



Experimental Study of Cutting and Feeding Forces, Temperature and Surface Integrity in The Machining Process of Waspaloy

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Esrafil H.¹,
Amirabadi H.^{2*},
Akbari J.³,
Jafarian F.⁴,

How to cite this article

Esrafil H, Amirabadi H, Akbari J, Jafarian F, Experimental Study of Cutting and Feeding Forces, Temperature and Surface Integrity in The Machining Process of Waspaloy. Modares Mechanical Engineering; 2023;23(12):697-706.

¹ Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

² Faculty of Engineering, University of Neyshabur, Neyshabur, Iran.

³ Dep. of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

⁴ Faculty of Engineering, Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat, Iran.

*Correspondence

Address: Faculty of Engineering, University of Neyshabur, Neyshabur, Iran.
hamirabadi@neyshabur.ac.ir

Article History

Received: December 30, 2023

Accepted: March 4, 2024

ePublished: April 4, 2024

ABSTRACT

Waspaloy is a type of nickel-based superalloy that is mainly used in aircraft turbine parts, compressor disks, shafts, and turbine parts. Waspaloy, like many nickel base superalloys, is difficult to machine at room temperature (conventional turning). In this paper, the cutting and feeding forces and cutting temperature have been evaluated by changing rotational speed, feed rate and constant depth of cut, in the dry oblique turning process of Waspaloy. The workpiece's diameter and hardness were 25 mm and 385±10 Vickers, respectively. In order to investigate of the cutting force, temperature and the surface roughness, a full factorial design experiment was used, and a regression model of the influencing factors was presented. Moreover, the surfaces roughness and micro hardness of the machined parts were evaluated. The results showed that the hardness on the surface of the workpiece increases with the increase of the cutting depth and the feed rate.

Keywords Waspaloy, Cutting and Feeding Forces, Chip Temperature, Surface Roughness, Micro Hardness.

CITATION LINKS

1- Super-nickel orthogonal turning operations optimization. 2- A physically based constitutive model for predicting the surface integrity in machining of Waspaloy. 3- Tool engage investigation in nickel superalloy turning operations. 4- Tool performance and attainable surface quality during the machining of aerospace alloys using self-propelled rotary tools. 5- Influence of microstructure on wear behaviour of uncoated WC tools in turning of Alloy 718 and Waspaloy. 6- The science and design of engineering materials. 7- Improvement of machinability of Waspaloy via laser-assisted machining. 8- Increasing tool life in machining of difficult-to-cut materials using nonconventional turning processes. 9- The effects of cutting conditions on surface integrity in machining Waspaloy. 10- Using internally cooled cutting tools in the machining of difficult-to-cut materials based on Waspaloy. 11- Experimental analysis of influence of cutting conditions on machinability of waspaloy. 12- Machinability of Waspaloy under different cutting and lubri-cooling conditions. 13- The analysis of surface topography during turning of Waspaloy with the application of response surface method. 14- Investigation of parameters for machining a difficult-to-machine superalloy: inconel X-750 and waspaloy. 15- Document Prepared by Special Metals 16- The machinability of nickel-based alloys: a review. 17- Hardness testing: principles and applications. 18- Investigation on the effects of damping over the temperature distribution on internal turning bar using Infrared fusion thermal imager analysis via SmartView software. 19- Tool wear on nickel alloys with different coolant pressures: Comparison of Alloy 718 and Waspaloy. 20- High bandwidth thermal microscopy of machining AISI 1045 steel. CIRP annals. 21- Improving surface integrity in finish machining of Inconel 718 alloy using intelligent systems. 22- Surface integrity in material removal processes: Recent advances.

مطالعه تجربی نیروهای برش، پیشروی، دمای براده و سلامت سطح در فرآیند تراشکاری ابرآلیاژ پایه نیکل واسپالوی

حمیدرضا اسرافیلی^۱، حسین امیرآبادی^{۲*}، جواد اکبری^۳، فرشید جعفریان^۴

^۱ دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

^۲ دانشکده مهندسی، دانشگاه نیشابور، نیشابور، ایران.

^۳ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

^۴ مرکز آموزش عالی محلات، محلات، ایران.

چکیده

واسپالوی یک نوع ابرآلیاژ پایه نیکل است که عمدتاً برای ساخت قطعات توربین هواپیما، دیسک‌های کمپرسور و شفت‌ها استفاده می‌شود. تراشکاری ابرآلیاژ واسپالوی مانند بسیاری از ابرآلیاژهای پایه نیکل در دمای محیط (تراشکاری مرسوم) دشوار است. در این پژوهش با تغییر در پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش به بررسی نیروهای ماشین‌کاری، دمای ایجادشده براده، صافی سطح و میکروسختی در فرآیند تراشکاری مورب ابرآلیاژ واسپالوی بدون مواد خنک کاری (ماشین‌کاری سنتی) پرداخته شد. سختی اولیه قطعه‌کار مورد آزمایش ۳۸۵±۱۰ ویکرز و قطر آن ۲۵ میلی‌متر بود. به‌منظور بررسی نیروهای برش و پیشروی و دمای براده از طراحی آزمایش کامل استفاده شد و یک مدل رگرسیونی از عوامل تأثیرگذار برای تخمین نیروی‌های تراشکاری و دمای براده ارائه گردید. همچنین صافی سطح قطعات ماشین‌کاری شده و نمودار میکروسختی قطعات ماشین‌کاری شده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش عمق برش و افزایش نرخ پیشروی سختی روی سطح قطعه‌کار افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: ابرآلیاژ واسپالوی، نیروهای برشی و پیشروی، دمای براده، صافی سطح، میکروسختی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۴

* نویسنده مسئول: hamirabadi@neyshabur.ac.ir

۱- مقدمه

ابرآلیاژهای پایه نیکل به دلیل داشتن خواص مکانیکی منحصربه‌فرد مانند مقاومت در برابر خستگی، پایداری حرارتی و مقاومت در برابر خوردگی دارای کاربری در صنایع هوافضا، موتورهای توربین‌های گازی، تجهیزات کارخانه‌های پتروشیمی، تجهیزات دریایی دارند^[۱,۲] و در صنعت به‌عنوان موادی باقابلیت ماشین‌کاری پایین شناخته‌شده‌اند^[۳]. ابرآلیاژهای پایه نیکل بیش از ۵۰٪ وزنی موتورهای هواپیما و توربین‌های گازی را به خود اختصاص داده‌اند و به دلیل ویژگی‌های خاص متالورژیکی و ترمومکانیکی در قسمت داغ توربین‌ها کاربرد دارند^[۴]. ابرآلیاژ واسپالوی (Waspaloy) یک نوع ابرآلیاژ پایه نیکل است که در دهه ۱۹۵۰ توسط شرکت پرات و ویتنی ساخته شد و عمدتاً برای قطعات توربین هواپیما، دیسک‌های کمپرسور و شفت‌ها استفاده می‌شود. ترکیبی از خواص کششی و خستگی خوب در ابرآلیاژ واسپالوی در

دماهای متوسط باعث شده است برای کاربردهای مذکور جذاب باشد و به‌عنوان یک ماده سخت که دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی است کاربرد آن را در صنایع پیشرفته همچون صنایع هوایی بسیار گسترده کرده است^[۲,۵]. به علت سخت شدن رسوب جامد در فاز غنی‌شده نیکل، پایداری ابرآلیاژ واسپالوی در دمای بالا افزایش‌یافته است. همچنین ساختار مکعبی مرکز دار و وجود فاز گاما که یک‌فاز آستنیتی پایه نیکل است و درصد زیادی از کروم، کبالت، مولیبدن و تنگستن موجب افزایش سختی این نوع ابرآلیاژ شده است. با افزایش میزان رسوبات، جابجایی کاهش می‌یابد که این موضوع باعث افزایش سختی ابرآلیاژ می‌شود^[۶].

