مجله مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1396، دوره 17، شماره 6، ص‌ص 241-247

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تأثیر سختی قطعه‌کار و پارامترهای برشی بر زبری سطح در سخت‌تراشی خشک فولاد ابزار سردکار X210Cr12

بهبود حیدری[1]، محمدمهدی ابوترابی*[2]، حمیدرضا کریمی‌زارچی[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

3- استادیار، مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد

* یزد، صندوق پستی 89195-741، abootorabi@yazd.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 29 فروردین 1396

پذیرش: 18 اردیبهشت 1396

ارائه در سایت: 25 خرداد 1396

کلید واژگان:

سخت‌تراشی

زبری سطح

سختی قطعه‌کار

سرعت برشی

نرخ پیشروی

چکیده

ماشین‌کاری فولادهای سخت ویژگی‌ها و مشکلات خاص خود را دارد. با توجه به پیشرفت‌های اخیر در به‌کارگیری ابزارهای برشی جدید، امکان براده‌برداری از فولادهای سخت شده به وسیله فرآیندهایی چون تراش‌کاری و فرزکاری به وجود آمده است و امکان جایگزین کردن تراش‌کاری سخت به‌جای برخی فرآیندهای سنگ‌زنی وجود دارد. به عملیات تراش‌کاری روی قطعه‌کارهایی با سختی بالای 45 راکول‌سی، سخت‌تراشی گفته می‌شود. هدف از این تحقیق بررسی اثر سختی قطعه‌کار و پارامترهای سرعت برشی و نرخ پیشروی بر زبری سطح در عملیات سخت‌تراشی فولاد ابزار سردکار X210Cr12 یا SPK در حالت خشک است. به این منظور قطعه‌کارهایی از جنس فولاد X210Cr12 تحت عملیات حرارتی متفاوت قرار گرفت تا در محدوده سخت‌تراشی قرار گیرد. سپس این قطعه‌کارها با استفاده از ابزار برشی سی‌بی‌ان با پارامترهای برشی متفاوت ماشین‌کاری و از لحاظ زبری سطح مقایسه شد. طراحی آزمایش‌ها به صورت کامل بوده و در مجموع، 36 آزمایش انجام شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی و آنالیز واریانس، نرخ پیشروی 90.4% و سختی قطعه‌کار 8.3% بر زبری سطح تأثیر داشته است. میزان اثر سرعت برشی بر زبری سطح قطعه‌کار بسیار ناچیز است. افزایش نرخ پیشروی سبب افزایش زبری سطح شده است. با افزایش سختی قطعه‌کار تا 50 راکول‌سی، زبری سطح قطعه‌کار کاهش و با افزایش سختی از 50 تا 65 راکول‌سی، زبری سطح افزایش یافته است.

The effect of workpiece hardness and cutting parameters on surface roughness in dry hard turning of X210Cr12 cold tool steel

Behbood Heydari[1], Mohammad Mahdi Abootorabi[1*], Hamid Reza Karimi zarchi[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

2- Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

*P.O.B. 89195-741, Yazd, Iran, abootorabi@yazd.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 18 April 2017

Accepted 08 May 2017

Available Online 15 June 2017

Keywords:

Hard turning

Surface roughness

Workpiece hardness

Cutting speed

Feed rate

ABSTRACT

Machining of hard steels has its own problems. According to the recent advances in implementation of new cutting tools, the machining of hard steels with operations such as turning and milling is possible and it can be replaced with some grinding operations. Turning of workpieces with 45 HRC or upper hardness is called hard turning. The aim of this article is the investigation of the effect of workpiece hardness and cutting speed and feed rate parameters on surface roughness in hard turning of cold work tool steel X210Cr12 or SPK in dry condition. To achieve this goal, the workpieces of X210Cr12 steel were hardened with different heat treatment cycles such that their hardness lay in the hard turning range. Then the workpieces were machined with different cutting parameters using CBN tool and the resulted surface roughness were compared. Experimental tests were designed with full factorial method and totally 36 tests have been done. According to obtained results of experimental tests and analysis of variance, the effect of feed rate and workpiece hardness on surface roughness was 90.4% and 8.3%, respectively. The effect of cutting speed on surface roughness is negligible. Increasing the feed rate resulted in the upper surface roughness. Increasing the workpieces hardness to 50 HRC decreased surface roughness and increasing workpieces hardness from 50 to 65 HRC, increased surface roughness.

1- مقدمه

ماشین‌کاری یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین فرآیندهای تولید در صنایع مختلف است. تراش‌کاری فولادهای سخت دارای اهمیت زیادی در تمام بخش‌های تولید به خصوص صنایع نیروگاه و هوافضاست و به عنوان یک فرآیند جدید که می‌تواند عملیات سنگ‌زنی نهایی را حذف کند، جهت کاهش زمان و هزینه تولید و برای داشتن زبری سطح پایین و دقت ابعادی مناسب

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

B. Heydari, M. M. Abootorabi, H. R. Karimi zarchi, The effect of workpiece hardness and cutting parameters on surface roughness in dry hard turning of X210Cr12 cold tool steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 241-247, 2017 (in Persian)

