



بررسی تجربی اثر پارامترهای فرآیند تراشکاری داغ بر سایش ابزار و زبری سطح فولاد AISI630

سید محمد ابراهیمی¹، محمدجعفر حداد^{2*}، علیرضا آرائی³، سید حمید ابراهیمی⁴

1- دانش‌آموخته دکتری، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

4- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

* تهران، صندوق پستی 11155/4563، mjhadad@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 29 آبان 1399

داوری اولیه: 17 دی 1399

پذیرش: 27 فروردین 1400

کلیدواژگان:

فولاد AISI630

تراشکاری داغ

سایش ابزار

زبری سطح

چکیده

فولاد AISI630 یک فولاد زنگ نزن است که با مکانیزم پیر سختی، استحکام آن افزایش می‌یابد. این فولاد دارای سختی بالا و ضریب هدایت حرارتی پایین است و به این دلیل در دسته مواد سخت-برش قرار می‌گیرد. این دو عامل سبب شده که سایش ابزار در فرآیند ماشین‌کاری این فولاد زیاد باشد و کیفیت سطح قطعه کار پس از ماشین‌کاری نامطلوب باشد. در این تحقیق فرآیند تراشکاری داغ این فولاد مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر سایش ابزار، فرآیند تراشکاری داغ تا دمای پیش‌گرم 400 °C بر روی این فولاد انجام شد. تراشکاری در سه نرخ پیشروی و سه سطح از سرعت برشی و با استفاده از ابزار کاربیدی با دو لایه پوشش بر روی این فولاد انجام شد. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مقدار سایش سطح آزاد ابزار در شرایط مختلف تراشکاری و در دماهای پیش‌گرم مختلف اندازه‌گیری شد و مکانیزم سایش ابزار بررسی شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که کمترین سایش در سطح آزاد ابزار با انجام تراشکاری داغ در دمای 300 °C حاصل شده است. بطوریکه تراشکاری داغ در این دما سبب کاهش 33 درصدی در سایش سطح آزاد ابزار شد. مشاهده سطح ساییده شده ابزارها نشان داد که مکانیزم سایش ابزار در تراشکاری داغ و تراشکاری معمولی این فولاد از نوع سایش خراشان و سایش چسبنده است. نتایج زبری سطحی از سطح قطعه کار نیز نشان داد که در هر سرعت برشی و پیشروی، با افزایش دمای اولیه قطعه کار تا 400 °C، زبری سطح کاهش می‌یابد. با استفاده از نرم افزار Minitab مقدار بهینه دما، سرعت برشی و پیشروی با هدف کم کردن سایش ابزار و زبری سطح به دست آمد.

Experimental investigation of the effects of hot turning parameters on the cutting tool wear and surface roughness of AISI630 hardened stainless steel

Seyed Mohammad Ebrahimi¹, Mohammadjafar Hadad^{1*}, Alireza Araee¹, Seyed Hamid Ebrahimi²

1- School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

* P.O.B. 11155/4563, Tehran, Iran, mjhadad@ut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 20 November 2020
First Decision: 7 January 2021
Accepted: 16 April 2021

Keywords:
AISI630 Steel
Hot turning
Tool wear
Surface roughness

Abstract

AISI630 is a stainless steel that is strengthened by precipitation-hardening mechanism. This steel has high hardness and low thermal conductivity, has made it one of the difficult-to-cut materials. These two factors have its machining is associated with high tool wear and poor workpiece surface quality. In this study, the conventional and hot turning of AISI630 hardened stainless steel have been investigated. To determine the effect of machining parameters on tool wear, a hot turning process up to a preheating temperature of 400°C was performed. Turning was conducted at three feed rates and three levels of cutting speed using PVD-(Ti,Al)N/(Al,Cr)2O3 coated carbide tools. Tool flank wear and wear mechanisms have been studied in different cutting conditions as well as different preheating temperatures using SEM microscope. Experimental results showed that the lowest wear on the free surface of the tool was obtained by hot turning at 300 °C. Hot turning at this temperature reduced the flank wear by 33%. Observation of the worn surface of the tools showed that the tool wear mechanism in hot turning and conventional turning is of the type of abrasive wear and adhesive wear. Moreover, at each cutting speed and feed, with increasing the workpiece initial temperature up to 400°C, the surface roughness decreases. The optimal values of temperature, cutting speed and feed rate were obtained using Minitab software with the aim of reducing tool wear and surface roughness.

1- مقدمه

می‌باشد [1]. مکانیزم اصلی سخت شونده‌گی در این فولاد، پیرسختی یا رسوب سختی می‌باشد. دمای پیرسختی این فولاد از 482 تا 621 درجه سانتی‌گراد است و بیشترین سختی این

فولاد AISI630 یک فولاد زنگ نزن با زمینه مارتنزیتی است و عمده کاربرد آن در صنایع نظامی، پتروشیمی، هسته‌ای و هوافضا

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. M. Ebrahimi, M.J. Hadad, A.R. Araee, S. H. Ebrahimi, Experimental investigation of the effects of hot turning parameters on the cutting tool wear and surface roughness of AISI630 hardened stainless steel, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 52- 64, 2021 (in Persian)

فولاد AISI630 کاربرد گسترده‌ای در صنایع نظامی، نیروگاهی و پتروشیمی دارد [8] و حجم بالایی از قطعاتی که از این فولاد در این صنایع مصرف می‌شود، با روش ماشین‌کاری تولید می‌شود. بنابراین بررسی سایش ابزار و قابلیت ماشین‌کاری این فولاد توسط محققین مورد توجه قرار گرفته است. موهانتی و همکارانش [9] تأثیر پارامترهای تراشکاری را در دمای محیط بر سایش ابزار و زبری سطح قطعه‌ای از جنس فولاد AISI630 با سختی 35HRC مورد بررسی قرار دادند و محدوده‌ای از سرعت برشی را برای ابزار کاربایدی پیشنهاد کردند. سیویا و چاکرادار [10] نیز سایش سطح آزاد ابزار و زبری سطح این فولاد را در فرآیند تراشکاری معمولی مورد بررسی قرار دادند. آنها برای کاهش سایش ابزار روش‌های خنک‌کاری برودتی با نیتروژن مایع و روش روانکاری کمینه را به کار گرفتند و نشان دادند که خنک‌کاری ابزار در حین فرآیند تراشکاری می‌تواند منجر به کاهش سایش ابزار شود. لای و همکارانش [11] تأثیر تراشکاری خشک، تراشکاری با خنک‌کاری نیتروژن مایع و تراشکاری با خنک‌کاری هوای فشرده را بر سایش ابزار، نیروی تراش و زبری سطح فولاد AISI630 بررسی کردند. «خانی» و همکاران [12] نیز فرآیند تراشکاری داغ این فولاد با سختی 43HRC را با استفاده از پلاسما و خنک‌کاری تبریدی همزمان ابزار انجام دادند و تأثیر دمای پیش‌گرم را بر سایش ابزار مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها حاکی از این بود که تلفیق تراشکاری داغ و خنک‌کاری برودتی - که اصطلاحاً ماشین‌کاری ترکیبی نامیده می‌شود - می‌تواند سبب کاهش سایش ابزار و افزایش صافی سطح قطعه شود. برمینگهام و همکاران [13] نیز فرآیند فرزکاری داغ را بر روی این فولاد به کمک لیزر انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که با پیش‌گرم کردن قطعه کار در دمای 300 درجه سانتی‌گراد در فرزکاری داغ، نیروی ابزار 33 درصد کاهش یافت و به تبع آن سایش ابزار نیز 50 درصد کمتر از فرزکاری معمولی شد.

در این تحقیق تراشکاری معمولی و تراشکاری داغ در حالت خشک در دماهای پیش‌گرم 200، 300 و 400 درجه سانتی‌گراد بر روی فولاد سخت شده AISI630 انجام شد و مقدار سایش سطح آزاد ابزار و زبری سطح قطعه کار اندازه‌گیری شده است. با استفاده از آنالیز واریانس تأثیر پارامترهای تراشکاری بر روی سایش سطح آزاد ابزار و زبری سطح قطعه کار به دست آمده و مقادیر دما، سرعت و پیشروی جهت کمینه کردن سایش ابزار و زبری سطح قطعه، استخراج شده است.

