ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2023;23(11):577-585

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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-22]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1402.23.11.1.3]

[DOI: 10.22034/mme.23.11.577]

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 decrea Considering the improvement of surafce topography, in the order of priority, the effici of MQL, wet and cryogenic methods has been from the highest to the lowest to the dry method. the cross section of machined samples were prepared and it as observed that subsurface hardness of the samples decreases with the distance from the urface up to 34% and approaches the hardness of the bulk material. The hardness value in ross sectio machined samples is directly related to the work hardening caused by severe lastic mation on machined surface. with increase of cutting speed, the intensity of lasti mati increases and the hardness under the surface increases. Different cooling and cation ess direct effect on thickness of the microstructural deformed layer der the highest of cutting speed used in this research, the maximum reduction in thic s of the de d yer of the microstructure in cryogenic and MQL conditions compared to the dr e was equ l to 62% and 28%, respectively.

Keywords 304L less Steel mg, Surface Integrity, Minimum Quantity Lubrication, Cryogenic.

Retract

CITATION LINKS

1- Stainless and heat resistance steel AlCrN PVD coatings for machining of austenitic stainless steel. 3- A rev of cr ic cooling in machining processes. 4- Investigation of cooling and lubrication s for Integrity in Machining. 6- A study on droplets sizes, their ...7- Inv gating e rou ness, material removal rate ... 8- Investigating the Effects of Powder Mixe ctrical charge Machining ... 9- Experimental study of tool wear and surface roughn on high speed h milling in D2 steel. 10- Next generation high performance ... 11 e effect of cr cooling and minimum quantity lubrication on end milling of ... 12- ogenic hi eed machining of cobalt chromium alloy. 13- Evaluation of machining perform n cryogenic ... 14- Comparison of surface integrity, tool wear and chip morphology 02 ... 15- Influence of nano- minimum quantity lubrication with MoS2 and CuO ... 16 hermal 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

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

مقایسه یکپارچگی سطح ماشینکاری شده در تراشکاری فولاد ضدزنگ 304L تحت حالات روانکاری کمینه (MQL) و کرایوژنیک (CO_2)

سعید دینارووند[1]*، بهزاد جباری‌پور[1]

[1] گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

چکیده

در تحقیق جاری تاثیر پارامترهای عملیاتی برشی بر توپوگرافی سطح ماشینکاری، تغییرات ریزسختی و [illegible] در سطح مقطع عرضی قطعات تراشکاری شده تحت حالات خ[illegible] روانکاری کمینه (MQL) و خنک‌کاری کرایوژنیک (CO_2)، روی فولاد ضدزنگ 304 L [illegible] شده است. منشاء اصلی عیوب در توپوگرافی سطوح ماشینکاری[illegible] لبه انباشته روی سطح ابزار و جدا شدن مجدد آن بود، همچنین افزایش [illegible] برشی باعث ناپایداری [illegible] تشکیل لبه انباشته و در نتیجه کاهش حجم [illegible] می‌گردد. در بحث بهبود توپوگرافی سطح ماشینکاری شده، به [illegible] تاثیر روش‌های MQL، تر و کرایوژنیک، نسبت به روش خشک، از بیش[illegible] است. برش عرضی از نمونه‌های ماشینکاری شده تهیه و [illegible] مقدار سختی زیرسطحی نمونه‌ها با فاصله گرفتن از سطح تا حداکثر [illegible] یابد و به سختی ماده پایه قطعه‌کار نزدیک می‌شود. میزان سختی [illegible] عرضی نمونه‌های ماشینکاری شده، ارتباط مستقیم با کارسختی [illegible] ود آمده بر اثر تغییر شکل پلاستیک شدید روی سطح قطعه دارد. با افزایش [illegible] برشی، شدت تغییر شکل پلاستیک در قطعه نیز افزایش یافته و می[illegible] در زیر سطح بیشتر می‌شود. فرآیندهای خنک‌کاری و روانکاری مختلف [illegible] مستقیم بر ضخامت لایه تغییر شکل یافته ریزساختاری دارد. 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.