در حال گسترش است [1]. به فرآیند تراش‌کاری قطعه‌کارهایی با سختی بالای 45 راکول‌سی سخت‌تراشی گفته می‌شود. برخی از مزایای سخت‌تراشی چون سلامت سطح، عدم استفاده از سیالات برشی و انعطاف‌پذیری بال سبب شده که این فرآیند جایگزین مناسبی برای سنگ‌زنی شود [2]. استفاده از مایعات خنک‌کاری در ماشین‌کاری بسیار مهم است، اما هزینه‌ها را افزایش می‌دهد و اثرات مخربی بر محیط‌زیست و سلامت انسان می‌گذارد. به این دلایل تمایل به استفاده از ماشین‌کاری خشک افزایش یافته است [3]. انتخاب جنس، هندسه و پوشش ابزار برشی نقش مهمی در بهبود قابلیت ماشین‌کاری و کیفیت سطح ایفا می‌کند. دمای منطقه ماشین‌کاری در ماشین‌کاری خشک فولادهای سخت بسیار بالاست که سبب کاهش عمر ابزار می‌شود. برای حل این مشکل در سخت‌تراشی معمولاً از ابزار سی‌بی‌ان به دلیل مقاومت زیاد در برابر دما و سایش استفاده می‌شود [4]. سختی قطعه‌کار یکی از عوامل مؤثر بر زبری سطح است، اما مطالعات انجام شده در مورد تأثیر آن بر زبری سطح در سخت‌تراشی در حالت خشک نسبتاً کم است. تیل و ملکت [5] در سال 1999 تأثیر پارامترهای هندسه ابزار، سختی قطعه‌کار و نرخ پیشروی را روی زبری سطح و نیروی برشی در سخت‌تراشی فولاد AISI 52100 بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که انتخاب صحیح سختی قطعه‌کار و هندسه ابزار تأثیر زیادی بر نیروی برشی و زبری سطح دارد. لیو و همکاران [6] در سال 2002 تأثیر پارامترهای سختی قطعه‌کار، سرعت برشی، عمق برش و نرخ پیشروی بر زبری سطح و نیروی برشی را در سخت تراشی فولاد بلبرینگ GCr 15 در حالت خشک و با استفاده از ابزار سی‌بی‌ان بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که افزایش سختی قطعه‌کار از 30 تا 50 راکول‌سی سبب افزایش زبری، و افزایش بیشتر سختی موجب کاهش زبری سطح می‌شود. نیروی برشی با افزایش سرعت برشی و سختی قطعه‌کار افزایش می‌یابد. ازل و همکاران [7] در سال 2005 تأثیر پارامترهای برشی، سختی قطعه‌کار و هندسه ابزار بر صافی سطح فولاد ابزار AISI H13 را با استفاده از ابزار سی‌بی‌ان بررسی کردند. سختی قطعه‌کار در این پژوهش 51 و 54 راکول‌سی در نظر گرفته شد. آن‌ها نشان دادند که زبری سطح و نیروی شعاعی با افزایش سختی قطعه‌کار افزایش می‌یابد. زبری سطح با افزایش نرخ پیشروی افزایش پیدا می‌کند. لیما و همکاران [8] در سال 2005 در سخت‌تراشی فولاد AISI 4340 با دو سختی قطعه‌کار 42 و 48 راکول‌سی نشان دادند که نیروی برشی در سختی 48 راکول‌سی و زبری سطح در سختی 42 راکول‌سی بیشتر است. جیتاند و همکاران [9] در سال 2009 تأثیر پارامترهای برشی روی زبری سطح، سایش ابزار و نیروی برشی با استفاده از ابزار سرامیکی معمولی و ابزار دارای براده‌شکن را روی فولاد ابزار سردکار AISI D2 مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که قطعه‌کارهای ماشین‌کاری‌شده با ابزار دارای براده‌شکن نسبت به ابزار معمولی دارای زبری سطح کمتری است. چاوشی و تاجداری [10] در سال 2010 تأثیر سختی قطعه‌کار و سرعت اسپیندل بر زبری سطح در تراش‌کاری فولاد AISI 414 با استفاده از ابزار سی‌بی‌ان را بررسی کردند. در این تحقیق از روش رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی استفاده شد. آن‌ها با استفاده از نتایج تجربی نشان دادند که زبری سطح با افزایش سختی تا 55 راکول‌سی کاهش و پس از آن زبری سطح افزایش پیدا می‌کند، همچنین سرعت اسپیندل اثر چندانی بر زبری سطح ندارد. زبالا و سیویس [11] در سال 2012 تأثیر پارامترهای نرخ پیشروی، سرعت برشی، عمق برش و دو سختی قطعه‌کار 56 و 62 راکول‌سی را بر زبری سطح و نیروی برش در تراش‌کاری فولاد سردکار X165CrV12 با ابزار سی‌بی‌ان بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که قطعه‌کار در سختی 62 راکول‌سی نسبت به سختی 56 راکول‌سی دارای پرداخت سطح مطلوب‌تری است و زبری سطح با افزایش نرخ پیشروی افزایش می‌یابد. راجاسکاران و همکاران [12] در سال 2013 تأثیر پارامترهای برشی روی زبری سطح در تراش‌کاری مواد کامپوزیتی با ابزار برشی سی‌بی‌ان را بررسی کردند. پارامترهای در نظر گرفته شده، سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بود و نشان داده شد که عمق برش روی زبری سطح اثر چندانی ندارد و پارامترهای تأثیرگذار، سرعت برشی و نرخ پیشروی هستند. باتیش و همکاران [13] در سال 2014 پارامترهای سختی قطعه‌کار، سرعت برشی و نرخ پیشروی را در تراش‌کاری فولادهای SAE 8620، EN 31 و EN 9 با ابزار سرامیکی مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه سختی قطعه‌کار در سه سطح 50، 55 و 60 راکول‌سی در نظر گرفته شد. آن‌ها نشان دادند که زبری سطح با افزایش سختی کاهش و نیروی برشی افزایش پیدا می‌کند، همچنین زبری سطح با افزایش سرعت برشی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد و زبری سطح با افزایش نرخ پیشروی افزایش یافت و تأثیر نرخ پیشروی بر زبری سطح با افزایش مقدار نرخ پیشروی کاهش پیدا کرد. یولیانا [14] در سال 2015 عوامل مؤثر بر زبری سطح در ماشین‌کاری سخت فولاد فنر EN 47 را به صورت تجربی بررسی کرد و نشان داد که روند تغییر زبری سطح با افزایش سختی قطعه‌کار از 35 تا 55 راکول‌سی به صورت نزولی است، ولی زبری سطح قطعه بعد از سختی 55 راکول‌سی به صورت چشم‌گیر افزایش پیدا می‌کند. این تحقیق همچنین نشان داد که زبری سطح با افزایش نرخ پیشروی افزایش می‌یابد. امیددودمان و همکاران [15] در سال 2015 تأثیر پارامترهای سختی قطعه‌کار، نرخ پیشروی و سرعت برشی را بر زبری سطح و نیروی برش در سوراخ‌کاری فولاد AISI 4340 با استفاده از سیال برشی پایه گیاهی و ابزار کاربایدی بررسی کردند و نشان دادند سختی قطعه‌کار تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر زبری سطح دارد، به این‌گونه که افزایش آن سبب کاهش زبری سطح می‌شود. زرتی و همکاران [16] در سال 2017 زبری سطح در تراش‌کاری خشک فولاد ابزار سردکار X210Cr12 را با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی مدل و بهینه کردند و دریافتند که نرخ پیشروی و شعاع نوک ابزار بیشترین تأثیر را بر زبری سطح دارد. نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان داد که روش تاگوچی در بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری جهت دست‌یابی به کیفیت سطحی مطلوب بسیار مناسب است. همان گونه که اشاره شد، نخست اطلاعات در خصوص تأثیر ریزساختار و پارامتر سختی قطعه‌کار بر زبری سطح در ماشین‌کاری خشک فولاد ابزار سردکار X210Cr12 وجود ندارد، دوم مرور این تحقیقات نشان می‌دهد که چگونگی تأثیر سختی قطعه‌کار بر زبری سطح مورد توافق همگان نیست؛ بنابراین در این پژوهش اثر ریزساختار و سختی قطعه‌کار و همچنین تأثیر پارامترهای سرعت برشی و نرخ پیشروی بر زبری سطح قطعه‌کار در سخت‌تراشی فولاد ابزار یادشده در حالت خشک به صورت تجربی بررسی و پاسخی به چرایی نحوه اثر سختی قطعه‌کار بر زبری سطح در تراش‌کاری این فولاد پر کاربرد داده شده است. فولاد X210Cr12 دارای قابلیت ماشین‌کاری پایینی است، ولی در سال‌های اخیر برای کم کردن مشکلات ناشی از استفاده سیالات برشی، ماشین‌کاری این فولاد در حالت خشک مورد توجه محققان قرار گرفته و نتایج مثبتی در مورد کاربرد صنعتی و توجیه اقتصادی برش این‌گونه فولادها در حالت خشک گزارش شده است [17,16].

