



بررسی تجربی صافی سطح و سلامت سطح در فرایند تراش کاری داغ فولاد ضدزنگ 17-4 PH(AISI630) به کمک روان کاری کمینه (MQL)

امیرحسین مقدسی^۱، محمد جعفر حداد^{۲*}، محمدکاظمی نصر آبادی^۳

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک-ساخت و تولید، دانشگاه تهران، تهران

۲- استادیار، مهندسی مکانیک-ساخت و تولید، دانشگاه تهران، تهران

۳- استادیار، مهندسی مکانیک-طراحی جامدات، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳۹۷۴۳۶۸۳، mjhadad@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۳ دی ۱۳۹۷

پذیرش: ۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۸

ارائه در سایت: دی ۱۳۹۸

کلیدواژگان:

مواد سخت برش

ماشین کاری داغ

صافی سطح

روان کاری کمینه (MQL)

فولاد ضدزنگ PH 17-4 یکی از فولادهای ضدزنگ با استحکام بالا می باشد که کاربرد بسیاری در صنایع نظامی، نفت و گاز و غیره دارد که به دلیل استحکام بالا مانند دیگر مواد سخت برش ماشین کاری آن دارای معضلات بسیاری می باشد. با توجه به پیشرفت های بسیار در بهبود خواص مواد به ویژه استحکام و سختی آن ها در سال های اخیر، این امر اهمیت بیشتری به خود گرفته است. استفاده از منبع حرارتی کنترل شونده در کنار ماشین کاری (ماشین کاری داغ) به عنوان شیوه ای کارآمد برای ماشین کاری مواد سخت برش معرفی شده است. این امر همچنین باعث بهبود چشمگیر پارامترهای خروجی فرایند می شود. برای از بین بردن معضلات دیگر مانند سایش ابزار و نفوذ در دمای بالا در کنار فرایند از روان کاری کمینه (MQL) استفاده شده است. صافی سطح به عنوان یک پارامتر مهم در ماشین کاری به علت استحکام و سختی بسیار بالا یکی از چالش های ماشین کاری این فولاد می باشد. با استفاده از این روش صافی سطح و همین طور سلامت سطح نهایی به مقدار بسیار چشمگیری بهبود یافته است. در این پژوهش تأثیر سرعت برشی، سرعت برشی و دمای اعمال شده در فرایند بر صافی سطح و سلامت سطح در فرایند تراش کاری بررسی شده است. با استفاده از ماشین کاری ترکیبی صافی سطح نهایی ۷۰ تا ۱۰۰ درصد بهبود داده شده است و همچنین بدست آوردن پروفیل یکنواخت زبری سطح نیز نشان داده شده است. ماشین کاری ترکیبی نشان داده است که تمامی عیوب سطحی مانند ترک و میکروترک ها و همچنین ذرات چسبیده شده روی سطح را از بین می برد که نشان دهنده بهبود چشمگیر در استحکام خستگی نیز می تواند باشد.

Experimental Study on surface roughness and quality of Hybrid MQL and Thermally-Enhanced Turning of Stainless Steel 17-4 PH (AISI 630)

Amir Hossein Moghadasi¹, Mohammad Jafar Hadad^{1*}, Mohammad kazemi Nasrabadi²

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

2- Department of Mechanical Engineering, Shahid Sattari University, Tehran, Iran

* P.O.B. 1439743683 Tehran, Iran, mjhadad@ut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 3 January 2019
Accepted 18 May 2019
Available December 2019

Keywords:

Hard to cut materials
Heat assisted machining
Surface integrity
Minimum quantity lubrication (MQL)

Abstract

17-4 stainless steel is one of the high strength stainless steel that is widely used in military, oil and gas industries, which has many problems due to its high strength, such as other new and high strength materials face to a lot of problems. Due to great improvement in material properties especially their strength and hardness in recent years, this has become more evident. The use of controlled heat source along with machining (hot machining) (heat assisted machining) has been introduced as an efficient way for machining hard-cutting materials. This also significantly improves the process output parameters. Minimum quantity lubrication (MQL) has been used to eliminate other dangers, such as tool wear and high temperature infiltration. The surface roughness as an important parameter in machining due to its high strength and hardness is one of the challenges of machining this steel. Using this method, surface integrity have improved significantly. In this study, the effect of cutting velocity, feed rate and applied temperature on the surface have been investigated on the surface integrity. The surface roughness has been improved by using a hybrid machining up to 70 to 100%, as well as a uniform surface roughness profile. The hybrid machining has shown that all surface imperfections, such as cracks and micro cracks, sticking particles Eliminates at the surface, which can indicate a dramatic improvement in fatigue strength.