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 لبه انباشته (Built up edge) درحین 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. عموما 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 [illegible] ماشینکاری آلیاژهای سخت ماشینکاری (difficult to cut alloys) مثل فولادهای ضدزنگ، انتخاب [illegible] خنک‌کاری و [illegible] مناسب بسیار حایز اهمیت است. [illegible] خنک‌کاری یا روانکاری مدرن مانند خنک‌کاری تح[illegible]ار (High pressure cooling)، خنک‌کاری کرایوژنیک [illegible] بریدی ([illegible] کاری کمینه (Minimum Quantity Lubrication (MQL)) و روانکاری خشک آیروسل (Aerosol lubrication (ADL)) علاوه بر بهبود قابلیت ماشینکاری، بهبود یکپارچ[illegible] 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 LN_2 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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1402.23.11.1.3]
[DOI: 10.22034/mme.23.11.577]

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 خنک‌کاری بسیار قابل توجه می‌باشد[6].

یکپارچگی سطح (Surface integrity) مفهومی است که علاوه بر بیان خواص هندسی، به معرفی خواص مکانیکی، متالوژیکی، 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 و رابطه آن با عملکرد قطعه توصیف می‌شود. ویژگی‌های سطحی که به یکپارچگی سطح بستگی دارد، شامل استحکام خستگی، استحکام شکست، نرخ خوردگی و خواص تریبولوژیکی مانند اصطکاک و سایش است[7-9]. کوردس و همکاران به بررسی تراشکاری کرایوژنیک به وسیله دی‌اکسیدکربن در فرزکاری فولاد سختی‌تی ۱/۴۹۶۲ پرداختند. بررسی‌های آنها نشان داد که این روش درمقایسه با روش خشک و MQL کاهش ۳ برابر را به همراه دارد. همچنین با استفاده از این روش می‌توان برداری را نسبت به سایر روش‌ها تا ۷۳٪ افزایش داد همکاران تحقیقی در مورد تاثیر خنک‌کاری کرایوژنیک نیتروژن مایع و روانکاری کمینه در فرزکاری آلیاژ 6Al-4V انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که ترکیب حالت روانکاری کمینه خنک‌کاری کرایوژنیک منجر به افزایش عمر ابزار تا ۳۲٪ می‌شود. همچنین در روش کرایوژنیک، در عمق برشی بالا ممکن است به دلیل عدم روانکاری مطلوب، در سطح ابزار چسبندگی ایجاد شود [11]. شکرانی و همکاران به بررسی تاثیر خنک‌کاری کرایوژنیک نیتروژن مایع در ماشینکاری سرعت بالای آلیاژ کبالت کروم پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از روش کرایوژنیک 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 کرایوژنیک 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 کرایوژنیک 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 کرایوژنیک، روانکاری کمینه و خشک دارای بیشترین میزان زبری سطح در عملیات ماشینکاری می‌باشند [13]. کاینا‌ک و همکاران در تحقیقی به ارزیابی عملکرد ماشینکاری Inconel718 و مقایسه آن در روشهای خشک و تر، کرایوژنیک و روانکاری کمینه پرداختند. در طی این آزمایشات، پدیده شکست ناگهانی ابزار مشاهده نشد اما در فرآیند خشک و کرایوژنیک، لبه انباشته بسیار بزرگی نسبت به روش MQL به وجود آمد. در ماشینکاری خشک نرخ فرسایش سطح آزاد بسیار زیاد بود و در روش کرایوژنیک این نرخ به کمترین حالت رسید [14].

جباری‌پور و همکاران در تحقیقی تاثیر تغییرات پارامترهای مختلف برشی بر سایش ابزار و یکپارچگی سطح در حالات فرزکاری خشک و کرایوژنیک با سیال دی‌اکسیدکربن، بر روی فولاد ضدزنگ 304L را بررسی نمودند. آنها بیان کردند که در فرزکاری خشک، بر روی توپوگرافی سطح قطعه‌کار عیوبی همچون خراشیدگی، پارگی سطحی، تورم، ترکهای ریز، حفره‌ها و رسوب مجدد مواد براده‌برداری شده، پدید آمد. در شرایط کرایوژنیک، 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 کرایوژنیک زبری سطح قطعه‌کار را نسبت به حالات متناظر خشک، از ۴٪ تا ۷۱٪ بهبود داده است. در تمامی موارد، سختی سطح ماشینکاری شده در حالت خشک از کرایوژنیک بیشتر است. افزایش پارامترهای برشی و یا ماشینکاری خشک، سبب تشدید تغییر شکل پلاستیک و فشرده شدن ساختاری در مجاورت سطح ماشینکاري می‌گردد. مقدار کاهش ضخامت لایه تغییر شکل یافته در کرایوژنیک نسبت به خشک ۱۶٪ بود [15].

