



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 processes 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 ... 2- 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. 5- A study on the effect of cutting speed on surface roughness and material removal rate ... 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 turning of 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 برش بر توپوگرافی سطح ماشینکاری، تغییرات ریزسختی و میزان خراش در سطح مقطع عرضی قطعات تراشکاری شده تحت حالات روانکاری کمینه (MQL) و خنک کاری کرایوژنیک (CO₂)، روی فولاد ضدزنگ 304 L بررسی شده است. منشاء اصلی عیوب در توپوگرافی سطوح ماشینکاری، لایه انباشته روی سطح ابزار و جدا شدن مجدد آن بود، همچنین افزایش برشی باعث ناپایداری تشکیل لایه انباشته و در نتیجه کاهش حجم برش می گردد. در بحث بهبود توپوگرافی سطح ماشینکاری شده، به تاثیرات مختلف روش های MQL، تر و کرایوژنیک، نسبت به روش خشک، از بیشترین تا کمترین، برش عرضی از نمونه های ماشینکاری شده تهیه و مقایسه شد. مقدار سختی زیرسطحی نمونه ها با فاصله گرفتن از سطح تا حداکثر ۱۰۰ میکرومتر، یابد و به سختی ماده پایه قطعه کار نزدیک می شود. میزان سختی سطحی عرضی نمونه های ماشینکاری شده، ارتباط مستقیم با کارسختی و لایه انباشته بر اثر تغییر شکل پلاستیک شدید روی سطح قطعه دارد. با افزایش برش، شدت تغییر شکل پلاستیک در قطعه نیز افزایش یافته و میزان برش در زیر سطح بیشتر می شود. فرآیندهای خنک کاری 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.

کلیدواژه ها: 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 می باشند. کروم در فولاد باعث ایجاد خاصیت محافظت در مقابل خوردگی می گردد. علت به وجود آمدن این خاصیت، تشکیل لایه اکسید-کروم بر روی سطح فولاد می باشد که اکسیژن موجود در هوا برای ایجاد آن کافی است. خاصیت محافظت با افزایش درصد کروم افزایش می یابد [1]. استحکام بالای فولاد ضدزنگ سبب افزایش اعمال بارهای مکانیکی به ابزار برشی در حین فرآیندهای ماشینکاری می شود و از طرفی هدایت حرارتی پایین سبب افزایش دما در موضع برشی است و حرارت نمی تواند به طور مطلوب از طریق

قطعه کار و براده دفع شود. از طرفی ضعف شکست براده در حین ماشینکاری این نوع فولادها، باعث سایش شدید ابزار شده و کیفیت سطح قطعه کار را کاهش می دهد. فولادهای ضدزنگ آستنیتی علیرغم داشتن نرخ پایین هدایت حرارتی، کارسختی (Work hardening) بالایی دارند، این ویژگیها باعث می شود تا فولادهای ضدزنگ نسبت به فولادهای کربنی، فولادهای آلیاژی کم کربن و فولادهای ضدزنگ غیرآستنیتی، سخت تر ماشینکاری شوند. چقرمگی و شکل پذیری بالا باعث شکل گیری براده های بلند همراه با چسبیدن مواد قطعه کار به ابزار شده که منجر به افزایش سایش چسبنده (Adhesive wear) می شود. علاوه بر این، حرارت زیاد در موضع برش باعث نفوذ (Diffusion) و سایش شیمیایی (Chemical wear) روی ابزار می شود. به علاوه، تشکیل لایه انباشته (Built up edge) در حین برش می تواند منجر به ناپایداری نیروهای ماشینکاری شود که باعث لب پر شدن (Chipping) ابزار برشی می گردد [2].

استفاده از خنک کاری و روانکاری در عملیات ماشینکاری نقش مهمی را ایفا می کند. عموماً استفاده از سیال خنک کار 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 می بخشد. استفاده از سیالات برشی مرسوم در صنعت مشکلات زیست محیطی فراوانی ایجاد می کند [3]. به منظور کاهش مشکلات زیست محیطی ماشینکاری آلیاژهای سخت ماشینکاری (difficult to cut alloys) مثل فولادهای ضدزنگ، انتخاب خنک کاری و روانکاری مناسب بسیار حایز اهمیت است. استفاده از تکنیک های خنک کاری یا روانکاری مدرن مانند خنک کاری تحت فشار (High pressure cooling)، خنک کاری کرایوژنیک (کرایوژنیک)، روانکاری کمینه (Minimum Lubrication (MQL)) و روانکاری خشک (Dry Lubrication (DL))، علاوه بر بهبود قابلیت ماشینکاری، بهبود یکپارچگی سطح قطعه کار و کاهش سایش ابزار، بهره وری را نیز افزایش می دهد [4].