2- مشخصات تجهیزات و روش انجام آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها در تحقیق حاضر، فولاد AISI630

فولاد 48 راکول C است که با رسوب سختی به مدت یک ساعت در دمای 482 درجه سانتی‌گراد حاصل می‌شود. این سختی بالا به همراه رسوبهای ریز مس و ذرات سخت کارباید نظیر کارباید نایوبیوم [1، 2] که در زمینه مارتزیتی پراکنده شده‌اند، سبب سایش شدید ابزار و کیفیت نامطلوب سطح قطعه پس از ماشین‌کاری میشوند. به علاوه ضریب هدایت حرارتی پایین این فولاد سبب شده که این فلز در زمره مواد سخت‌برش (difficult-to-cut) قرار گیرد و ماشین‌کاری آن با سایش زیاد ابزار و کیفیت سطح پایین قطعه کار همراه باشد. محققین بسیاری از روش ماشین‌کاری داغ برای ماشین‌کاری مواد و فلزات سخت‌برش استفاده کرده‌اند. چانگ و کو [3، 4] تراشکاری داغ به کمک لیزر را بر روی قطعه‌ای از جنس سرامیک Al_2O_3 انجام دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که تراشکاری داغ زبری سطح و نیروی تراش را به ترتیب به میزان 70 درصد و 20 درصد کاهش داده است. سوپرالیاژها نیز دسته‌ای از مواد سخت‌برش هستند که ماشین‌کاری آنها با سایش شدید ابزار همراه است. اژدوری و همکاران [5] مقدار انرژی ویژه تراش، زبری سطح و سایش ابزار را در فرآیند تراشکاری داغ اینکونل 718 با لیزر اندازه‌گیری کردند. نشان داده شد که انرژی ویژه تراش، سایش ابزار و زبری سطح در مقایسه با تراشکاری معمولی به ترتیب 35%، 22% و 53% کاهش یافت. یکی دیگر از مواد سخت‌برش کامپوزیت‌های پایه فلزی هستند که استحکام و سختی بالایی دارند، اما ماشین‌کاری آنها موجب سایش شدید ابزار و کیفیت سطح نامطلوب می‌شود. «وانگ» و همکاران [6] فرآیند ماشین‌کاری داغ به کمک لیزر را بر روی یک کامپوزیت پایه فلزی آلومینیوم با ذرات ریز Al_2O_3 انجام دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با افزایش دمای پیش‌گرم، نیروی برش و زبری سطح کاهش می‌یابد و عمر ابزار افزایش می‌یابد.

اگرچه انجام ماشین‌کاری داغ بر روی اغلب مواد سخت‌برش، می‌تواند سبب کاهش زبری سطح، کاهش نیرو و کاهش سایش ابزار شود، اما از طرفی می‌تواند سبب افزایش دمای ابزار شود که در برخی از فلزات مانند آلیاژهای تیتانیوم منجر به افزایش سایش ابزار شده و در نتیجه باعث کاهش عمر ابزار می‌شود. نتایج «برمینگهام» و همکاران [7] در ماشین‌کاری داغ آلیاژ Ti-6Al-4V نشان می‌دهد که با افزایش دمای پیش‌گرم قطعه کار، نیروی برش کاهش می‌یابد. به علاوه عمر ابزار تا دمای پیش‌گرم 250 درجه سانتی‌گراد بهبود مختصری می‌یابد. ولی با افزایش دمای پیش‌گرم قطعه به مقدار 350 درجه سانتی‌گراد، عمر ابزار نسبت به تراشکاری معمولی کاهش می‌یابد.



Fig. 1 Experimental setup

شکل 1 چیدمان انجام آزمایش‌ها

Stainless steel ISO M	Hardness Brinell	<<<< WEAR RESISTANCE		
		GC1115	GC1125	
Material	No.	HB	$h_{ax}, mm = feed f_r, mm/r$	
			0.1-0.2-0.3	0.1-0.2-0.3
			Cutting speed (v_c), m/min	
Ferritic/martensitic Bars/forged				
Non-hardened	05.11	200	335-255-200	280-215-170
PH-hardened	05.12	330	185-150-120	155-125-100
Hardened	05.13	330	200-160-140	165-135-120

Fig. 2 Proposed cutting tool grade from SANDVIK Co. for turning martensitic precipitation-hardened steels in M group [14]

شکل 2 گرید پیشنهادی شرکت سندویک جهت تراشکاری فولادهای مارتنزیتی پیرسخت شونده در گروه M [14]

با توجه به شکل 2، برای فولادهای پیرسخت شونده با سختی 330 برینل (معادل 33 راکول C)، سرعت برشی در محدوده 120 تا 185 متر بر دقیقه پیشنهاد شده است. اما با توجه به اینکه در این تحقیق، فولاد AISI630 در حالت سخت شده (47HRC) و بدون سیال برشی تحت تراشکاری قرار می‌گیرد، مقادیر سرعت برشی کمتر از مقادیر پیشنهادی فوق و در محدوده 62 تا 123 متر بر دقیقه انتخاب شدند. مطابق جدول 1 در آنالیز واریانس سه سطح از سرعت برشی در نظر گرفته شد. نرخ پیشروی با توجه به شکل 2 سه مقدار 0/102، 0/175 و 0/241 میلی‌متر بر دور اختیار شد. قبل از انجام ماشین کاری داغ، نمونه‌ها تحت روتراشی قرار گرفتند و مته مرغک در یک سمت قطعه کار زده شد. برای انجام ماشین کاری داغ در یک دمای مشخص، ابتدا نمونه‌ها داخل یک کوره المنتی با دمایی 40 تا 60 درجه سانتی‌گراد بالاتر از آن دما و طی زمان یک ساعت پیش‌گرم شدند. به عنوان مثال برای انجام ماشین کاری داغ در دمای 200 °C، نمونه‌ها داخل کوره با دمای

38 راکول C با قطر 36 میلی‌متر پس از انجام عملیات حرارتی پیرسختی در دمای 482 درجه سانتی‌گراد به مدت 1 ساعت به سختی 47 ± 1 راکول C رسید. ابتدا نمونه‌ها تحت روتراشی قرار گرفته و قطر آنها به 35 میلی‌متر کاهش یافت. سپس فرآیند تراشکاری خشک (بدون استفاده از سیال برشی) در سرعت‌ها و نرخ پیشروی‌های مختلف بر روی نمونه‌ها با طول 240 میلی‌متر مطابق شکل 1 در مدت زمان 3 دقیقه انجام شد. در انتخاب جنس ابزار و پوشش آن، از موارد پیشنهادی توسط سازندگان معتبر ابزارهای برشی مانند سیکو و سندویک استفاده شد. فولاد AISI630 در کاتالوگ شرکت «سیکو» در دسته مواد سخت ISOH با نام H12 قرار داده شده است، در حالیکه مطابق شکل 2، در دسته بندی شرکت سندویک در دسته فولادهای زنگ نزن ISO M با شماره 05.12 قرار گرفته است [14]. با توجه به کاتالوگ شرکت «سیکو» گرید TH1500 از این شرکت و با توجه به شکل 2، گریدهای GC1115 و GC1125 از شرکت «سندویک» برای تراشکاری فولادهای زنگ نزن پیرسخت شونده مناسب هستند [14].

با توجه به شکل 2 از ابزار شرکت سندویک با گرید GC1115 برای تراشکاری استفاده شد. جنس ابزار، تنگستن کارباید حاوی 6% وزنی کبالت است و بر روی آن دو لایه پوشش به روش PVD و با ضخامت تقریبی هر لایه 3 میکرومتر قرار گرفته است. پوشش لایه اول که بر روی تنگستن کارباید ایجاد شده است، (Ti,Al)N است که سختی خود را در دمای بالا به خوبی حفظ میکند و پوشش لایه دوم $(Al,Cr)_2O_3$ است که از تشکیل لبه انباشته جلوگیری می‌کند. تراشکاری در حالت پرداخت و میانی انجام شد، لذا از ابزار با کد DNMG150608-QM 1115 استفاده شده است. شعاع نوک ابزار 0/8 میلی‌متر و شعاع لبه برنده اصلی 0/02 میلی‌متر می‌باشد. از ابزارگیر PDJNR2525M1506 برای نگهداری ابزار حین تراشکاری استفاده شد. زاویه براده و آزاد ابزار به ترتیب 6° و 6° است.

مطابق شکل 1 زاویه لبه برنده اصلی ابزار با محور قطعه کار، 93° برای انجام کلیه تست‌ها می‌باشد. برای انجام تراشکاری از دستگاه CD6250A شرکت DALIAN MACHINE TOOL GROUP ساخت کشور چین با حداکثر سرعت دورانی 1400 دور بر دقیقه استفاده شد. برای تحلیل داده‌های خروجی نظیر سایش ابزار و زبری سطح از آنالیز واریانس (ANOVA) در نرم‌افزار مینی‌تب 17 استفاده شد.

240 °C پیش گرم شدند. (405±25°C) بر روی قطعه انجام شد.

جدول 1 پارامترهای فرآیند تراشکاری

Table 1 Turning parameters

سطح	دمای تراشکاری T (°C)	سرعت برشی V_c (m/min)	پیشروی f (mm/rev)
1	25	62	0/102
2	200	96	0/175
3	300	123	0/241
4	400



Fig. 3 Temperature measurement system

شکل 3 ترموکوپل مورد استفاده در تحقیق

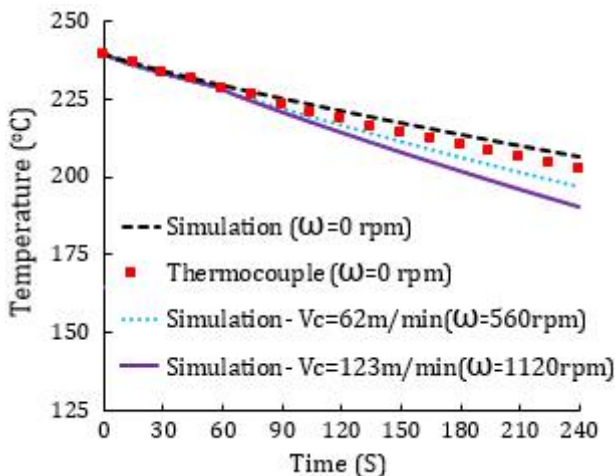


Fig. 4 Workpiece surface temperature versus time

شکل 4 افت دمای سطح قطعه کار پس از زمان 4 دقیقه

سایش سطح آزاد ابزار با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مدل FEI Quanta 450 اندازه‌گیری شد. زبری سطح همه نمونه‌ها در راستای پیشروی ابزار، با دستگاه HOMMELWERKE Turbo Roughness V3.34 اندازه‌گیری شد. در هر قطعه، در سه مقطع اندازه‌گیری زبری انجام و مقدار متوسط به عنوان زبری سطح آن قطعه ثبت گردیده است.

3- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

در این قسمت نتایج حاصل از انجام تراشکاری داغ در شرایط

نمونه‌ها پس از بیرون آمدن از کوره، طی زمان 60 ثانیه بر روی اسپیندل دستگاه تراش بسته شدند. سمت دیگر قطعه کار توسط مرغک مهار شد. پس از بستن قطعه کار فرآیند روتراشی به مدت زمان سه دقیقه بر روی قطعه انجام شد. دمای قطعه کار پس از خروج از کوره با استفاده از یک ترموکوپل تماسی مدل CHY-502A که در شکل 3 نشان داده شده است، در فواصل زمانی 15 ثانیه اندازه‌گیری و در یک نمودار مانند شکل 4 رسم شد. اندازه‌گیری دمای قطعه نشان داد که پس از گذشت 60 ثانیه زمان (جهت بستن قطعه کار به دستگاه)، دمای سطح قطعه به 230 °C افت می‌کند. برای محاسبه افت دما در حین بستن قطعه کار بر روی دستگاه، یک مدل شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار فلوننت 6/3 نیز انجام شد. مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی در 60 ثانیه اول، $13/8 \text{ W/m}^2\text{C}$ به دست آمد. در حین تراشکاری به دلیل چرخش قطعه کار با سرعت دورانی ω ، انتقال حرارت با هوای محیط متفاوت با زمان بستن قطعه کار می‌باشد. با استفاده از نرم‌افزار فلوننت 6/3 مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی تحت چرخش با سرعت دورانی 1120 دور بر دقیقه (معادل سرعت برشی 123 متر بر دقیقه)، $32/6 \text{ W/m}^2\text{C}$ به دست آمد. پس از شبیه‌سازی مشاهده شد که بعد از سه دقیقه چرخش قطعه کار بر روی دستگاه تراش، حداکثر 50°C افت دما در سطح قطعه اتفاق می‌افتد. بنابراین فرآیند تراشکاری داغ در دمای اسمی 200°C، در بازه دمایی 190-230 درجه سانتی‌گراد (210±20°C) بر روی قطعه انجام شد. به همین ترتیب برای انجام ماشین‌کاری داغ در دمای 300°C، نمونه‌ها داخل کوره با دمای 350°C پیش‌گرم شدند. با محاسبه افت دما، فرآیند تراشکاری داغ در دمای نامی 300°C، در بازه دمایی 290-330 درجه سانتی‌گراد (310±20°C) بر روی قطعه انجام شد. برای انجام ماشین‌کاری داغ در دمای 400°C، نمونه‌ها داخل کوره با دمای 460°C پیش‌گرم شدند. با در نظر گرفتن افت دما، تراشکاری داغ در بازه دمایی 380-430 درجه سانتی‌گراد

مختلف ارائه می‌شود. سپس با استفاده از تحلیل آماری، تأثیر پارامترهای مختلف فرایند تراشکاری داغ بر روی سایش ابزار و زبری سطح بررسی می‌شود.

3-1- تأثیر پارامترهای تراشکاری داغ بر سایش سطح آزاد ابزار

در جدول 2 مقدار سایش سطح آزاد ابزار و زبری سطح در هر آزمایش به تفکیک درج شده است. استفاده از یک روش آماری می‌تواند به درک بهتری از تأثیر پارامترهای تراشکاری بر روی یک خروجی مشخص مانند سایش سطح آزاد ابزار منجر شود. بنابراین برای مشاهده تأثیر هر پارامتر به صورت مجزا بر روی میانگین سایش ابزار، با استفاده از آنالیز واریانس، نمودار اثرات اصلی در شکل 5 رسم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت برشی و پیشروی، مقدار میانگین سایش سطح آزاد ابزار افزایش یافته است. با پیش‌گرم کردن قطعه کار در دمای 200°C سایش سطح آزاد ابزار نسبت به تراشکاری معمولی (در دمای محیط) کاهش می‌یابد. با افزایش دمای پیش‌گرم به 300°C و انجام تراشکاری، سایش ابزار باز هم کاهش می‌یابد، اما با افزایش دمای پیش‌گرم قطعه کار به 400°C مقدار سایش ابزار نه تنها

کاهش نمی‌یابد، بلکه طبق جدول 2، در برخی از شرایط نسبت به تراشکاری در دمای 300°C، افزایش قابل ملاحظه ای می‌یابد. نتایج جدول 2 نشان می‌دهد که در تراشکاری داغ فولاد AISI630 با دماهای پیش‌گرم 200، 300 و 400 درجه سانتی‌گراد، کمترین سایش سطح آزاد ابزار، در تراشکاری با دمای پیش‌گرم 300 °C حاصل می‌شود. همچنین با تراشکاری داغ در این دما در سرعت برشی 62 متر بر دقیقه و پیشروی 0/175 میلی‌متر بر دور، بیشترین کاهش در مقدار سایش سطح آزاد ابزار نسبت به تراشکاری معمولی، 33% می‌باشد. سیویایه و چاکرادار [10] نشان دادند در تراشکاری این فولاد با پیشروی 0/143 میلی‌متر بر دور و سرعت برشی 55 متر بر دقیقه، سایش ابزار در تراشکاری معمولی با سیال برشی در مقایسه با تراشکاری معمولی در حالت خشک، 24% کاهش می‌یابد. بنابراین مشاهده می‌شود که تراشکاری داغ در مقایسه با تراشکاری معمولی با سیال برشی، سبب کاهش بیشتر سایش ابزار می‌شود و از این نظر می‌تواند جایگزین تراشکاری معمولی با سیال برشی باشد. یکی از مزایای تراشکاری داغ نسبت به تراشکاری معمولی با سیال برشی، عدم استفاده از سیال برشی و به تبع آن حذف مشکلات سیال برشی نظیر آلوده کردن محیط کار و مشکلات تنفسی اپراتور دستگاه می‌باشد.

جدول 2 مقادیر سایش سطح آزاد ابزار و زبری سطح بر حسب پارامترهای تراشکاری

Table 2 Tool flank wear and surface roughness values versus cutting parameters

شماره آزمایش	دمای تراشکاری T (°C)	سرعت برشی Vc (m/min)	پیشروی f (mm/rev)	سایش ابزار VB (µm)	زبری سطح Ra (µm)	شماره آزمایش	دمای تراشکاری T (°C)	سرعت برشی Vc (m/min)	پیشروی f (mm/rev)	سایش ابزار VB (µm)	زبری سطح Ra (µm)
1	25	62	0/102	91	2/2	19	300	96	0/175	100	2
2	200	62	0/102	82	2	20	400	96	0/175	107	1/61
3	300	62	0/102	70	1/69	21	25	123	0/175	128	1/8
4	400	62	0/102	71	1/6	22	200	123	0/175	118	1/76
5	25	96	0/102	105	1/6	23	300	123	0/175	106	1/5
6	200	96	0/102	98	1/5	24	400	123	0/175	112	1/41
7	300	96	0/102	88	1/31	25	25	62	0/241	128	2/86
8	400	96	0/102	91	1/27	26	200	62	0/241	112	2/8
9	25	123	0/102	119	1/5	27	300	62	0/241	91	2/63
10	200	123	0/102	108	1/41	28	400	62	0/241	94	2/47
11	300	123	0/102	100	1/19	29	25	96	0/241	138	2/9
12	400	123	0/102	107	1/14	30	200	96	0/241	123	2/8
13	25	62	0/175	114	2/6	31	300	96	0/241	110	2/6
14	200	62	0/175	99	2/43	32	400	96	0/241	115	2/12
15	300	62	0/175	76	2/1	33	25	123	0/241	147	2/8
16	400	62	0/175	84	2/11	34	200	123	0/241	131	2/73
17	25	96	0/175	118	2/5	35	300	123	0/241	119	2/49
18	200	96	0/175	110	2/36	36	400	123	0/241	125	2/21

شکل 6- الف می‌باشد. مناطق مختلف بر روی ابزار ساییده شده، توسط نقشه‌های EDS شناسایی شده‌اند. منطقه‌ای از سطح آزاد ابزار که با نقطه «1» نشان داده شده است، منطقه غنی از آهن است و لذا در EDS maps شکل 7- ب به سهولت قابل تشخیص است. ترکیب این نقطه از 75/3% وزنی آهن، 16/3% کروم، 4/5% نیکل، 3/5% مس و 0/3% از سایر عناصر تشکیل شده است و مشابه ترکیب متریال قطعه کار است و لذا مشخص است که این متریال به صورت یک لایه به سطح ابزار چسبیده است.