2- تجهیزات و آزمایش‌های تجربی

فولاد SPK یا X210Cr12 ماده مورد استفاده در این تحقیق است که جزء

فولادهای ابزار سردکار به‌حساب می‌آید. ترکیب شیمیایی این فولاد با آزمایش کوانتومتری تعیین‌شده و در جدول 1 آمده است. ماده خام اولیه به صورت میلگرد با قطر 30 میلی‌متر بود که در طول‌های 180 میلی‌متری برش داده شد. برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه تراش مدل TN40 ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز استفاده شده است. سختی اولیه قطعه‌کار خریداری شده حدود 30 راکول‌سی بود. نمونه‌های تهیه‌شده تحت عملیات حرارتی سخت‌کاری برای حصول سختی‌های مختلف قرار گرفتند. ابتدا قطعه‌کارها در داخل کوره الکتریکی ساخت شرکت اکسایتون قرار گرفته و تا دمای 950 درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند. قطعه‌کارها به مدت 1 ساعت در این دما نگه داشته شدند تا کاملاً آستنیته شده و سپس در روغن تا دمای محیط سرد شدند تا ساختار قطعه به مارتنزیت تبدیل و اصطلاحاً کوئنچ گردد. در نهایت قطعه‌ها تحت فرآیندهای عملیات حرارتی بازپخت متفاوتی قرار گرفتند تا به سختی‌های مورد نظر در عملیات سخت‌تراشی برسند. به این منظور از عملیات حرارتی کوئنچ و تمپر با تغییر محیط سردکننده و دمای تمپر استفاده شده است. جدول 2 مراحل عملیات حرارتی و سختی‌های به‌دست‌آمده در شرایط مختلف عملیات سخت‌گردانی را نشان می‌دهد. کاربرد گسترده فولاد X210Cr12 در ساخت تیغه‌های برش، ابزارهای خان‌کشی، غلتک‌های شکل‌دهی و قالب‌های کشش سرد دلیل استفاده از مقادیر بالای سختی قطعه‌کار در این مطالعه است. تمام این کاربردها نیاز به سختی بیشتر از 50 راکول‌سی دارد. این فولاد معمولاً در سختی حدود 30 راکول‌سی ماشین‌کاری و سپس سخت‌کاری می‌شود و برای رسیدن به شکل نهایی نیاز به یک عملیات تکمیلی مانند سنگ‌زنی دارد. با استفاده از فرآیند سخت‌تراشی می‌توان قطعه‌کار را پس از سخت‌کاری مستقیم ماشین‌کاری کرد و به اندازه نهایی همراه با کیفیت مناسب رساند و در نتیجه عملیات تکمیلی مانند سنگ‌زنی را در فرآیند تولید قطعه حذف کرد. سختی قطعه‌کار در عملیات سخت‌تراشی معمولاً بالای 45 راکول‌سی است.

از ابزارگیر مدل PSDNN 2525M12 و ابزار سی‌بی‌ان با کد NU-CNGA 120408 BN7500 ساخت شرکت سامیتومو ژاپن برای انجام فرآیند براده‌برداری استفاده شد. سه فاکتور سرعت برشی، نرخ پیشروی و سختی قطعه‌کار به عنوان متغیرهای ورودی فرآیند سخت‌تراشی در نظر گرفته شدند.

سرعت برشی و نرخ پیشروی در سه سطح، سختی قطعه‌کار در چهار سطح و عمق برش ثابت و برابر 0.2 میلی‌متر انتخاب شد. در جدول 3 مقادیر و سطوح متغیرهای ورودی فرآیند بیان شده است. طراحی آزمایش به صورت کامل بوده و در مجموع 36 آزمایش صورت گرفت. همه آزمایش‌ها در حالت خشک (بدون روان‌کار) انجام شده است. پس از سخت‌کاری قطعه‌کارها، میزان سختی هر قطعه با استفاده از دستگاه سختی‌سنج ساخت شرکت ولپرت آلمان سه بار اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها به عنوان سختی قطعه‌کار در نظر گرفته شد. زبری سطح تأثیر زیادی بر مقاومت به خستگی و کیفیت ظاهری محصول دارد. در این پژوهش زبری سطح براساس معیار R_a یا زبری سطح متوسط گزارش شده است. آزمایش‌های زبری‌سنجی با استفاده از دستگاه زبری‌سنج مدل TR100 ساخت شرکت تایم انجام شده است. مقدار کورس حرکت پراب زبری‌سنج براساس استاندارد ISO 4287 به اندازه 2.5 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. اندازه‌گیری زبری سطح برای هر نمونه در سه موقعیت مختلف و با دو تکرار انجام شد و میانگین اندازه‌های به‌دست‌آمده به عنوان زبری سطح متوسط R_a ثبت شد.