۱- مقدمه

در بسیاری از کاربردهای مهندسی، قطعات مکانیکی باید قابل تعویض باشند تا بتوانند عملکرد مناسب و قابل اعتمادی را در یکی از مهمترین فرایندهای ساخت و تولید، ماشین کاری است.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. H. Moghadasi, M. J. Hadad, M. kazemi Nasrabadi, Experimental Study on surface roughness and quality of Hybrid MQL and Thermally-Enhanced Turning of Stainless Steel 17-4 PH (AISI 630), Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 8, pp. 21-32, 2019 (in Persian)

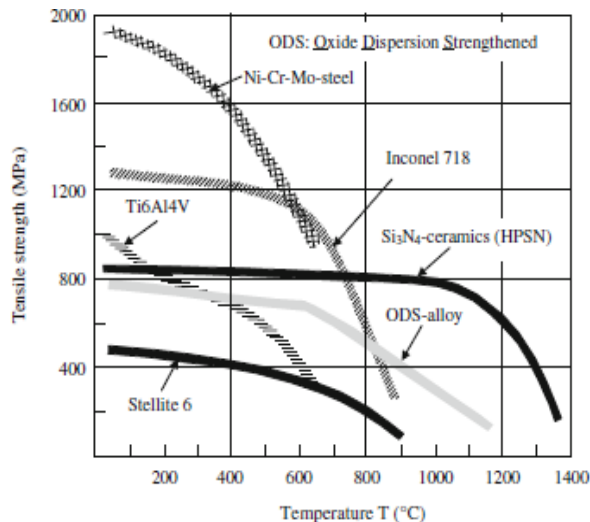


Fig. 1 Variations of hard-cutting materials in a ratio to temperature changes [1]

شکل ۱ وابستگی استحکام تسلیم برخی مواد سخت برش به دما [۱]

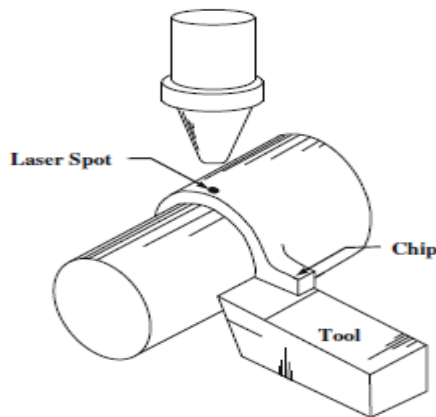


Fig. 2 Laser-assisted turning [4]

شکل ۲ شماتیک فرایند تراش کاری داغ به کمک لیزر [۴]

روان کاری و خنک کاری کمینه (MQL): پژوهشگران و مهندسان صنایع مختلف با به کارگیری روش‌های مختلف تلاش‌هایی را برای افزایش عمر ابزار صورت داده‌اند. هدف تمام این روش‌ها، دفع هرچه بهتر حرارت از سطح تماس ابزار و براده با بهره‌گیری از فناوری‌های مختلف می‌باشد. از جدیدترین فناوری‌ها به کار رفته در این زمینه می‌توان به خنک‌کارهای سنتزی، خنک‌کارهای تحت فشار، خنک‌کارهای برودتی، خنک‌کارهای گاز فشرده و یا ترکیبی از آن‌ها اشاره کرد. اما هزینه‌های ناشی از تأمین و تصفیه خنک‌کار (به‌خصوص در نوع مایع) و همچنین وضع قوانین زیست‌محیطی جدید علیه بسیاری از این مواد، صنعت را به استفاده از فناوری MQL علاقه‌مند کرد. MQL به معنای حداقل مقدار روان کاری است. در این روش، مقدار بسیار کمی از روان‌کار/خنک‌کار با هوا مخلوط شده و

طول عمر مورد انتظارشان داشته باشند؛ برای این کار، قطعات باید از شکل هندسی، دقت ابعادی و صافی سطح مطلوب برخوردار باشند. تراش کاری نیز یکی از مهمترین فرایندهای ماشین کاری می‌باشد که دارای کاربرد بسیار زیادی در صنعت است.

بسیاری از آلیاژهای مورد استفاده در حال حاضر، مانند آلیاژهای مورد استفاده در صنایع توربین‌گاز، صنایع هوافضا، خودروسازی و ماشین‌های صنعتی بسیار سخت تراش و یا حتی عملاً در دمای محیط، غیرقابل ماشین کاری می‌باشند. این مواد از آلیاژهای پایه نیکل، فولادهای آلیاژی، تنگستن، مولیبدن، تانتالیم و تیتانیوم فرآوری می‌شوند. به‌علاوه تعداد بسیاری از دیگر آلیاژها وجود دارند که در دمای اتاق ماشین کاری می‌شوند، اما مطلوب‌تر است که با سرعت‌های بالاتر قابل ماشین کاری باشند و در سرعت‌های بالاتر، از عمر ابزار بیشتری بهره برده شود. ابتدایی‌ترین مسئله هنگام ساخت قطعه‌ای با این مواد، رفتار آنها هنگام ماشین کاری و مشکلات متعددی مانند سایش ابزار و کیفیت سطح نامطلوب آن‌ها می‌باشد.

آزمایش‌های زیادی انجام شده‌اند و نتیجه گرفته شده که ماشین کاری انواع این آلیاژها با پیش گرم کردن آنها قبل از تماس لبه برشی ابزار با قطعه کار، و ایجاد رژیم ماشین کاری نرم (شکل‌پذیر) به اندازه چشمگیری ماشین کاری آنها را تسهیل می‌کند.

این امر به عنوان ماشین کاری داغ (یا ماشین کاری به کمک حرارت‌آشناخته می‌شود. در این روش از یک منبع حرارتی خارجی به عنوان عامل ایجاد کننده حرارت در منطقه برش قبل ماشین کاری استفاده می‌شود. این حرارت باعث می‌شود منطقه برش قبل از عملیات برش دمای آن بالا رفته و در نتیجه سختی آن کاهش پیدا کند، در نتیجه ماشین کاری آن را تسهیل کند [۱-۳].