جدول 3- نتایج آنالیز واریانس برای سایش سطح آزاد ابزار (S=3.952, R²=96.37%, R²adj= 95.46%)

Table 3 ANOVA results for flank wear (S=3.952, R²=96.37%, R²adj=95.46%)

Source	DF	Seq. SS	Adj. MS	P Value	Contribution
T	3	3713/9	1237/96	0/000	%30/83
Vc	2	4001/1	2000/53	0/000	%33/22
f	2	3893/1	1946/53	0/000	%32/32
Error	28	437/2	15/62	...	%3/63
Total	35	12045/2	%100/00

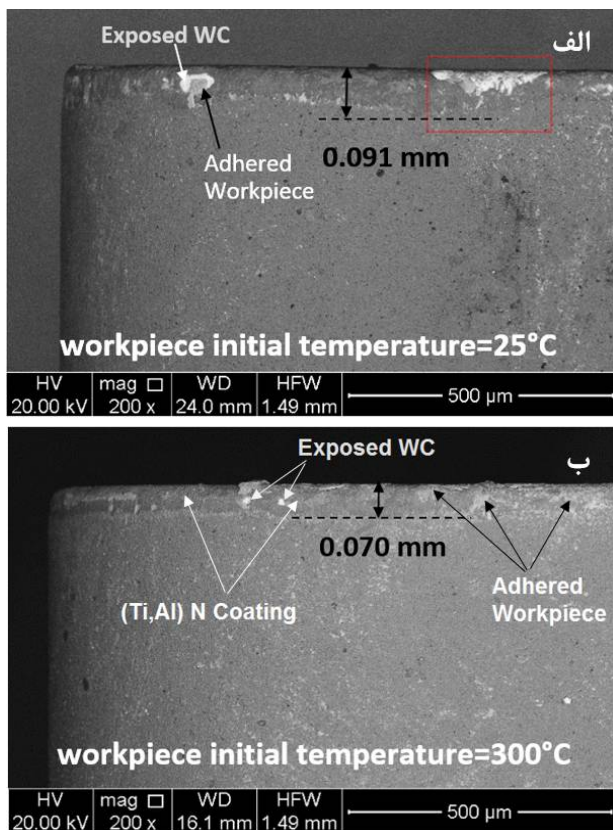


Fig. 6 Cutting tool flank wear after 3 minutes cutting with 62m/min, 0.102mm/rev; a) conventional turning, b) turning at 300°C

شکل 6 سایش سطح آزاد ابزار پس از سه دقیقه تراشکاری با سرعت 62 m/min و پیشروی 0/102 mm/rev (الف) تراشکاری معمولی، ب) تراشکاری در دمای 300 °C

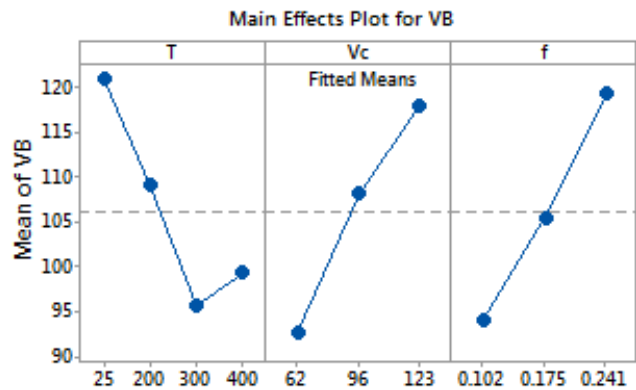


Fig. 5 Main effects plot for Cutting tool flank wear

شکل 5 نمودار اثرات اصلی برای سایش سطح آزاد ابزار

در جدول 3 نیز خلاصه‌ای از نتیجه آنالیز واریانس درج شده است. مقدار S و P Value به ترتیب بیانگر انحراف استاندارد و مقدار احتمال هستند. اگر P Value برای یک پارامتر کمتر از 0/05 باشد نشان دهنده آن است که آن پارامتر بر سایش ابزار تأثیرگذار است. در جدول 3 مقدار مشارکت هر پارامتر در سایش سطح آزاد ابزار درج شده است. مشارکت پارامترهای دما، سرعت برشی و پیشروی، در سایش سطح آزاد ابزار به ترتیب 30/83%، 33/22% و 32/32% می‌باشد. بنابراین با توجه به مقدار خطای 3/63% می‌توان گفت که مشارکت پارامترهای دما، سرعت و پیشروی در سایش ابزار تقریباً به یک اندازه می‌باشد. همچنین ضریب رگرسیون منطبق شده یا R²adj برابر 95/46% است که نشان می‌دهد بیش از 95 درصد داده‌ها توسط مدل پوشش داده شده‌اند.

با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی سایش سطح آزاد ابزارها در دماهای پیش‌گرم و شرایط تراشکاری مختلف تصویر برداری شد. شکل 6 سطح آزاد دو ابزار را نشان می‌دهد که با سرعت برشی 62 متر بر دقیقه و پیشروی 0/102 mm/rev در تراشکاری معمولی و داغ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به شکل 6، علاوه بر اینکه مقدار سایش ابزار در تراشکاری داغ کاهش یافته است، نوع سایش نیز در مقایسه با تراشکاری معمولی تغییر یافته است. در تراشکاری معمولی، هر دو لایه پوشش ابزار ساییده شده و ماده اصلی ابزار که حاوی تنگستن کارباید است، نمایان شده است. در حالی که در تراشکاری داغ، لایه بالایی پوشش ابزار کنده شده و لایه زیرین پوشش همچنان بر روی زیرلایه تنگستن کارباید موجود است. نحوه تشخیص عناصر موجود بر روی سطح ابزار، توسط میکروسکوپ الکترونی در شکل 7 توضیح داده شده است.

شکل 7- الف یک بزرگنمایی از مستطیل قرمز رنگ در

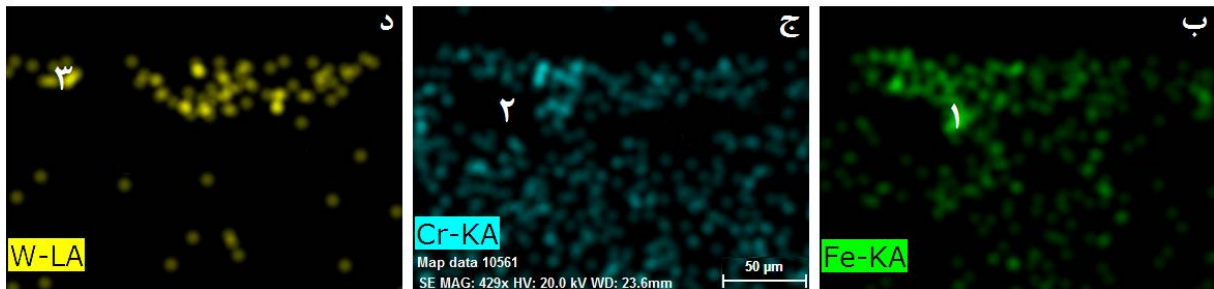
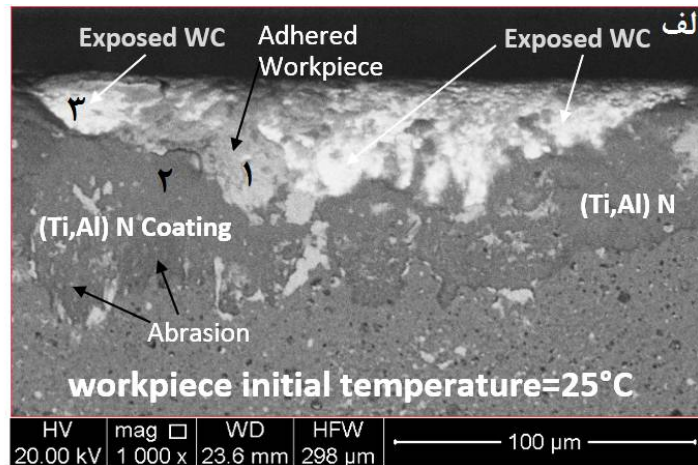


Fig. 7 a) Magnification of the red rectangle in Figure 6-a, b) Iron-rich area. Areas where the workpiece material is adhered to the tool surface, c) Chrome-rich area, Areas where the top layer of the tool is not removed. In the areas marked in black, the top layer of the tool is peeled off, d) Tungsten rich area, where the top and bottom layers of the tool are removed.

شکل 7 الف: بزرگنمایی از مستطیل قرمز در شکل 6-الف. ب: منطقه غنی از آهن. مناطقی که متریال قطعه کار بر روی سطح ابزار چسبیده است. ج: منطقه غنی از کروم. مناطقی که پوشش لایه بالایی ابزار کنده نشده است. در مناطقی که با رنگ مشکی مشخص شده‌اند، پوشش لایه بالایی ابزار کنده شده است. د: منطقه غنی از تنگستن. جایی که پوشش لایه بالایی و پایینی ابزار کنده شده است.