کرایوژنیک علم استفاده از مواد در دماهای بسیار پایین است. وظیفه اصلی خنک کاری کرایوژنیک در برش فلزات، دفع حرارت از منطقه برش و کاهش اصطکاک در فصل مشترک ابزار و براده و قطعه کار می باشد. نیتروژن مایع LN₂ پرمایه ترین سیال در خنک کاری کرایوژنیک است و نقطه جوش آن ۱۹۸/۸- درجه سانتیگراد است. گاز دی اکسید کربن دیگر سیال کرایوژنیک استفاده شده است و نقطه جوش آن ۷۸/۵- درجه سانتیگراد است. گاز دی اکسید کربن در مخازن با فشار متوسط تحت دمای محیط نگهداری می شود [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 لبه های

سطح در عملیات ماشینکاری می‌باشند [13]. کاینک 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].

جباری‌پور و همکاران در تحقیقی تاثیر تغییرات پارامترهای مختلف برشی بر سایش ابزار و یکپارچگی سطح در حالات فرزکاری خشک و کرایونیک 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 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 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 کرایونیک بیشتر است. افزایش پارامترهای برشی و یا ماشینکاری خشک، سبب تشدید تغییر شکل پلاستیک و فشردگی شدن و سایش و ساختاری در مجاورت سطح ماشینکاری می‌شد. مقدار کاهش ضخامت لایه تغییر شکل یافته در کرایونیک 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 روغن گیاهی با غلظت‌های مختلف و تاثیر آنها بر نیروهای برشی و زبری سطح را بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که مقدار سایش و نیروهای ماسی با استفاده از پودر نانو اکسید مس و سويا با غلظت ۴ درصد و نانو پودر MoS_2 در روغن پایه سويا 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].

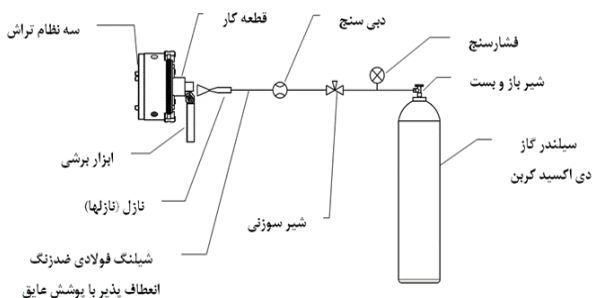
بیشتر تحقیقات انجام شده در حوزه ماشینکاری کرایونیک مربوط به استفاده از سیال نیتروژن مایع بوده است و تحقیقات بسیار محدودی با استفاده از سیال کرایونیک دی‌اکسیدکربن در فرآیندهای ماشینکاری انجام شده است. بر اساس آخرین اطلاع نویسندگان تحقیق جاری، تاکنون تحقیقات بسیار محدودی در زمینه تراشکاری کرایونیک با استفاده 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 خشک 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 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 می‌باشد [7-9].

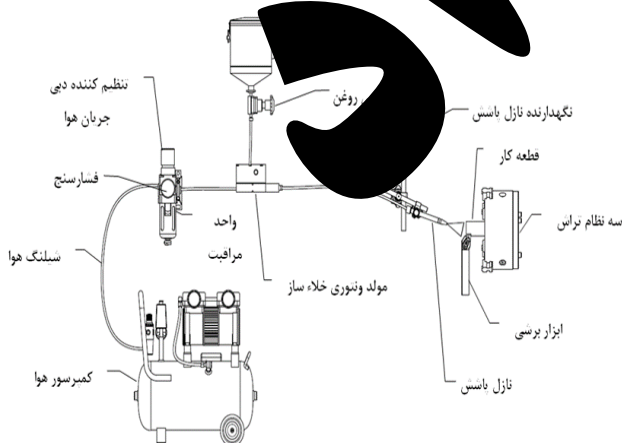
همکاران به بررسی کرایونیک به وسیله نیتروژن دی‌اکسیدکربن در فرزکاری فولاد 6Al-4V با نیتروژن ۱/۴۹۶۲ پرداختند. بررسی‌های آنها نشان داد که در روش خشک و در مقایسه با روش خشک و MQL کاهش ۳٪ سایش ابزار را به همراه دارد. همچنین با استفاده از این روش می‌توان سایش ابزار را به برداری را نسبت به سایر روش‌ها تا ۷۳٪ افزایش داد. همکاران تحقیقی در مورد تاثیر خشک‌کاری کرایونیک 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 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 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، پاشش مخلوط هوا و روغن، نازل پاشش ایروسل، شیلنگ‌ها، شیلنگ‌های اولیه‌های انتقال هوا و ایروسل، ساخته و استفاده از تصویر شماتیک این مدار نیز در شکل ۲ شده است.