مواد به طور کلی با افزایش دما استحکام و کرنش سختی شان کاهش می‌یابد. در شکل ۱ رفتار استحکام مواد در کنار حرارت برای برخی مواد نشان داده شده است. این کاهش سختی در نهایت باعث کاهش نیروی ماشین کاری در نتیجه بهبود دیگر پارامترهای ماشینکاری مانند صافی سطح، سایش ابزار و در نتیجه بالاتر رفتن عمر ابزار و کاهش هزینه‌های ماشین کاری می‌شود. شماتیک کلی فرایند تراش کاری داغ در اینجا با استفاده از منبع حرارت دهی لیزر در شکل ۲ قابل مشاهده است.

³ Minimum Quantity Lubrication

¹ Hot Machining

² Heat Assisted Machining

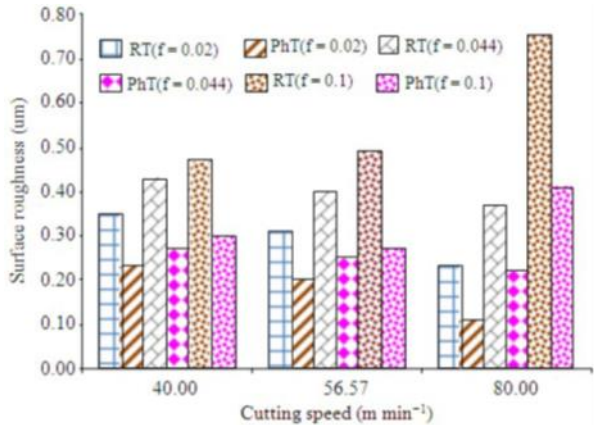


Fig. 4 The effect of cutting velocity and preheating on surface roughness

شکل ۴ تأثیر دمای پیشگرم و سرعت برشی بر صافی سطح قطعه [۷]

در مورد عمر ابزار در سرعت‌های برشی بالا می‌توان گفت چون ناحیه تداخل ابزار و براده کاهش می‌یابد، پس مقاومت نیز بین این دو کمتر خواهد شد. همچنین چون در دماهای بالا به علت کاهش مقاومت در برابر ماشین‌کاری، سرعت سایش ابزار کمتر شده در نتیجه می‌توان از سرعت برشی بالاتری نسبت به ماشین‌کاری معمولی استفاده کرد که باعث کاهش زمان تولید قطعه کار می‌شود.

عمر ابزار در تراش کاری داغ در سرعت‌های برشی و پیشروی بالاتر کاهش می‌یابد این موضوع در شکل ۵ قابل مشاهده است.

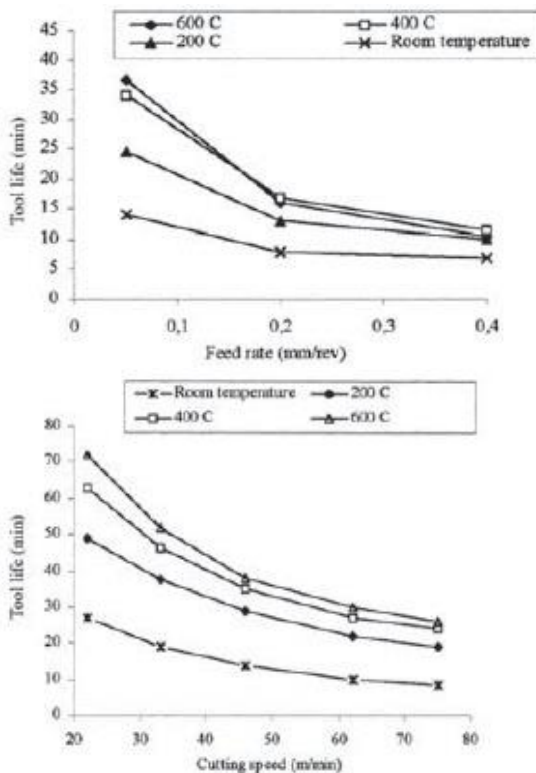


Fig. 5 Effect of heating on tool life at different cutting speeds and feed rates
شکل ۵ ارتباط بین عمر ابزار و سرعت‌های برشی و پیشروی در دماهای مختلف [۸]

به صورت اروسول (گاز پخش شونده در هوا) درمی‌آید. این مخلوط توسط یک نازل با فشار بالا به منطقه برش پاشش می‌شود. پژوهشگران با مطالعات تجربی نشان داده‌اند که این تکنیک علاوه بر دوستاند محیط زیست بودن و صرفه‌جویی اقتصادی، در شرایط کاری یکسان نسبت به ماشین‌کاری خشک و ماشین‌کاری با خنک‌کاری سیلابی، پارامترهای خروجی نظیر عمر ابزار، نحوه شکل‌گیری براده و به خصوص کیفیت سطح را بهبود می‌بخشد [۵]. شماتیک نحوه اعمال روان‌کاری کمینه در شکل ۳ قابل مشاهده است.

در تحقیقات گذشته نیز این مسئله عنوان شده است که ماشین‌کاری به کمک حرارت باعث بهبود چشمگیر پارامتر ماشین‌کاری برای مثال نیروهای ماشین‌کاری تا ۳۰٪ و صافی سطح تا ۱۰۰٪ بهبود یافته است.

