ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2022;22(06):357-369

The Effect of Workpiece Hardness and Cutting Parameters on Temperature, Surface Roughness and Tool Wear in Ultrasonic Assisted Turning

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Bayat M.[1] ,
Amini, S.[1*]

How to cite this article
Bayat M, Amini S. The Effect of Workpiece Hardness and Cutting Parameters on Temperature, Surface Roughness and Tool Wear in Ultrasonic Assisted Turning. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(06):357-369.

[1] Manufacturing Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Kashan, Kashan, Iran

Correspondence
Address: P.O.B. 8731753153, Manufacturing Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Kashan, Kashan, Iran
amini.s@kashanu.ac.ir

Article History
Received: November 29, 2021
Accepted: February 06, 2022
ePublished: April 03, 2022

ABSTRACT

Machining of hard workpieces is one of the most important challenges of the manufacturing industry. Hence, new methods were added to traditional machining. Ultrasonic vibration machining is one of these methods. The advantages of using ultrasonic vibrations compared to traditional machining include reducing machining forces, reducing tool wear and friction, increasing tool life, creating intermittent cutting conditions, increasing surface quality, and so on. To vibrate the tool, a horn with a resonant frequency of 20,633 Hz was analyzed by Abacus software. In this study, the effects of cutting speed, feed rate, conventional machining conditions, and vibration machining conditions at three different hardness of 15, 30, and 45 Rockwell C for the workpiece on surface roughness and tool wear were evaluated. The experiments were designed at full factorial, and a total of 54 experiments were performed. The results showed that at higher workpiece hardness by applying vibration the surface roughness was reduced. The surface roughness (Ra) in machining by means of ultrasonic vibrations is up to about 36% less than conventional machining in various machining parameters. In addition, the temperature in vibration machining is lower about 15% at higher stiffness of the workpiece. Also, with the increase in the hardness of the workpiece, the tool wear was increased, which is less by applying ultrasonic vibrations. Also, by applying vibrations, tool wear was reduced in total, which can be minimized by selecting cermet tools and applying vibrations in 4140 AISI steel machining.

Keywords Turning, Machining Temperature, Ultrasonic Assisted Turning, Tool Life, Surface Roughness, Workpiece Hardness, AISI 4140 Steel

CITATION LINKS

[1] Design of optimisation of cutting parameters for turning metal matrix composites ... [2] Estimation of energy consumption in milling process with minimum quantity lubrication ... [3] Effect of ultrasonic-assisted turning on geometrical tolerances in Al 2024-T6. [4] Comparative performance of coated and uncoated inserts during intermittent cut milling of aisi 4340 steel. [5] Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed ... [6] Machinability investigations in hard turning ... [7] Factors influencing surface integrity in hard machining of steels-A review. [8] Evaluation of workpiece hardness and cutting parameters effects ... [9] The effect of workpiece hardness and cutting parameters on surface roughness in dry hard turning of X210Cr12 cold tool steel. [10] Surface roughness modelling in hard turning operation of AISI 4140 using CBN cutting tool. [11] Experimental study on effect of micro textured surfaces ... [12] An approach based on tool mode control for surface roughness reduction ... [13] A study on ultrasonic vibration cutting of low alloy steel. [14] Vibration drilling process on Al2024. [15] Modelling and simulation of effect of ultrasonic vibrations on machining of Ti6Al4V. [16] Surface integrity and microstructure changes in 3D ... [17] Analysis of linear vibration in rotary turning of AISI 4140 steel. [18] Cryogenic turning of AISI 304 stainless steel .... [19] Metal Cutting Principles, pp.213-272. [20] Effect of cutting parameters on tool-chip interface temperature ... [21] Analysis of cutting parameters and cooling/lubrication methods for sustainable machining ... [22] Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V. [23] Prediction of surface roughness and cutting zone temperature in dry turning ... [24] Effect of cutting parameters on heat generation in ultra-precision milling ... [25] Cutting temperature and resulting influence on machining performance ... [26] Effect of cutting and vibration parameters on the cutting performance ... [27] Theoretical modeling of tool mean temperature during ultrasonically assisted turning. [28] Vibratory rotary turning process of Al 7075 workpiece. [29] Built-up edge reduction in drilling of AISI 1045 steel.

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.

بررسی تاثیر سختی قطعه‌کار و پارامترهای برشی بر دما، زبری سطح و فرسایش ابزار در تراشکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک

مسعود بیات
گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
سعید امینی*
گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده
ماشین‌کاری قطعات با سختی بالا یکی از مهم‌ترین چالش‌های صنعت است. از این رو روش‌های نوینی به ماشین‌کاری سنتی افزوده شده است. ماشین‌کاری به کمک ارتعاشات التراسونیک از جمله این روش‌ها است. مزایای استفاده از ارتعاشات التراسونیک نسبت به ماشین‌کاری سنتی شامل کاهش نیروهای ماشین‌کاری، کاهش سایش ابزار و اصطکاک، افزایش قابلیت ماشین‌کاری مواد سخت، افزایش کیفیت سطح و غیره است. برای اعمال ارتعاش‌های التراسونیک به ابزار، یک هورن از جنس فولاد با فرکانس تشدید ۲۰۶۳۳ هرتز توسط نرم‌افزار آباکوس تحلیل و سپس ساخته شد. در این مطالعه، اثرات عوامل سرعت دورانی، نرخ پیشروی، شرایط ماشین‌کاری معمولی و التراسونیک در سه سختی ۱۵، ۳۰ و ٤٥ راکول سی مختلف برای قطعه‌کار بر دمای ماشین‌کاری، زبری سطح و فرسایش ابزار مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد در سختی‌های بالاتر توسط اعمال ارتعاشات التراسونیک زبری سطح کاهش یافت. زبری سطح (R_a) در ماشین‌کاری به کمک ارتعاش‌های التراسونیک نسبت به ماشین‌کاری معمولی در عوامل مختلف ماشین‌کاری تا حدود ۳٦ درصد کمتر است. همچنین با افزایش سختی قطعه‌کار فرسایش ابزار بیشتر شده است که توسط اعمال ارتعاش‌های التراسونیک این فرسایش ابزار نسبت به حالت ماشین‌کاری معمولی کمتر است. علاوه بر این دمای ماشین‌کاری در مجموع در سختی‌های بالاتر قطعه‌کار در حالت التراسونیک حداکثر ۱۵ درصد کمتر است. با اعمال ارتعاش‌های التراسونیک فرسایش ابزار در مجموع کاهش یافته است که می‌توان با انتخاب ابزار سرمتی و اعمال التراسونیک شرایط فرسایش ابزار را در ماشین‌کاری فولاد AISI 4140 به حداقل رساند.

کلیدواژه‌ها: تراشکاری، ماشین‌کاری به کمک ارتعاشات التراسونیک، عمر ابزار، دمای ماشین‌کاری، زبری سطح، سختی قطعه کار، فولاد AISI 4140

تاریخ دریافت: ۱٤۰۰/۰۹/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۷
*نویسنده مسئول: amini.s@kashanu.ac.ir

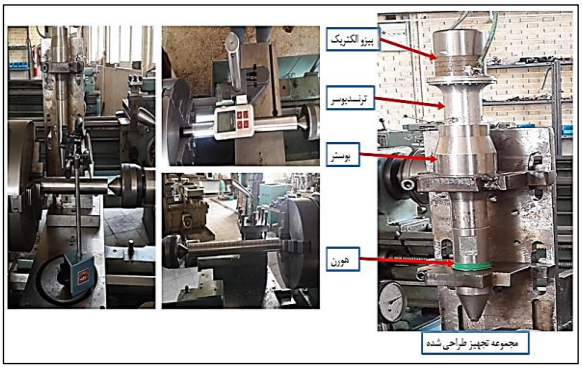
۱- مقدمه
ماشین‌کاری یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین فرایندهای تولید در صنایع مختلف است. عمل برش فلزات حرکتی نسبی بین ابزار برشی و قطعه‌کار است که در نتیجه آن مقداری از فلز مورد نظر به شکل براده از قطعه‌کار جدا می‌شود. هنگام ماشین‌کاری قطعات به‌تدریج ابزار برشی از بین رفته و از عمر آن کاسته می‌شود؛ بنابراین هنگام ماشین‌کاری، شرایط ابزار یک عامل مهم است. طول عمر ابزار عبارت است از زمان یا حجم مواد ماشین‌کاری شده قبل از اینکه ابزار کند یا اینکه دچار شکست گردد[1]. در حین عملیات ماشین‌کاری یک منطقه سایش در ابزار برش شکل می‌گیرد و میزان سایش ایجاد شده در ابزار معمولاً معیار مناسبی جهت تعیین عمر ابزار است. به طور کلی راه‌های متعددی برای افزایش طول عمر ابزار پیشنهاد می‌گردد که استفاده از مایعات خنک‌کاری در ماشین‌کاری بسیار مهم است، اما هزینه‌ها را افزایش می‌دهد و اثرات مخربی بر محیط‌زیست و سلامت انسان می‌گذارد[2]. به این دلایل تمایل به استفاده از ماشین‌کاری خشک افزایش یافته است[3]. تاکنون مطالعات زیادی بر روی عوامل ماشین‌کاری و تأثیر آن‌ها بر روی صافی سطح و عمر ابزار انجام شده است. ساراوانان و خاویر[4] رفتار ماشین‌کاری ابزار با پوشش TiN و بدون پوشش را در فرآیند فرزکاری فولاد AISI 4340 بررسی کردند. نتایج نشان داد دمای ناحیه ماشین‌کاری در فرزکاری خشک فولادهای سخت بسیار بالاست که سبب کاهش عمر ابزار شده است. ازل و همکاران[5] تأثیر عوامل برشی، سختی قطعه‌کار و هندسه ابزار بر صافی سطح فولاد ابزار AISI H13 با استفاده از ابزار سی بی ان را بررسی کردند. سختی قطعه‌کار در این پژوهش ۵۱ و ٥٤ راکول‌سی در نظر گرفته شد. آن‌ها نشان دادند که زبری سطح و نیروی شعاعی با افزایش سختی قطعه‌کار افزایش و زبری سطح با افزایش نرخ پیشروی افزایش پیدا می‌کند. جیتاند و همکاران[6] تأثیر عوامل برشی روی زبری سطح، سایش ابزار و نیروی برشی با استفاده از ابزار سرامیکی معمولی و ابزار دارای براده شکن را روی فولاد ابزار سردکار AISI D2بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که قطعه‌کارهای ماشین‌کاری شده با ابزار دارای براده شکن نسبت به ابزار معمولی دارای زبری سطح کمتری است. یولیانا[7] عوامل مؤثر بر زبری سطح در ماشین‌کاری سخت فولاد فنر EN47 به صورت تجربی بررسی کرد و نشان داد که روند تغییر زبری سطح با افزایش سختی قطعه‌کار از ۳۵ تا ۵۵ راکول‌سی به صورت نزولی است، ولی زبری سطح قطعه بعد از سختی ۵۵ راکول‌سی به صورت چشمگیر افزایش پیدا می‌کند. دودمان و همکاران[8] تأثیر عوامل سختی قطعه‌کار، نرخ پیشروی و سرعت دورانی را بر زبری سطح و با استفاده از سیال برشی پایه گیاهی و ابزار کاربایدی نیروی برش در سوراخ‌کاری فولاد AISI 4340 را بررسی کردند و نشان دادند سختی قطعه‌کار تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر زبری سطح دارد، به این‌گونه که افزایش آن سبب کاهش زبری سطح شد. حیدری و همکاران[9] در تحقیقی نشان دادند که با افزایش سختی قطعه‌کار تا ۵۰ راکول‌سی، زبری سطح قطعه‌کار کاهش و با افزایش سختی از ۵۰ تا ۶۵ راکول‌سی، زبری سطح افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان داد در سختی ۵۰ راکول‌سی بهترین زبری سطح حاصل شد. در مطالعه‌ای دیگر چاوشی و همکاران[10] تأثیر سختی قطعه‌کار و سرعت اسپیندل بر زبری سطح در ماشین‌کاری فولاد را بررسی کردند. قطعه‌کارهایی با سختی ۳۵، ۴۵، ۵۰، ۵۰، ۵۵، ۶۰ و ۶۵ راکول‌سی را برای انجام آزمایش‌ها انتخاب کردند. آن‌ها با استفاده از نتایج تجربی نشان دادند که زبری سطح با افزایش سختی تا ۵۵ راکول