در برخی از نقاط نیز چسبندگی همراه با خراش بوده است، بطوری که متریال قطعه کار یک پیوند قوی با پوشش لایه بالایی ابزار که $(Al, Cr)_2O_3$ است، ایجاد کرده و سپس در ادامه فرآیند تراشکاری از روی سطح ابزار کنده شد. این پدیده سبب شده که پوشش لایه زیرین ابزار یا $(Ti, Al)N$ نمایان شود. در این نواحی که پوشش لایه بالایی ابزار کنده شده است، کروم نباید وجود داشته باشد. در نتیجه در مناطقی که عنصر کروم رویت نشده، پوشش لایه اول کنده شده است (شکل 7-ج) و پوشش $(Ti, Al)N$ بر روی ابزار مشاهده می‌شود. به عنوان نمونه نقطه «2» شکل‌های 7-الف و ج. آنالیز شیمیایی این نقطه شامل 44% وزنی تیتانیوم، 22/2% آلومینیوم، 32/8% نیتروژن، 0/6% کربن و 0/3% اکسیژن است. این آنالیز نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی در این ناحیه $(Ti, Al)N$ است. در برخی از قسمت‌های سطح آزاد ابزار، خراش به اندازه‌ای زیاد بوده که ماده قطعه کار پس از چسبیدن به سطح ابزار، پوشش بالایی و پوشش زیرین را کنده و سطح خام تنگستن کارباید را نمایان کرده است که در شکل 7-د و در نقطه 3 نمونه ای از این سایش نشان داده شده است. شکل 7 نشان می‌دهد که سایش ابزار در ماشین‌کاری

معمولی بیشتر از نوع خراشان و چسبنده است. شکل 6-ب نیز نشان می‌دهد که در تراشکاری داغ در دمای 300 درجه سانتی‌گراد، مکانیزم سایش چسبنده وجود دارد و متریال قطعه کار به سطح ابزار می‌چسبد. به علاوه در برخی از نقاط نیز هر دو لایه پوشش ابزار کنده شده است. مقایسه شکل‌های 6-الف و ب نشان می‌دهد که با افزایش دمای پیش‌گرم قطعه کار در ماشین‌کاری داغ تا $300^\circ C$ ، سایش سطح آزاد ابزار تحت مکانیزم‌های خراش و چسبندگی، نسبت به تراشکاری معمولی کاهش یافته است.

در شکل 8-الف سایش سطح آزاد ابزار در تراشکاری داغ با سرعت 62 متر بر دقیقه و پیشروی 0/175 میلی‌متر بر دور، نشان داده شده است. شکل 8-ب بزرگنمایی از قسمت نوک ابزار را نشان می‌دهد. شیارهایی روی سطح آزاد ابزار مشاهده می‌شود که نشان دهنده اینست که مکانیزم غالب سایش ابزار در این سرعت و پیشروی، سایش خراشان است. به علاوه متریال چسبیده به لبه برنده اصلی ابزار در این شکل به صورت لبه انباشته (BUE) مشاهده می‌شود.

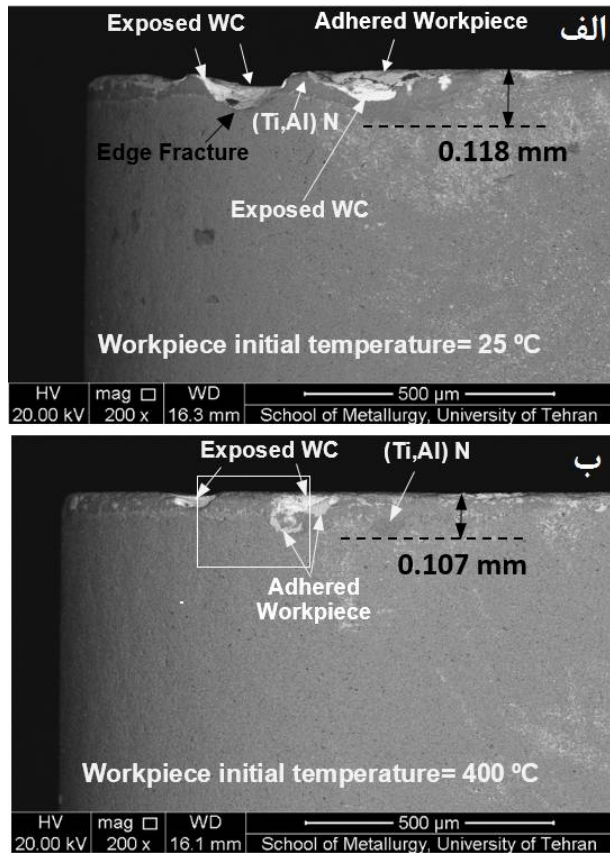


Fig. 9 Cutting tool flank wear after 3 minutes cutting at cutting speed 96m/min and feed 0.175mm/rev

شکل 9 سایش سطح آزاد ابزار پس از سه دقیقه تراشکاری در سرعت 96 m/min و پیشروی 0/175 mm/rev

در برخی از نقاط مانند نقطه «5» متریال قطعه کار یک پیوند قوی با پوشش لایه بالایی ابزار که $(Al,Cr)_2O_3$ است، ایجاد کرده و سپس در ادامه فرآیند تراشکاری از روی سطح ابزار کنده شد و سبب شده در آن نقاط که پوشش لایه زیرین ابزار یا $(Ti,Al)N$ نمایان شود. در این نواحی که پوشش لایه بالایی ابزار کنده شده است، کروم نباید وجود داشته باشد. آنالیز نقطه «5» در شکل 10- ج نشان داد که ترکیب شیمیایی در این ناحیه $(Ti,Al)N$ است. در برخی از مناطق مانند نقاط «6» و «7»، خراش به اندازه‌ای زیاد بوده که ماده قطعه کار پس از چسبیدن به سطح ابزار، پوشش بالایی و پوشش زیرین را کنده و زیرلایه ابزار (تنگستن کارباید) را نمایان کرده است که در شکل 10- د نشان داده شده است. مکانیسم «چسبندگی» سبب می‌شود که متریال قطعه کار به صورت یک لایه با استحکام اتصال بالا به سطح آزاد ابزار و لبه برنده اصلی ابزار بچسبد (BUE). به دلیل طبیعت دینامیکی فرآیند تراشکاری، لبه انباشته (BUE) ناپایدار می‌باشد و به صورت مداوم از روی لبه ابزار برداشته می‌شود. این چرخه تشکیل لبه انباشته و برداشته شدن آن در نهایت منجر به کندگی پوشش ابزار (Peel-off) و شکست لبه ابزار (Edge fracture) خواهد شد (نقاط 6 و 7 در شکل 10- الف).

تراشکاری داغ در دمای $400^\circ C$ با سرعت 96m/min و پیشروی 0/175mm/rev نشان داده شده است.

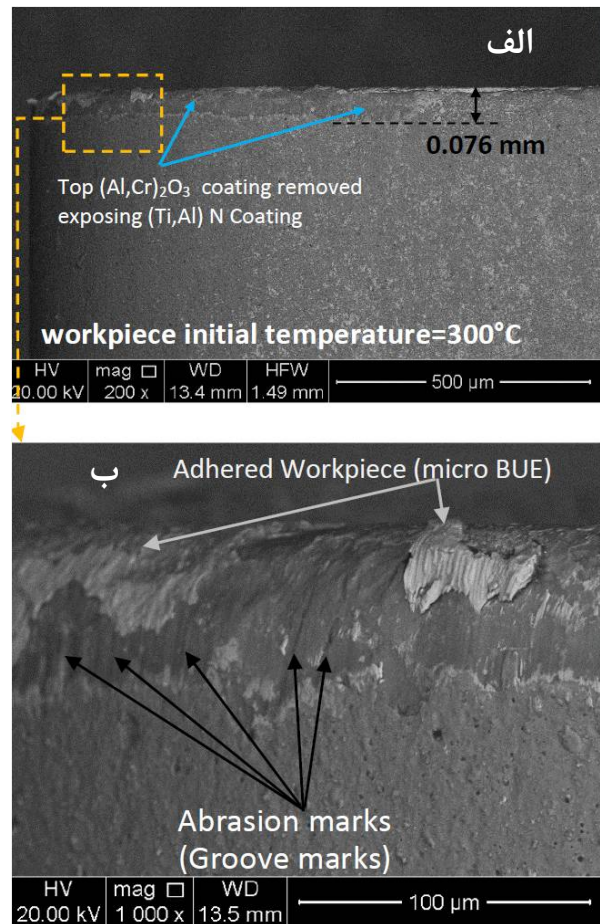


Fig. 8 Cutting tool flank wear after 3 minutes cutting at a cutting speed 62m/min and feed 0.175mm/rev

شکل 8 سایش سطح آزاد ابزار پس از سه دقیقه تراشکاری در سرعت 62 m/min و پیشروی 0/175 mm/rev

مشاهده می‌شود که انجام تراشکاری داغ سبب کاهش سایش در سطح آزاد ابزار شده است. در تراشکاری معمولی، در قسمت شعاع نوک ابزار، شکستگی لبه ایجاد شده است و در آن ناحیه تنگستن کارباید نمایان شده است. در حالی که در تراشکاری داغ در دمای $400^\circ C$ مساحت ناحیه‌ای که تنگستن کارباید نمایان شده، کمتر از تراشکاری معمولی است.