در ابرآلیاژ واسپالوی عناصری از قبیل (Ni, Co, Cr, Ti) باعث استحکام و مقاومت در برابر خوردگی بالا می‌شود که ماشین‌کاری این ماده را مشکل می‌کند. قابلیت ماشین‌کاری پایین ابرآلیاژ واسپالوی در واقع به دلیل ویژگی‌های ذاتی مختلف آن مانند: هدایت حرارتی کم، تغییر شکل ابزار برش به دلیل سختی و استحکام بالا، سخت شدن سریع قطعه‌کار هنگام ماشین‌کاری به دلیل وجود ماتریس آستنیتی، سایش سریع ابزار به دلیل وجود کاربیدهای ساینده سخت در ریزساختار قطعه‌کار، نفوذ حرارتی پایین ماده قطعه‌کار و بالا رفتن دمای برش در نوک ابزار، واکنش شیمیایی با مواد ابزار، چسبندگی تراشه به قطعه‌کار و ابزار و تشکیل لبه‌های انباشته و جوش خوردگی ماده قطعه‌کار به لبه‌های برش است^[۱,۳,۵]. ابرآلیاژ واسپالوی از طریق فاز گاما پرایم و رسوبات کاربیدی، که مقدار آن تقریباً ۲۰ درصد حجمی در مواد پیرسازی شده است، سخت می‌شود. ابرآلیاژ واسپالوی دارای یک ماتریس آستنیتی با فاز γ است و رایج‌ترین فازهای ثانویه کاربیدهای فلزی شامل MC و M₂₃C₆ و فاز γ' ، فاز تقویت‌کننده مکعبی منظم Ni₃(Al, Ti) است. فازهای کاربید در ابرآلیاژ واسپالوی عمدتاً با قفل کردن مرزهای دانه به تقویت آن کمک می‌کند، که باعث کاهش لغزش مرز دانه در دمای بالا می‌شود^[۵]. در فرآیند تراشکاری تنش بالایی که بین ابزار و قطعه‌کار به وجود می‌آید باعث ایجاد لایه‌ای از فلز تغییر شکل یافته بر روی سطح قطعه‌کار می‌شود این تغییر شکل با ایجاد کارسختی در سطح قطعه‌کار ادامه فرآیند تراشکاری را در پاس‌های بعدی با مشکل مواجه می‌کند^[۷]. بنابراین، بررسی نیرو و دمای ایجادشده در فرآیند ماشین‌کاری این ابرآلیاژ، به‌منظور رسیدن به سطحی مطلوب و بدون ایراد، موردتوجه محققین قرار گرفته است.

کاراگوزل و همکارانش^[۸] به بررسی افزایش عمر ابزار در فرآیند تراشکاری غیرمرسوم برای ابرآلیاژهای اینکونل ۷۱۸، واسپالوی و تیتانیوم (Ti6Al4V) پرداختند. آن‌ها به‌منظور بررسی عمر ابزار نتایج تجربی دو فرآیند براده برداری تراشکاری-فرزکاری (turn-milling) و تراشکاری چرخشی (rotary turning) با تراشکاری مرسوم در آلیاژهای مذکور را مقایسه کردند. بامطالعه تأثیرات شرایط برش و خنک کاری فرایند، در هر دو روش به دلیل کاهش

ایجاد شده براده در فرایند تراشکاری مورب ابرآلیاژ واسپالوی بدون خنک‌کاری (تراشکاری سنتی) پرداخته شد. به منظور بررسی نیروی برش و دمای براده از طراحی آزمایشی عاملی کامل با سه بار تکرار استفاده شد و یک مدل رگرسیونی از عوامل تأثیرگذار برای تخمین نیروی‌های برشی و دمای براده ارائه گردید. همچنین صافی سطح و سختی سطح قطعات ماشین‌کاری شده مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- آزمایش‌های تجربی

مشخصات فیزیکی و ترکیبات شیمیایی قطعه‌کار مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱ و ۲) آورده شده است. قطعه‌کار مورد استفاده میلگرد به قطر ۲۵ میلی‌متر بود. نمونه‌های آزمون تجربی با عملیات حرارتی مطابق با استاندارد AMS۷۰۸ از سختی 270 ± 5 ویکرز به سختی 385 ± 10 ویکرز افزایش یافت و سپس عملیات ماشین‌کاری انجام شد.

جدول (۱) مشخصات فیزیکی ابرآلیاژ واسپالوی [15]

مشخصات فیزیکی	دما (سانتی‌گراد)	مقدار	واحد
چگالی	۲۱	۸/۱۹	گرم بر سانتی‌متر مکعب
محدوده ذوب	۱۳۳۰-۱۳۶۰	-	سانتی‌گراد
مدول الاستیسیته	۲۱	۲۱۱	گیگا پاسکال

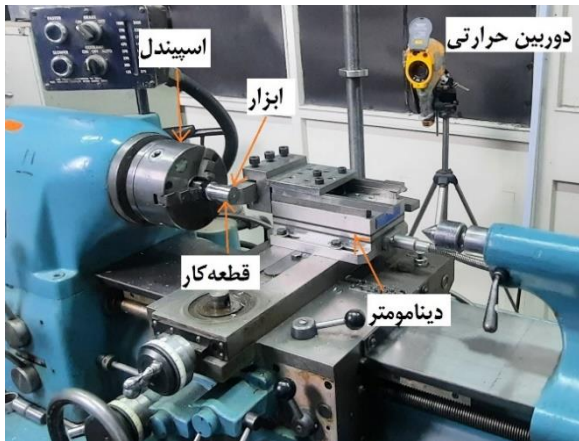
جدول (۲) عناصر تشکیل‌دهنده ابرآلیاژ واسپالوی [16]

عناصر تشکیل‌دهنده	درصد وزنی (حد بالا)	درصد وزنی (حد پایین)
Nickel	فلز پایه	فلز پایه
Chromium	۲۱/۰۰	۱۸/۰۰
Cobalt	۱۵/۰۰	۱۲/۰۰
Molybdenum	۵/۰۰	۳/۵۰
Aluminum	۱/۶۰	۱/۰۰
Titanium	۳/۲۵	۲/۶۰
Iron	۲/۰۰	---
Manganese	۱/۰۰	---
Silicon	۰/۷۵	---
Carbon	۰/۱۰	۰/۰۲
Boron	۰/۰۱	۰/۰۰۳
Zirconium	۰/۱۲	۰/۰۲
Copper	۰/۵۰	---
Sulfur	۰/۰۳۰	---

پس از انجام عملیات حرارتی آزمایش سختی سنجی ویکرز در ۵ ناحیه به صورت تصادفی روی سطح قطعه‌کار انجام شد میانگین سختی به دست آمده 385 ± 10 ویکرز بود [17]. تراشکاری مورب تمامی آزمایش‌ها به صورت تصادفی انجام گردید و هر آزمایش ۳ مرتبه تکرار شد. در این پژوهش از دستگاه ماشین تراش هاردینگ