همکاران در فرآیند سنگ‌زنی فولاد ابزار سردکار D2 با استفاده از تکنیک MQL با افزودن نانوذرات MoS_2 و CuO به دو نوع روغن گیاهی با غلظت‌های مختلف و تأثیر آنها بر نیروهای برشی و زبری سطح را بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که مقادیر نرمال و نیروهای مماسی با استفاده از پودر نانو اکسید مس در روغن پایه سویا با غلظت ۴ درصد و نانو پودر MoS_2 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 کرایوژنیک مربوط به استفاده از سیال نیتروژن مایع بوده است و تحقیقات بسیار محدودی با استفاده از سیال کرایوژنیک دی‌اکسیدکربن در فرآیندهای ماشینکاری انجام شده است. بر اساس آخرین اطلاع نویسندگان تحقیق جاری، تاکنون تحقیقات بسیار محدودی در زمینه تراشکاری کرایوژنیک با استفاده از سیال‌خنک‌کار دی‌اکسیدکربن و همچنین تراشکاری با روانکاری کمینه و مقایسه این تکنیکهای خنک‌کاری و روانکاری جدید با یکدیگر و با حالات

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1402.23.11.1.3]
[DOI: 10.22034/mme.23.11.577]

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) نمونه‌های تراشکاری شده فولاد ضدزنگ ۳۰۴L تحت روشهای خشک، تر (آب صابون)، خنک‌کاری کرایوژنیک با استفاده از سیال دی‌اکسیدکربن و روانکاری کمینه پرداخته می‌شود. در تحقیق جاری جهت ماشینکاری کرایوژنیک با استفاده از سیال دی‌اکسیدکربن و همچنین تکنیک روانکاری کمینه، دو نوع مدار مخصوص و مجزا برای ماشینکاری کرایوژنیک و روانکاری کمینه، طراحی، ساخته و [illegible] شده است.

۲- مواد، تجهیزات و طراحی [illegible]

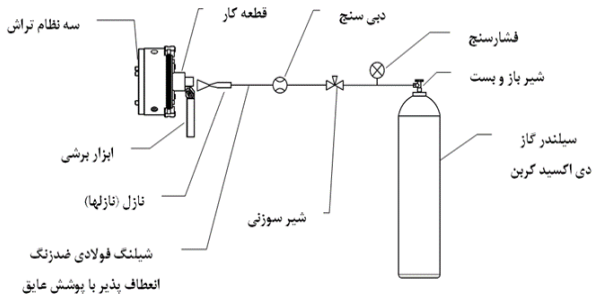
در این آزمایشات از دستگاه [illegible] CNC مدل STM2000 ساخت کشور آلمان، با توان خروجی ۳۵ کیلووات و حداکثر سرعت اسپیندل ۴۰۰۰ دور بر دقیقه [illegible] است. برای انجام عملیات تراشکاری از اینسرت‌ه[illegible] ZC[illegible] ساخت کشور [illegible] با کد استاندارد CNMG120412-DM از [illegible] YP[illegible] استفاده شد[illegible] است. لازم به ذکر است که برای هر تست [illegible] یک لبه جدید اینسرت ابزار استفاده شده است. ابزار[illegible] MARO[illegible] DCLNL-2020-K12 بوده است. برای بررسی توپو[illegible] ماشینکاری شده از میکروسکوپ نوری مدل [illegible]BX51M استفاده شده است. برای انجام تست ریزسخ[illegible] دستگاه SHIMADZU Micro Hardness Tester ساخت کش[illegible] با بار ۱۰۰ گرم نیرو و مدت زمان ۵ ثانیه استفاده گردید. 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 می‌کنند 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 میلیمتر و طول ۱۴۰ میلیمتر استفاده گردیده است. نوع تستهای تراشکاری، روتراشی بوده است و تعداد پاس روتراشی، روی هر نمونه قطعه‌کار، ۴ پاس و هر پاس به طول ۷۰ میلیمتر بوده است. تمامی قطعات به طول ۱۰۰ میلیمتر بیرون از کارگیر ماشین تراش بسته شدند. مقدار بیرون‌آمدگی هولدر از ابزارگیر دستگاه برابر با ۵۰ میلیمتر بوده است.