سی کاهش و پس از آن افزایش پیدا می‌کند. زبری سطح قطعات ماشین‌کاری شده یکی از مهم‌ترین پارامترهای تعیین کیفیت قطعات و در بسیاری از مواقع مهم‌ترین معیار برای قبول یا ردکردن قطعات است. در تراشکاری به کمک التراسونیک، ابزار به صورت مکرر از قطعه‌کار جدا می‌شود. بسیاری از محققان در مقالات مختلف گزارش کرده‌اند که بهبود زیادی در عوامل خروجی در ماشین‌کاری وجود دارد[11]. استاویوس و همکاران[12] اثر تراشکاری معمولی و تراشکاری به کمک التراسونیک را بر آلومینیوم را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ارتعاش‌های فراصوت باعث بهبود زبری سطح شده است. در مطالعه دیگری، نات و همکاران[13] با افزودن شرایط ارتعاش فراصوت به ماشین‌کاری معمولی، توانستند نیروهای برش و همچنین سایش ابزار را کاهش دهند. در مطالعه دیگری امینی و همکاران[14] نشان دادند که حرکت ارتعاشی ابزار در سوراخ‌کاری باعث کاهش شدید نیروی محوری در مقایسه با ماشین‌کاری معمولی شده است. پاتیل و همکاران[15] نشان دادند که با استفاده از ارتعاش التراسونیک در ماشین‌کاری Ti6Al4V، نیروی برش به میزان ۴۰ % الی ۴۵ % کاهش یافته و همچنین دمای برش نیز ۴۸ % کاهش یافته است. در تحقیقی توسط لطفی و همکاران[16] شبیه‌سازی‌های فرآیند تراشکاری التراسونیک انجام شد و نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از ارتعاش‌های التراسونیک باعث کاهش اندازه دانه شد. همچنین با افزایش سختی قطعه‌کار، نیروی ماشین‌کاری نیز افزایش یافته و از طرفی باعث افزایش انرژی مصرفی و هزینه تولید شده است. امینی و همکاران[17] نیروهای برشی، سایش ابزار و زبری سطح هنگامی‌که ارتعاش التراسونیک به تراشکاری دورانی (RT) افزوده شد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد افزایش سرعت دورانی منجر به افزایش نیروهای برشی شده که این مورد در تراشکاری دورانی به کمک التراسونیک به علت رسیدن به سرعت بحرانی بیشتر نمایان بود. افزایش سرعت دورانی ابزار باعث کاهش زبری سطح و نیروهای برشی در تراشکاری دورانی شد. به طور کلی زبری سطح و نیروهای برشی بیش از ۵۰٪ کاهش یافتند و در مقایسه با تراشکاری سنتی و دورانی سایش کمتر ابزار در تراشکاری دورانی التراسونیک به دست آمد. اما تحقیقات قبلی نشان داده است که استفاده از ارتعاش‌های فراصوت باعث کاهش نیروی برش شده است؛ بنابراین به نظر می‌رسد که اعمال این ارتعاش‌های التراسونیک روی قطعه‌کار با سختی بالا می‌تواند مؤثر باشد. فولاد AISI 4140 یک نوع فولاد آلیاژی مولیبدن-کروم است و به دلیل تنش تسلیم بالا به طور گسترده‌ای برای ساخت قطعاتی مانند محور، شفت، پیچ‌ومهره، چرخ‌دنده‌ها و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. به دلیل کاربرد متنوع این فولاد و نیاز به کیفیت سطح مناسب اقدام به بررسی این جنس قطعه‌کار در سختی‌های متفاوت شد؛ بنابراین، در این تحقیق سعی شده است تأثیر عوامل ماشین‌کاری در سختی‌های مختلف قطعه‌کار در هر دو حالت تراشکاری معمولی یا Conventional turning (CT) و حالت تراشکاری به کمک التراسونیک یا Ultrasonic assisted turning (UAT) بررسی شود. مهم‌ترین مسئله در این تحقیق سختی قطعه‌کار است که با روش‌های ماشین‌کاری معمولی و التراسونیک بررسی شده است. همچنین اثر این دو نوع ماشین‌کاری بر فرسایش ابزار در دو نوع ابزار تنگستن کاربایدی و سرمتی نیز بررسی شده است. هدف این تحقیق، بررسی تأثیر عوامل سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی و سختی قطعه‌کار با دو شرایط مختلف ماشین‌کاری بر کیفیت سطح و عمر ابزار دو ابزار مختلف در ماشین‌کاری فولاد AISI 4140 است. به‌طورکلی، در مورد اثر ارتعاشات‌های التراسونیک در سختی‌های بالای قطعه‌کار، مطالعات کمی انجام شده است. در این مقاله اثر اعمال ارتعاش‌های التراسونیک در فرآیند ماشین‌کاری فولاد AISI 4140 در حالت‌های معمولی و التراسونیک با هم بررسی و مقایسه شده است. نوآوری این مقاله شامل مقایسه اثر سه سختی متفاوت قطعه‌کار در ماشین‌کاری التراسونیک و ماشین‌کاری معمولی بر زبری سطح، دما و شرایط فرسایش ابزار برشی تنگستن کاربایدی و سرمتی است.

۲- مواد و روش‌ها

فولاد AISI 4140 یکی از پرکاربردترین فولادها در صنعت است. بدین منظور برای بررسی عوامل برشی بر زبری سطح و شرایط ابزار در سختی‌های متفاوت این قطعه‌کار انتخاب شد. ماده خام اولیه به صورت میل‌گرد با قطر اولیه ۲۰ میلیمتر انتخاب شد. قطعات از جنس فولاد AISI 4140 انتخاب و توسط عملیات حرارتی به سختی‌های ۱۵، ۳۰ و ٤٥ راکول‌سی رسیدند. نمونه‌های تهیه شده تحت عملیات حرارتی برای حصول سختی‌های مختلف قرار گرفتند. ابتدا قطعات داخل کوره الکتریکی قرار گرفته و تا دمای ۸۷۰ سانتی‌گراد حرارت داده شدند. قطعه‌کارها به مدت ۱ ساعت در این دما نگه داشته شده تا کاملاً آستنیته شده و ساختار قطعه به مارتنزیت تبدیل گردد. در نهایت قطعات تحت فرایندهای عملیات حرارتی بازپخت برای حصول سختی ٤٥ راکول سی به مدت ۲۰ دقیقه و سختی ۳۰ راکول سی به مدت ۲ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه قرار گرفتند و سپس داخل محیط روغن خنک شدند تا به سختی-های مورد نظر جهت انجام فرآیند تراشکاری برسند. از ابزار سرمتی و تنگستن کاربایدی برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. در مجموع سه ابزار تنگستن کاربایدی و سه ابزار سرمتی برای هر سختی متفاوت قطعه‌کار استفاده شده است. ابزار مورد استفاده از نوع DCMT 11T308-PF 4225 ساخت شرکت سندویک است که مخصوص ماشین‌کاری فولاد و استیل (گرید P و M) است. ابزار سرمتی نیز از نوع DCMT-11T302-HF-Cermet جهت انجام آزمایش‌ها انتخاب شد. همچنین طول هر نمونه در هر آزمایش، ۵ میلیمتر بوده است. برای سختی ۱۵ راکول سی یک ابزار سرمتی و