دمای برش نسبت به روش مرسوم افزایش عمر ابزار مشاهده شد. آمبرلو و همکاران [9] به بررسی تأثیرات شرایط برش بر روی یکپارچگی سطح در فرایند تراشکاری متعامد ابرآلیاژ واسپالوی پرداختند. آن‌ها باهدف حذف مواد خنک‌کاری، اثرات سرعت برش و پیشروی بر روی یکپارچگی سطح در حین عملیات تراشکاری بر روی ابرآلیاژ واسپالوی با استفاده از یک نوع ابزار پوشش داده شده را مورد مطالعه قرار دادند. تأثیر شرایط برش در مصرف انرژی مکانیکی، سایش ابزار و برخی از شاخص‌های یکپارچگی سطح شامل: زبری سطح، لایه آسیب‌دیده، میکروسختی، اندازه دانه و تغییر میکروساختاری مورد بررسی آن‌ها قرار گرفت. نتایج نشان داد که شرایط برش تأثیرات معناداری بر پارامترهای مربوط به یکپارچگی سطح دارد که بر عملکرد کلی آن تأثیرگذار است. ایسیک [10] به بررسی تأثیرات خنک‌کاری مستقیم ابزار کاربیدی با استفاده از یک سیکل بسته در فرایند تراشکاری ابرآلیاژ واسپالوی پرداخت. نتایج به دست آمده با تراشکاری خشک مقایسه شد. نتایج نشان داد به دلیل کاهش دمای ابزار و دمای براده نسبت به ماشین‌کاری خشک، کیفیت سطح ۱۳٪ و سایش ابزار ۱۲٪ بهبود پیدا کرد. کاراسو و همکارانش [11] در سال ۲۰۱۷ به بررسی نتایج تجربی نیروهای برش و شکل براده، سایش ابزار و دما در فرایند تراشکاری متعامد ابرآلیاژ واسپالوی پرداختند. فرایند تراشکاری به دو روش خشک و روان‌کار روغن با استفاده از ابزار کاربیدی پوشش داده شده در سرعت‌های برشی و نرخ‌های پیشروی متفاوت انجام شد. نتایج تجربی نشان داد پارامترهای برش و شرایط روان‌کاری تأثیر معناداری بر نیروهای برشی، نرخ سایش ابزار، دما و مورفولوژی براده دارد. رینالدی و همکارانش [12] به بررسی قابلیت ماشین‌کاری ابرآلیاژ واسپالوی در شرایط مختلف برش، خنک‌کاری و روان‌کاری پرداختند. این تحقیق باهدف بررسی تأثیر پارامترهای برش بر روی نیروهای برشی، شکل براده، سایش ابزار و درجه حرارت بین ابزار و براده در فرایند برش متعامد انجام شد. پرزستاک و همکارانش [13] به تجزیه و تحلیل زبری سطح قطعه‌کار در فرایند تراشکاری خشک ابرآلیاژ واسپالوی پرداختند. هدف اصلی محققین تعیین شرایط بهینه تراشکاری خشک و امکان به حداقل رساندن پارامترهای زبری سطح با استفاده از متغیرهای سرعت برشی، سرعت پیشروی و عمق برش بود. ول مورگان و همکارانش [14] به بررسی و تحقیق در خصوص پارامترهای تراشکاری ابرآلیاژهای اینکونل ایکس ۷۵۰ و واسپالوی پرداختند. آزمایش‌ها باهدف تحلیل سایش ابزار، نیروهای تراشکاری و صافی سطح بر روی ابرآلیاژهای اینکونل ایکس ۷۵۰ و واسپالوی در حالت تراشکاری خشک انجام شد.

با توجه به کمبود پژوهش‌های تجربی در زمینه ماشین‌کاری ابرآلیاژ واسپالوی و نیاز مبرم صنعت به اطلاعات توانایی ماشین‌کاری این ماده در این پژوهش با تغییر در پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش به بررسی نیروی‌های ماشین‌کاری و دمای



شکل ۱) چیدمان آزمایش‌های تجربی

جدول ۳) پارامترهای طراحی آزمایش

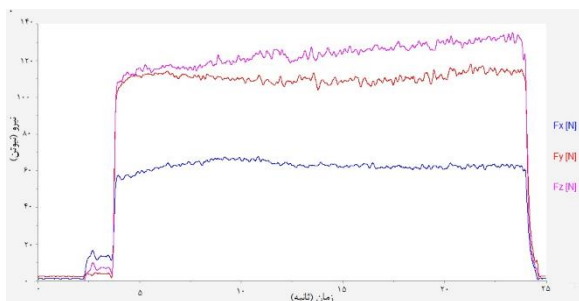
پارامترها	سطوح		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
سرعت برشی (دور بر دقیقه)	۴۰۰	۸۰۰	۱۲۰۰
نرخ پیشروی (میلی‌متر بر دور)	۰/۰۳۵	۰/۰۷۰	۰/۱۰۵
عمق برش (میلی‌متر)	۰/۳	۰/۶	۰/۹

۴- نتایج و بحث

با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی و تعداد سطوح طراحی آزمایش، تعداد ۲۷ آزمون با سه بار تکرار انجام شد. حاصل نتایج این آزمایش‌ها شامل نیروی برشی، نیروی پیشروی، دمای براده ایجادشده، زبری سطح و پروفیل میکروسختی بود.

۴-۱- نیروهای ماشین‌کاری

دینامومتر کیستلر در فرایند تراشکاری نیروی برش (Fc) (مؤلفه مماسی) را با نماد Fz، نیروی پیشروی (Ff) (مؤلفه محوری) را با نماد Fy و در نهایت نیروی پس‌پس (Fp) (مؤلفه شعاعی) را با نماد Fx نشان می‌دهد. شکل (۲) نیروهای ماشین‌کاری در سرعت برشی ۱۲۰۰ (دور بر دقیقه) نرخ پیشروی ۰/۰۳۵ (میلی‌متر بر دور) و عمق برش ۰/۶ (میلی‌متر) را نشان می‌دهد.



شکل ۲) نمایش نیروهای تراشکاری در نرم‌افزار DynoWare در سرعت ۱۲۰۰ (دور بر دقیقه) نرخ پیشروی ۰/۰۳۵ میلی‌متر بر دور و عمق برش ۰/۶ میلی‌متر

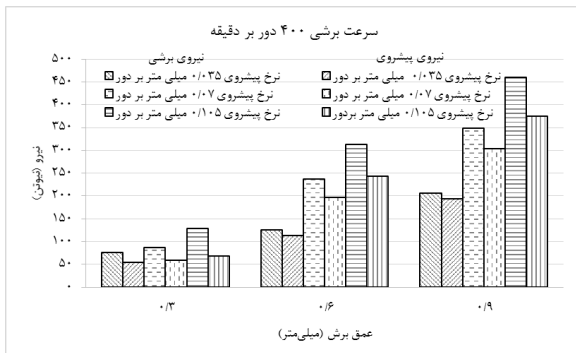
(Harding) مدل HLV-H ساخت کشور انگلستان، با حداکثر توان اسپیندل ۱/۱۲ کیلووات و دور متغیر از ۱۲۵ الی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی متغیر از ۲/۵ الی ۱۹۶ میلی‌متر بر دقیقه مستقل از یکدیگر و پیشروی شعاعی ابزار با دقت ۰/۰۲ میلی‌متر استفاده شد. نیروهای ماشین‌کاری توسط دینامومتر کیستلر مدل ۹۱۲۱ اندازه‌گیری شد. قبل از انجام آزمایش‌ها از کالیبره بودن دستگاه اطمینان به عمل آمد. به منظور داده‌برداری نیروهای ماشین‌کاری از آمپلی‌فایر ۵۰۷۰ کیستلر به همراه کارت داده‌برداری A06۹۷ کیستلر و نرم‌افزار داینور (DynoWare) استفاده شد.