جدول ۱) پارامترهای برشی مورد استفاده در تستهای ماشینکاری

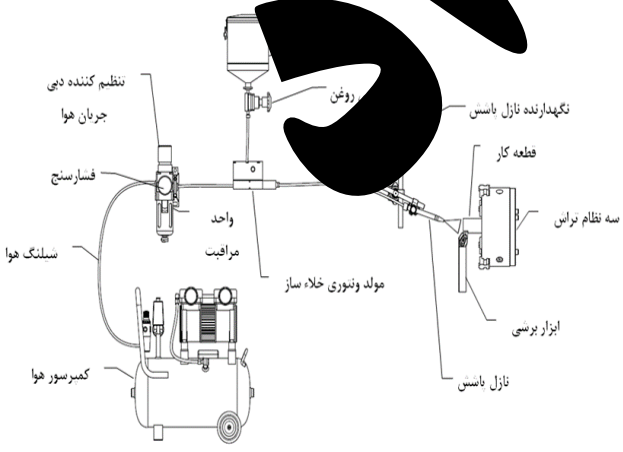
سرعت برشی (Vc) (متر بر دقیقه)	۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰
سرعت پیشروی (f) (میلیمتر بر دور)	۰/۲ (ثابت)
عمق برش شعاعی (ap) (میلیمتر)	۰/۵، ۱/۵، ۲/۵

تصویر شماتیک مدار طراحی و ساخته شده در تحقیق جاری به منظور انجام عملیات خنک‌کاری کرایوژنیک دی‌اکسیدکربن، در شکل ۱ نشان داده شده است. از مزایای این مدار می‌توان به پیوستگی جریان سیال کرایوژنیک، عدم یخ‌زدگی شیلنگ‌ها، عدم انسداد مسیر حرکت سیال به دلیل یخ‌زدگی، انعطاف کافی و مناسب شیلنگ‌ها برای تنظیم کردن در محل ماشین‌کاری و افزایش بازه تنظیمی دبی اشاره کرد. این مدار توسط کلمپ هیدرولیکی و پایه مگنت، در محل مورد نظر بر روی ماشین ابزار بسته می‌شود.



شکل ۱) تصویر شماتیک مدار خنک‌کاری کرایوژنیک CO۲

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 (مخلوط هوا و روغن)، نازل پاشش ایروسل، [illegible] شده، شیلنگها[illegible] لوله‌های انتقال هوا و ایروسل، [illegible] ساخته و استفا[illegible] تصویر شماتیک این مدار نیز در [illegible] شده [illegible]



شکل ۲) تصویر شماتیک مدار روانکاری کمینه (MQL)

قبل از انجام تست‌های 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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1402.23.11.1.3]
[DOI: 10.22034/mme.23.11.577]

مدارها مطابق جداول ۲ و ۳، به ترتیب در تست‌های تراشکاری روان‌کاری کمینه و کرایوژنیک، تعیین، تنظیم و استفاده شدند.