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد X210Cr12 با استفاده از کوانتومتری

Table 1 Chemical composition of X210Cr12 steel by using spectrometer

عنصر	درصد وزنی (%)
آهن	85.63
کرم	11.7
کربن	2.05
منگنز	0.32
سیلیسیوم	0.25
فسفر	0.03
گوگرد	0.02

3- نتایج و بحث

زبری سطح قطعه‌کار تحت تأثیر پارامترهای مختلفی ازجمله نرخ پیشروی، سختی قطعه‌کار، سرعت برشی، هندسه ابزار و استحکام ماشین‌ابزار قرار دارد. پارامترهای ورودی در هر آزمایش و نتایج حاصل از تست زبری‌سنجی نمونه‌های تراش‌کاری‌شده در جدول 4 یاد شده است.

3-1- تأثیر نرخ پیشروی بر زبری سطح

نرخ پیشروی در بین پارامترهای برشی بیشترین تأثیر را بر زبری سطح دارد [18]. داویم و همکاران [19] از لحاظ تئوری بیان کردند که نرخ پیشروی و شعاع نوک ابزار بیشترین تأثیر را بر زبری سطح دارد؛ اگرچه در واقعیت علاوه‌بر دو پارامتر شعاع نوک ابزار و نرخ پیشروی عوامل دیگری نیز بر زبری سطح نهایی قطعه تأثیرگذار است. رابطه زبری سطح با نرخ پیشروی و شعاع نوک ابزار به صورت رابطه (1) است.

$$R_a = \frac{0.0321 f^2}{r_\varepsilon} \quad (1)$$

f نرخ پیشروی برحسب میلی‌متر بر دور و r_ε شعاع نوک ابزار برحسب میلی‌متر است. در شکل 1 تأثیر نرخ پیشروی بر زبری سطح در سرعت برشی 88 متر بر دقیقه در سختی‌های مختلف قطعه‌کار نشان داده شده است. تأثیر متغیرهای ورودی بر زبری سطح در همه آزمایش‌ها به صورت میانگین در شکل 2 نشان داده شده است. زبری سطح با افزایش نرخ پیشروی افزایش می‌یابد. با توجه به ثابت بودن شعاع نوک ابزار در همه تست‌ها، دلیل افزایش زبری سطح در اثر افزایش نرخ پیشروی، افزایش گام برآمدگی‌های ناشی از

جدول 2 شرایط عملیات حرارتی تمپر نمونه‌ها و سختی‌های به‌دست‌آمده

Table 2 the tempering conditions workpices and the resulted hardnesses

شماره نمونه	محیط سردکننده	زمان نگهداری (min)	دمای عملیات حرارتی (°C)	سختی (HRC)
1	کوره	45	600	40
2	اتاق	30	600	45
3	اتاق	45	400	50
4	روغن	60	950	65

جدول 3 سطوح پارامترهای برشی ورودی

Table 3 Levels of input cutting parameters

سطح	سرعت برشی V_C (m/min)	نرخ پیشروی f (mm/rev)	سختی (HRC)
1	88	0.05	40
2	123	0.14	45
3	176	0.22	50
4	-	-	65

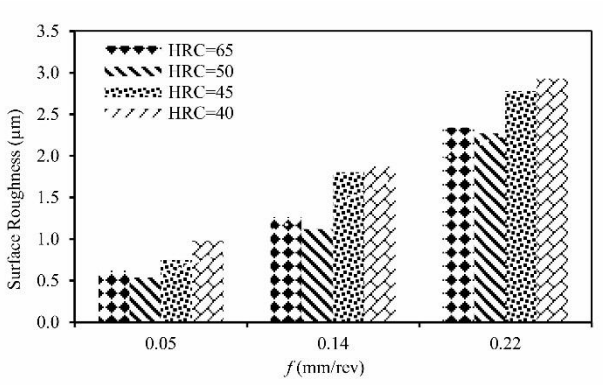

Fig. 1 Effect of feed rate on average surface roughness in various workpiece hardness with cutting speed of 88 m/min

شکل 1 تأثیر نرخ پیشروی بر میانگین زبری سطح در سختی‌های قطعه‌کار مختلف و سرعت برشی 88 متر بر دقیقه

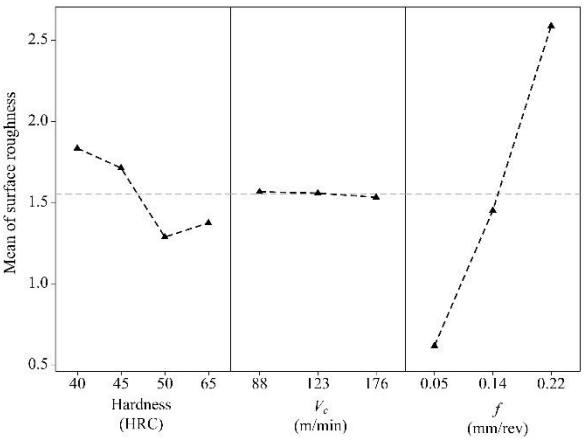

Fig. 2 Main effects plot for means on surface roughness

شکل 2 اثرات اصلی پارامتـرهای ماشـین‌کاری بر زبری سطح

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 بدترشدن شرایط برش نسبت داد.

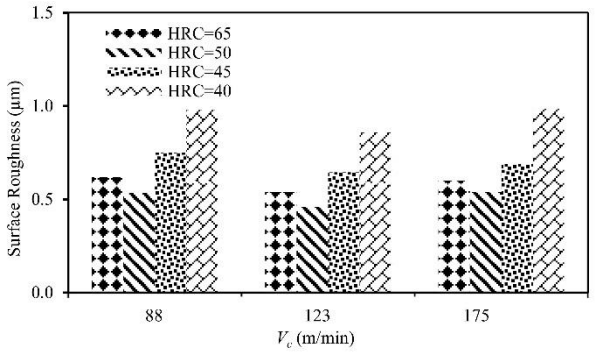

Fig. 3 Effect of cutting speed on surface roughness in feed rate of 0.05 mm/rev and various workpiece hardness

شکل 3 تأثیر سرعت برشی بر زبری سطح در نرخ پیشروی 0.05 میلی‌متر بر دور و سختی‌های قطعه‌کار مختلف

