور)

طبق نمودار و مقادیر مندرج شده در شکل ۷، به طور کلی با افزایش سرعت برشی از ۷۰ تا ۱۰۰ متر بر دقیقه میزان عمق تغییرات ریزساختاری، بیشتر می شود. با افزایش سرعت برشی، میزان حرارت در موضع برش افزایش می یابد و ماشینکاری بیشتر موجب اعمال کرنش برشی بالاتری بر روی قطعه کار می گردد. لغزش ابزار روی سطح قطعه کار و اعمال تنشهای موضعی مکانیکی در فرآیند براده برداری، موجب تغییر شکل پلاستیکی در زیر سطح قطعه می شود. در نهایت تغییر شکل پلاستیکی در فرم لایه ها و دانه بندی در لایه زیرین سطح ماشینکاری شده کارسختی، اصلی ترین دلیل تشکیل لایه سخت شده در سطح ماشینکاری می باشد.

۴- نتیجه گیری

- ۱) عمده عیوب به وجود آمده بر توپوگرافی سطوح ماشینکاری، ناشی از تشکیل لبه انباشته و جدا شدن مجدد آن از روی سطح ابزار و تغییر شکل شدید پلاستیک در یک موضع خاص قطعه کار دارد.
- ۲) در ماشینکاری فولاد ضدزنگ، شرایط برشی باید در محدوده پایدار و متناسب با این جنس قرار گیرد. استفاده از سرعت های برشی پایین، باعث ایجاد عیوب زیاد توپوگرافی سطح می شود. همچنین افزایش سرعت برشی باعث ناپایداری در تشکیل لبه انباشته و در نتیجه کاهش حجم توده لبه انباشته می گردد.
- ۳) در بحث بهبود توپوگرافی سطح ماشینکاری شده، به ترتیب اولویت، تاثیر روش های MQL، تر و کرایوژنیک، نسبت به روش خشک، از بیشترین تا کمترین بوده است.
- ۴) برش عرضی نمونه های ماشینکاری شده تهیه و مشاهده گردید که مقدار سختی زیرسطحی نمونه ها با فاصله گرفتن از سطح تا حداکثر ۳۴٪ کاهش می یابد و به سختی ماده پایه قطعه کار نزدیک می شود. میزان سختی در سطح مقطع عرضی

نمونه های ماشینکاری شده، ارتباط مستقیم با کارسختی به وجود آمده بر اثر تغییر شکل پلاستیک شدید روی سطح قطعه دارد. با افزایش سرعت برشی، شدت تغییر شکل پلاستیک در قطعه نیز افزایش یافته و میزان سختی در زیر سطح بیشتر می شود.

(۵) فرآیندهای خنک کاری و روانکاری تاثیر مستقیم بر ضخامت لایه تغییر شکل یافته ریزساختاری در سطح مقطع عرضی نمونه های ماشینکاری دارد. استفاده از روش کرایوژنیک به دلیل کاهش دمای سطح باعث می شود تا ضخامت لایه تغییر شکل یافته در این روش، از سایر روشها کمتر گردد. بعد از روش کرایوژنیک، فرآیند MQL به دلیل کاهش اصطکاک ابزار با سطح قطعه کار در موضع برش، دارای کمترین میزان تغییرات ریزساختاری در سطح مقطع عرضی نمونه های ماشینکاری می باشد. تحت بیشترین مقدار سرعت برشی استفاده شده در تحقیق جاری، حداکثر کاهش ضخامت لایه تغییر شکل یافته ریزساختاری در حالات کرایوژنیک و روانکاری کمینه نسبت به حالت خشک، به ترتیب برابر با ۶۲٪ و ۲۸٪ بوده است.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده و همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری فرستاده نشده است.

تعارف: نویسنده حاضر، هیچگونه تعارض منافی با سازمانها و مراکز دیگر ندارد.

نگارنده: سعید دیناروند (نویسنده اول)، روش شناس / پژوهشگر / نگارنده (۵۰٪)؛ بهزاد جباری پور (نویسنده دوم)، روش شناس / پژوهشگر اصلی / تحلیل گر داده ها (۵۰٪).

منابع مالی: هیچگونه منبع مالی در این مقاله درج نشده است.