یک ابزار تنگستن کاربایدی و برای سختی ۳۰ و ۴۵ راکول سی نیز به همین صورت از ابزاری جداگانه استفاده شده است تا احتمال خطا کاهش یابد. همچنین ترتیب آزمایش‌ها به صورت تصادفی انتخاب شد. سه مولفه سرعت دورانی، نرخ پیشروی و سختی قطعه‌کار و دو شرایط متفاوت ماشین‌کاری به عنوان متغیرهای ورودی فرآیند تراشکاری در نظر گرفته شد. برای انجام آزمایش‌ها برای سرعت دورانی، سرعت پیشروی و سختی قطعه‌کار سه سطح انتخاب شد و دو شرایط متفاوت ماشین‌کاری برای انجام آزمایش‌ها در نظر گرفته شده است. عمق برش در تمام مراحل آزمایش ثابت و برابر ۰/۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است. در این مطالعه، آزمایش‌ها با استفاده از تراشکاری معمولی (CT) و تراشکاری با کمک التراسونیک (UAT) در عوامل مختلف ماشین‌کاری انجام شده است. دامنه ارتعاش و فرکانس تنظیم شده برای سیستم به ترتیب ۱۲ میکرومتر و ۲۰۶۳۳ هرتز بود. از سنسور (AEC-5502A-01) ساخت کشور ژاپن برای اندازه‌گیری دامنه ارتعاش استفاده شده است. تجهیزات ویژه‌ای برای نصب سیستم اعمال ارتعاشات التراسونیک به ابزار بر روی دستگاه تراش طراحی شد. برای انجام فرآیند تراشکاری معمولی (CT) و تراشکاری با کمک التراسونیک (UAT)، یک تجهیز طراحی شده بر روی ماشین تراش ساخت ماشین‌سازی تبریز نصب شد. تجهیزات نصب شده بر روی دستگاه تراش در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱) آماده‌سازی مجموعه تراشکاری به کمک ارتعاش التراسونیک

برای ساخت قیدوبند برای اعمال ارتعاش‌های التراسونیک در جهت سرعت دورانی به ابزار ابتدا قیدوبند مربوطه طراحی شده است. قیدوبند مربوطه از جنس فولاد St37 است که در محل‌های مربوطه جوشکاری شده است. عوامل برشی متغیر که در آزمایش‌های ماشین‌کاری استفاده شد در جدول ۱ ذکر شده است. انتخاب مقادیر عوامل برشی بر اساس پیشنهاد کارخانه سازنده ابزار، بررسی تحقیقات منتشر شده قبلی در مورد ماشین‌کاری فولاد AISI 4140 و همچنین در نظر گرفتن سرعت دورانی بحرانی جهت اعمال شرایط التراسونیک انجام شده است. ژنراتور مورد استفاده در این تحقیق ساخت شرکت سوئیسی MPI است. توان این ژنراتور ۱۰۰۰ وات و محدوده بسامد آن بین ۱۸ تا ۴۰ کیلوهرتز است.

جدول ۱) پارامترهای برشی ورودی آزمایش‌های تجربی

سطوح	سختی قطعه‌کار (HRC)	سرعت دورانی (rpm)	نرخ پیشروی (mm/rev)	دامنه ارتعاش (µm)
۱	۱۵	۱۸۰	۰/۰۸	ماشینکاری معمولی (۰)
۲	۳۰	۳۵۵	۰/۱۴	ماشینکاری التراسونیک (۱۲)
۳	۴۵	۵۰۰	۰/۲	-

ترانسدیوسر مورد استفاده از نوع ترانسدیوسرهای پیزوالکتریکی با بسامد ۲۰-۲۰/۵ کیلوهرتز است. ترانسدیوسر یکی از مهم‌ترین اجزای هد اولتراسونیک است که وظیفه آن تبدیل سیگنال‌های الکتریکی به ارتعاش‌های مکانیکی (مود ارسالی) و تبدیل ارتعاش‌های مکانیکی به سیگنال‌های الکتریکی (مود برگشتی) است. هورن یکی از اجزای هد اولتراسونیک است که وظایف مهمی از جمله انتقال ارتعاشات و تقویت دامنه ارتعاش‌ها را بر عهده دارد. برای بررسی عوامل خروجی از دستگاه اندازه‌گیر ابعادی ویدئویی Vision Measurement Machine (VMM) SP4030 ساخت شرکت ایسون کشور چین استفاده شد. برای اندازه‌گیری دمای سطح قطعه‌کار، از ترمومتر لیزی مدل VIR50 ساخت شرکت اکستچ با دقت ۰/۱ درجه سانتیگراد استفاده شده است. این نوع ترمومتر قابلیت داده برداری به صورت ۱۵۰میلی ثانیه را دارد. همچنین فاصله ترمومتر تا قطعه‌کار در محدوده قابلیت اندازه‌گیری دستگاه بود. این دستگاه قابلیت داده برداری تا فاصله ۱۲۷ سانتی متری از سوژه مورد نظر را دارد. تنظیمات ترمومتر دارای Emissivity های متفاوت برای جنس‌های متفاوت دارد که پیش از شروع آزمایش‌ها بایستی این مقادیر مطابق جنس مورد نظر وارد تنظیمات دستگاه شود. این دستگاه قابلیت بررسی دما درمحدوده ۵۰- تا ۲۲۰۰ درجه سانتی گراد را دارد. لازم به ذکر است که دمای بررسی شده در این مطالعه دمای قطعه‌کار است و دمای ابزار نیست. پس از انجام سخت‌کاری میزان سختی هر قطعه توسط دستگاه سختی سنج اندازه‌گیری شد. زبری سنج مورد استفاده جهت بررسی زبری سطح‌ها مدلPS1 و ساخت شرکت ماهر است. در شکل ۱ نحوه آماده‌سازی تجهیزات ماشین‌کاری نمایش داده شده است. در این تحقیق از روش ماشین‌کاری خشک برای براده برداری نمونه‌ها استفاده شده است.

در شکل ۲ تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی نشان داده شده است. هر یک از آزمایش‌ها ۲ بار تکرار شد و به دلیل نزدیکی نتایج خروجی به یکدیگر از آزمایش سوم صرف نظر شد.

پس از انجام آزمایش‌ها مقادیر میانگین زبری سطح R_a با استفاده از دستگاه زبری سنج اندازه‌گیری شده است. مقدار کورس حرکت سوزن دستگاه زبری سنج بر اساس استاندارد ISO 4287 مقدار ۲/۵ میلیمتر تنظیم شده است. برای دقت بیشتر و بررسی قابلیت تکرارپذیری زبری سطح برای هر نمونه در سه موقعیت مختلف و سه بار تکرار انجام شد و میانگین اندازه‌های به دست آمده به عنوان

شکل ۲) تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها الف) ژنراتور التراسونیک MPI ب) دستگاه تصویربردار ویدئویی ج) دستگاه زبری سنج

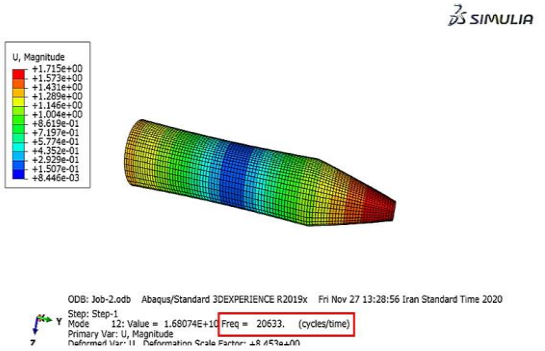
زبری سطح متوسط R_a ثبت شد. پس از انجام آزمایش‌ها به بررسی و تحلیل نتایج پرداخته شد. سایش ابزار پس از ماشین‌کاری بررسی و تصویربرداری شده است. پس از انجام آزمایش‌ها، در آزمایشگاه از ابزارهای برشی توسط دستگاه اندازه‌گیر ابعادی ویدئویی (VMM) تصاویر تهیه شد. از روش طراحی آزمایش فاکتوریل کامل استفاده شد و ٥٤ آزمایش با این روش انجام شد. بر این اساس عوامل ماشین‌کاری، در جدول ۲ مشخص شده است.

هورن با استفاده از دستگاه تراش سی‌ان‌سی ساخته شده که هرچه هورن با دقت بیشتری طراحی شود دامنه ارتعاش بهتری خواهد داشت. به همین برای منظور طراحی هورن از آنالیز مدال در نرم‌افزار آباکوس استفاده شد که در شکل ۳ نتیجه تجزیه و تحلیل مدال از هورن طراحی شده تحت ارتعاش طولی در فرکانس ۲۰۶۳۳ هرتز نشان داده شده است. پس از پایان آزمایش‌ها برای مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها از نرم‌افزار مینی تب استفاده شد. داده‌ها در این نرم‌افزار تحلیل شد و نمودارها توسط این نرم‌افزار تهیه شد.

۳- نتایج تجربی و بحث

۳-۱- بررسی شرایط ماشین‌کاری بر دمای قطعه‌کار

دما در ناحیه ماشین‌کاری یکی از عوامل مهم در عمر ابزار و کیفیت سطح است. در ناحیه اولیه و ثانویه در هنگام ماشین‌کاری، حرارت تولید شده است. حرارت ایجاد شده در ناحیه برش ناشی از تغییر شکل پلاستیک مواد هنگام تشکیل براده و همچنین اصطکاک بین ابزار با براده و سطح قطعه‌کار است. دما علاوه بر سایش ابزار، باعث تغییر شکل براده و کاهش کیفیت سطح قطعه‌کار می‌شود[18]. دماهای استخراجی، با توجه به زمان کوتاه ماشین‌کاری، تنها بیانگر دمای پای ابزار یا سطح قطعه‌کار در حین