3-2- تأثیر سرعت برشی بر زبری سطح

سرعت برشی تأثیر زیادی بر میزان ارتعاش ایجاد شده، زمان ماشین‌کاری، انرژی مخصوص تراش، عمر ابزار، دما و هزینه تمام شده قطعه دارد و تعیین مقدار بهینه آن دارای اهمیت بسیاری است. نحوه تأثیر سرعت برشی بر زبری سطح کاملاً مشخص نشده است. در برخی از گزارش‌ها زبری سطح با افزایش سرعت برشی افزایش و یا کاهش یافته و در برخی موارد با افزایش سرعت برشی تأثیر زیادی بر زبری سطح مشاهده نشده است [21,20]. شکل 3 چگونگی اثر سرعت برشی بر زبری سطح در نرخ پیشروی 0.05 میلی‌متر بر دور و در سختی‌های مختلف قطعه‌کار را در این تحقیق نشان می‌دهد. با توجه به شکل 3 افزایش سرعت برشی تأثیر اندکی بر زبری سطح دارد. مرور تحقیقات منتشر شده پیشین در مورد تأثیر سرعت برشی بر زبری سطح نشان می‌دهد که چگونگی تأثیر سرعت برشی بر زبری سطح به مقدار زیادی به مقادیر انتخاب شده برای سرعت برشی بستگی دارد. تغییر سرعت برشی بسته به مقدار عددی آن سبب تغییر دمای ناحیه برش، میزان تغییر شکل پلاستیک و اصطکاک و همچنین تشکیل یا عدم تشکیل لبه انباشته می‌شود که هر یک از این پارامترها سبب تغییر در زبری سطح قطعه‌کار می‌شوند. رفتار مشاهده شده در شکل 3 ممکن است با تغییر مقادیر عددی سرعت‌های برشی آزمایش شده تغییر کند.

جدول 4 طراحی آزمایش‌ها همراه با مقادیر زبری سطح اندازه‌گیری‌شده

Table 4 Design of experiments and the measured surface roughness values

شماره آزمایش	V_c	f	سختی	R_a (μm)	شماره آزمایش	V_c	f	سختی	R_a (μm)
1	1	1	1	0.98	19	2	2	3	1.15
2	1	1	2	0.75	20	2	2	4	1.20
3	1	1	3	0.54	21	2	3	1	2.88
4	1	1	4	0.62	22	2	3	2	2.80
5	1	2	1	1.87	23	2	3	3	2.23
6	1	2	2	1.81	24	2	3	4	2.59
7	1	2	3	1.12	25	3	1	1	0.99
8	1	2	4	1.26	26	3	1	2	0.69
9	1	3	1	2.93	27	3	1	3	0.54
10	1	3	2	2.78	28	3	1	4	0.60
11	1	3	3	2.27	29	3	2	1	1.70
12	1	3	4	2.34	30	3	2	2	1.64
13	2	1	1	0.86	31	3	2	3	1.09
14	2	1	2	0.65	32	3	2	4	1.12
15	2	1	3	0.46	33	3	3	1	2.83
16	2	1	4	0.54	34	3	3	2	2.63
17	2	2	1	1.84	35	3	3	3	2.20
18	2	2	2	1.67	36	3	3	4	2.55

3-3- تأثیر سختی قطعه‌کار بر زبری سطح

سختی قطعه‌کار یکی از پارامترهای مهم و مؤثر بر کیفیت سطح، نیرو، عمر ابزار و توان مصرفی فرآیند ماشین‌کاری است. شکل 4 تأثیر سختی قطعه‌کار بر زبری سطح در نرخ پیشروی 0.05 میلی‌متر بر دور و سرعت‌های برشی مختلف را نشان می‌دهد. به طور کلی در شکل 4 زبری سطح با افزایش سختی قطعه‌کار تا 50 راکول‌سی کاهش یافته، همچنین زبری سطح در سختی‌های مختلف با افزایش سرعت برشی ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است. دلیل کاهش زبری در سرعت 123 متر بر دقیقه آن است که درجه حرارت با افزایش سختی و سرعت برشی به صورت جزئی بالا رفته و موجب نرم‌تر شدن قطعه‌کار و کاهش استحکام آن می‌شود، ولی اثر چندانی بر ابزار ندارد؛ بنابراین برداشت براده از سطح قطعه‌کار آسان‌تر شده و نیروی برشی کاهش می‌یابد، و درنهایت کاهش زبری سطح قطعه‌کار را سبب می‌شود [23,22]. درجه حرارت در محل تماس ابزار و قطعه‌کار با افزایش بیشتر سرعت برشی افزایش پیدا کرده و سبب چسبیدن براده به سطح ابزار، افزایش دما و سائیده شدن ابزار می‌شود. درجه حرارت بالا سبب می‌شود براده به حالت خمیری شکل درآمده و موقع جدا شدن به سطح ابزار و قطعه‌کار بچسبد و زبری سطح قطعه‌کار را افزایش دهد.

چاوشی و تاجداری [10] در سال 2010 تأثیر سختی قطعه‌کار و سرعت اسپیندل بر زبری سطح در تراش‌کاری فولاد AISI 414 با استفاده از ابزار سی‌بی‌ان بررسی کردند. سختی‌های در نظر گرفته شده در این تحقیق 35، 45، 50، 55، 60 و 65 راکول‌سی بود. آن‌ها با استفاده از نتایج تجربی نشان دادند که زبری سطح با افزایش سختی تا 55 راکول‌سی کاهش و پس از آن افزایش پیدا می‌کند. براساس شکل 2 زبری سطح با افزایش سختی از 40 تا 50 راکول‌سی کاهش و با افزایش سختی تا 65 راکول‌سی افزایش یافته که در تطابق با تحقیق چاوشی و تاجداری است. طبق نتایج به‌دست‌آمده توسط لیو و همکاران [6] در سال 2002 زبری سطح روی فولاد یاتاقانی GCr15 با سختی‌های 30، 40، 50، 60 و 64 راکول‌سی، با افزایش سختی قطعه‌کار از 30 تا 50 راکول‌سی افزایش می‌یابد و افزایش سختی قطعه‌کار به بالاتر از 50 راکول‌سی موجب کاهش زبری سطح می‌گردد که در تقابل با نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق است. در تحقیق دیگری که توسط باتیش و همکاران [13] در سال 2014 انجام شد، پارامترهای سختی قطعه‌کار، سرعت برشی و نرخ پیشروی را در تراش‌کاری فولادهای SAE 8620، EN 31 و EN 9 با ابزار سرامیکی در سه سختی 50، 55 و 60 راکول‌سی بررسی کردند و نشان دادند زبری سطح با افزایش سختی کاهش می‌یابد. در این تحقیق زبری با افزایش سختی از 40 تا 50 راکول‌سی کاهش یافته است. مهم‌ترین عامل در متفاوت بودن تأثیر سختی بر زبری سطح در تحقیقات مختلف این است که تغییر شکل پلاستیک، ترکیب شیمیایی، مکانیزم تشکیل براده و ایجاد لبه انباشته در سطح براده ابزار در مواد مختلف یکسان نیست. هر جا که لبه انباشته به وجود می‌آید زبری سطح افزایش و هر موقع که لبه انباشته از بین می‌رود، زبری سطح کاهش می‌یابد. تشکیل لبه انباشته در ماشین‌کاری فولاد به ریزساختار قطعه‌کار حتی با وجود سختی مشابه بستگی دارد [24]. طبق شکل 2 کمترین زبری سطح در سختی 50 راکول‌سی به‌دست آمده است.