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

ماشینکاری متداول خشک و تر، بر روی فولاد ضدزنگ آستینیتی 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 آزمایش شده است.

۲- مواد، تجهیزات و طراحی

در این آزمایشات از دستگاه تراش CNC مدل STM2000 ساخت کشور آلمان، با توان خروجی ۱۵۰۰ وات و حداکثر سرعت اسپیندل ۴۰۰۰ دور بر دقیقه استفاده شده است. برای انجام عملیات تراشکاری از اینسرت‌های ZN2500 ساخت کشور آلمان با کد استاندارد CNMG120412-DM از شرکت YP استفاده شده است. لازم به ذکر است که برای هر تست یک لایه یک جدید اینسرت ابزار استفاده شده است. ابزارهای MARO 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 ۱۰۰ بار 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 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 قطعه کار، 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 بیرون آمدگی 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)	۱۵۰، ۱۰۰، ۵۰
سرعت پیشروی (f) (میلیمتر بر دور)	۰/۲ (ثابت)
عمق برش شعاعی (ap) (میلیمتر)	۰/۵، ۱/۵، ۲/۵

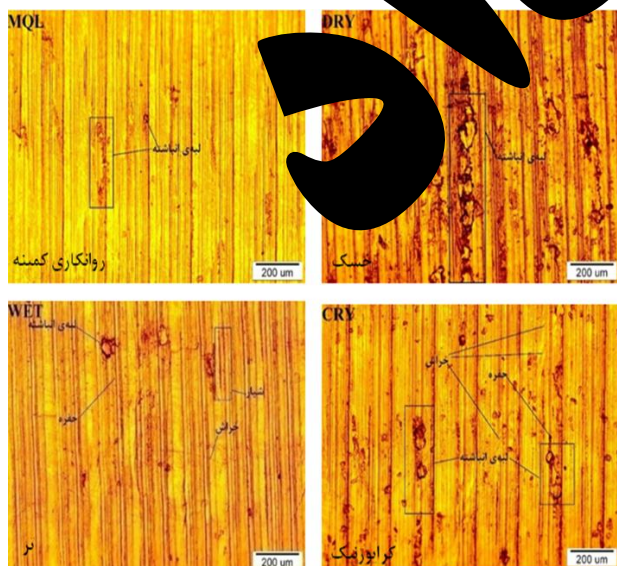
(عمق برشی ۱/۵ میلیمتر، سرعت پیشروی ۰/۲ میلیمتر بر دور و سرعت برشی ۱۰۰ متر بر دقیقه)

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 فرایند 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، لایه ای از مواد بر روی سطح دچار ذوب موضعی شده و پس از سرد شدن به صورت گسترده پخش می گردد [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)

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

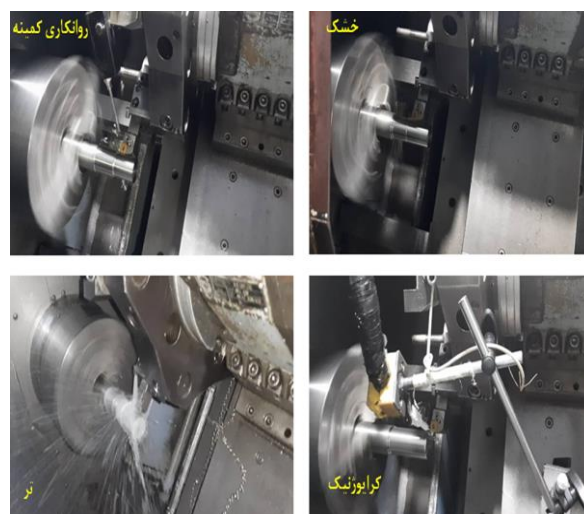
جدول ۲ تنظیمات بهینه مدار MQL

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

جدول ۳ تنظیمات بهینه مدار کرایوژنیک CO₂

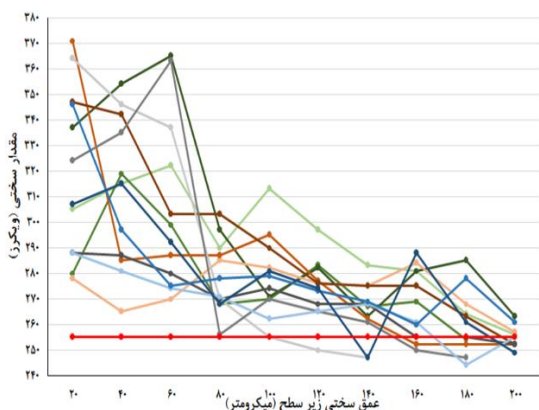
۷۰	فشار هوای کپسول (بار)
۱۸	دبی پاشش سیال (لیتر بر دقیقه)
۱۰	سطح پاشش سیال
۶۰	زاویه پاشش سیال نسبت به سطح براده (درجه)
۱۵	زاویه پاشش سیال نسبت به سطح آزاد اصلی (درجه)
۳۰	فاصله نازل تا سطح ابزار (میلیمتر)