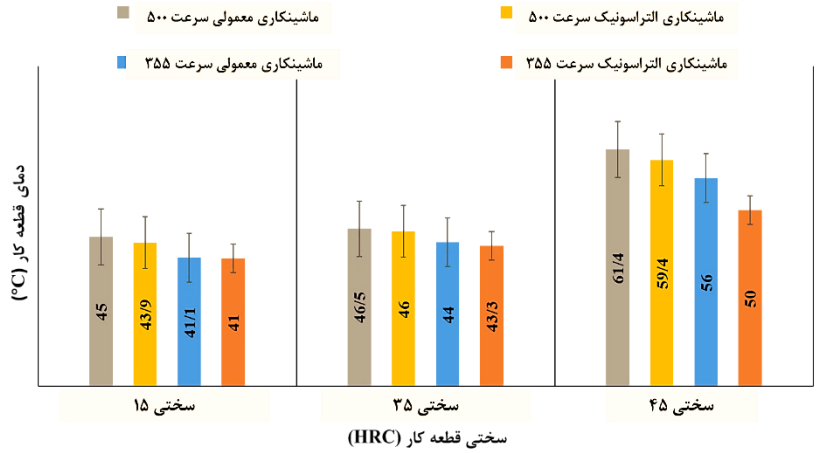


شکل ۳) تجزیه و تحلیل مدال از هورن مدل شده در نرم‌افزار آباکوس

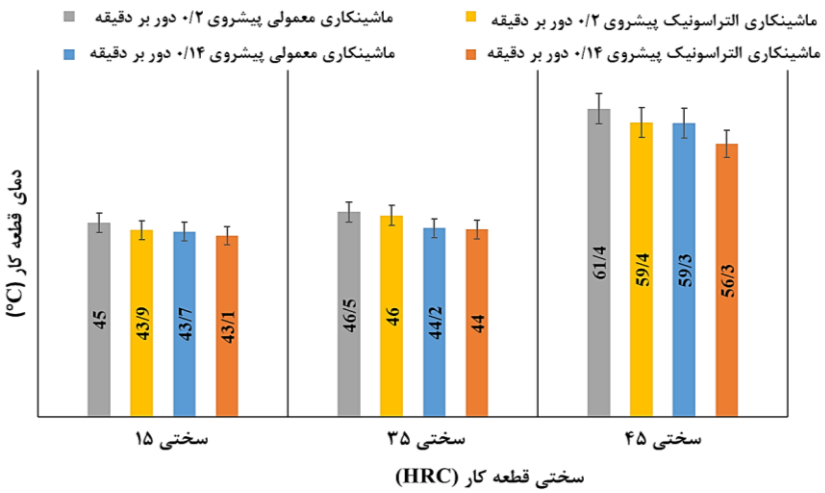
جدول ۲) پارامترهای برشی ورودی آزمایش‌های تجربی

شماره آزمایش	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/rev)	شرایط ماشین‌کاری	شماره آزمایش	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/rev)	شرایط ماشین‌کاری	شماره آزمایش	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/rev)	شرایط ماشین‌کاری
۱	۱۸۰	۰/۰۸	CT	۱۹	۱۸۰	۰/۰۸	CT	۳۷	۱۸۰	۰/۰۸	CT
۲	۱۸۰	۰/۱۴		۲۰	۱۸۰	۰/۱۴		۳۸	۱۸۰	۰/۱۴	
۳	۱۸۰	۰/۲		۲۱	۱۸۰	۰/۲		۳۹	۱۸۰	۰/۲	
۴	۳۵۵	۰/۰۸		۲۲	۳۵۵	۰/۰۸		۴۰	۳۵۵	۰/۰۸	
۵	۳۵۵	۰/۱۴		۲۳	۳۵۵	۰/۱۴		۴۱	۳۵۵	۰/۱۴	
۶	۳۵۵	۰/۲		۲۴	۳۵۵	۰/۲		۴۲	۳۵۵	۰/۲	
۷	۵۰۰	۰/۰۸		۲۵	۵۰۰	۰/۰۸		۴۳	۵۰۰	۰/۰۸	
۸	۵۰۰	۰/۱۴		۲۶	۵۰۰	۰/۱۴		۴۴	۵۰۰	۰/۱۴	
۹	۵۰۰	۰/۲		۲۷	۵۰۰	۰/۲		۴۵	۵۰۰	۰/۲	
۱۰	۱۸۰	۰/۰۸	UAT	۲۸	۱۸۰	۰/۰۸	UAT	۴۶	۱۸۰	۰/۰۸	UAT
۱۱	۱۸۰	۰/۱۴		۲۹	۱۸۰	۰/۱۴		۴۷	۱۸۰	۰/۱۴	
۱۲	۱۸۰	۰/۲		۳۰	۱۸۰	۰/۲		۴۸	۱۸۰	۰/۲	
۱۳	۳۵۵	۰/۰۸		۳۱	۳۵۵	۰/۰۸		۴۹	۳۵۵	۰/۰۸	
۱۴	۳۵۵	۰/۱۴		۳۲	۳۵۵	۰/۱۴		۵۰	۳۵۵	۰/۱۴	
۱۵	۳۵۵	۰/۲		۳۳	۳۵۵	۰/۲		۵۱	۳۵۵	۰/۲	
۱۶	۵۰۰	۰/۰۸		۳۴	۵۰۰	۰/۰۸		۵۲	۵۰۰	۰/۰۸	
۱۷	۵۰۰	۰/۱۴		۳۵	۵۰۰	۰/۱۴		۵۳	۵۰۰	۰/۱۴	
۱۸	۵۰۰	۰/۲		۳۶	۵۰۰	۰/۲		۵۴	۵۰۰	۰/۲	
سختی قطعه‌کار = ۱۵ راکول سی				سختی قطعه‌کار = ۳۰ راکول سی				سختی قطعه‌کار = ۴۵ راکول سی			

ماشین‌کاری است. در شکل ۴ دمای ابزار در سرعت‌های برشی مختلف، در سه سختی مختلف و نرخ پیشروی ۰/۲ میلیمتر بر دور در حالت ماشین‌کاری معمولی و التراسونیک نشان داده شده است. در ماشین‌کاری التراسونیک، با افزایش سرعت دورانی، روند افزایش دما به صورت صعودی است. در شکل ۴ واضح است که دمای سطح قطعه‌کار مربوط به ماشین‌کاری التراسونیک در همه سرعت‌ها کمتر از ماشین‌کاری معمولی است. با افزایش سرعت دورانی از ۳۵۵ تا ۵۰۰ متر بر دقیقه، دما در هر دو حالت ماشین‌کاری افزایش یافته است. با افزایش سرعت، روند افزایش دما مشابه است ولی در هر سرعت، دما در ماشین‌کاری التراسونیک کمتر از ماشین‌کاری معمولی است. بیشترین کاهش دما در سرعت دورانی ۳۵۵ متر بر دقیقه در ماشین‌کاری التراسونیک به مقدار ۱۵٪ نسبت به ماشین‌کاری معمولی مشاهده می‌شود. مقدار متوسط کاهش دما در نرخ پیشروی ۰/۲ میلیمتر بر دور در ماشین‌کاری التراسونیک نسبت به حالت معمولی تا ۱۵٪ است. در شکل ۵ دمای ابزار در پیشروی‌های مختلف، در سه سختی و سرعت دورانی ۵۰۰ متر بر دقیقه در حالت ماشین‌کاری معمولی و التراسونیک نشان داده شده است. مطالعات نشان داده است که با افزایش نرخ پیشروی، سطح مقطع براده و به دنبال آن، توان اصطکاکی تلف شده روی سطح ابزار افزایش می‌یابد[19]. هنگام براده‌برداری این افزایش توان اصطکاکی، باعث افزایش دمای برشی در عملیات تراشکاری شده است. افزایش نرخ پیشروی نیز به دلیل افزایش نیروی اصطکاکی و نرخ کرنش در نواحی اولیه و ثانویه تغییر شکل، دمای برش را افزایش می‌دهد[20]. روند به‌دست آمده در شکل ۵ با مطالعات دیگر محققان مطابقت دارد[21,22]. در فرآیند ماشین‌کاری سنتی، انرژي حاصل از تغییر شکل پلاستیک در ناحیه برش و محل برخورد ابزار با براده، تولید حرارت می‌کند. این حرارت توسط براده‌ها، سیال خنک‌کاري و همچنین انتقال حرارت هدایتی به ابزار و قطعه‌کار، منتقل می‌شود. اگرچه فقط تحقیقات اندکی در زمینه ارتباط بین دماي ماشین‌کاري و زبري سطح صورت پذیرفته است، اما افزایش دماي قطعه‌کار و ابزار در حین ماشین‌کاري، نقشی اساسی در کیفیت سطح نهایی ایفا می‌کند. علت اصلی این موضوع در شدت یافتن روند سایش ابزار در دماهاي بالا است[23]. وانگ و همکاران[24] به مطالعه تجربی حرارت تولید شده در حین ماشین‌کاري آلومینیوم ۶۰۶۱ پرداختند.



شکل ۴) تأثیر سرعت دورانی بر دما در دو حالت ماشین‌کاری (UAT) و (CT)



شکل ۵) تأثیر پیشروی بر دما در دو حالت ماشین‌کاری (UAT) و (CT)

آن‌ها در این تحقیق تاثیر عوامل ماشین‌کاري مانند عمق برش، سرعت اسپیندل و نرخ پیشروي را بر مقدار حرارت تولیدشده در فرآیند مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که افزایش سرعت اسپیندل و نرخ پیشروي منجر به افزایش دماي قطعه‌کار خواهد شد. همچنین، با کاهش عمق ماشین‌کاري، دماي قطعه‌کار در محل برش نیز کاهش یافته است. در شکل ٦ اثر عوامل مختلف ماشین‌کاری بر روی دما را نشان داده شده است. اعمال ارتعاشات التراسونیک در ناحیه ماشین‌کاری باعث ایجاد شرایط قطع و وصلی بین قطعه‌کار و ابزار شده است. از کل حرارت تولید شده هنگام تراشکاری با فرض اینکه هیچ‌گونه انتقال حرارتی به محیط نباشد، حدود ٦٠ الی ٨٠ درصد (بسته به سرعت دورانی، نرخ پیشروی و نوع عملیات براده برداری) توسط براده انتقال می‌یابد، حدود ١٠ الی ٢٠ درصد به ابزار و حدود ١٠ الی ٢٠ درصد نیز به قطعه‌کار منتقل می‌شود. فرآیند التراسونیک باعث بهبود جدایش براده‌ها از قطعه‌کار شده است که دارای سهم زیادی از حرارت در حین ماشین‌کاری را دارد. این شکسته شدن براده‌ها باعث سریع‌تر منتقل شدن حرارت از ناحیه ماشین‌کاری به بیرون دارد. از این رو فرصت انتقال حرارت از براده به قطعه‌کار کاهش می‌یابد که باعث کاهش دما در ناحیه ماشین‌کاری شده است. همان‌طور که مشاهده شد با اعمال ماشین‌کاری به کمک ارتعاش التراسونیک با افزایش سرعت دورانی و نرخ پیشروی دما افزایش یافته است. در حالت التراسونیک، مقدار کاهش دما در سطح قطعه‌کار بیشتر است که این امر باعث بهبود کیفیت سطح شده است که در بخش بعدی بررسی شده است. مطابق شکل ٦، سختی قطعه‌کار در بین پارامترهای برش بیشترین تأثیر را بر روی دما دارد. همان‌طور که مشاهده شد، با افزایش سختی قطعه‌کار، دما افزایش یافته است. "آنالیز واریانس داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های تجربی برای دما در جدول ٣ نشان داد که سختی قطعه‌کار و سرعت دورانی به ترتیب مهمترین عامل مؤثر بر دما هستند. "