4-3- تأثیر ریزساختار قطعه‌کار بر زبری سطح

زبری سطح علاوه‌بر پارامترهای ماشین‌کاری از پارامترهای مختلفی مانند ریزساختار، خصوصیت آخال‌ها، سختی اولیه نمونه‌ها و اندازه دانه‌ها تأثیر می‌پذیرد. هرچه میزان سختی اولیه قطعه‌کار بیشتر و اندازه دانه‌ها کوچک تر

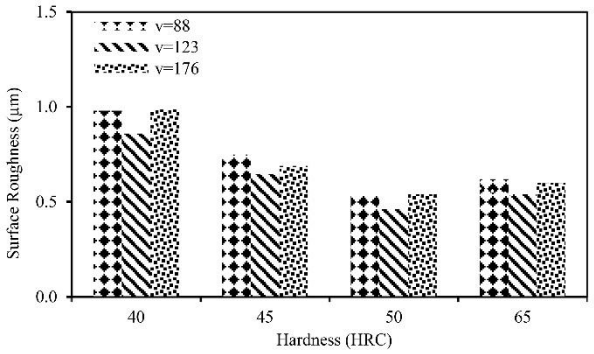

Fig 4 Effect of workpice hardness on surface roughness in feed rate of 0.05 mm/rev and various cutting speeds

شکل 4 تأثیر سختی قطعه‌کار بر زبری سطح در نرخ پیشروی 0.05 میلی‌متر بر دور و سرعت‌های برشی مختلف

باشد، زبری سطح کاهش می‌یابد [25]. برای بررسی میکروسکوپی و مطالعه ریزساختار فولاد ابزار X210Cr12، از قطعه‌کارها نمونه‌برداری شد تا تأثیر ریزساختار بر زبری سطح در سختی‌های مختلف مورد مطالعه قرار گیرد، سپس مراحل آماده‌سازی سطح نمونه شامل سنگ‌زنی، سنباده‌زنی، پولیش کردن و اچ در محلول نایتال 5% روی نمونه‌ها صورت گرفت و ریزساختار آن‌ها از طریق میکروسکوپ نوری بررسی شد. شکل 5 ریز ساختار نمونه‌های اچ شده در سختی‌های مختلف را نشان می‌دهد. در ریزساختارهای نشان داده شده در شکل 5 تکه‌های ذرات کاربید کروم به رنگ سفید حضور دارد. زمینه این میکروساختارها با توجه به شرایط تمپر شامل مارتنزینت- آستنیت (شکل 5-ج) و یا مارتنزیت- مارتنزیت تمپر شده و فریت حاصل از تجزیه آستنیت باقی‌مانده (شکل‌های 5– الف و ب) است. نتایج حاصل از تحقیقات پیشین در خصوص فولاد AS45G2 نشان می‌دهد که نرمی و توانایی فریت برای چسبیدن به لبه ابزار برش سبب کاهش قابلیت ماشین‌کاری می‌شود. مقدار زیاد فریت در فولاد سبب تشکیل لبه انباشته شده و که زبری سطح افزایش پیدا کند. ساختار پرلیتی به واسطه ترکیبی از صفحات کاربیدی ترد در کنار لایه‌های نرم فریت موجب افزایش قابلیت ماشین‌کاری می‌شود. ساختار پرلیتی باعث زبری سطح کمتر و براده‌برداری آسان‌تر می‌شود. افزایش مقدار کربن در ساختار پرلیتی عمر ابزار و قابلیت ماشین‌کاری فولاد را کاهش می‌دهد [26]. برای پی‌بردن به چرایی افزایش زبری سطح با کاهش سختی و توضیح دلیل آن از طریق تغییرات میکروساختاری، این گونه می‌توان بیان کرد که در این تحقیق میکروساختار آن شامل ذرات کاربید کروم حاوی مارتنزیت، مارتنزیت تمپر شده و آستنیت باقی‌مانده (بسته به شرایط عملیات حرارتی) است. به نظر می‌رسد با توجه به این‌که نرمی فاز مارتنزیت تمپر شده نسبت به مارتنزیت و همچنین ذرات کاربید به مراتب بالاتر است، اثری که مارتنزیت تمپر شده و فریت به وجود آمده از آستنیت باقی‌مانده پس از تمپر در فولاد X210Cr12 انجام می‌دهند همان اثری است که مقدار فریت در ماشین‌کاری فولاد خوش‌تراش AS45G2 انجام می‌دهد. به عبارت دقیق‌تر هرچه مارتنزیت تمپر شده و فریت به وجود آمده از تجزیه آستنیت باقی‌مانده از فولاد X210Cr12 افزایش یابد، نخست سختی قطعه‌کار کاهش یافته و دوم زبری سطح پس از عملیات ماشین‌کاری افزایش می‌یابد. دلیل این‌که زبری سطح در سختی 40 و 45 راکول‌سی نسبت به سختی 50 راکول‌سی بیشتر است. این موضوع کاملاً در تطابق با میکروساختار نشان داده شده در شکل 5 است. مقدار بیشتر مارتنزیت تمپر شده در میکروساختارهای شکل‌های 5 -الف و ب در مقایسه با میکروساختار 5- ج کاملاً مشهود است.