به منظور اندازه‌گیری دمای براده، از دوربین حرارتی (فروسرخ) فلوک (Fluke) مدل TI۴۰۰ با بازه دمایی ۲۰- الی ۱۲۰۰+ درجه سانتی‌گراد با دقت ± 2 درجه سانتی‌گراد استفاده شد. تحلیل دمائی با استفاده از نرم‌افزار مربوط به دوربین حرارتی با نام اسمارت ویو (SmartView) انجام شد^[18]. از ترمومتر تماسی جهت اطمینان از کالیبره بودن دوربین حرارتی (فروسرخ) استفاده شد. به منظور سنجش دما توسط دوربین حرارتی فروسرخ و به حداقل رساندن اثرات ضریب تابش، با استفاده از رنگ گواش سطح قطعه‌کار قبل از ماشین‌کاری پوشش سیاه مات شد. عملیات تراشکاری با استفاده ابزار برشی کاربیدی بدون پوشش و بدون براده شکن ساخت شرکت سندویک (Sandvik) انجام شد. شعاع نوک ابزار ۰/۴ میلی‌متر بود. عدم وجود براده شکن در ابزار، امکان بررسی هندسه لبه برشی ابزار را با دقت بیشتری فراهم می‌کند^[19].

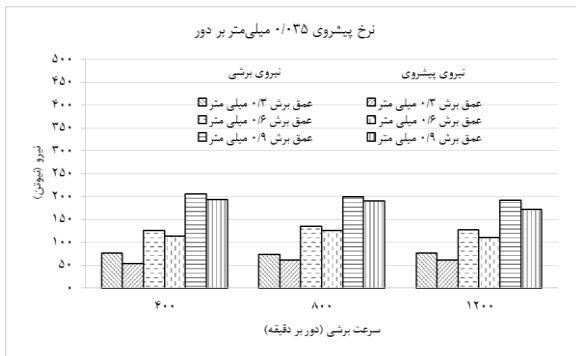
هر آزمایش منحصراً با یک لبه ابزار انجام شد. پس از انجام عملیات ماشین‌کاری صافی سطح تمامی قطعات با استفاده از زبری سنج مدل Tr-200 اندازه‌گیری شد. مقدار Ra به‌عنوان شاخص صافی سطح مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور انجام آزمایش‌های میکروسختی از سطح قطعات ماشین‌کاری شده سه نقطه روی سطح قطعه‌کار به‌صورت تصادفی انتخاب شد سپس با استفاده از دستگاه میکروسختی سنجی ساخت شرکت کوپا عملیات میکروسختی ویکرز با اعمال ۱۰۰ گرم نیرو انجام شد. چیدمان آزمایش‌های تجربی در شکل (۱) نشان داده شده است.

۳- طراحی آزمایش

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای ورودی شامل سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بر روی نیروهای ماشین‌کاری، دمای براده، صافی سطح و پروفیل میکروسختی از طراحی آزمایش عاملی کامل مطابق جدول (۳) استفاده شد. شکل (۳) تأثیر پارامترهای ورودی فرایند تراشکاری مورب (شرایط خشک) را بر نیروهای برشی نشان می‌دهد. در شکل (۳-الف) در سرعت برشی ۴۰۰ (دور بر دقیقه) و عمق برش ۰/۳ میلی‌متر با افزایش نرخ پیشروی از ۰/۰۳۵ به ۰/۰۷ (میلی‌متر بر دور) نیروی برشی ۱۵٪ و نیروی پیشروی ۹٪ افزایش یافت.



(الف)



(ب)

شکل ۳ تأثیر سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بر نیروی برشی. الف) تغییرات نیروی برشی و پیشروی در سرعت برشی ۴۰۰، برای مقادیر عمق برش و پیشروی مختلف، ب: تغییرات نیروی برشی و پیشروی در نرخ پیشروی ۰/۱۰۳۵ میلی‌متر بر دور در سرعت برشی و عمق برش مختلف

زمانی اتفاق افتاد که سرعت برش در پایین‌ترین سطح و عمق برش و نرخ پیشروی در بالاترین سطح بود.

با استفاده از نرم‌افزار مینیتب، تحلیل آماری به‌منظور بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر نیروهای برشی و پیشروی انجام شد. جدول (۴ و ۵) جدول آنالیز واریانس متغیرهای ورودی بر نیروی‌های برش و پیشروی آورده شده است.

جدول (۴ و ۵) نشان می‌دهد مقدار پی (P) از سطح معناداری (۰/۰۵) کمتر است که می‌توان نتیجه گرفت تمامی اثرات سرعت برشی و نرخ پیشروی و عمق برش دارای تأثیرات معنادار بر نیروی‌های تراشکاری شامل نیروی برشی و نیروی پیشروی دارد. در این مطالعه یک مدل رگرسیونی نمائی مطابق رابطه (۱ و ۲) با ضریب همبستگی (R²) برابر با ۰/۹۶ و ۰/۹۴ جهت تخمین مناسب نیروی برشی و پیشروی به دست آمد.

$$F_c(N) = \exp(Y')$$

$$Y' = 3.8827 - 0.001041 V_c (\text{rpm}) + 0.026880 a_f (\text{mm/rev}) + 1.7013 a_p (\text{mm}) \quad (1)$$

با افزایش نرخ پیشروی از ۰/۰۷ به ۰/۱۰۵ نیروی برشی و نیروی پیشروی به ترتیب ۶۱ و ۱۷٪ بیشتر شد. با افزایش نرخ پیشروی از ۰/۰۳۵ به ۰/۱۰۵، نیروی برشی ۶۸٪ و نیروی پیشروی ۲۸٪ افزایش یافت. با افزایش عمق برش از ۰/۳ میلی‌متر به ۰/۶ میلی‌متر و افزایش نرخ پیشروی از ۰/۰۳۵ به ۰/۰۷ (میلی‌متر بر دور) نیروی برشی ۸۸٪ و نیروی پیشروی ۷۳٪ افزایش یافت و با افزایش نرخ پیشروی از ۰/۰۷ به ۰/۱۰۵ نیروی برشی و نیروی پیشروی به ترتیب ۳۲ و ۲۴٪ بیشتر شد. با افزایش نرخ پیشروی از ۰/۰۳۵ به ۰/۱۰۵، نیروی برشی ۱۴۸٪ و نیروی پیشروی ۱۱۵٪ افزایش یافت. با افزایش عمق برش از ۰/۳ میلی‌متر به ۰/۹ میلی‌متر و افزایش نرخ پیشروی از ۰/۰۳۵ به ۰/۰۷ (میلی‌متر بر دور) نیروی برشی ۶۹٪ و نیروی پیشروی ۵۷٪ افزایش یافت. با افزایش نرخ پیشروی از ۰/۰۷ به ۰/۱۰۵، نیروی برشی و نیروی پیشروی به ترتیب ۳۲ و ۲۳٪ بیشتر شد. با افزایش نرخ پیشروی از ۰/۰۳۵ به ۰/۱۰۵، نیروی برشی ۱۲۳٪ و نیروی پیشروی ۹۳٪ افزایش یافت. در تمامی موارد مشاهده شد با افزایش نرخ براده برداری نیروی‌های برشی و نیروی‌های پیشروی افزایش می‌یابند. با افزایش نرخ پیشروی و عمق برش، بار براده روی ابزار افزایش می‌یابد، در نتیجه نیروی تراشکاری افزایش خواهد یافت. همچنین افزایش نیرو ناشی از افزایش نرخ براده برداری به دلیل افزایش طول تماس ابزار و قطعه‌کار و اثر کرنش سختی بین ماده قطعه‌کار و ابزار برشی در زمان ماشین‌کاری است.