۳-۲- بررسی زبری سطح

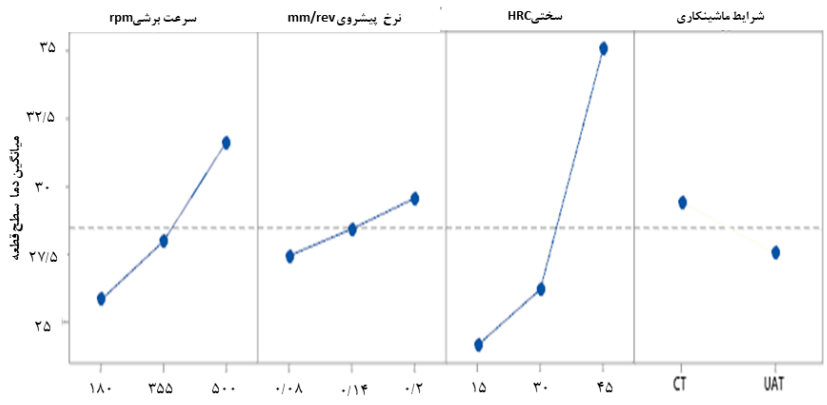
با توجه به اینکه زبری سطح و عمر ابزار تحت تأثیر عوامل مختلفی است پس از انجام آزمایش‌ها در این قسمت به بررسی نمودارها و بحث و تحلیل نتایج پرداخته شده است. نمودارها بر اساس میانگین زبری سطح برای سرعت دورانی و نرخ پیشروی برای سختی‌های متفاوت قطعه‌کار در دو حالت ماشین‌کاری معمولی (CT) و التراسونیک (UAT) رسم شد. با توجه به ثابت بودن ماشین‌ابزار، ابزار و قطعه‌کار در همه آزمون‌ها و ثابت فرض کردن شرایط محیطی، تأثیر متغیرهای سرعت دورانی، نرخ پیشروی، سختی و روش ماشین‌کاری بر زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۲-۱- تأثیر سرعت دورانی بر زبری سطح

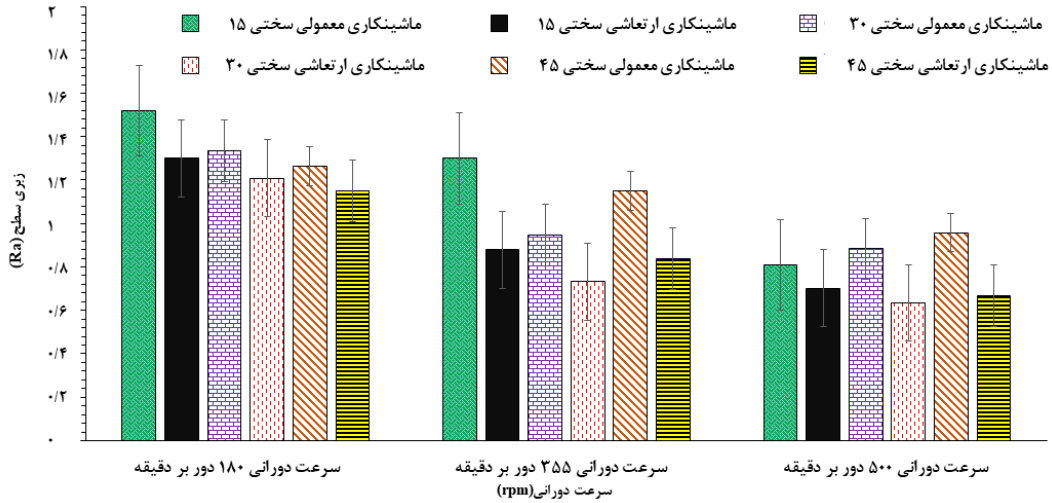
سرعت دورانی از مهم‌ترین عوامل ماشین‌کاری است که تأثیر بسیار زیادي بر بازدهی ماشین‌کاری، کیفیت سطح تمام شده، زمان و هزینه کلی ماشین‌کاری دارد. با توجه به نوع فرآیند و ماده مورد نظر، محدوده مشخصی از سرعت دورانی برای دستیابی به زبری سطح مطلوب وجود دارد. در شکل ٧ میانگین زبری سطوح حاصل از ماشین‌کاری التراسونیک و معمولی در سه سرعت دورانی در سختی‌های ١٥، ٣٠ و ٤٥ راکول سی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ٧ نشان داده شده است با افزایش سرعت دورانی ارتفاع ناهمواری سطوح کمتر شده و پرداخت سطوح بهتر شده است. دلیل کاهش زبری سطح در اثر افزایش سرعت دورانی را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که با افزایش سرعت دورانی فرآیند تغییر شکل پلاستیک راحت‌تر اتفاق رخ داده و اصطکاك بین سطوح آزاد ابزار و سطوح ماشین‌کاری شده و همچنین اصطکاك بین سطح ابزار و براده در اثر افزایش درجه حرارت کاهش یافته

جدول ٣) آنالیز واریانس برای دما

Source	DF	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
سرعت برشی	٢	% ١٧/٢٥	٣٠٨/٩۴	١۵۴/۴٧	٣٩/۵٩	0
نرخ پیشروی	٢	% ٢/٢۵	۴٠/۵٩	٢٠/٢٩۵	۵/٢	٠/٠٠٩
سختی قطعه کار	٢	% ۶٧/٧۵	١٢١٢/۶٣	۶٠۶/٣١٧	١۵۵/٣٩	0
نوع ماشینکاری	١	% ٢/٧۵	۴٩/٢۵	۴٩/٢۴٩	١٢/۶٢	٠/٠٠١
خطا	۴۶	% ١٠	١٧٩/۴٩	٣/٩٠٢		
مجموع	۵٣	% ١٠٠	١٧٩٠/٩١			



شکل ٦) نمودار اصلی اثرات برای زبری سطح

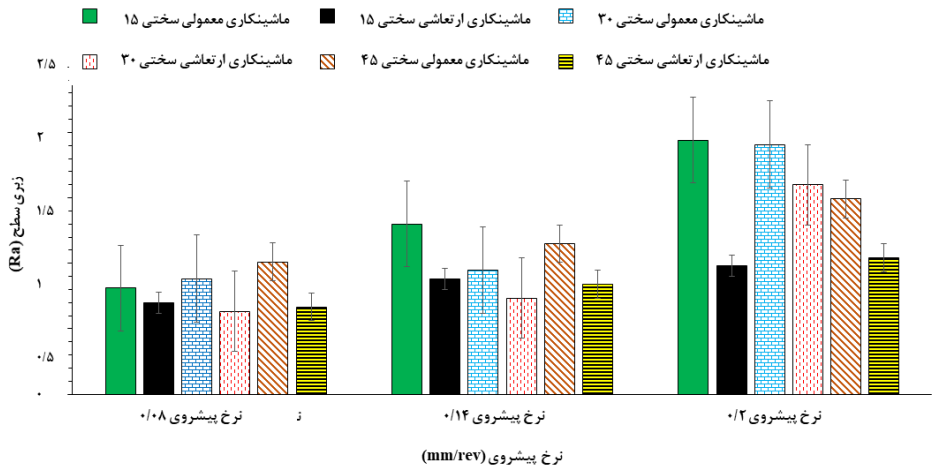


شکل ۷) تأثیر سرعت دورانی بر زبری سطح در دو حالت ماشین‌کاری (UAT) و (CT)

است. توان مصرف شده در برش فلزات به مقدار زیادی در ناحیه برش به حرارت تبدیل می‌شود. حرارت تولید شده ناشی از تغییر شکل پلاستیک ماده قطعه‌کار و اصطکاک است. افزایش حرارت در ناحیه ماشین‌کاری باعث خمیری شدن فلز برداشته شده از سطح قطعه‌کار شده است. به دلیل بالا رفتن درجه حرارت، تغییر شکل پلاستیک آسان‌تر شده و لبه انباشته (BUE) از بین می‌رود. این از بین رفتن لبه انباشته باعث روان تر حرکت کردن براده از روی ابزار و به دنبال آن کاهش اصطکاک در این ناحیه می‌شود. همچنین اعمال ارتعاش‌های التراسونیک، خود باعث از بین رفتن لبه انباشته به دلیل فرآیند قطع و وصل ماشین‌کاری شده است. در هر دو حالت ماشین‌کاری معمولی (CT) و التراسونیک (UAT) با افزایش سرعت دورانی، زبری سطح کاهش یافته است. طبق تحقیقی توسط گنگ و همکاران[25] نشان داد که اعمال ارتعاش-های التراسونیک باعث کاهش دمای ماشین‌کاری شده است. همچنین در تحقیقی دیگر توسط لو و همکاران[26] نشان داده شد دما و نیروی ماشین‌کاری در حالت التراسونیک نسبت به حالت ماشین‌کاری معمولی کاهش یافته است. با مرور بر تحقیقات گذشته و نتایج بخش قبل اعمال ارتعاش‌های التراسونیک باعث کاهش حرارت و نیروی ماشین‌کاری شده است. از این رو با افزایش سرعت دورانی حرارت در ناحیه ماشین‌کاری افزایش یافته است. این افزایش حرارت در حالت التراسونیک کمتر است و باعث بهبود زبری سطح نسبت به ماشین‌کاری معمولی شده است. در حالت التراسونیک، با افزایش سرعت دورانی زبری سطح کاهش یافته است، اما در سرعت دورانی یکسان، زبری سطح حالت التراسونیک کمتر از حالت معمولی است. علت دیگر کاهش زبری سطح در اثر افزایش سرعت دورانی کاهش نیروی ماشین‌کاری به علت شکل‌گیری براده آسان‌تر و کمتر شدن مقدار سایش ابزار در نظر گرفت. طبق نتایج ارایه شده در بخش قبل (۱-۳) مقاله اعمال ارتعاش‌های التراسونیک تا حدودی باعث کاهش حرارت در ناحیه برش شده است. از این رو با توجه به قطع و وصل شدن ماشین‌کاری (به نوعی ماشینکاری ضربه‌ای و جدایش بین قطعه‌کار و ابزار) در حالت ارتعاشی که باعث از بین رفتن لبه انباشته شده باعث شده کیفیت سطح بهتر و سایش ابزار نیز به دلیل از بین رفتن لبه انباشته کمتر شود. اما در حالت ماشین‌کاری معمولی به دلیل نبود ضربه این حرارت در ناحیه ماشین‌کاری بیشتر شده و همچنین لبه انباشته نیز دیرتر از بین می‌رود که باعث سایش بیشتر ابزار شده است. ماشین‌کاری التراسونیک با اعمال ضربه (جدایش) با فرکانس ۲۰۰۰۰ هرتز نیز باعث از بین رفتن لبه انباشته شده که در مقایسه با حالت ماشین‌کاری معمولی دارای برتری در از بین بردن لبه انباشته و جداشدن پلیسه‌ها از قطعه‌کار است.