5-3- آنالیز واریانس

جهت تعیین میزان تأثیر پارامترهای ورودی بر زبری سطح از روش آنالیز واریانس در نرم‌افزار مینی‌تب 17 استفاده شد. این یک روش آماری استاندارد است که درصد اثر هر یک از متغیرهای ورودی بر خروجی را مشخص می‌کند. این تحلیل براساس سطح اطمینان 95% (عدم قطعیت 5%) انجام شده است. نتایج حاصل از آنالیز واریانس برای زبری سطح در جدول 5 ارائه شده است. در این جدول ستون DF تعداد درجه آزادی هر پارامتر در مدل، ستون Seq SS تغییرپذیری کل مدل، ستون توزیع درصد تأثیر هر پارامتر بر مدل، ستون Adj SS مجموع مربعات تغییرات و ستون Adj MS مجموع مربعات مینیمم تغییرات را نشان می‌دهد، ستون F برابر با Adj MS تقسیم بر مقدار خطای Adj MS است و ستون P توسط نرم‌افزار و با توجه به مقدار F تعیین می‌شود. با توجه به سطح اطمینان 95%، مقدار P کمتر از 0.05 برای هر یک از پارامترها نشان‌دهنده تأثیر پارامتر بر خروجی است. نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز واریانس نشان می‌دهد که نرخ پیشروی 90.4% و سختی قطعه‌کار 8.3% بر زبری سطح تأثیر داشته است. میزان تأثیر خطای آنالیز واریانس 1.3% است که قابلیت اعتماد آنالیز واریانس انجام شده را نشان می‌دهد. براساس جدول 5 سرعت برشی اثر ناچیزی بر زبری سطح داشته است.

4- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش بررسی اثرات سختی قطعه‌کار و پارامترهای سرعت برشی و نرخ پیشروی بر زبری سطح در فرآیند سخت‌تراشی خشک آلیاژ X210Cr12 بود. پارامترهای سرعت برشی و نرخ پیشروی هر کدام در سه سطح، سختی قطعه‌کار در چهار سطح و عمق برش نیز ثابت انتخاب شد. جهت طراحی و تحلیل نتایج آزمایش‌ها از روش طراحی آزمایش کامل استفاده و در مجموع 36 آزمایش انجام شد. نتایج تجربی نشان داد که زبری سطح با افزایش سختی قطعه‌کار از 40 تا 50 راکول‌سی کاهش می‌یابد، ولی افزایش بیشتر سختی قطعه‌کار تا 65 راکول‌سی سبب افزایش زبری سطح می‌شود. افزایش نرخ پیشروی سبب افزایش زبری سطح شده و در مورد نحوه اثر سرعت برشی بر زبری سطح می‌توان گفت اثر آن بسیار ناچیز و قابل اغماض است، همچنین از آنالیز واریانس برای بررسی میزان تأثیر پارامترهای ورودی بر زبری سطح استفاده شد. نتایج نشان داد که نرخ پیشروی 90.4%، سختی قطعه‌کار 8.3% و سرعت برشی به مقدار ناچیزی بر زبری سطح اثر داشته است. افزایش مارتنزیت تمپر شده و فریت به وجود آمده از تجزیه آستنیت باقی‌مانده در فولادها موجب می‌شود سختی قطعه‌کار کاهش یابد که این امر سبب به وجود آمدن لبه انباشته می‌شود و در نتیجه زبری سطح پس از عملیات ماشین‌کاری افزایش پیدا می‌کند. در مجموع با توجه به پژوهش‌های انجام شده بر مواد مختلف می‌توان انتظار داشت که تأثیر سختی قطعه‌کار بر زبری سطح در پارامترهای برشی متفاوت و برای مواد مختلف، به دلیل تفاوت در ریز ساختار، سختی اولیه نمونه‌ها و اندازه دانه‌ها متفاوت باشد.

جدول 5 آنالیز واریانس برای زبری سطح

Table 5 Analysis of variance for surface roughness

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F	P
Feed rate	2	22.77	90.4%	22.77	11.7347	1015.07	0
Hardness	3	2.083	8.27%	1.8597	0.694	61.91	0
Cutting speed	2	0.020	0.08%	0.0076	0.010	0.92	0.411
Error	28	0.314	1.25%	0.4109	0.0112		
Total	35	25.19	100.00%				

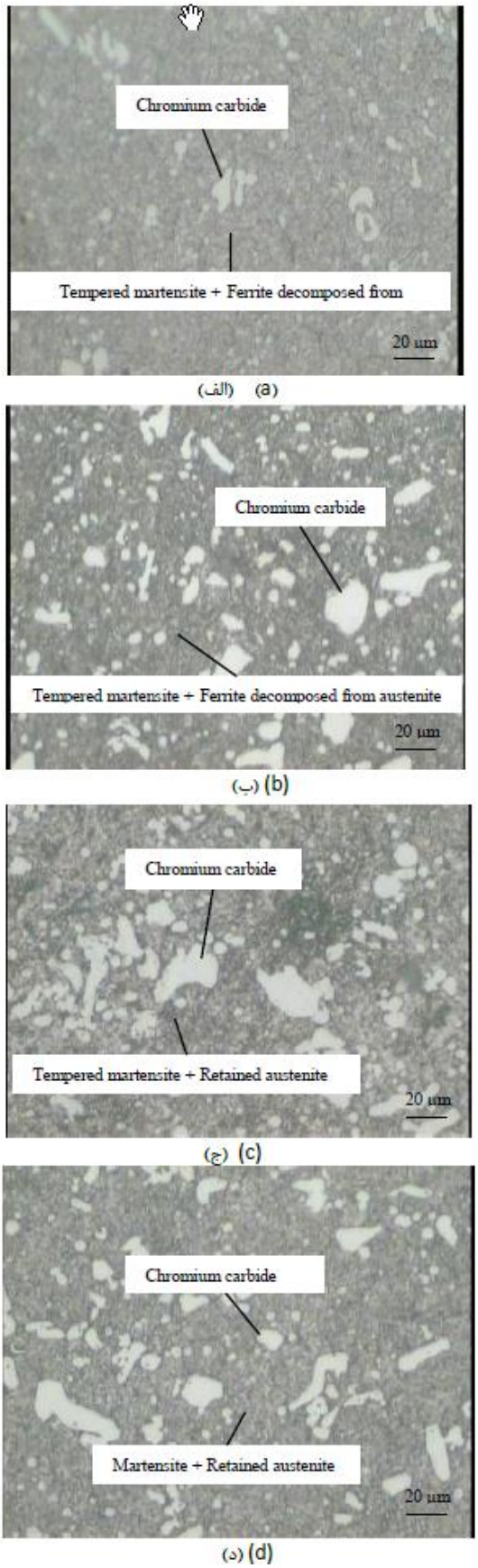

Fig 5 microstructure of the steel X210Cr12 in hardness a- 40 HRC, b- 45 HRC, c- 50 HRC, d- 65 HRC

شکل 5 ریز ساختار فولاد X210Cr12 در سختی الف- 40 HRC، ب-45 HRC ، ج- 50 HRC، د- 65 HRC

زبری سطح با افزایش سختی قطعه‌کار تا یک حد خاص کاهش می‌یابد و پس از آن حد بحرانی افزایش بیشتر سختی قطعه‌کار سبب افزایش زبری سطح می‌شود.