نتایج ماشین‌کاری ترکیبی با قوس پلاسما بر روی فولاد زنگ نزن 17-4PH نشان می‌دهد که تا ۳۰٪ کاهش در نیروی برشی با این تکنیک امکان پذیر است به علاوه نسبت به ماشین‌کاری معمولی تا ۴۰٪ عمر ابزار طولانی‌تر می‌گردد [۶].

شکل ۴ تأثیر دمای پیشگرم قطعه کار را بر صافی سطح ماشین‌کاری شده در قطعه ای از جنس فولاد ابزار D2 نشان می‌دهد [۷]. مشاهده می‌شود که در هر سرعت برشی، پیشگرم کردن منجر به افزایش صافی سطح قطعه شده است.

۱-۱- بیان مسأله، نوع آوری و ذکر اهداف

همان‌طور که در بخش قبل گفته شد اعمال حرارت به قطعه قبل از انجام فرایند تراش کاری و به طور کل ماشین‌کاری به علت کاهش دادن استحکام و کرنش سختی باعث تسهیل شدن انجام فرایند می‌شود. این تسهیل شدن به طور کلی در قالب کاهش نیرو و توان ماشین‌کاری خود را نشان می‌دهد.



Fig. 3 Minimum quantity lubrication (MQL) performance [5]

شکل ۳ شماتیک نحوه اعمال روان‌کاری کمینه (MQL) [۵]

مشترک براده و ابزار را کاهش داده و در نتیجه کاهش انواع سایش و در نهایت زبری سطح را در پی خواهد داشت.

با توجه به نکات مطرح شده، ماشین کاری هیبریدی می تواند دو هدف مهم کاهش هزینه های تعویض ابزار و بهبود پارامترهای خروجی ماشین کاری (به طور مثال کیفیت سطح) را ارضا کند. ناگفته نماند که این فرایند به طور خاص برای ماشین کاری مواد سخت برش طراحی شده است و بهره گیری از آن در براده برداری فلزات معمولی توجیه اقتصادی ندارد.

۳-۱- اهمیت و ضرورت اجرای طرح

امکان افزایش نرخ براده برداری، ایجاد کیفیت سطحی خوب و کاهش هزینه های تعویض ابزار همواره از دغدغه های اصلی در ماشین کاری مواد سخت برش اعم از PH 4-17 بوده است. با بهره گیری از ماشین کاری هیبریدی، تمامی پارامترهای مذکور بهبود می یابد و گاه آن قدر نتایج مطلوب می شود که برای مثال کیفیت سطحی به حدی می رسد که به حذف فرایند تکمیلی سنگ زنی می انجامد. یا حتی برخی مواد مانند اینکونل ها که برای ماشین کاری نیاز به ابزارهای سرامیکی گران قیمت داشتند با استفاده از این فرایند قابلیت ماشین کاری با ابزارهای به مراتب ارزان تر را با همان طول عمر پیدا کرده اند.

۱-۴- جنبه های نوآوری طرح

استفاده از سیستم MQL در کنار پیش گرم کردن قطعه باعث می شود خصوصیات ماشین کاری به شکل چشم گیری بهبود یابد دلیل این امر نرم شدن ماده قبل از ماشین کاری در کنار روان کاری و خنک کاری ماده مربوطه است. در مطالعات گذشته تا هم اکنون به این موضوع اشاره نشده است؛ در نهایت استفاده از یک سیستم برودتی در کنار پیش گرم کردن قطعه بوده است. این طرح برای نخستین بار فناوری MQL را جایگزین سیستم برودتی در ماشین کاری هیبریدی کرده است که انتخابی کاملاً هدفمند بوده است. به طور جزئی تر، مزیت برجسته MQL نسبت به سیستم مذکور، قابلیت روان کاری و در نتیجه بهبود پارامترهای مربوطه است اما توانایی خنک کاری آن از سیستم های برودتی ضعیف تر است که با توجه به رفتار فولاد مارتنزیتی PH 4-17 که براده های ترد و ناپیوسته تولید می کند، توجیه پذیر است.

۲- روش تحقیق

ماده مورد بررسی در این پژوهش فولاد ضد زنگ رسوب سخت

به طور کلی از مزایای ماشین کاری داغ می توان به نکات زیر اشاره کرد:

- (الف) امکان انجام ماشین کاری بر روی مواد و فلزات سخت؛
- (ب) افزایش نرخ براده برداری؛
- (ج) کاهش نیروی وارده به ابزار و در نتیجه کاهش سایش ابزار و بهبود عمر آن؛
- (د) صرفه جویی اقتصادی به واسطه کاهش نیرو و توان ماشین کاری؛
- (ه) افزایش کیفیت سطح قطعه.

نکته قابل اهمیت این موضوع است که استحکام ماده بعد از انجام فرایند نباید کاهش زیادی داشته باشد تا بتوان از آن در کاربردهای مورد نظر از قبل استفاده کرد. با توجه به اینکه ماده تا قبل از رسیدن به دمای تبلور مجدد خود حرارت داده می شود، تغییرات ریز ساختاری خاصی بر روی آن اتفاق نمی افتد؛ در نتیجه استحکام و سختی خود را بعد از انجام فرایند تغییر زیادی نخواهد داشت.