شکل 10- الف یک بزرگنمایی از مستطیل سفید در شکل 9- ب می‌باشد و EDS maps آن در شکل‌های 10- ب تا د ترسیم شده‌اند. منطقه‌ای از سطح آزاد ابزار که با نقطه «4» نشان داده شده است، منطقه غنی از آهن است و در EDS maps شکل 10- ب ترسیم شده است. پس از آنالیز مشخص شد که ترکیب این نقطه مشابه ترکیب متریال قطعه کار است و لذا این متریال به صورت یک لایه به سطح آزاد ابزار چسبیده است.

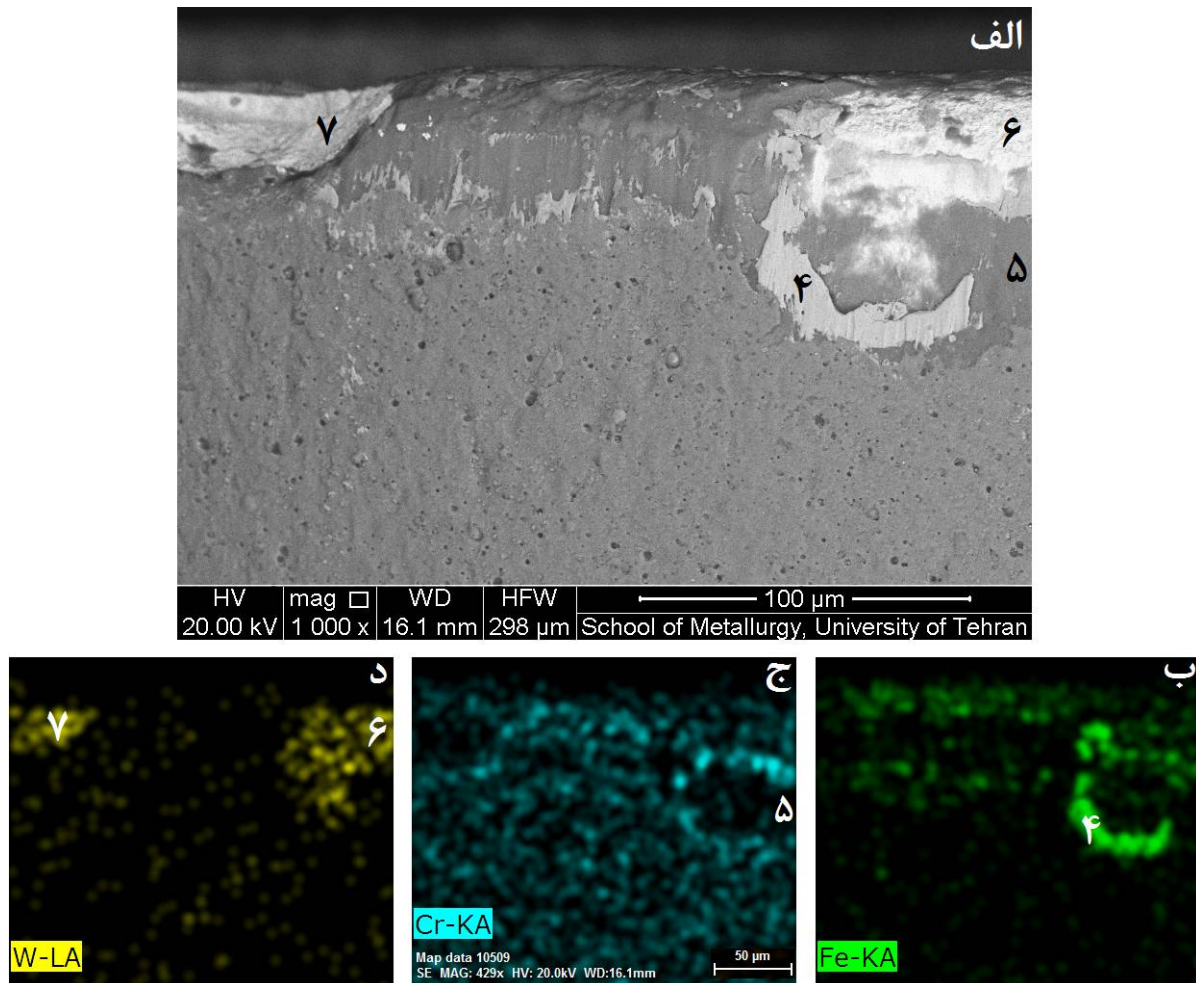


Fig. 10 a) Magnification of the white rectangle in Figure 8-b, b) Iron-rich area. Areas where the workpiece material is adhered to the tool surface, c) Chrome-rich area, Areas where the top layer of the tool is not removed. In the areas marked in black, the top layer of the tool is peeled off, d) Tungsten rich areas, where the top and bottom layers of the tool are removed.

شکل 10 الف: بزرگمایی از مستطیل سفید در شکل 9-ب. ب: منطقه غنی از آهن. مناطقی که متریال قطعه کار بر روی سطح ابزار چسبیده است. ج: منطقه غنی از کروم. مناطقی که پوشش لایه بالایی ابزار کنده نشده است. در مناطقی که با رنگ مشکی مشخص شده‌اند، پوشش لایه بالایی ابزار کنده شده است. د: مناطق غنی از تنگستن. جایی که پوشش لایه بالایی و پایینی ابزار کنده شده است.

نرخ پیشروی 0/175mm/rev رسم شده است. با توجه به این شکل با افزایش دمای اولیه قطعه کار از 25°C به 300°C، مقدار دمای ماکزیمم نوک ابزار از 685°C به 791°C و به میزان 15% افزایش یافته، در حالیکه نیروی تراش از 543 N به 395 N و به اندازه 27% کاهش یافته است. این کاهش نیرو سبب کاهش تنش وارده بر شعاع نوک ابزار و لبه برنده اصلی ابزار می‌شود [16]. بنابراین اگرچه انجام تراشکاری داغ، سبب افزایش دمای ابزار می‌شود اما سبب کاهش بیشتر نیروی تراش و تنش وارده به لبه ابزار می‌شود و در نتیجه سبب کاهش سایش سطح آزاد ابزار به میزان 33% می‌شود.

با افزایش دمای اولیه قطعه کار از 300 به 400°C، مقدار دمای ماکزیمم نوک ابزار از 791°C به 842°C افزایش یافته و نیروی تراش از 395 N به 367 N کاهش یافته است.

شکل‌های 10-ب تا 10-ج نشان می‌دهد که در تراشکاری داغ در دمای 400°C، هر دو مکانیسم «سایش چسبنده» و «سایش خراشان» وجود دارد. مقایسه اشکال 9-الف و 9-ب نشان می‌دهد که با افزایش دمای پیش‌گرم قطعه کار در ماشین‌کاری داغ تا 400°C، سایش سطح آزاد ابزار تحت مکانیزم‌های خراش و چسبندگی، نسبت به تراشکاری معمولی در دمای 25°C کاهش یافته است.

با استفاده از یک مدل اجزا محدود که برای تراشکاری فولاد AISI630 توسط ابراهیمی و همکاران [15] صحه‌گذاری شده است و با بکارگیری معادله ساختاری Power Viscosity Law، مقدار نیروی تراش و دمای ماکزیمم نوک ابزار محاسبه شد. در شکل 11 دمای ماکزیمم نوک ابزار (T_p) و نیروی تراش (F_c) بر حسب دمای پیش‌گرم قطعه کار در سرعت برشی 62m/min و

می‌دهند که در دمای معمولی و دمای پیش‌گرم 400°C ، با سرعت 96 متر بر دقیقه و پیشروی 0/175 میلی‌متر بر دور، تراشکاری شده‌اند.

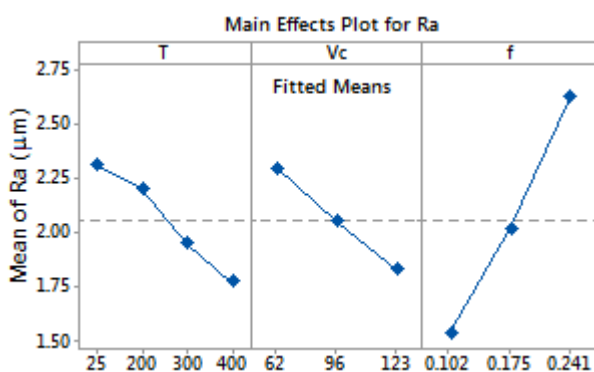


Fig. 12 Main effects plot for Workpiece surface roughness (Ra)
شکل 12 نمودار اثرات اصلی برای زبری سطح قطعه کار (Ra)

جدول 4 نتایج آنالیز واریانس برای زبری سطح قطعه کار ($S=0.161$, $R^2=93.20\%$, $R^2_{adj}=91.50\%$)
Table 4 ANOVA results for surface roughness ($S=0.161$, $R^2=93.20\%$, $R^2_{adj}=91.50\%$)

Source	DF	Seq. SS	Adj. MS	P Value	Contribution
T	3	1/5895	0/52983	0/000	%14/90
Vc	2	1/2846	0/64230	0/000	%12/04
f	2	7/0713	3/53564	0/000	%66/27
Error	28	0/7257	0/02592	...	%6/80
Total	35	10/6711	%100/00

مشاهده می‌شود که مقدار زبری در تراشکاری داغ به شدت کم شده است. با توجه به نتایج جدول 2، مقدار متوسط زبری سطح در این شرایط تراشکاری، از 2/5 میکرومتر در تراشکاری معمولی به 1/61 میکرومتر در تراشکاری داغ کاهش یافته است.