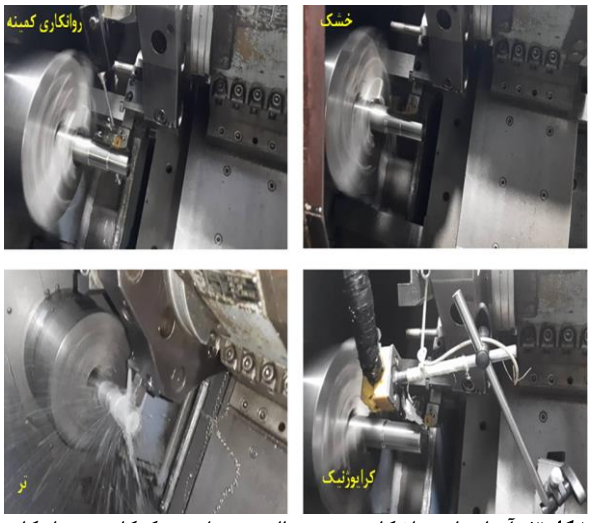
جدول ۲) تنظیمات بهینه مدار MQL

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	۶۰
زاویه پاشش ایروسل نسبت به سطح (درجه)	۱۵
فاصله نازل تا سطح	۳۰

جدول ۳) تنظیمات بهینه مدار کرایو CO۲

فشار هوای کپسول (	**۷۰**
دبی پاشش سیال (لیتر بر دقیقه	۱۸
سطح پاشش سیال	
زاویه پاشش سیال نسبت به سطح براده (درجه)	
زاویه پاشش سیال نسبت به سطح آزاد اصلی (درجه)	
فاصله نازل تا سطح ابزار (میلیمتر)	

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.



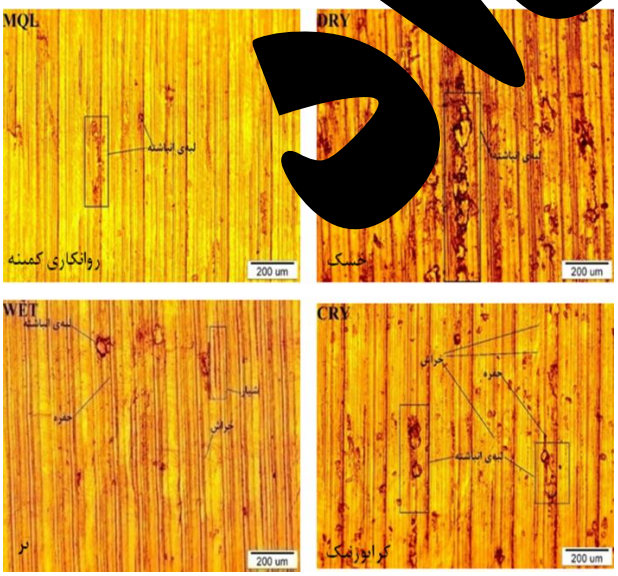
شکل ۳) آزمایشات تراشکاری تحت حالات مختلف خنک‌کاری و روان‌کاری (عمق برشی ۱/۵ میلیمتر، سرعت پیشروی ۰/۲ میلیمتر بر دور و سرعت برشی ۱۰۰ متر بر دقیقه)

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 تقریبا امکان‌پذیر 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 خنک‌کاری و روانکاری به چشم می‌خورد. مقدار و تراکم این عیب در روش MQL در کمترین حالت ممکن در مقایسه با سایر روش‌ها قرار دارد. فرایند تر، کرایوژنیک و خشک در مقایسه با روش MQL در رده‌های بعدی قرار دارند. کم بودن لبه انباشته در حالت تر به دلیل سرعت برشی پایین و امکان نفوذ سیال خنک‌کار به موضع تماس لبه برنده ابزار و سطح قطعه است. در فرآیند خشک به دلیل نبود هیچ‌گونه سیال خنک‌کار، پدیده لبه انباشته به صورت پخش‌شده (Adhering Layer) به وجود می‌آید. در این نوع عیب، لبه انباشته شده بر روی سطح دچار ذوب موضعی شده و [illegible] سطح به صورت گسترده پخش می‌گردد [17].



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)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1402.23.11.1.3]
[DOI: 10.22034/mme.23.11.577]

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 براده-برداری 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 آنی 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.