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 خنک کاری و روان کاری

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 ریزسختی در سطح است و به همین دلیل است که در روش خشک و تر، سطح سختی بیشترین مقدار سختی ایجاد می‌شود. در روش‌های کرایوژنیک اعمال سیال خنک‌کاری با بازدهی بالا منجر به کاهش دفعه‌ای برش شده و امکان نفوذ حرارت را تا عمق کمتری کاهش داده است. مجموعه این عوامل باعث ایجاد چینه‌های ریزسختی در نمونه‌های 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.

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

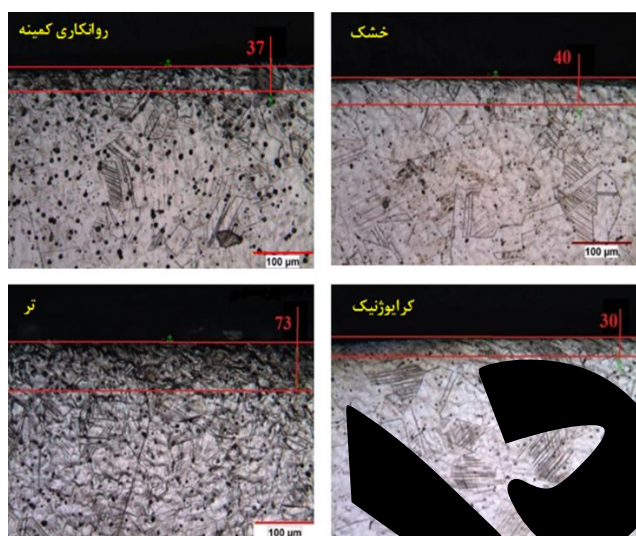
جهت مشاهده تغییرات ریزسختی در بخش‌های مختلف و همچنین تغییرات ریزساختاری در سطح مقطع عرضی نمونه‌های ماشینکاری شده در بخش‌های مختلف، از پیشانی آزاد میلگردهای تراشکاری شده، قطعه‌ای دیسکی شکلی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر بریده شد و تمام این نمونه‌های بریده شده در فرآیند سرد شدند. در مرحله بعد، سطح خارجی مانت شده به سطح جانبی نمونه‌های ماشینکاری بودند، 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 صاف و صیقلی به دست آید.

مقدار ریزسختی ماده پایه (Bulk) قبل از ماشینکاری با ۲۵۵ ویکرز می‌باشد. علاوه بر نمونه خام، ریزسختی سه روش ویکرز برای نمونه‌های ماشینکاری شده تحت سرعت‌های 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)

نمودار موجود در شکل ۷، تغییرات عمق لایه تغییر شکل یافته ریزساختاری در سطح مقطع عرضی نمونه‌های ماشینکاری شده تحت سرعت‌های برشی و شرایط مختلف خشک کاری 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 خشک کاری 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 قطعه کار 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 ماشین کاری شده

در عملیات ماشینکاری به روش تراشکاری، نیروی زیاد برای انجام تغییر شکل پلاستیک، ریزساختاری‌های موجود در سطح و زیر سطح، تحت تاثیر این نیروی افزایش یافته حاصل از تغییر شکل پلاستیک قرار گرفته و دچار تغییرات نسبت به منطقه ماشینکاری نشده و ریزساختار پایه ماده می‌شود. در حین 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 سخت شده است، در این مرحله برای بررسی تغییرات ریزساختاری به کار می‌رود. در صورت که پس از اطمینان از صیقلی بودن سطوح و حذف خراش‌های ناشی از سمباده‌زنی، سطح بیرونی نمونه‌های مانت شده در محلول اتیکال (Ethical) با ترکیب ۱۰٪ اسید $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 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 ۰/۲ میلی‌متر و سرعت پیشروی ۰/۲ میلی‌متر بر دور، تحت حالات خشک کاری 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 خشک کاری 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.

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس

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 Annual Machining and Machine Tools Conference*. 2015; 11(1):198-202 (in Persian).

10- Cordes S, Hübner F, Wierschmidt T. Next generation high performance cutting by use of carbon dioxide as cryogenics. *Procedia 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*. 2015; 188:404-7.

13- N, Shah P. Comparative analysis of dry, flood, MQL and cryogenic CO2 techniques during the machining of 15-5-PH SS alloy. *Tribology International*. 2020 ; 140:106196.

14- Kaymakci . 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