چند دلیل برای کاهش زبری سطح در تراشکاری داغ نسبت به تراشکاری معمولی وجود دارد. دلیل اول کم شدن ضخامت متوسط براده (t_c) در تراشکاری داغ در مقایسه با تراشکاری معمولی است. به عنوان نمونه در شکل 14 ضخامت متوسط براده در تراشکاری معمولی و تراشکاری داغ در دمای 300°C از 0/270 میلی‌متر به 0/255 میلی‌متر کاهش یافته است. با کم شدن ضخامت متوسط براده، نیروی تراش کاهش می‌یابد و عمل براده برداری با سهولت بیشتری انجام می‌شود و در نتیجه زبری سطح کاهش می‌یابد.

دلیل دوم برای کاهش زبری سطح قطعه کار، افت استحکام تسلیم قطعه کار و در نتیجه کاهش نیروی تراش در تراشکاری داغ نسبت به تراشکاری معمولی می‌باشد که در شکل 12 نشان داده شده است.

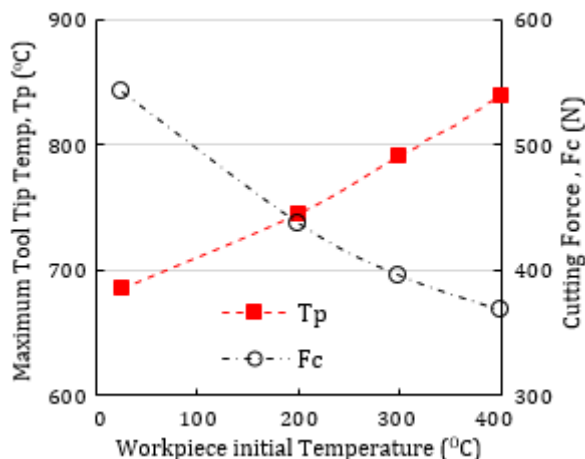


Fig. 11 Predicted Tool's tip temperature and cutting force by 3D-FEM ($V_c=62$ m/min, $f=0.175$ mm/rev)

شکل 11 مقادیر پیش بینی شده دمای نوک ابزار و نیروی تراش توسط تحلیل سه بُعدی اجزاء محدود ($V_c=62$ m/min, $f=0.175$ mm/rev)

اگرچه در تراشکاری داغ در دمای 400°C ، نیروی تراش نسبت به تراشکاری داغ در دمای 300°C کاهش می‌یابد، اما دمای نوک ابزار نیز به مقادیر بالاتر از 800°C افزایش یافته است و این درحالیست که در دماهای بالاتر از 800 درجه سانتی‌گراد مکانیزم سایش «نفوذ» نیز به عنوان مکانیزم غالب در کنار سایر مکانیزم‌های سایش بر ابزار تنگستن کاربرد اثر می‌گذارد [17] و سبب می‌شود که ابزار کارایی خود را از دست بدهد.

3-2- تأثیر پارامترهای تراشکاری داغ بر زبری سطح قطعه

برای مشاهده تأثیر هر پارامتر به صورت مجزا بر روی میانگین زبری سطح قطعه کار، از نتایج آنالیز واریانس استفاده شد. نمودار اثرات اصلی در زبری سطح در شکل 12 رسم شده است. مشاهده می‌شود که پیشروی ابزار بیشترین تأثیر را بر روی زبری سطح قطعه کار دارد. با افزایش دمای پیش‌گرم قطعه کار از 25°C به 400°C ، مقدار زبری سطح کاهش می‌یابد. بر خلاف آنچه که در نمودار مربوط به سایش ابزار در شکل 5 مشاهده شد، افزایش دمای پیش‌گرم تا 400°C همواره منجر به کاهش زبری سطح قطعه کار می‌شود. در جدول 4 نتیجه آنالیز واریانس درج شده است. مشارکت پارامترهای دما، سرعت برشی و پیشروی، در زبری سطح قطعه کار به ترتیب %14/90، %12/04 و %66/27 می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که در این محدوده از دما، سرعت برشی و پیشروی، مشارکت پارامتر پیشروی در زبری سطح قطعه کار، تقریباً 4 برابر پارامتر دما و 5 برابر پارامتر سرعت برشی است.

شکل‌های 13- الف و ب پروفیل زبری سطح دو نمونه‌ای را نشان

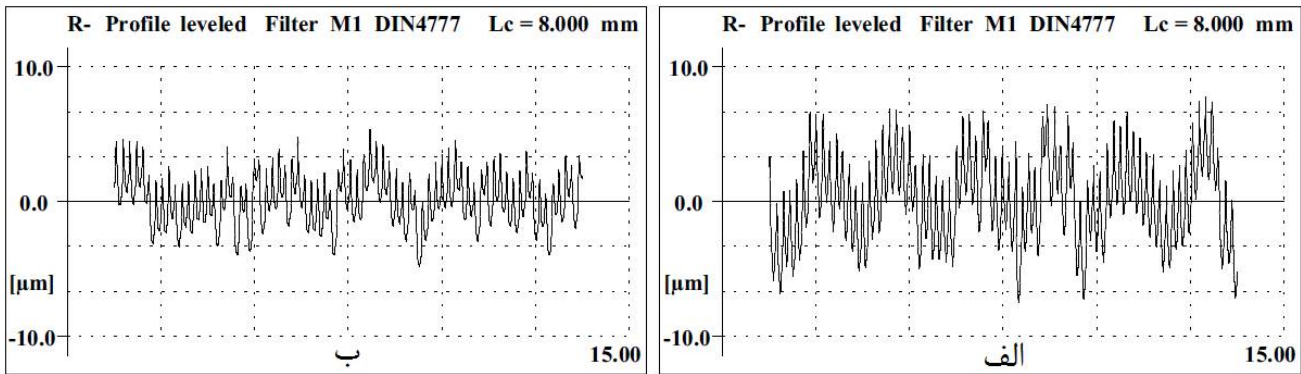


Fig. 13 Roughness profile in conventional and hot turning processes at 400°C and 96m/min and 0.175mm/rev

شکل 13 پروفیل زبری در تراشکاری معمولی و تراشکاری داغ در دمای 400°C با سرعت 96 متر بر دقیقه و پیشروی 0/175 میلی‌متر بر دور

افزار Minitab استفاده شد. بدین منظور هر دو خروجی سایش ابزار و زبری سطح با ضریب وزنی یک در نظر گرفته شدند. همچنین درجه اهمیت هر دو خروجی یکسان در نظر گرفته شد و مقدار «شرایط مطلوب» یا Desirability توسط نرم افزار محاسبه شد.

مقدار «شرایط مطلوب» بین صفر و 1 است و نزدیک بودن به عدد 1 به این معنی است که پارامترهای مستقل به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که پاسخ‌ها از مطلوبیت بیشتری برخوردار هستند. با توجه به شکل 16، دما، سرعت برشی و نرخ پیشروی بهینه در تراشکاری فولاد سخت شده‌ی AISI630 به ترتیب 400°C، 62m/min و 0/102mm/rev هستند. با انجام تراشکاری در این شرایط، سایش سطح آزاد ابزار و زبری سطح قطعه کار به ترتیب 22% و 27% نسبت به تراشکاری خشک در دمای محیط کاهش می‌یابند.

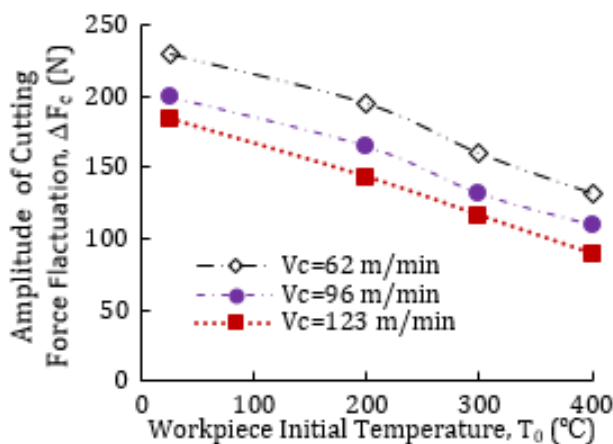


Fig. 15 The amplitude of cutting force vs. workpiece initial temperature (f=0.175 mm/rev)

شکل 15 دامنه نوسان نیروی تراش بر حسب دمای اولیه قطعه کار (f=0175 mm/rev)

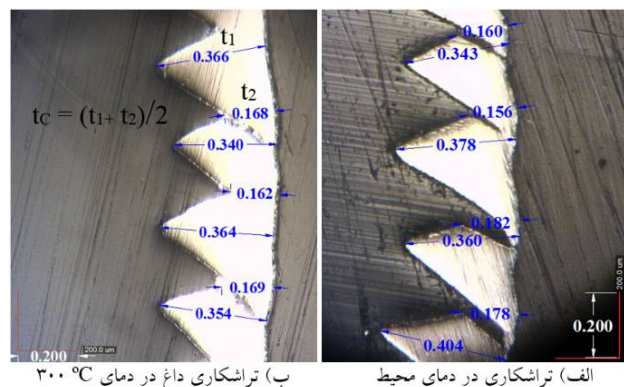


Fig. 14 Chip thickness in Conventional and hot turning (Vc=96 m/min, f=0.241 mm/rev)