همان گونه که اشاره شد، مهم ترین عیب فرایند ماشین کاری داغ، افزایش دمای ابزار و در نتیجه افزایش فرسایش ابزار می باشد. لذا برخی از محققان از روش ترکیبی گرم کردن قطعه کار و خنک کاری ابزار در حین فرایند ماشین کاری استفاده کرده اند و نام این فرایند را ماشین کاری ترکیبی نامیده اند. به عنوان نمونه در یک تحقیق [۶] اثر خنک کاری ابزار با نیتروژن مایع در حین فرایند ماشین کاری داغ با پلاسما بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان می دهد که استفاده از خنک کاری برودتی سبب افزایش ۴۰ درصدی عمر ابزار می شود.

۱-۲- ترکیب ماشین کاری داغ و روان کاری کمینه

با توجه به این که گفته شد با پیش گرم کردن قطعه که باعث کاهش سختی آن می شود شرایط ماشین کاری بهبود می یابد، اما با این وجود موضوع چسبندگی براده به ابزار و پدیده براده با لبه انباشته به وجود می آید که خود این موضع باعث بدتر شدن شرایط و خروجی های فرایند ماشین کاری به ویژه موضوع مورد بررسی یعنی صافی سطح و سلامت سطح خواهد شد که برای حل این موضوع روان کاری کمینه پیشنهاد شده است که نه تنها این موضوع را حل خواهد کرد بلکه با کاهش اصطکاک و خنک کاری و روان کاری موضعی باعث بهبود خروجی ها مثل نیروی ماشین کاری و زبری سطح نیز خواهد شد. به صورت جزئی تر این سیستم از طریق روان کاری، اصطکاک سطح

¹ Hybrid Machining

Material data - typical values

	Ultimate strength	Yield strength (0.2%)	Elongation	Hardness	
	MPa	MPa	%	HRB	HRC
316L	520	180	50	55	
17-4PH	1050	900	4		25

Chemical composition (%)

	Fe	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb+Ta
316L	Bal	16-18	10-14	2-3		
17-4PH	Bal	15.5-17.5	3-5		3-5	0.15-0.45

Fig. 6 Material data-typical values and chemical composition of 17-4PH [10]

شکل ۶ خواص مکانیکی فولاد 17-4PH و درصد عناصر آلیاژی تشکیل دهنده آن [۱۰]

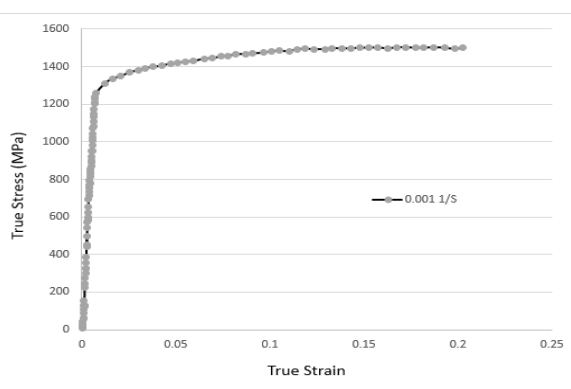


Fig. 7 True stress - true strain diagram of 17-4 PH

شکل ۷ نمودار تنش و کرنش ماده

برای انجام آزمایش تجربی از یک دستگاه تراش صنعتی ۲ متری المانی استفاده شده است. برای پیشگرم کردن قطعه کار از یک کوره المنتی استفاده شده است که از طریق بستر تعبیه شده روی ساپورت دستگاه قرار می‌گیرد اندازه‌گیری دما از طریق ترموکوپل تماسی نوع k در حین حرارت‌دهی و بعد از آن انجام شده است. برای صحه‌سنجی اندازه‌گیری دما از ترموکوپل لیزری برای کالیبراسیون کوره و ترموکوپل در حین حرارت‌دهی و بعد از آن و همچنین اندازه‌گیری افت دما برای آزمایش استفاده شده است. انجام عملیات بدین صورت می‌باشد که قطعه از طریق کوره المنتی به دمای مورد نظر رسانده شده و بعد از آن آزمایش انجام داده شده است. لازم به توضیح است که مقدار افت دمای نمونه بعد از پیش‌گرم از تحلیل عددی با کمک اباکوس و به صورت تجربی به کمک ترموکوپل تماسی و لیزری محاسبه شده است که نشان می‌دهد که با توجه به خاصیت ذاتی انتقال حرارت کم این نوع فولاد بعد از دو دقیقه حداکثر ۴۰ درجه سانتی‌گراد افت دما وجود داشته است که با توجه به زمان آزمایش برای هر تست که بسیار کمتر بوده است، مشکلی وجود نداشته است. نحوه قرارگیری کوره و نمونه بر روی ماشین تراش در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

شونده 17-4PH با تمپر H900 می‌باشد. این فولاد در استاندارد امریکا با نام AISI 630 شناخته می‌شود. و یم فولاد زنگ نزن با زمینه مارتنزیتی است. عمده کاربرد این فولاد در صنایع نظامی، هسته‌ای و هوافضا و در ساخت قطعاتی مانند بالک موشک‌ها، مخازن تحت فشار، اجزایی که در معرض موادخورنده و تنش بالا قرار دارند، می‌باشد [۹]. از جمله ویژگی‌های دیگر آن استحکام بسیار بالا، چقرمگی بسیار بالا و همین‌طور مقاومت به خوردگی بسیار بالاست که باعث شده است عمده کاربرد آن در صنایع نظامی، هسته‌ای، هوا فضا و شیمیایی باشد. از سوی دیگر به دلیل انتقال حرارت پایین و همین‌طور شکل‌پذیری بالا از جمله مواد سخت ماشین‌کاری شونده محسوب می‌شوند. خواص مکانیکی و درصد عناصر آلیاژی این فولاد در شکل ۶ قابل مشاهده است.