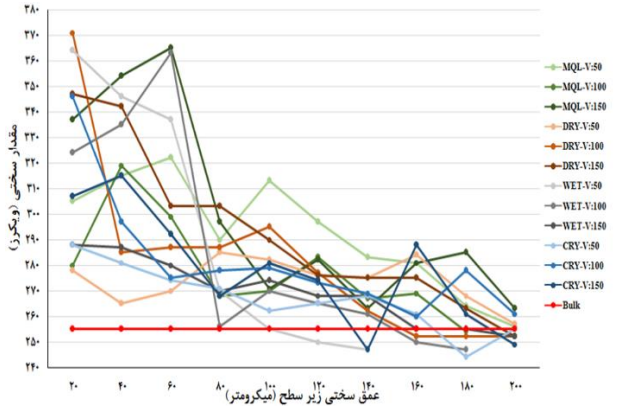
۲-۳- ریزسختی در سطح مقطع عرضی نمونه‌های ماشین‌کاری شده

جهت مشاهده تغییرات ریزسختی در بخش و همچنین تغییرات ریزساختاری در سطح مقطع عرضی نمونه‌های ماشینکاری شده در بخش قبل، از پیشانی آزاد میلگردهای تراشکاری شده، قطعه‌ای به شکل دیسکی با ضخامت ۱۰ میلیمتر بریده شد و تمام این نمونه‌های [illegible] سرد شدند. در مرحله بعد، سطح خارجی مانت شده [illegible] نمونه‌های ماشینکاری بودند، توسط سمباده‌های ۴۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ پرداخت شدند. همچنین برای رفع خراش‌های [illegible] حاصل از فرآیند سمباده‌زنی، قطعات توسط [illegible] اکسید آلومینیوم و آب به وسیله نمد پولیش شده تا سطح صیقلی به دست آید.

مقدار ریزسختی ماده پایه (Bulk) قبل از ماشینکاری [illegible] با ۲۵۵ ویکرز می‌باشد. علاوه بر نمونه خام، ریزسختی‌سنجی به روش 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 مجموعا 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 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، نسبتا 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 [illegible] [21]، عمق سختی نشان‌دهنده میزان نفوذ [illegible] سطح ماشینکاری می‌باشد. تنش حرارتی یکی از [illegible] ایجاد کارسختی در [illegible] و به همین دلیل است که در [illegible] سطح [illegible] بیشترین مقدار سختی ایجاد می‌شود. [illegible] کرایوژنیک اعمال سیال خنک‌کاری با بازدهی بالا [illegible] کاهش [illegible] موضع برش شده و امکان نفوذ حرارت را تا عمق [illegible] برده است. مجموعه این عوامل باعث ایجاد چنین [illegible] 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 قطعه‌کار و انجام براده‌برداری در سطح قطعه، موجب تغییر شکل پلاستیک در سطح و زیر سطح

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1402.23.11.1.3]
[DOI: 10.22034/mme.23.11.577]

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.

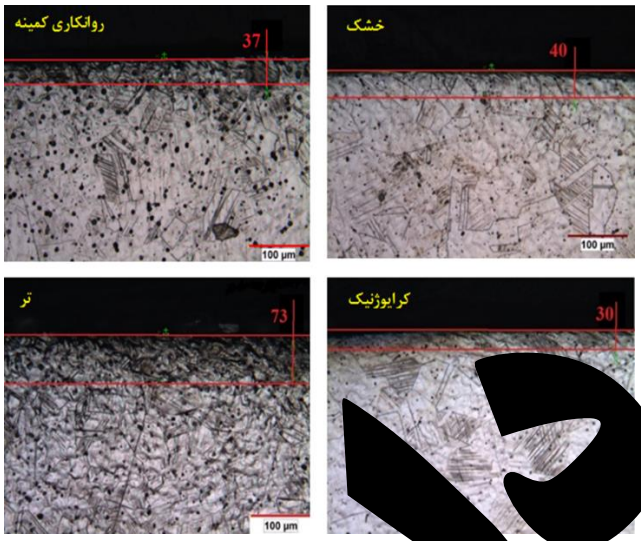
۳-۳- تغییرات ریزساختاری در سطح مقطع عرضی نمونه‌های ماشین‌کاری شده