در شکل (۳-ب) با افزایش سرعت برشی از ۴۰۰ به ۸۰۰ (دور بر دقیقه) در عمق برش ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ میلی‌متر و نرخ پیشروی ۰/۱۰۳۵ میلی‌متر بر دور، نیروی برش نسبت حالت قبل به ترتیب ۶۳، ۶۴ و ۷۸٪ و نیروی پیشروی به ترتیب ۱۶، ۵۰ و ۷۸٪ کاهش می‌یابد. در حقیقت با افزایش سرعت برشی و افزایش دمای براده تغییر شکل نیافته دمای ناحیه صفحه برش و دمای ناحیه اصطکاکی براده ابزار افزایش می‌یابد و این افزایش دما منتج به کاهش تنش جریان برشی در صفحه برش و ناحیه اصطکاکی براده و ابزار و نرم شدن قطعه‌کار و شکل‌گیری راحت‌تر آن می‌شود. همچنین با افزایش سرعت برشی به ۱۲۰۰ (دور بر دقیقه) در نرخ پیشروی ۰/۰۳۵ میلی‌متر بر دور مشاهده می‌شود، حرارتی که به براده تغییر شکل نیافته وارد می‌شود بیشتر از دو حالت قبل شده (این نتایج توسط آزمون‌های حرارت سنجی که در قسمت بعد بیان می‌گردد، تأیید می‌شود) و با افزایش دمای براده تغییر شکل نیافته نیروی برشی کاهش می‌یابد. لازم است توجه شود که گرادیان دمایی با افزایش سرعت برشی کاهش خواهد یافت. با افزایش عمق برش نیروهای برشی به دلیل افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته و افزایش حجم براده تشکیل شده، افزایش می‌یابد. در این ابرآلیاژ سایش ابزار و تشکیل لبه انباشته سبب افزایش نیروی برش خواهد شد. در این آزمایش بیشترین تغییرات نیروی برش

جدول ۴) تأثیرات سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بر نیروی برشی

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	عدد فیشر	مقدار پی
مدل	۲۶	۸۰۲۴۶۰	۳۰۸۶۴	۱۷۹۰/۲۷	۰/۰۰۰
خطی	۶	۶۷۰۵۸۳	۱۱۱۷۶۴	۶۴۸۲/۹۱	۰/۰۰۰
سرعت برشی (دور بر دقیقه)	۲	۲۱۳۵۴۸	۱۰۶۷۷۴	۶۱۹۳/۴۷	۰/۰۰۰
نرخ پیشروی (میلی متر بر دور)	۲	۱۶۵۰۷۷	۸۲۵۳۹	۴۷۸۷/۶۸	۰/۰۰۰
عمق برش (میلی متر)	۲	۲۹۱۹۵۸	۱۴۵۹۷۹	۸۴۶۷/۵۷	۰/۰۰۰
۲- اثر متقابل	۱۲	۱۲۳۳۳۱	۱۰۲۷۸	۵۹۶/۱۶	۰/۰۰۰
سرعت برشی × نرخ پیشروی	۴	۲۲۵۹۶	۵۶۴۹	۳۲۷/۶۸	۰/۰۰۰
سرعت برشی × عمق برش	۴	۶۲۶۹۸	۱۵۶۷۴	۹۰۹/۲۰	۰/۰۰۰
نرخ پیشروی × عمق برش	۴	۳۸۰۳۷	۹۵۰۹	۵۵۱/۵۹	۰/۰۰۰
۳- اثر متقابل	۸	۸۵۴۵	۱۰۶۸	۶۱/۹۶	۰/۰۰۰
سرعت برشی × نرخ پیشروی × عمق برش	۸	۸۵۴۵	۱۰۶۸	۶۱/۹۶	۰/۰۰۰
خطا	۵۴	۹۳۱	۱۷		
جمع کل	۸۰	۸۰۳۳۹۱			

جدول ۵) تأثیرات سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بر نیروی پیشروی

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	عدد فیشر	مقدار پی
مدل	۲۶	۵۶۵۱۶۸	۲۱۷۳۷	۱۹۱۸/۶۶	۰/۰۰۰
خطی	۶	۴۸۰۸۳۷	۸۰۱۴۰	۷۰۷۳/۶۱	۰/۰۰۰
سرعت برشی (دور بر دقیقه)	۲	۹۹۳۵۶	۴۹۶۷۸	۴۳۸۴/۸۸	۰/۰۰۰
نرخ پیشروی (میلی متر بر دور)	۲	۷۸۳۵۶	۳۹۱۷۸	۳۴۵۸/۰۷	۰/۰۰۰
عمق برش (میلی متر)	۲	۳۰۳۱۲۶	۱۵۱۵۶۳	۱۳۳۷۷/۸۶	۰/۰۰۰
۲- اثر متقابل	۱۲	۷۵۶۴۱	۶۳۰۳	۵۵۶/۳۸	۰/۰۰۰
سرعت برشی × نرخ پیشروی	۴	۹۵۱۶	۲۳۷۹	۹۹۹/۲۰	۰/۰۰۰
سرعت برشی × عمق برش	۴	۴۶۰۶۷	۱۱۵۱۷	۱۰۱۶/۵۵	۰/۰۰۰
نرخ پیشروی × عمق برش	۴	۲۰۰۵۸	۵۰۱۴	۴۴۲/۶۱	۰/۰۰۰
۳- اثر متقابل	۸	۸۶۸۹	۱۰۸۶	۹۵/۸۷	۰/۰۰۰
سرعت برشی × نرخ پیشروی × عمق برش	۸	۸۶۸۹	۱۰۸۶	۹۵/۸۷	۰/۰۰۰
خطا	۵۴	۶۱۲	۱۱		
جمع کل	۸۰	۵۶۵۷۸۰			

۴-۲- دمای ماشین کاری

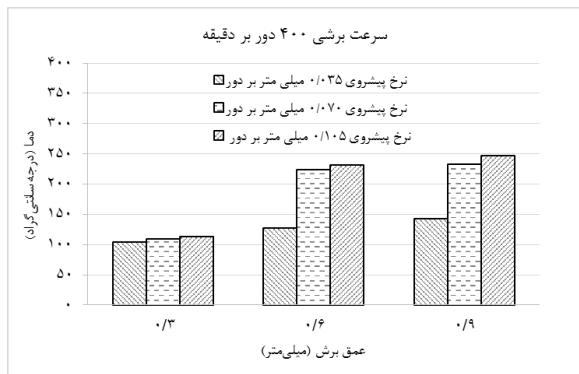
اندازه‌گیری و مقایسه دمای ماشین کاری در فرایند تراشکاری متعامد اغلب بر اساس حداکثر دمای اندازه‌گیری شده بر روی صفحه براده‌ی ابزار است [20]. در این تحقیق به دلیل عدم دسترسی به محل ناحیه تماس ابزار و براده و همچنین ناحیه اول برش، دمای براده تشکیل شده با استفاده از دوربین حرارتی فرورسرخ

$$F_f(N) = \exp(Y') \quad (2)$$

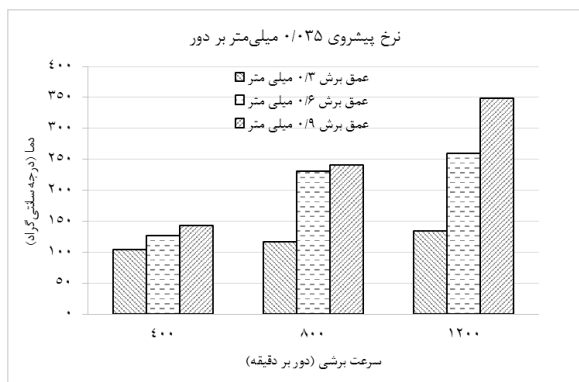
$$Y' = 3.5623 - 0.000814 V_c \text{ (rpm)} + 0.020811 a_f \text{ (mm/rev)} + 2.0092 a_p \text{ (mm)}$$

که V_c سرعت برشی (دور بر دقیقه)، a_f نرخ پیشروی (میلی متر بر دور)، a_p عمق برش (میلی متر)، F_c نیروی برشی (نیوتن) و F_f نیروی پیشروی (نیوتن) است.