۲-۲-۳- تأثیر نرخ پیشروی بر زبری سطح

در شکل ۸ میانگین زبری سطوح در نرخ‌های پیشروی مختلف در سختی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ راکول سی نشان داده شده است. در هر دو حالت معمولی و التراسونیک با افزایش نرخ پیشروی، زبری سطح افزایش یافته است. اما در نرخ پیشروی یکسان، زبری سطح در حالت التراسونیک بهتر از حالت معمولی است. زبری سطح به دست آمده ناشی از تراشکاری التراسونیک به صورت قابل توجهی کمتر تراشکاری معمولی است که این صافی سطح بهتر را می‌توان به تشکیل لبه انباشته کمتر نسبت به تراشکاری معمولی مربوط دانست. با افزایش نرخ پیشروی نیروی مورد نیاز برای برداشتن براده افزایش یافته و کیفیت سطح ماشین‌کاری شده کاهش یافته است. براده‌ها در تراشکاری التراسونیک به‌صورت ناپیوسته و شکسته ایجاد شده که این خود باعث کاهش تماس براده‌ها با سطح تراشکاری شده و کاهش چسبندگی براده به ابزار و قطعه‌کار و در نتیجه باعث بهبود کیفیت سطح تازه ماشین‌کاری شده می‌گردد. یکی از عوامل مهم دیگر که به طور مؤثر بر روی زبری

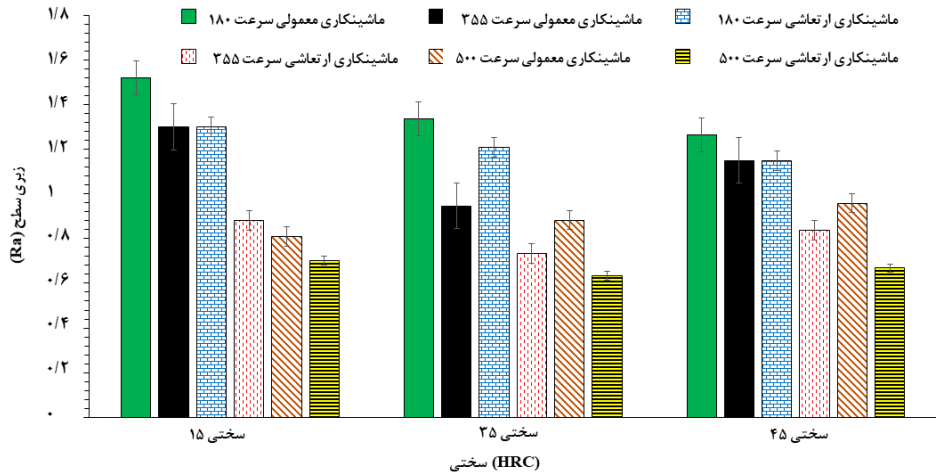


شکل ۸) تأثیر نرخ پیشروی بر زبری سطح در دو حالت ماشین‌کاری (UAT) و (CT)

سطح اثر می‌گذارد سایش ابزار است که ابزار هندسه و برندگی خود را از دست داده و در نتیجه به شدت بر روی زبری سطح اثرگذار است. البته افزایش سرعت دورانی تا حدی می‌تواند باعث بهبود کیفیت سطح گردد که ابزار توانایی تحمل درجه حرارت بیشتر را داشته باشد، در غیر این صورت لبه‌های برنده ابزار به سرعت شکل و فرم خود را از دست داده و باعث بدتر شدن کیفیت سطح می‌گردد. دلیل دیگر افزایش زبری سطح در اثر افزایش نرخ پیشروی، افزایش گام برآمدگی‌های ناشی از تماس ابزار با سطح قطعه‌کار است. افزایش زبری سطح با افزایش پیشروی را می‌توان به افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته و در نتیجه افزایش نیروی برشی و بدتر شدن شرایط برش نسبت داد. علت این امر بالارفتن نیروی ماشین‌کاری در اثر افزایش سطح تماس ابزار و براده در نتیجه افزایش اصطکاک در منطقه برش و افزایش مقدار سایش ابزار است. در هنگام ماشین‌کاری با پیشروی کم، ارتعاش التراسونیک به حداقل رسیده و نیروی برش کمتر است. اما در بالاترین میزان پیشروی، ارتعاشات التراسونیک در ناحیه ماشین‌کاری بیشتر است، در نتیجه زبری سطح بالاتر به دست آمده است.

۳-۲-۳- اثر سختی قطعه‌کار بر زبری سطح

سختی قطعه‌کار یکی از عوامل مهم و مؤثر در کیفیت سطح، عمر ابزار و مصرف انرژی در فرآیند ماشین‌کاری است. سختی هر فلز ناشی از ترکیب شیمیایی و عملیات حرارتی آن است. با افزایش سختی قطعه‌کار نیروی برشی افزایش می‌یابد. با افزودن عناصر آلیاژی به فلز تأثیر متفاوتی در قابلیت ماشین‌کاری ایجاد می‌شود. بعضی از عناصر باعث خوش‌تراش شدن فلز و افزایش عمر ابزار می‌شوند و نیروی تراش را کاهش و کیفیت سطح را افزایش می‌دهند. در شکل ۹ تأثیر سختی قطعه‌کار بر زبری سطح در سرعت پیشروی ۰/۱٤ دور در دقیقه در سرعت‌های مختلف دورانی در دو حالت ماشین‌کاری معمولی و التراسونیک نشان داده شده است. طبق تحقیقات گذشته[27] اعمال ارتعاشات التراسونیک باعث کاهش دمای ماشین‌کاری تا حدود ٦۰٪ شده است. همچنین در بخش ۱-۳ نتایج نشان داد که با افزایش سختی قطعه‌کار، زبری سطح کاهش یافته است. با افزایش سرعت دورانی، زبری سطح در سختی‌های مختلف کاهش یافته است. دلیل کاهش زبری در سرعت ۳۵۵ دور در دقیقه این است که دما با افزایش سختی و



شکل ۹) اثر سرعت دورانی در سختی متفاوت بر زبری سطح در دو حالت ماشین‌کاری (UAT) و (CT)

سرعت دورانی کمی افزایش می‌یابد، قطعه‌کار را نرم‌تر می‌کند و مقاومت آن را کاهش می‌دهد، بنابراین، سازوکار براده برداری از سطح قطعه‌کار ساده‌تر شده و نیروی برش کاهش می‌یابد و در نهایت از زبری سطح قطعه‌کار می‌کاهد[28, 29]. درجه حرارت در نقطه تماس ابزار و قطعه‌کار با افزایش بیشتر سرعت دورانی افزایش یافته و باعث شده براده‌ها حالت خمیری پیدا کرده و از سطح ابزار راحت‌تر کنده شده و باعث کاهش دمای ابزار در ناحیه برش و به دنبال آن کاهش سایش ابزار شده است.

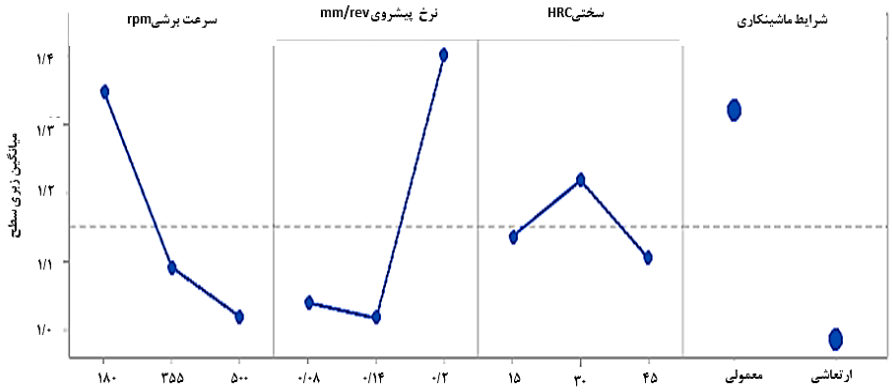
در شکل ۱۰ اثر عوامل مختلف ماشین‌کاری بر روی زبری سطح را نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده شد با اعمال ماشین‌کاری به کمک ارتعاش التراسونیک با افزایش سرعت اسپیندل زبری سطح کاهش یافته است. در حالت التراسونیک، مقدار کاهش زبری سطح بیشتر است و باعث بهبود کیفیت سطح شده است. مطابق شکل ۱۰، سختی قطعه‌کار در بین عوامل برش بیشترین تأثیر را بر روی زبری سطح دارد. همان‌طور که مشاهده شد، با افزایش سختی قطعه‌کار، زبری سطح کاهش یافته است. همچنین، می‌توان متوجه شد که با افزایش سختی قطعه‌کار با اعمال ارتعاش‌های التراسونیک، می‌توان به زبری سطح بهتری نسبت به حالت ماشین‌کاری معمولی رسید. همان‌طور که مشاهده می‌شود تفاوت زیادی در زبری سطح بین سختی ۳۰ و ٤٥ راکول‌سی است. با بررسی نتایج حاصل و مطالعه پژوهش‌های پیشین می‌توان متوجه شد یکی از عوامل مهم در متفاوت بودن تأثیر سختی بر زبری سطح این است که شرایط ماشین‌کاری، شرایط فرسایش ابزار، سازوکارتشکیل براده و ایجاد لبه انباشته در ابزار در مواد مختلف یکسان نیست. زبری سطح اثر مستقیمی با لبه انباشته دارد و با شکل‌گیری لبه انباشته زبری سطح افزایش و با از بین رفتن لبه انباشته زبری سطح کاهش می‌یابد. همچنین اعمال ارتعاش‌های التراسونیک باعث کاهش نیروی برشی می‌شود که در نتیجه فشار وارد به ابزار و فرسایش ابزار کاهش می‌یابد. اعمال ارتعاش‌های التراسونیک باعث شکسته شدن براده‌های حاصل از ماشین‌کاری شده که باعث عدم جوش خوردن براده با ابزار و عدم تشکیل لبه انباشته شده است. همچنین در شرایط یکسان و سختی‌های بالاتر قطعه‌کار ابزار برشی در حالت (UAT) نسبت به حالت (CT) فرسایش کمتری داشته است که یکی از دلایل بهبود زبری سطح در سختی‌های بالاتر اعمال ارتعاش‌های التراسونیک است. "آنالیز واریانس داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های تجربی برای زبری سطح در جدول ۴ نشان داد که شرایط ماشین‌کاری التراسونیک و معمولی، سرعت دورانی و نرخ پیشروی به ترتیب مهمترین عامل مؤثر بر زبری سطح هستند و پس از آن‌ها، سختی قطعه‌کار تأثیر اندکی دارد."