در عملیات ماشینکاری به [illegible] نیروی زیاد برای انجام تغییر شکل پلاستیک، [illegible] های موجود در سطح و زیر سطح، تحت تاثیر این نیرو [illegible] افزایش [illegible] حاصل از تغییر شکل پلاستیک قرار گرفته و دچار تغ[illegible] نسبت منطقه ماشینکاری نشده و ریزساختار پایه [illegible] جمله این تغیی[illegible] ریزساختاری، می‌توان به تغییر شکل [illegible] ریزساختار ماده [illegible] قالب پیچش، له‌شدگی، تغییر جهت و غی[illegible] نمونه‌های مانت شده که در مرحله قبل سخ[illegible]، در این مرحله برای بررسی تغییرات ریزساختاری به ک[illegible] صورت که پس از اطمینان از صیقلی بودن سطوح [illegible] خراش‌های ناشی از سمباده‌زنی، سطح بیرونی ن[illegible] های مانت شده در محلول اتیکال (Ethical) با ترکیب ۱۰٪ [illegible] اسید ($H_2C_2O_4$) و ۹۰٪ آب مقطر که به عنوان الکترولیز استف[illegible] شده است، با ولتاژ ۱۰ ولت به مدت ٤٠ ثانیه تحت عملیات اچ الکترو[illegible] یمیایی 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 ٦، 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 کاملا 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 ٦، 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.

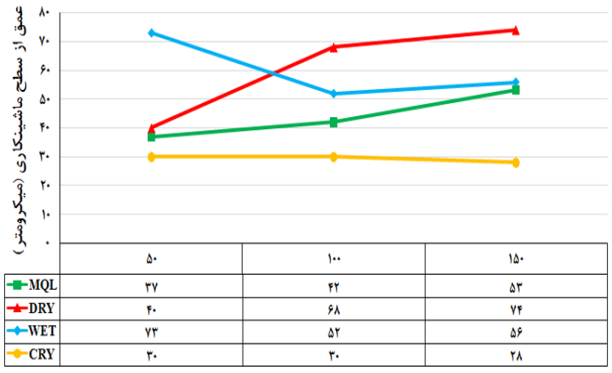
علت تغییر ریزساختار در لایه‌های زیرین سطح مقطع عرضی نمونه‌های ماشینکاری شده، کارسختی ناشی از افزایش مقدار کرنش برشی در حین تغییر شکل پلاستیک است. این تغییرات باعث افزایش میزان سختی در فواصل نزدیک به سطح ماشینکاری می‌شود. با افزایش فاصله از سطح ماشینکاری، این تغییرات کاهش پیدا کرده و ریزساختار، به شکل 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) تغییر[illegible] کاری در سطح مقطع عرضی نمونه‌های ماشینکاری شده (سرعت [illegible] ۵۰ مت[illegible] برشی ۲/۵ میلیمتر و سرعت پیشروی ۰/۲ میلیمتر بر[illegible]

نمودار موجود در شک[illegible] عمق لایه تغییر شکل یافته ریزساختاری در سطح [illegible] 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 تقریبا یکسان بوده و کمترین میزان در بین تمام روشهای خنک‌کاری و روانکاری بوده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1402.23.11.1.3]
[DOI: 10.22034/mme.23.11.577]



	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
MQL	۳۷	۴۲	۵۳
DRY	۴۰	۶۸	۷۴
WET	۷۳	۵۲	۵۶
CRY	۳۰	۳۰	۲۸

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

شکل ۷) نمودار عمق تغییرات ریزساختاری تحت [illegible] عتهای برشی و شرایط خنک‌کاری و روانکاری مختلف (عمق برشی [illegible] یمتر و سرعت پیشروی ۰/۲ میلیمتر بر دور)

طبق نمودار و مقادیر مندرج [illegible] ل ۷، به‌طور کلی با افزایش سرعت برشی از ۱۰۰ تا [illegible] تر بر دقیقه میزان عمق تغییرات ریزساختاری، بیشتر می‌شود. با [illegible] ش سرعت برشی، میزان حرارت در موضع برش افزایش [illegible] ماشینکاری بیشتر موجب اعمال کرنش برشی بالاتری بر [illegible] ی گردد. لغزش ابزار روی سطح قطعه‌کار و اعمال تنشهای [illegible] مکانیکی در فرآیند براده‌برداری، موجب تغییر شکل پلا [illegible] ر زیر سطح قطعه می‌شود. در نهایت تغییر شکل پلاستیک [illegible] فرم لایه‌ها و دانه‌بندی در لایه زیرین سطح ماشینکاری [illegible] کارسختی، اصلی‌ترین دلیل تشکیل لایه سخت شده [illegible] سطح ماشینکاری می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

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 قطعه‌کار دارد.