بیشترین افزایش دما زمانی مشاهده شد که تمامی متغیرها در بالاترین سطح خود قرار دارند.



(الف)



(ب)

شکل ۵) تأثیر سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بر دمای براده، الف: تغییرات دمای براده در سرعت برشی 400، برای مقادیر عمق برش و نرخ پیشروی مختلف، ب: تغییرات دمای براده در نرخ پیشروی 0.135 میلی‌متر بر دور در سرعت برشی و عمق برش مختلف

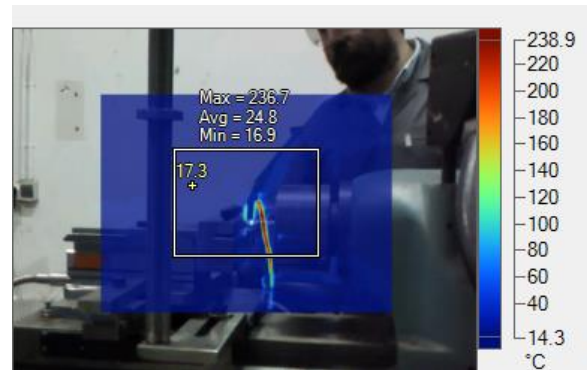
با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب، تحلیل آماری به‌منظور بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر دمای براده انجام شد. جدول (۶) آنالیز واریانس متغیرهای ورودی بر دمای براده نشان داده شده است. جدول (۶) نشان می‌دهد مقدار پی (P) در تمامی سطوح از سطح معناداری (0.05) کمتر است. در این مطالعه یک مدل رگرسیونی نمائی مطابق رابطه (۳) با ضریب همبستگی (R2) برابر با 0.80 جهت تخمین مناسب دمای براده به دست آمد.

$$\text{Temp.} = \exp(Y')$$

$$Y' = 3.9054 + 0.000331 V_c \text{ (rpm)} \quad (3)$$

$$+ 0.012499 a_f \text{ (mm/rev)} + 1.1157 a_p \text{ (mm)}$$

اندازه‌گیری شد. شکل (۴) نشان می‌دهد با تغییرات سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش، دمای براده تشکیل‌شده رفتار قابل پیش‌بینی از خود نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت برشی دمای براده افزایش‌یافته همچنین در سرعت‌های برشی ثابت با افزایش نرخ پیشروی دمای براده تشکیل‌شده افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است حرارت تولیدی در ناحیه تراشکاری بین ابزار، قطعه‌کار، براده و خنک‌کننده تقسیم می‌گردد (در این تحقیق تراشکاری در شرایط خشک و بدون ماده خنک‌کننده انجام شد) که مقدار آنها با توجه به شرایط ورودی با هم متفاوت است. در این پژوهش تغییرات دمای براده تشکیل‌شده در محدوده 100 الی 350 درجه مشاهده شد. شکل (۵) تصویر نمایش داده شده در دوربین حرارتی را در حین عملیات تراشکاری نشان می‌دهد.



شکل ۴) تحلیل دما با استفاده از نرم‌افزار SmartView در سرعت 800 (دور بر دقیقه)، نرخ پیشروی 0.135 میلی‌متر بر دور و عمق برش 0.16 میلی‌متر

شکل (۵-الف) تغییرات دمای براده را در سرعت برشی 400 (دور بر دقیقه)، عمق برش 0.13، 0.16، 0.19 میلی‌متر و نرخ پیشروی 0.135، 0.17، 0.105 میلی‌متر بر دور نشان می‌دهد. در عمق برش 0.13 میلی‌متر افزایش دمای براده با افزایش نرخ پیشروی از 0.135 به 0.17 و از 0.17 به 0.105 به مقدار 4% و از 0.135 به 0.105 به مقدار 9% مشاهده شد. با افزایش عمق برش به 0.16 میلی‌متر افزایش دمای براده با تغییرات نرخ پیشروی به ترتیب 77، 4 و 83% بود. زمانیکه عمق برش 0.19 میلی‌متر است. مقدار افزایش دمای براده برای نرخ‌های پیشروی مذکور به ترتیب 6.63، 72% و 72% مشاهده شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تأثیر نرخ پیشروی در عمق برش 0.13 میلی‌متر بسیار کمتر از زمانی است که عمق برش افزایش می‌یابد و پیشروی از 0.135 به 0.17 میلی‌متر بر دور تغییر می‌کند، دلیل آن را می‌توان این حقیقت دانست که با افزایش هم‌زمان نرخ پیشروی و عمق برش اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار در ناحیه تماس ابزار و براده تغییر شکل یافته بیشتر شده و این امر باعث افزایش دما می‌شود. در شکل (۵-ب) با افزایش سرعت برشی و افزایش عمق برش دمای براده افزایش یافت. به‌طور خاص

جدول ۶) تأثیرات سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بر دمای براده

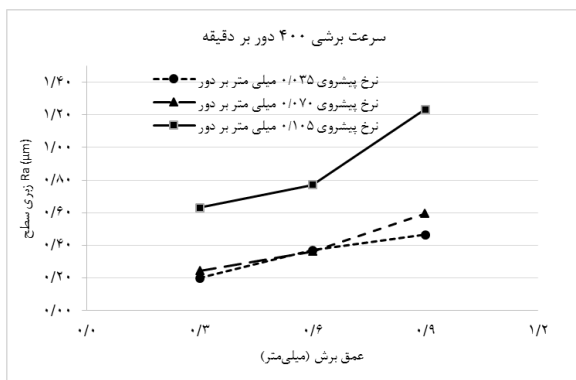
منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	عدد فیشر	مقدار پی
مدل	۲۶	۳۸۲۶۶۷	۳۸۲۶۶۷	۱۱۴/۶۶	۰/۰۰۰
خطی	۶	۳۳۱۸۹۰	۵۵۳۱۵	۴۳۰/۹۴	۰/۰۰۰
سرعت برشی (دور بر دقیقه)	۲	۳۹۵۱۶	۱۹۷۵۸	۱۵۳/۹۳	۰/۰۰۰
نرخ پیشروی (میلی‌متر بر دور)	۲	۷۱۸۰۹	۳۵۹۰۴	۲۷۹/۷۲	۰/۰۰۰
عمق برش (میلی‌متر)	۲	۲۲۰۵۶۴	۱۱۰۲۸۲	۸۵۹/۱۸	۰/۰۰۰
۲- اثر متقابل	۱۲	۴۶۷۱۵	۳۸۹۳	۳۰/۳۳	۰/۰۰۰
سرعت برشی × نرخ پیشروی	۴	۱۲۱۴	۳۰۳	۲/۳۶	۰/۰۴۴
سرعت برشی × عمق برش	۴	۱۵۳۵۶	۳۸۳۹	۲۹/۹۱	۰/۰۰۰
نرخ پیشروی × عمق برش	۴	۳۰۱۴۵	۷۵۳۶	۵۸/۷۱	۰/۰۰۰
۳- اثر متقابل	۸	۴۰۶۳	۵۰۸	۳/۹۶	۰/۰۰۱
سرعت برشی × نرخ پیشروی × عمق برش	۸	۴۰۶۳	۵۰۸	۳/۹۶	۰/۰۰۱
خطا	۵۴	۶۹۳۱	۱۲۸		
جمع کل	۸۰	۳۸۹۵۹۹			