منابع

- 1- Kaviani nezhad F. Mechanical and heat resistance steels. Abgin Rayan publication. 2007; 19-50 (In Persian).
- 2- Funa Endrino JL, Fox-Rabinovich GS, Gey C. Hard AlTiN, AlCrN PVD coatings for machining of austenitic stainless steel. Surface and Coatings Technology. 2006; 200(24):6840-5.
- 3- Yildiz Y, Nalbant M. A review of cryogenic cooling in machining processes. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2008; 48(9):947-64.
- 4- Busch K, Hochmuth C, Pause B, Stoll A, Wertheim R. Investigation of cooling and lubrication strategies for machining high-temperature alloys. Procedia CIRP. 2016; 41:835-40.
- 5- Davim JP, editor. Surface integrity in machining. London: Springer; 2010.
- 6- Maruda RW, Krolczyk GM, Feldshtein E, Pusavec F, Szydłowski M, Legutko S, Sobczak-Kupiec A. A study on

alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2016 ;100:25-54.

20- Thakur DG, Ramamoorthy B, Vijayaraghavan L. A study on the surface integrity aspects of superalloy Inconel 718 under minimum quantity lubrication in high speed turning. *International Journal of Materials and Structural Integrity*. 2011 ;5(1):36-45.

21- Rachmat H, Mahalil K, Abd Rahim E, Mohid Z. Comparison between dry, MQL, and cryogenic cooling technique on surface integrity of burnished surface. *International Journal of Integrated Engineering*. 2019 ;11(5):35-41.

22- Sharma J, Sidhu BS. Investigation of effects of dry and near dry machining on AISI D2 steel using vegetable oil. *Journal of cleaner production*. 2014 ;66:619-23.

23- Zhao W, Ren F, Iqbal A, Gong L, He N, Xu Q. Effect of liquid nitrogen cooling on surface integrity in cryogenic milling of Ti-6Al-4 V titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020 ;106:1497-508.

droplets sizes, their distribution and heat exchange for minimum quantity cooling lubrication (MQCL). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2016; 100:81-92.

7- Jabbaripour B, Sadeghi MH, Shabgard MR, Faraji H. Investigating surface roughness, material removal rate and corrosion resistance in PMEDM of γ -TiAl intermetallic. *Journal of Manufacturing Processes*. 2013; 15(1):56-68.

8- Jabbaripour B, Sadeghi MH, Shabgard MR, Shajari S, Hassanpour H. Investigating the effects of powder mixed electrical discharge machining on the surface quality of γ -TiAl intermetallic. *Advanced Materials Research*. 2012; 488:396-401

9- Molla Ramezani N, Rasti A, Sadeghi M.H, Jabbaripour B, Rezaei Hajideh . Experimental study of tool wear and surface roughness in high speed helical milling in D2 steel. *Modares Mechanical Engineering. Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*. 2015; 11(1):198-202 (in Persian).

10- Cordes S, Hübner F, Peterschmidt T. Next generation high performance cutting by use of carbon dioxide as cryogenics. *Prodia Cirp*. 2014; 14:401-5.

11- Park KH, Yang J, Kim MA, Lee DY, Kim TG, Kim DW, Lee SW. Effect of cryogenic cooling and minimum quantity lubrication on end milling of titanium alloy. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015; 29:5121-6.

12- Shokrieh A, Kia V, Newman ST. Cryogenic high speed turning of cobalt chromium alloy. *Procedia Manufacturing*. 2016; 6:404-7.

13- N, Shah P. Comparative analysis of dry, flood, MQL and cryogenic CO2 techniques during the machining of 316L SS alloy. *Tribology International*. 2020 ; 140:105196.

14- Kayani . Evaluation of machining performance in cryogenic machining of Inconel 718 and comparison with dry and MQL machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014 ;72(5-8):919-33.

15- Jabbaripour B, Masouleh HS, Salmasi MH. Comparison of surface integrity, tool wear and chip morphology in CO2 cryogenic and dry milling of 304 stainless steel. *Surface Topography: Metrology and Properties*. 2021 ;9(1):015032.

16- Azami A, Salahshournejad Z, Shakouri E, Sharifi AR, Saraeian P. Influence of nano-minimum quantity lubrication with MoS2 and CuO nanoparticles on cutting forces and surface roughness during grinding of AISI D2 steel. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023 ;87:209-20.

17- Danish M, Ginta TL, Habib K, Carou D, Rani AM, Saha BB. Thermal analysis during turning of AZ31 magnesium alloy under dry and cryogenic conditions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017 ;91:2855-68.

18- Bordin A, Sartori S, Bruschi S, Ghiotti A. Experimental investigation on the feasibility of dry and cryogenic machining as sustainable strategies when turning Ti6Al4V produced by Additive Manufacturing. *Journal of cleaner production*. 2017 ;142:4142-51.

19- Thakur A, Gangopadhyay S. State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super