شکل 14 ضخامت براده در تراشکاری معمولی و داغ (Vc=96 m/min, f=0.241 mm/rev)

دلیل سوم برای کاهش زبری سطح در تراشکاری داغ نسبت به تراشکاری معمولی، کاهش نوسانات نیروی تراش است. «کالامز» و همکارانش [18] نشان دادند که زبری سطح علاوه بر وابستگی به مقدار نیروی تراش، به دامنه نوسانات نیروی تراش نیز وابسته است. به اینصورت که با کاهش دامنه نوسانات نیرو، زبری سطح قطعه کار کاهش می‌یابد. با استفاده از مدل اجزا محدود ابراهیمی و همکاران [15]، مقدار دامنه نوسانات نیروی تراش در پیشروی 0/175 میلی‌متر بر دور محاسبه شد و در شکل 15 رسم شد. مشاهده می‌شود که در هر سرعت برشی، با افزایش دمای پیش‌گرم قطعه کار، دامنه نوسانات نیروی تراش کاهش می‌یابد. نتایج جدول 2 نیز نشان می‌دهد که با افزایش دمای پیش‌گرم تا 400°C، زبری سطح کاهش می‌یابد.

3-3- یافتن پارامترهای بهینه تراشکاری

برای یافتن مقادیر بهینه دما، سرعت برشی و نرخ پیشروی از نرم

0/102 mm/rev هستند. در این شرایط، سایش ابزار و زبری سطح به ترتیب 22% و 27% نسبت به تراشکاری خشک در دمای محیط کاهش یافته‌اند.

- انواع سایش ابزار نظیر سایش سطح آزاد¹، شکست لبه ابزار² و کنده شده پوشش ابزار³ در تراشکاری معمولی و داغ این فولاد مشاهده شد و علت اصلی رُخداد این نوع از سایش‌ها دو مکانیسم چسبندگی⁴ و خراش⁵ می‌باشد.

5- مراجع

- [1] J.H. Wu, C.K. Lin, Effect of strain rate on high-temperature low-cycle fatigue of 17-4 PH stainless steels, Mater. Sci. Eng. A. 2005, 390, 291–298.
- [2] J. Burja, B. S'uler, A. Nagode, Effect of ageing temperature on reverse austenite content in AISI 630 stainless steel. Mater. Sci. Eng. Technol., 50 (2019), 405-411.
- [3] CW. Chang, CP. Kuo, Evaluation of surface roughness in laser-assisted machining of Aluminum oxide ceramics with Taguchi method, International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007) 141–147
- [4] CW. Chang, CP. Kuo, An investigation of laser-assisted machining of Al₂O₃ ceramics planing, International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007) 452–561
- [5] S. Azhdari S, R. Shoja Razavi, R. Vafaei, Pulsed laser-assisted machining of Inconel 718 superalloy. Opt Laser Technol. 2017; 87:72–78.
- [6] Y. Wang, L.J. Yang, N.J. Wang. An investigation of laser-assisted machining of Al₂O₃ particle reinforced aluminium matrix composite. Journal of Materials Processing Technology 129 (2002) 268-272
- [7] M.J. Birmingham, S. Palanisamy, MS. Dargusch. Understanding the tool wear mechanism during thermally assisted machining Ti-6Al-4V. Int. J. of Mach Tool Manu. 2012; 62:76-87.
- [8] W.F. Brown, H. Mindlin, C.Y. Ho (editors), Aerospace Structural Metals Handbook. Vol. 2. Stainless steels; Purdue University, West Lafayette, 1997.
- [9] A. Mohanty, S. Gangopadhyay, A. Thakur, On Applicability of Multilayer Coated Tool in Dry Machining of Aerospace Grade Stainless Steel. Mater Manuf Process. 2015; 31:869-879.
- [10] P. Sivaiah, D. Chakradhar, Experimental investigation on feasibility of cryogenic, MQL, wet and dry machining environments in turning of 17-4 PH stainless steel. Mater Manuf Process. 2017; 32:1775-1788.

¹ Flank wear

² Edge fracture

³ Coating peel-off

⁴ Adhesion

⁵ Abrasion

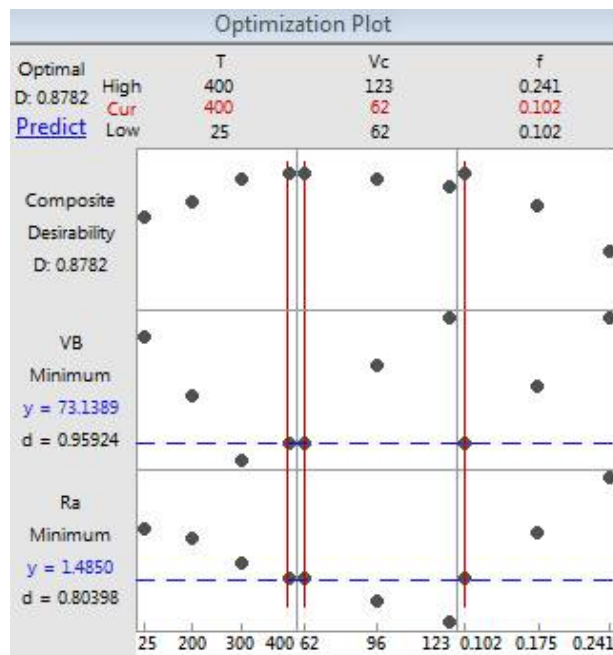


Fig. 16 Optimization plot for hot tuning of hardened AISI630

شکل 16 نمودار بهینه‌سازی برای تراشکاری داغ فولاد سخت شده‌ی AISI630

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق فرآیند تراشکاری معمولی و تراشکاری داغ فولاد زنگ نزن رسوب سخت شده AISI630 در سه دمای 200°C، 300°C و 400°C به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. اهم نتایج حاصله عبارتند از:

- با افزایش دمای پیش‌گرم قطعه کار از 25°C تا 300°C سایش سطح آزاد ابزار کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر دمای پیش‌گرم قطعه کار از 300°C به 400°C، افزایش جزیی در سایش سطح آزاد ابزار ایجاد می‌شود.

- انجام تراشکاری داغ در دمای 300°C سبب کاهش سایش سطح آزاد ابزار به مقدار حداکثر 33% نسبت به تراشکاری معمولی شده است. این کاهش سایش، در سرعت برشی 62 متر بر دقیقه و پیشروی 0/175 میلی‌متر بر دور حاصل شده است.

- در هر سه نرخ پیشروی، با افزایش دمای اولیه قطعه کار از 25 به 400 درجه سانتی‌گراد، مقدار زبری سطح قطعه کار، کاهش یافته است.

- کمترین زبری سطح قطعه کار، در دمای 400 درجه سانتی‌گراد با سرعت برشی 96 متر بر دقیقه و پیشروی 0/175 به دست آمده است. در این حالت زبری سطح نسبت به تراشکاری معمولی 36% کاهش یافته است.

- دما، سرعت برشی و نرخ پیشروی بهینه در تراشکاری فولاد سخت شده‌ی AISI630 به ترتیب 400°C، 62 m/min و

- numerical analysis of turning processes to predict the chip morphology, tool temperature and cutting force. *Int J Adv Manuf Technol.* 2019; 105:4245–4264.
- [16] A.R. Araee. Experimental and numerical investigation of the effects of preheating temperature on cutting force, chip shape and surface roughness in hot turning of AISI630 hardened stainless steel. *Energy Equipment and Systems.* 2021; 9: 145- 158.
- [17] J.A. Arsecularatne, L.C. Zhang, C. Montross. Wear and tool life of tungsten carbide, PCBN and PCD cutting tools. *J Jpn Soc Powder Met International Journal of Machine Tools & Manufacture.* 2006; 46: 482–491.
- [18] M. Calamaz, D. Coupard, F. Girot, A New Material Model for 2D Numerical Simulation of Serrated Chip Formation When Machining Titanium Alloy Ti–6Al–4V. *Int. J. of Mach Tool Manu.* 2008; 48:275–288.
- [11] Z. Lai, C. Wang, L. Zheng, H. Lin, Y. Yuan, J. Yang, W. Xiong. Effect of cryogenic oils-on-water compared with cryogenic minimum quantity lubrication in finishing turning of 17-4PH stainless steel. *Machining Science and Technology.* 2020; 24:1016–1036.
- [12] S. Khani, M. Farahnakian, M.R. Razfar, Experimental study on Hybrid Cryogenic and Plasma-Enhanced Turning of 17-4PH Stainless Steel. *Mater Manuf Process.* 2015; 30:868–874.
- [13] M.J. Bermingham, D. Kent, M.S. Dargusch, A new understanding of the wear processes during laser assisted milling 17-4 precipitation hardened stainless steel. *Wear.* 2015; 328-329:518–530.
- [14] *Turning tools*, Accessed on 2017; <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/downloads/pages/default.aspx>.
- [15] S.M. Ebrahimi, A.R. Araee, M.J. Hadad. Investigation of the effects of constitutive law on