این مسائل باعث شده است مقدار کمی از ماده به محصول نهایی تبدیل شود و ناچار به تحمل هزینه‌های زیاد می‌باشد. نیروهای برشی بالا و سایش ابزار شدید، محدودیت‌هایی را برای سرعت ماشین‌کاری به وجود آورده و در نتیجه نرخ تولید نیز کاهش می‌یابد. بدون شک، بهبود عمر ابزار، از طریق افزایش نرخ باربرداری و کاهش هزینه‌های تعویض ابزار می‌تواند به سودآوری بالاتر منجر شود. در این پژوهش سعی شده است که با ماشین‌کاری ترکیبی در نهایت منجر با ساده‌تر شدن ماشین‌کاری این نوع ماده که ارزشمند بودن آن در قبل ذکر شد از طریق کاهش نیروهای ماشین‌کاری، بهبود عمر ابزار از طریق کاهش سایش و همین‌طور بهبود شرایط نهایی محصول مثل صافی سطح آن و سلامت سطح آن شود. نمونه تهیه شده خواص مکانیکی آن از طریق تست فشار در دمای محیط بدست آورده شد تا خواص واقعی نمونه کار شده مشخص و مقایسه شود. نمودار تنش و کرنش حقیقی ماده در شکل ۷ مشخص شده است.

میانگین سختی نقاط مختلف این قطعه ۴۸ راکول C بدست آورده شد که این امر از طریق رسوب سختی در دمای ۹۰۰ درجه فارنهایت (۴۸۲ درجه سانتی‌گراد) حاصل شده است. این سختی بالا به همراه رسوب‌های ریز و سخت که در زمینه مارتنزیتی پراکنده شده‌اند، سبب سایش شدید ابزار می‌شوند. با افزایش دما تا حدود کمتر از ۹۰۰ درجه فارنهایت در حین ماشین‌کاری، سختی و استحکام این فلز (در همان دما) افت می‌کند و می‌توان آن را ماشین‌کاری نمود. این در حالی است که پس از خنک شدن این فولاد پس از ماشین‌کاری، استحکام و سختی اولیه آن تغییری نمی‌کند. این ویژگی عامل اصلی ترغیب برای انجام فرایند ماشین‌کاری داغ بر روی این فولاد است.

همان‌طور که گفته شد برای پایش وضعیت دمایی فرایند نیاز به صحت سنجی دمایی بوده است که برای صحت سنجی اندازه‌گیری ترموکوپل خود کوره و مقدار افت دما بعد از خاموش شدن و بیرون آوردن کوره، از یک ترموکوپل تماسی دیگر با سه تماس از نوع k و همین‌طور یک ترموکوپل لیزری استفاده شد. همین‌طور این مقدار با شبیه‌سازی اباکوس مطالعه شد نتایج آن در شکل ۹ آورده شده است. مقدار افت دما در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است.

ذاتی انتقال حرارت بسیار کم فولاد ph ۱۷-۴ مقدار افت دما بعد از عملیات پیش‌گرم بعد از حدود ۲ دقیقه مقدار ۳۰-۵۰ درجه سانتی‌گراد خواهد بود. همچنین با اندازه‌گیری‌های تجربی در آزمایش اندازه‌گیری شد که حداکثر مدت‌زمان انجام آزمایش بعد از پیش‌گرم ۳۰ ثانیه بوده است.

در مطالعه تجربی پیش‌رو نحوه انجام عملیات به گونه‌ای است که قطعه‌کاری که تحت عملیات ماشین‌کاری قرار خواهد گرفت، گرم شده و سپس با حرکت ساپورت دستگاه از آن خارج شود تا براده برداری از موضع حرارت دیده انجام شود. پارامترهای ورودی فرایند سرعت برشی v_c (m/min)، نرخ پیشروی f (mm/rev) و دمای پیش‌گرم T ($^{\circ}C$) می‌باشد که هرکدام در ۳ سطح به صورتی که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، در نظر گرفته شده است. آزمایش به صورت جایگشتی برای تمامی حالات صورت گرفته است. پارامتر ورودی دیگر مورد بررسی تأثیر روان‌کار بر فرایند بوده است آزمایش که در سه حالت خشک، روان‌کاری امولسیون و روان‌کاری کمینه به مانند آنچه در در جدول ۲ آورده شده است مقایسه شده است.

در حالت روان‌کاری کمینه از روغن گیاهی زیتون که بدون ضرر از نظر محیط زیستی است و همین‌طور مقاوت حرارتی بسیار بالایی دارد استفاده شده است. فشار هوای اعمالی برای مخلوط آب و روغن ۵ bar و همین‌طور روغن اعمالی ۳۰ ml/min بوده است. نحوه اعمال مخلوط روغن و هوا را در منطقه تراش کاری در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.

۲-۱- ماشین‌کاری ترکیبی

در این آزمایش همان‌طور که بیان شد هدف اصلی بهبود قابلیت ماشین‌کاری فولادهای ضدزنگ مارتنزیتی سخت‌کاری شده با سختی و استحکام بالا و به‌طور کل تمامی مواد سخت برش از جمله تیتانیم، سوپر آلیاژها، سرامیک‌ها، کامپوزیت‌های پایه فلزی و غیره، با این خصوصیات ذاتی می‌باشد تا بتوان شرایط انجام ماشین‌کاری آن‌ها را فراهم کرد و خروجی‌های مهم ماشین‌کاری آن‌ها از جمله نیروهای ماشین‌کاری، سایش ابزار، کیفیت سطح و نحوه تشکیل براده را بهبود بخشید.