۳-۴- زیری سطح

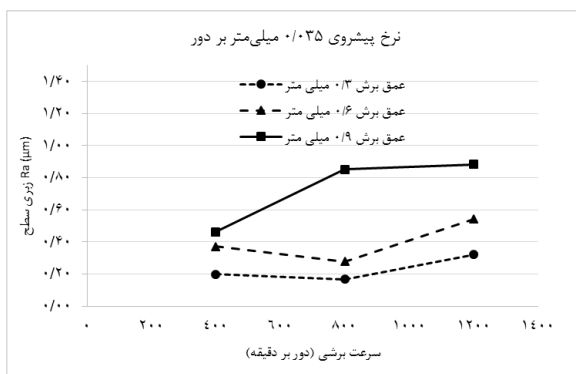
زبری سطح قطعات ماشین‌کاری شده توسط دستگاه زبری سنج مدل TR-200 انجام شد. از ۳ ناحیه مختلف روی سطح ماشین‌کاری شده آزمایش زبری سنجی گرفته شد [21]. هر آزمایش شامل پنج سیکل و هر سیکل ۲/۵ میلی‌متر بود. Ra به عنوان شاخص ارزیابی زبری سطح مورد مطالعه قرار گرفت. شکل (۶) تغییرات میانگین زبری سطح در سرعت‌های برشی، نرخ پیشروی و عمق برش متفاوت را نشان می‌دهد. شکل (۶-الف) نشان می‌دهد در سرعت برشی ثابت با افزایش نرخ پیشروی و عمق برش از کیفیت زبری سطح کاسته می‌شود. در شکل (۶-ب) با افزایش سرعت برشی و عمق برش در شرایطی که نرخ براده برداری ثابت است کیفیت سطح کم می‌شود. عدم افزایش کیفیت زبری سطح با افزایش سرعت برشی را می‌توان تغییرات نرخ کرنش برشی و ایجاد لبه انباشته در هنگام عملیات ماشین‌کاری دانست. کیفیت سطح با شاخص Ra کمتر از ۰/۲ میکرومتر معادل فرایند سنگ‌زنی می‌باشد [9].

۴-۴- تغییرات میکروسختی

در انجام فرایند تراشکاری ترکیب کرنش‌های بالا، نرخ کرنش و دما باعث ایجاد تغییر ریزساختار در زیر سطح قطعه‌کار و در نتیجه تغییر در سختی قطعه‌کار می‌شود [22]. در ابرآلیاژ واسپالوی بارهای ترمومکانیکی ناشی از فرایند برش سبب پدیده‌های متالورژیکی همانند تغییر شکل دانه‌ها، تغییرات در چگالی جابجایی و منطقه تجمع آنها، تبلور مجدد دینامیکی که خود باعث تشکیل ریزساختارهای جدید می‌شود و همچنین تغییرات فاز را به همراه دارد. به طور معمول، لایه آسیب‌دیده دارای ازدیاد طول دانه در جهت برش، تشکیل لایه سفید و تبلور مجدد دینامیکی است. در



(الف)



(ب)

شکل ۶) تأثیر سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بر زبری سطح ماشین‌کاری شده، الف: تغییرات زبری سطح ماشین‌کاری شده در سرعت برشی ۴۰۰، برای مقدار مختلف عمق برش و نرخ پیشروی، ب: تغییرات زبری سطح ماشین‌کاری شده در نرخ پیشروی ۰/۰۳۵ میلی‌متر بر دور در سرعت برشی و عمق برش مختلف

حالت بیشینه قرار داشت. که دلیل آن به واسطه افزایش سرعت برشی به دلیل افزایش دمای براده تغییر شکل نیافته، افزایش دما در ناحیه صفحه برش و ایجاد لبه انباشته ابزار است. بنابراین در ماشینکاری واسپالوی می‌بایست از سرعت برشی پایین و نرخ پیشروی کم استفاده شود.

همچنین با افزایش نرخ پیشروی به دلیل افزایش طول تماس ابزار و قطعه کار و افزایش نرخ براده برداری دمای بیشتری در ناحیه صفحه برش ایجاد می‌شود که باعث افزایش دمای ماشینکاری می‌گردد. بهترین صافی سطح در حالتی مشاهده شد که سرعت برشی مقدار ۸۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی و عمق برش در حالت کمینه قرار داشت. مشاهده شد در عمق برش ۰/۳ و ۰/۶ میلی‌متر با افزایش سرعت برشی از ۴۰۰ دور بر دقیقه به ۸۰۰ دور بر دقیقه در شرایطی که نرخ پیشروی ثابت بود کیفیت صافی سطح بهبود یافت. با افزایش سرعت برش از ۸۰۰ به ۱۲۰۰ دور بر دقیقه کیفیت صافی سطح کاهش یافت همچنین در عمق برش ۰/۹ میلی‌متر در شرایطی که نرخ پیشروی ثابت بود کیفیت سطح کاهش یافت که دلایل آن را می‌توان ایجاد لبه انباشته دانست. میکروسختی سطح قطعات ماشینکاری شده نشان داد سختی مشاهده شده بیشتر از سختی قطعه قبل از ماشینکاری بود که دلیل آن افزایش نیروهای برشی، حجم براده تولید شده و کرنش سختی ایجاد شده است.

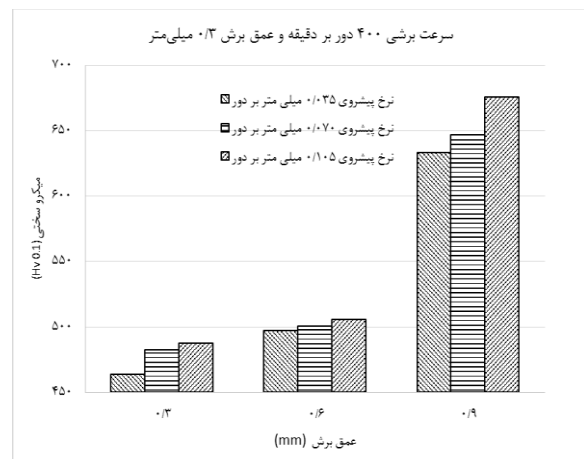
تشکر و قدردانی: نویسندگان این پژوهش بدین وسیله کمال تشکر و سپاسگزاری خود را از جناب آقای مهندس علیدادی مدیرعامل محترم شرکت دانش‌بنیان مهندسی ارتعاشات نوآوران پایش جهت در اختیار قرار دادن دوربین حرارتی، جناب آقای مهندس اکبری مدیرعامل محترم شرکت دانش‌بنیان المان صنعت سیستم بابت کمک در انجام عملیات حرارتی ابرآلیاژ وسپالوی، جناب آقای مهندس بیات (دانشجوی مقطع دکتری مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف) و جناب آقای مهندس اعظمی (مسئول محترم کارگاه ماشینکاری دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف) بابت همکاری در انجام آزمایش‌ها به عمل می‌آورند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان این تحقیق اقرار می‌نمایند که تمامی نتایج مندرج در این مقاله حاصل تحقیق صورت گرفته توسط ایشان و نتایج به‌دست‌آمده از آن است.