۳-۳- بررسی سایش ابزار

پایان عمر ابزار به جنس قطعه‌کار و هندسه ابزار برش، شرایط کلی ماشین‌کاری، نحوه بستن ابزار، شرایط ماشین‌کاری مانند معمولی، التراسونیک و عوامل برش بستگی دارد. به طور کلی سایش در اثر تغییر شکل پلاستیک در اثر تنش های فشاری، سایش ابزار در اثر چسبندگی، سایش ابزار در اثر ساییدگی، سایش ابزار در اثر نفوذ و سایش ابزار در اثر خستگی به وقوع می‌پیوندد. در سرعت های برشی و پیشروی زیاد و در نتیجه نیروهای فشاری بالا درجه حرارت سطح ابزار افزایش یافته و تغییر شکل پلاستیک لبه برنده اتفاق می‌افتد. در اثر افزایش حرارت درسطح ابزار اتم های سطح ابزار به براده منتقل شده و باعث ضعیف شدن سطح ابزار می‌گردد که این رخداد بیشتر در ابزارهای کاربیدی و در سرعت های بالا اتفاق می‌افتد. نرخ انتقال اتم ها از سطح ابزار به براده به صورت نمایی با درجه حرارت ازدیاد پیدا می‌کند. پدیده نفوذ که در اثر واکنش شیمیایی بین کبالت موجود در ابزار های کاربیدی و به هنگام تراش فولاد انجام می‌گردد باعث ضعیف شدن سطح ابزار

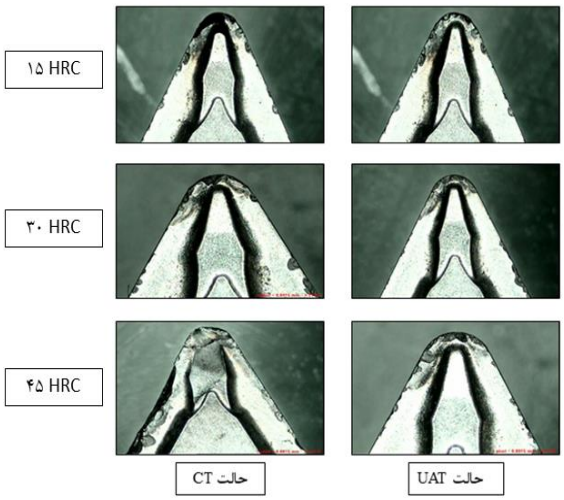
جدول ۴) آنالیز واریانس برای زبری سطح

Source	DF	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
سرعت برشی	2	21 %	61653/1	80826/0	63/10	**0**
نرخ پیشروی	2	50/18 %	3742/1	6871/0	03/9	**0**
سختی قطعه کار	2	90/11 %	88294/0	02724/0	36/0	**003/0**
نوع ماشینکاری	1	47 %	49916/3	88294/0	61/11	**001/0**
خطا	46	60/1 %	05449/0	07607/0		
مجموع	53	100	42732/7			



شکل ۱۰) نمودار اصلی اثرات برای زبری سطح

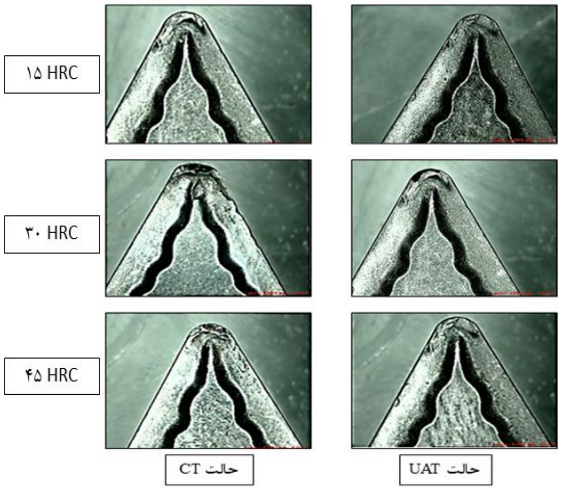
گشته و شکستگی ابزار را به دنبال خواهد داشت. به دلیل تغییرات درجه حرارت و نیروها در سطح ابزار حرکت های موازی و عمود بر لبه برنده ابزار به وجود می‌آید این پدیده باعث فرسایش ابزار می‌گردد. برای بررسی فرسایش ابزار، دو نوع ابزار مختلف سرمتی و تنگستن کاربایدی مورد بررسی قرار گرفت. فرایندهای تراشکاری التراسونیک و معمولی مجدد با ابزار سرمتی انجام شد. سایش ابزار باعث کاهش کیفیت سطح، کاهش دقت ابعادی قطعه و افزایش هزینه تمام شده قطعه شده است. در این تحقیق، عملیات ماشین‌کاری توسط شش ابزار تنگستن کاربایدی و شش ابزار سرمتی با دو روش مختلف ماشین‌کاری انجام شد. در هر دو شرایط آزمایش، عوامل برشی، جنس و هندسه ابزار کاملاً یکسان و سختی قطعه‌کار متفاوت بود. نتایج حاصل از عکس‌برداری از ابزار توسط دستگاه اندازه‌گیر نوری قبل و پس از انجام ماشین‌کاری در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۱) تأثیر سختی قطعه‌کار بر طول عمر ابزار تنگستن کاربایدی در دو حالت ماشین‌کاری (CT) و (UAT)

با توجه به عکس‌برداری از ابزارها، در حالت ماشین‌کاری معمولی (CT)، لبه برشی ابزار از بین رفته و ابزار لب پر شده است و فاز برشی ابزار به صورت نامنظم شده و از بین رفته است و با توجه به تعداد کم آزمایش‌ها ابزار خیلی سریع از بین رفته است. با توجه به شکل‌های ۱۱ و ۱۲، در حالت ماشین‌کاری التراسونیک (UAT)، لبه برشی ابزار هنوز از بین نرفته و نسبت به حالت ماشین‌کاری معمولی (CT)، لبه برشی سالم‌تر است و ابزار هنوز قابل استفاده است و آسیب جدی‌ای ندیده است.

با توجه به شکل‌های ۱۱ و ۱۲ سایش ابزار در حالت ماشین‌کاری التراسونیک (UAT) از حالت ماشین‌کاری معمولی (CT) کمتر است یعنی میزان عمر ابزار در حالت ماشین‌کاری التراسونیک (UAT) از حالت ماشین‌کاری معمولی (CT) بیشتر است. واکنش شیمیایی بالای فولاد باعث شده که قطعه‌کار در حین فرآیند ماشین‌کاری به ابزار برش جوش بخورد و منجر به ترک‌خوردگی زودرس و خرابی



شکل ۱۲) تأثیر سختی قطعه‌کار بر طول عمر ابزار سرمتی در دو حالت ماشین‌کاری (CT) و (UAT)

ابزار شود. همان‌طور که مشاهده شد، به دلیل ضریب انتقال حرارت کم آلیاژ فولاد، دما در سطح ابزار و قطعه‌کار افزایش یافته و باعث پدیده نفوذ در سطح ابزار شده است. در نتیجه اعمال فشار و گرمای بیش از حد بر روی لبه برش، سرعت دوران زیاد و سرعت پیشروی بالا و سختی ماده قطعه‌کار به معنی فشار و درجه حرارت بالا بر روی لبه برش است که منجر به سایش ابزار برش شده است.همچنین می‌توان مشاهده کرد که با افزایش سختی قطعه‌کار فرسایش ابزار بیشتر شده است که با اعمال ارتعاشات التراسونیک این فرسایش ابزار نسبت به حالت ماشین‌کاری معمولی کمتر است. همچنین با مقایسه میزان سایش دو ابزار برشی می‌توان دریافت که دو ابزار شرایط فرسایش مشابهی دارند، اما در حالت ماشین‌کاری معمولی ابزار سرمتی در مقایسه با ابزار تنگستن کاربایدی شرایط بهتری دارد. از بارزترین خصوصیات سرمت‌ها حفظ سختی در درجه حرارت‌های خیلی بالا و مقاومت بالا در مقابل سایش؛ ولی مقاومت کم در مقابل خمش و شوک‌های مکانیکی و بارهای ضربه‌ای و ارتعاش التراسونیک است و لذا با وجود این محدودیت‌ها باید از ماشین‌ابزارهای صلب و کاملاً مستحکم که بدون لرزش می‌باشند، استفاده کرد. ابزارهای سرمتی مقاومت به سایش بسیار بالاتری نسبت به ابزارهای کاربیدهای تنگستن دارند و در سرعت‌های برش بالاتری نیز کار می‌کنند. نتایج نشان داد ابزار سرمتی در سختی‌های بالاتر شرایط بهتری نسبت به ابزار تنگستن کاربایدی دارد. همچنین با اعمال ارتعاش‌های التراسونیک فرسایش ابزار کاهش یافته است که می‌توان با انتخاب ابزار سرمتی و اعمال ارتعاش‌های التراسونیک شرایط فرسایش ابزار را در ماشین‌کاری فولاد AISI ٤١٤٠ به حداقل رساند. در مورد عمر ابزار در سرعت‌های دورانی بالا می‌توان گفت چون درگیری بین ابزار و براده کاهش یافته، پس مقاومت نیز بین ابزار و براده کمتر خواهد شد. در حالت التراسونیک به دلیل جدایش بین ابزار و قطعه‌کار این فرآیند بهتر رخ می‌دهد. همچنین چون در دماهای بالا به علت