۲) در ماشینکاری فولاد ضدزنگ، شرایط برشی باید در محدوده پایدار و متناسب با این جنس قرار گیرد. استفاده از سرعت‌های برشی پایین، باعث ایجاد عیوب زیاد توپوگرافی سطح می‌شود. همچنین افزایش سرعت برشی باعث ناپایداری در تشکیل لبه انباشته و در نتیجه کاهش حجم توده لبه انباشته می‌گردد.

۳) در بحث بهبود توپوگرافی سطح ماشینکاری شده، به ترتیب اولویت، تاثیر روش‌های MQL، تر و کرایوژنیک، نسبت به روش خشک، از بیشترین تا کمترین بوده است.

٤) برش عرضی نمونه‌های ماشینکاری شده تهیه و مشاهده گردید که مقدار سختی زیرسطحی نمونه‌ها با فاصله گرفتن از سطح تا حداکثر ۳٤٪ کاهش می‌یابد و به سختی ماده پایه قطعه‌کار نزدیک می‌شود. میزان سختی در سطح مقطع عرضی نمونه‌های 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 می‌شود.

۵) فرآیندهای خنک‌کاری و روانکاری تاثیر مستقیم بر ضخامت لایه تغییر شکل یافته ریزساختاری در سطح مقطع عرضی نمونه‌های ماشینکاری دارد. استفاده از روش کرایوژنیک به دلیل کاهش دمای سطح باعث می‌شود 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 قطعه‌کار در موضع برش، دارای کمترین میزان تغییرات ریزساختاری در سطح مقطع عرضی نمونه‌های ماشینکاری می‌باشد. 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 ٦۲٪ 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.

تعارض [illegible] حاضر، هیچگونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و [illegible] دیگر [illegible]

[illegible]ندگان: سعید [illegible] (نویسنده اول)، روش‌شناس/ پژو[illegible] / نگا[illegible] (۵۰٪)؛ بهزاد جباری‌پور (نویسنده دوم)، روش‌شنا[illegible] شگر اصلی / تحلیل‌گر داده‌ها (۵۰٪).

منابع مالی: [illegible] نویسنگ[illegible] ن شده است.

منابع

1- Kaviani nezhad F. [illegible] nd heat resistance steels. Abgin Rayan pub[illegible]ion. 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, Szydlowski M, Legutko S, Sobczak-Kupiec A. A study on

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1402.23.11.1.3]
[DOI: 10.22034/mme.23.11.577]

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 [illegible] Experimental study of tool wear and surface roughn[illegible] high speed helical milling in D2 steel. Mod[illegible] Mechanical Engineering. Proceedings of the A[illegible] Machining and Machine Tools Conference. 2015; [illegible]198-202 (in Persian).
10- Cordes S, Hübner F, [illegible]erschmidt T. Next generation high perfo[illegible]nce cut[illegible] by use of carbon dioxide as cryogenics. P[illegible]dia Cirp. 2014; 14:401-5.
11- Park KH, Yang [illegible]mi MA, Lee DY, Kim TG, K[illegible]DW, Lee SW. [illegible]of cryogenic cooling and minimum qu[illegible]ication on end milling of titanium alloy[illegible] Journal of Mechanical Science and Te[illegible]5 ; 29:5121-6.
12- Sho[illegible]kia V, Newman ST. Cryogenic high speed [illegible]ng of cobalt chromium alloy. Procedia [illegible]:404-7.
[illegible] N, Shah P. Comparative analysis of dry, flood, M[illegible] and cryogenic CO2 techniques during the machini[illegible]15-5-PH SS alloy. Tribology International. 2020 ; 1[illegible]6196.
14- Kay[illegible] Evaluation of machining performance in cryoge[illegible]achining of Inconel 718 and comparison with [illegible]y 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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-12-22]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1402.23.11.1.3]
[DOI: 10.22034/mme.23.11.577]