جدول ۱ پارامترهای ورودی در آزمایش

سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	
۹۰	۷۰	۵۰	v_c (m/min) سرعت برشی
۰/۳	۰/۱۹	۰/۱۰۶	f (mm/rev) نرخ پیشروی
۳۵۰	۲۰۰	۲۵	$T(^{\circ}C)$ دمای پیش‌گرم

همان‌طور که گفته شد برای پایش وضعیت دمایی فرایند نیاز به صحت سنجی دمایی بوده است که برای صحت سنجی اندازه‌گیری ترموکوپل خود کوره و مقدار افت دما بعد از خاموش شدن و بیرون آوردن کوره، از یک ترموکوپل تماسی دیگر با سه تماس از نوع k و همین‌طور یک ترموکوپل لیزری استفاده شد. همین‌طور این مقدار با شبیه‌سازی اباکوس مطالعه شد نتایج آن در شکل ۹ آورده شده است. مقدار افت دما در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است.



Fig. 8 Heating setup on the machine

شکل ۸ نحوه قرارگیری کوره المنتی و نمونه آزمایش بر روی ماشین تراش

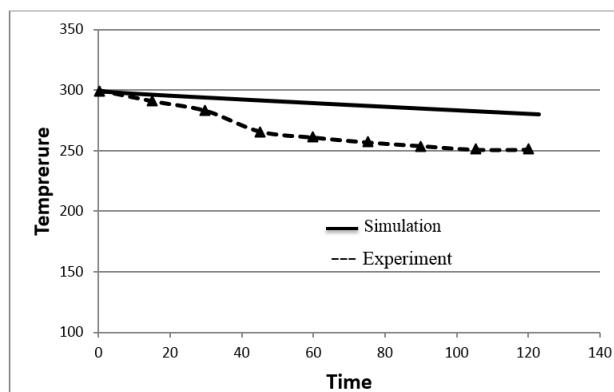


Fig. 9 Comparison of simulation and experiment temperature decline

شکل ۹ مقایسه مقدار افت دما در آزمایش تجربی و عددی

همان‌طور که در نمودار مشخص است با توجه به خاصیت

در ادامه توضیح خواهد داده شد، انجام گرفته است تا امکان استفاده از این ماشین کاری ترکیبی به عنوان یک روش کارآمد برای ماشین کاری قطعات با سختی و استحکام بالا بررسی شود. شکل ۱۱ شماتیک نحوه انجام ماشین کاری ترکیبی را نمایان می سازد.

برای اندازه گیری زبری سطح از دستگاه مدل Huatec SRT-6210 استفاده شده است. برای عکس های سطح و براده نیز از دوربین Microcapture و میکروسکوپ نوری استفاده شده است.

۳- ارائه نتایج و بحث

در این آزمایش تأثیر برهم کنش پارامترهای ورودی گفته شده بر روی زبری سطح، کیفیت و سلامت سطح تولیدی و نحوه شکل گیری براده بحث و تحلیل شده است. شکل ۱۲ تأثیر سرعت برشی و همین طور دما در سرعت پیشروی ثابت برای هر نمودار و حالت بدون روان کار بر روی زبری سطح در واحد R_a را نشان می دهد.

همان طور که در شکل ۱۲ مشخص است به طور کلی با افزایش سرعت برشی در حالت های مختلف زبری سطح کاهش یافته و یک روند مشخصی دارد. علت اصلی این امر آن است که با افزایش سرعت برشی دمای سطح برخورد ابزار و قطعه در نتیجه دمای منطقه ماشین کاری افزایش می یابد.

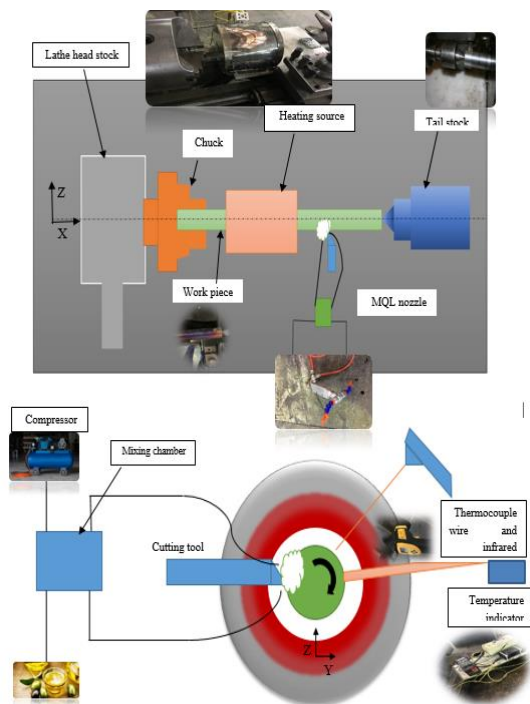


Fig. 11 Schematic of hybrid machining

شکل ۱۱ شماتیک ماشین کاری ترکیبی

جدول ۲ حالات مختلف روان کاری در نظر گرفته شده

Table 2 Experiment lubrication modes

$T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$	
*	*	*	خشک- بدون روان کار
-	-	*	امولسیون (۵۰٪ روغن-۵۰٪ آب)
*	*	*	MQL



Fig. 10 MQL setup

شکل ۱۰ نحوه اعمال روان کاری کمینه MQL در منطقه تراش

از این رو در این آزمایش و تحقیق به عنوان یک روش پیشنهادی کاربردی برای این امر ماشین کاری به کمک حرارت معرفی شده است، اما با توجه به بعضی مشکلات به وجود آمده در استفاده از این روش مانند بالابردن دمای منطقه برش و همچنین سایش ابزار، روش روان کاری کمینه به عنوان یک روش کاربردی پیشنهاد شده است تا در کنار ماشین کاری به کمک حرارت استفاده شود.