تعارض منافع: مقاله حاضر با هیچ شخص یا سازمانی تعارض منافع ندارد.

منابع مالی: کلیه هزینه‌ای انجام شده جهت انجام این تحقیق از منابع شخصی صورت گرفته است.

شرایط ماشینکاری برخی از دانه‌ها شروع به تبلور مجدد می‌کنند، که منجر به تقویت و سخت شدن مواد قطعه کار می‌شوند [2]. در این تحقیق با استفاده از دستگاه میکروسختی سنجی ساخت شرکت کوپا، عملیات میکروسختی ویکرز با اعمال ۱۰۰ گرم نیرو انجام شد. از سه ناحیه مختلف روی سطح ماشینکاری شده آزمایش میکروسختی انجام شد. شکل (۷) میانگین اندازه میکروسختی از سطح ماشینکاری شده را در شرایطی نشان می‌دهد که سرعت برشی ۴۰۰ و عمق برش و نرخ پیشروی مختلف است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود سختی روی سطح قطعه ماشینکاری شده بیشتر از سختی قبل از ماشینکاری است. دلیل این افزایش را می‌توان به واسطه افزایش نیروهای برشی و به دلیل افزایش حجم براده تولید شده و کرنش سختی ایجاد شده دانست.



(الف)

شکل ۷ تأثیر سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بر تغییرات میکروسختی، الف: تغییرات نمودار میکروسختی در سرعت برشی ۴۰۰ دور بر دقیقه برای مقادیر مختلف عمق برش و نرخ پیشروی

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تأثیر پارامترهای فرایند تراشکاری شامل سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بر نیروی‌های تراشکاری، دمای براده، صافی سطح و میکروسختی قطعات ماشینکاری شده پرداخته شد. مشاهده شد تأثیر پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش بر روی نیروی‌های ماشینکاری معنادار و قابل توجه است. مدل رگرسیونی نمائی با ضرایب همبستگی ۰/۹۶ و ۰/۹۴ برای نیروهای برشی و پیشروی پیشنهاد شد تا مقادیر نیروی‌های تراشکاری با تخمین مناسبی پیش‌بینی شود. همچنین برای به‌دست آوردن دمای براده حاصل از فرایند تراشکاری یک مدل رگرسیونی نمائی با ضرایب همبستگی ۰/۸۰ پیشنهاد شد.

در این تحقیق بیشترین مقدار نیروی برشی و پیشروی به ترتیب ۶۱ و ۳۷۴ نیوتن در شرایطی مشاهده شد که سرعت برشی ۴۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۰/۱۰۵ میلی‌متر بر دور و عمق برش ۰/۹ میلی‌متر بود. با افزایش سرعت برشی و نرخ پیشروی در تمامی آزمایش‌ها دمای ماشینکاری افزایش یافت. بیشترین دمای براده زمانی مشاهده شد که سرعت برش، نرخ پیشروی و عمق برش در

منابع

- 15- [Available from: Document Prepared by Special Metals on Waspaloy Accessed from <http://www.specialmetals.com/documents/Waspaloy>.]
- 16- Ezugwu EO, Wang ZM, Machado AR. The machinability of nickel-based alloys: a review. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999 Feb 15;86(1-3):1-6.
- 17- Herrmann K, editor. *Hardness testing: principles and applications*. ASM international; 2011.
- 18- Paramasivam B. Investigation on the effects of damping over the temperature distribution on internal turning bar using Infrared fusion thermal imager analysis via SmartView software. *Measurement*. 2020 Oct 1;162:107938.
- 19- Polvorosa R, Suárez A, de Lacalle LL, Cerrillo I, Wretland A, Veiga F. Tool wear on nickel alloys with different coolant pressures: Comparison of Alloy 718 and Waspaloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017 Apr 1;26:44-56.
- 20- Davies MA, Cooke AL, Larsen ER. High bandwidth thermal microscopy of machining AISI 1045 steel. *CIRP annals*. 2005 Jan 1;54(1):63-6.
- 21- Jafarian F, Amirabadi H, Fattahi M. Improving surface integrity in finish machining of Inconel 718 alloy using intelligent systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014 Mar;71:817-27.
- 22- Jawahir IS, Brinksmeier E, M'saoubi R, Aspinwall DK, Outeiro JC, Meyer D, Umbrello D, Jayal AD. Surface integrity in material removal processes: Recent advances. *CIRP annals*. 2011 Jan 1;60(2):603-26.
- 1- Del Prete A, Primo T, Franchi R. Super-nickel orthogonal turning operations optimization. *Procedia CIRP*. 2013 Jan 1;8:164-9.
- 2- Imbrogno S, Rinaldi S, Umbrello D, Filice L, Franchi R, Del Prete A. A physically based constitutive model for predicting the surface integrity in machining of Waspaloy. *Materials & design*. 2018 Aug 15;152:140-55.
- 3- Del Prete A, de Vitis AA, Filice L, Caruso S, Umbrello D. Tool engage investigation in nickel superalloy turning operations. *Key Engineering Materials*. 2012 Apr 4;504:1305-10.
- 4- Kishawy HA, Becze CE, McIntosh DG. Tool performance and attainable surface quality during the machining of aerospace alloys using self-propelled rotary tools. *Journal of materials processing technology*. 2004 Oct 30;152(3):266-71.
- 5- Olovsjö S, Nyborg L. Influence of microstructure on wear behaviour of uncoated WC tools in turning of Alloy 718 and Waspaloy. *Wear*. 2012 Apr 5;282:12-21.
- 6- Schaffer JP, Saxena A, Antolovich SD, Sanders TH, Warner SB. *The science and design of engineering materials*: Irwin Chicago; 1995.
- 7- Ding H, Shin YC. Improvement of machinability of Waspaloy via laser-assisted machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013 Jan;64:475-86.
- 8- Karaguzel U, Olgun U, Uysal E, Budak E, Bakkal M. Increasing tool life in machining of difficult-to-cut materials using nonconventional turning processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015 Apr;77:1993-2004.
- 9- Umbrello D. The effects of cutting conditions on surface integrity in machining Waspaloy. *Key Engineering Materials*. 2014 Jul 1;611:1243-9.
- 10- Isik Y. Using internally cooled cutting tools in the machining of difficult-to-cut materials based on Waspaloy. *Advances in Mechanical Engineering*. 2016 May 3;8(5):1687814016647888.
- 11- Caruso S, Rinaldi S, Franchi R, Del Prete A, Umbrello D. Experimental analysis of influence of cutting conditions on machinability of waspaloy. In *AIP Conference Proceedings 2017 Oct 16 (Vol. 1896, No. 1)*. AIP Publishing.
- 12- Rinaldi S, Caruso S, Umbrello D, Filice L, Franchi R, Del Prete A. Machinability of Waspaloy under different cutting and lubri-cooling conditions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018 Feb;94:3703-12.
- 13- Przystacki D, Chwalczuk T. The analysis of surface topography during turning of Waspaloy with the application of response surface method. In *MATEC Web of Conferences 2017 (Vol. 136, p. 02006)*. EDP Sciences.
- 14- Vetri Velmurugan K, Venkatesan K, Devendiran S, Mathew AT. Investigation of parameters for machining a difficult-to-machine superalloy: inconel X-750 and waspaloy. In *Innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering (I-DAD 2018) Volume 2 2019 (pp. 199-215)*. Springer Singapore.