کاهش مقاومت در برابر ماشین‌کاری، سرعت سایش ابزار کمتر شده در نتیجه می‌توان از سرعت دورانی بالاتری نسبت به ماشین‌کاری معمولی استفاده کرد که باعث کاهش زمان تولید و ماشین‌کاری می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با استفاده از روش فاکتوریل کامل ٥٤ آزمایش به‌منظور بررسی تأثیر سختی قطعه‌کار و عوامل برشی بر زبری سطح قطعه‌کار (R_a) و شرایط فرسایش ابزار برشی از جنس سرمتی و تنگستن کارباید در قطعه‌کار از جنس فولاد AISI 4140 بررسی شد. مهمترین نتایج حاصل از این مطالعه یه شرح زیر است:

- در این مطالعه ثابت گردید که دما در ماشین‌کاری به کمک ارتعاش‌های التراسونیک نسبت به ماشین‌کاری معمولی با میزان حداکثر ۱۵ % کاهش یافته است.
- کاهش دما در حین ماشین‌کاری اثر مستقیمی بر کیفیت سطح تولیدی دارد.
- زبری سطح (R_a) در ماشین‌کاری به کمک ارتعاش‌های التراسونیک نسبت به ماشین‌کاری معمولی در عوامل مختلف ماشین‌کاری به دلیل جدایش ابزار از قطعه‌کار در حالت التراسونیک تا حدود ٣٦ درصد کمتر است.
- همچنین با افزایش سختی قطعه‌کار با اعمال ارتعاش‌های التراسونیک به دلیل کاهش حرارت تولیدی و کمتر درگیر شدن ابزار با قطعه‌کار به دلیل قطع و وصل شدن ماشین‌کاری عمر ابزار بهبود یافته و در حالت التراسونیک در ناحیه ماشین‌کاری می‌توان به کیفیت سطح بهتری دست یافت.
- با افزایش سختی قطعه‌کار فرسایش ابزار بیشتر شده است که سایش ابزار در حالت ماشین‌کاری التراسونیک از حالت ماشین‌کاری معمولی کمتر است که نشان دهنده عمر بیشتر ابزار در حالت ماشین‌کاری التراسونیک نسبت به ماشین‌کاری معمولی است. همچنین سایش ابزار تنگستن کارباید در مقایسه با ابزار سرمتی بیشتر است که این پدیده در سختی های بالاتر مشهودتر است.
- با اعمال ارتعاش‌های التراسونیک فرسایش ابزار کاهش یافته است که با انتخاب ابزار سرمتی و اعمال ارتعاش‌های التراسونیک شرایط فرسایش ابزار را در ماشین‌کاری فولاد AISI 4140 به حداقل رساند.
- عوامل بهینه که دارای کمترین زبری سطح می‌باشند شامل سرعت دورانی به مقدار ۵۰۰، نرخ پیشروی ۰/۰۸ در سختی قطعه‌کار ۳۰ و ٤٥ راکول سی است.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان این مقاله در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مدنظر گرفته و هنگام استفاده از منابع علمی به آن به عنوان مرجع اشاره کرده‌اند.

تعارض منافع: تمامی مطالب مذکور در این مقاله توسط نویسندگان آن انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

سهم نویسندگان: مسعود بیات (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه، پژوهشگر اصلی، نگارنده بحث (۵۰٪)؛ سعید امینی (نویسنده دوم)، روش‌شناس، پژوهشگر کمکی، نگارنده بحث (۵۰٪).

منابع مالی: تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

منابع

1- Davim JP. Design of optimisation of cutting parameters for turning metal matrix composites based on the orthogonal arrays. Journal of materials processing technology. 2003;132(1-3):340-4.

2- Bayat M, Abootorabi MM. Estimation of energy consumption in milling process with minimum quantity lubrication and comparison with wet cutting state. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(6):1701-8.

3- Bayat M, Amini S, Hadidi M. Effect of ultrasonic-assisted turning on geometrical tolerances in Al 2024-T6. Materials and Manufacturing Processes. 2021:1-2.

4- Saravanan L, Xavior MA. comparative performance of coated and uncoated inserts during intermittent cut milling of aisi 4340 steel. Journal of Engineering Science and Technology. 2015;10(5):606-16.

5- Özel T, Hsu TK, Zeren E. Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2005;25(3):262-9.

6- Gaitonde VN, Karnik SR, Figueira L, Davim JP. Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2009; 27(4):754-63.

7- Cristina-Iuliana B. Factors influencing surface integrity in hard machining of steels-A review. International Journal of Scientific & Engineering Research. 2015;6(5):38-43.

8- Omiddodman AR, Hassanpour H, Sadeghi MH, Rasti A, Saadatbakhsh MH. Evaluation of workpiece hardness and cutting parameters effects on cutting force and surface roughness in drilling using vegetable-based cutting fluid. Modares Mechanical Engineering. 2015;14(13).

9- Heydari B, Abootorabi Zarchi MM. The effect of workpiece hardness and cutting parameters on surface roughness in dry hard turning of X210Cr12 cold tool steel. Modares Mechanical Engineering. 2017;17(6):241-7.

10- Chavoshi SZ, Tajdari M. Surface roughness modelling in hard turning operation of AISI 4140 using CBN cutting tool. International journal of material forming. 2010;3(4):233-9.

11- Amini S, Hosseinabadi HN, Sajjady SA. Experimental study on effect of micro textured surfaces generated by ultrasonic vibration assisted face turning on friction and wear performance. Applied Surface Science. 2016; 390:633-48.
12- Ostasevicius V, Gaidys R, Rimkeviciene J, Dauksevicius R. An approach based on tool mode control for surface roughness reduction in high-frequency vibration cutting. Journal of Sound and Vibration. 2010;329(23):4866-79.
13- Nath C, Rahman M, Andrew SS. A study on ultrasonic vibration cutting of low alloy steel. Journal of Materials Processing Technology. 2007; 192:159-65.
14- Amini S, Tehrani AF, Barani A, Paktinat H. Vibration drilling process on Al2024. InAdvanced Materials Research 2012 (Vol. 445, pp. 79-83). Trans Tech Publications Ltd.
15- Patil S, Joshi S, Tewari A, Joshi SS. Modelling and simulation of effect of ultrasonic vibrations on machining of Ti6Al4V. Ultrasonics. 2014; 54(2):694-705.
16- Lotfi M, Amini S, Akbari J. Surface integrity and microstructure changes in 3D elliptical ultrasonic assisted turning of Ti–6Al–4V: FEM and experimental examination. Tribology International. 2020; 151:106492.
17- Amini S, Aghaei M, Lotfi M, Hakimi E. Analysis of linear vibration in rotary turning of AISI 4140 steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017;91(9):4107-16.
18- Dhananchezian M, Kumar MP, Sornakumar T. Cryogenic turning of AISI 304 stainless steel with modified tungsten carbide tool inserts. Materials and Manufacturing Processes. 2011;26(5):781-5.
19- M. C. Shaw, *Metal Cutting Principles*, pp.213-272, London: Oxford University Press, 1984.
20- Sulaiman S, Roshan A, Borazjani S. Effect of cutting parameters on tool-chip interface temperature in an orthogonal turning process. InAdvanced Materials Research 2014 (Vol. 903, pp. 21-26). Trans Tech Publications Ltd.
21- Sarıkaya M, Yılmaz V, Güllü A. Analysis of cutting parameters and cooling/lubrication methods for sustainable machining in turning of Haynes 25 superalloy. Journal of Cleaner Production. 2016; 133:172-81.
22- S. Y. Hong, Y. Ding, Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V, International Journal of Machine Tool & Manufacture, Vol. 41, No. 1, pp. 1417-1437, 2001.
23- M. Aydın, C. Karakuzu, M. Uçar, A. Cengiz, and M. A. Çavuşlu, "Prediction of surface roughness and cutting zone temperature in dry turning processes of AISI304 stainless steel using ANFIS with PSO learning," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 67, no. 1–4, pp. 957–967,2013.
24- Wang SJ, Chen X, To S, Ouyang XB, Liu Q, Liu JW, Lee WB. Effect of cutting parameters on heat generation in ultra-precision milling of aluminum alloy 6061. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015;80(5):1265-75.
25- Geng D, Lu Z, Yao G, Liu J, Li Z, Zhang D. Cutting temperature and resulting influence on machining performance in rotary ultrasonic elliptical machining of thick CFRP. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2017; 123:160-70.
26- Luo H, Wang Y, Zhang P. Effect of cutting and vibration parameters on the cutting performance of 7075-T651 aluminum alloy by ultrasonic vibration. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020;107(1):371-84.
27- Khajehzadeh M, Razfar MR. Theoretical modeling of tool mean temperature during ultrasonically assisted turning. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2016;230(4):675-93.
28- Amini S, Mohagheghian N. Vibratory rotary turning process of Al 7075 workpiece. Materials and Manufacturing Processes. 2014;29(3):344-9.
29- Lotfi M, Amini S, Teimouri R, Alinaghian M. Built-up edge reduction in drilling of AISI 1045 steel. Materials and Manufacturing Processes. 2017;32(6):623-30.