5- مراجع

[1] S. Thamizhmanii, S. Hasan, Machinability of hard martensitic stainless steel and hard alloy steel by CBN and PCBN tools by turning process, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 554–559, 2011.

[2] S. B. Hosseini, K. Ryttberg, J. Kaminski, U. Klement, Characterization of the surface integrity induced by hard turning of bainitic and martensitic AISI 52100 steel, *CIRP Conference on High Performance Cutting*, Vol. 1, No. 1, pp. 494–499, 2012.

[3] A. Devillez, F. Schneider, S. Dominiak, D. Dudzinski, D. Larrouquere, Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools, *Wear*, Vol. 262, No. 7–8, pp. 931–942, 2007.

[4] Y. Sahin, Comparison of tool life between ceramic and cubic boron nitride (CBN) cutting tools when machining hardened steels, *Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 7, pp. 3478–3489, 2009.

[5] J. D. Thiele, S. N. Melkote, Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel, *Materials Processing Technology*, Vol. 94, No. 2, pp. 216–226, 1999.

[6] X. L. Liu, D. H. Wen, Z. J. Li, L. Xiao, F. G. Yan, Experimental study on hard turning hardened GCr15 steel with PCBN tool, *Materials Processing Technology*, Vol. 129, No. 1–3, pp. 217–221, 2002.

[7] T. Özel, T. K. Hsu, E. Zeren, 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, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 25, No. 3–4, pp. 262–269, 2005.

[8] J. G. Lima, R. F. Ávila, A. M. Abrão, M. Faustino, J. P. Davim, Hard turning: AISI 4340 high strength low alloy steel and AISI D2 cold work tool steel, *Materials Processing Technology*, Vol. 169, No. 3, pp. 388–395, 2005.

[9] V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, L. Figueira, J. Paulo Davim, Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts, *Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 27, No. 4, pp. 754–763, 2009.

[10] S. Z. Chavoshi, M. Tajdari, Surface roughness modelling in hard turning operation of AISI 4140 using CBN cutting tool, *Material Forming*, Vol. 3, No. 4, pp. 233–239, 2010.

[11] W. Zębala, J. Siwiec, Hard turning of cold work tool steel with CBN tools, *Advances in Manufacturing Science and Technology*, Vol. 36, No. 4, pp. 19–32, 2012.

[12] T. Rajasekaran, K. Palanikumar, S. Arunachalam, Investigation on the turning parameters for surface roughness using taguchi analysis, *Procedia Engineering*, Vol. 51, pp. 781–790, 2013.

[13] A. Batish, A. Bhattacharya, M. Kaur, M. S. Cheema, Hard turning: Parametric optimization using genetic algorithm for rough/finish machining and study of surface morphology, *Materials Processing Technology*, Vol. 28, No. 5, pp. 1629–1640, 2014.

[14] B. C. Iuliana, Factors influencing surface integrity in hard machining of steels a review.doc, *Scientific & Engineering Research*, Vol. 6, No. 5, pp. 38–43, 2015.

[15] A. R. Omiddodman, H. Hassanpour, M. H. Sadeghi, A. Rasti, M. H. Saadatbakhsh, Evaluation of workpiece hardness and cutting parameters effects on cutting force and surface roughness in drilling using vegetable-based cutting fluid, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 265–271, 2015. (in Persian فارسی)

[16] O. Zerti, M. A. Yallese, S. Belhadi, L. Bouzid, Taguchi design of experiments for optimization and modeling of surface roughness when dry turning x210cr12 steel, *Applied Mechanics Behavior of Materials and Engineering Systems*, pp. 275–288, 2017.

[17] S. K. Shihab, Z. A. Khan, A. Mohammad, A. N. Siddiquee, A review of turning of hard steels used in bearing and automotive applications, *Production & Manufacturing Research*, Vol. 2, No. 1, pp. 24–49, 2014.

[18] M. Nalbant, H. Gökkaya, G. Sur, Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning, *Materials & Design*, Vol. 28, No. 4, pp. 1379–1385, 2007.

[19] J. P. Davim, V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models, *Materials Processing Technology*, Vol. 205, No. 1–3, pp. 16–23, 2008.

[20] B. A. Khidhir, B. Mohamed, Study of cutting speed on surface roughness and chip formation when machining nickel-based alloy, *Materials Processing Technology*, Vol. 24, No. 5, pp. 1053–1059, 2010.

[21] A. Bordin, S. Bruschi, A. Ghiotti, The effect of cutting speed and feed rate on the surface integrity in dry turning of CoCrMo alloy, *2nd CIRP Conference on Surface Integrity*, Vol. 13, pp. 219–224, 2014.

[22] B. Davoodi, S. H. Musavi, An experimental investigation of the effect of lubrication method on surface roughness and cutting fluid consumption in machining of super alloys, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 343–352, 2016. (in Persian فارسی)

[23] J. Hua, R. Shivpuria, X. Chenga, V. Bedekara, Y. Matsumotob, F. Hashimotob, T. R. Watkinsca, Effect of feed rate, orkpiece hardness and cutting edge on subsurface residual stress in the hard turning of bearing steel using chamfer+ hone cutting edge geometry, *Materials Science and Engineering*, Vol. 394, No. 1, pp. 238–248, 2005.

[24] T. Akasawa, I. Fukuda, K. Nakamura, T. Tanaka, Effect of microstructure and hardness on the machinability of medium-carbon chrome-molybdenum steel, *Materials Processing Technology*, Vol. 153–154, No. 1–3, pp. 48–53, 2004.

[25] H. Fazli, A. A. Akbari, Investigation the effect of microstructure and grain size of AISI 1045 steel on surface roughness in grinding process, *Sharif Mechanical Engineering*, Vol. 29, No. 1, pp. 31–40, 2012. (in Persian فارسی)

[26] Y. M. Brunzel, M. Fomin, Effect of the pearlite structure of structural steel on its machinability, *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 39, No. 2, pp. 39–41, 1997.