استفاده از این دو روش در کنار هم می تواند تکمیل کننده و بهبوددهنده هر یک برای ایجاد شرایط ماشین کاری مطلوب برای ماشین کاری این مواد با خصوصیات ویژه باشد. کاهش دمای ماشین کاری از طریق این روش روان کاری و همین طور کاهش اصطکاک کاری در مناطق برش در کنار فواید ماشین کاری به کمک حرارت از جمله نرمش حرارتی^۱ و بهبود در سختی کرنشی^۲ که باعث کاهش سختی ماده در لحظه برش و تشکیل براده و در نتیجه سهولت تشکیل براده می شود می تواند تکمیل کننده و تشدیدکننده تمامی پارامترهای ماشین کاری ذکر شده در قبل گردد.

در این تحقیق بررسی ترکیب ماشین کاری به کمک حرارت و همین طور روان کاری کمینه بر روی پارامترهای خروجی که

¹ Thermal softening

² Strain hardening

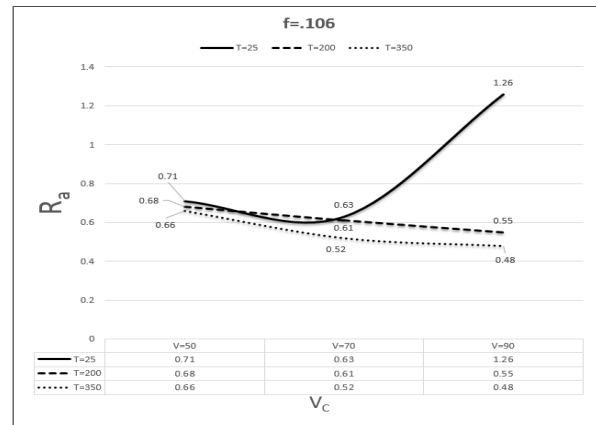
پایین تر شده است.

علت دیگر کاهش زبری سطح در اثر افزایش سرعت برشی را می‌توان کمتر شدن نیروی ماشین‌کاری به علت شکل‌گیری براده راحت‌تر و همین‌طور کمتر شدن مقدار سایش ابزار در نظر گرفت. در یک حالت در پیشروی پایین با افزایش سرعت برشی، زبری سطح افزایش یافته است که علت این موضوع تشکیل براده لبه‌انباشته به علت بالارفتن دما مشاهده شد، که با استفاده از روان‌کار این موضوع از بین رفته است.

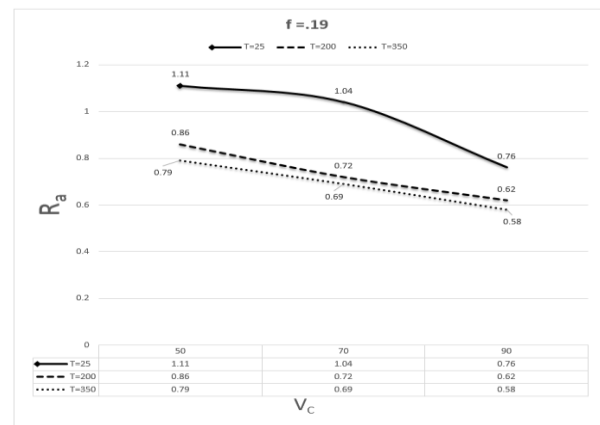
همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود با افزایش سرعت پیشروی زبری سطح نیز به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. علت این امر بالارفتن نیروی ماشین‌کاری در اثر افزایش سطح تماس ابزار و براده در نتیجه افزایش اصطکاک در منطقه برش در نتیجه افزایش مقدار سایش ابزار می‌باشد. در هنگام ماشین‌کاری با پیشروی کم، ارتعاش به حداقل می‌رسد و نیروی برش کمتر است. اما در بالاترین میزان پیشروی، ارتعاشات و عیوب رزونانس روی سطح ماشین‌کاری بیشتر است، در نتیجه زبری سطح بالاتر بدست آمده است.

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود با افزایش دمای پیش‌گرم برای نمونه در حالت تراش‌کاری داغ زبری سطح به مقدار بسیار قابل توجهی کاهش یافته است. علت اصلی این کاهش، کاهش سختی ماده اولیه در اثر بالارفتن دما و درشت شدن دانه‌ها می‌باشد. البته این موضوع را باید دانست که سختی اولیه ماده مورد نظر بعد انجام فرایند تغییری نمی‌کند. علت مهم بعد این می‌باشد که فولاد PH 17-4 دارای رسوب سختی می‌باشد این موضوع باعث این می‌شود که زبری سطح افزایش یابد با افزایش دما این رسوب سختی کاهش می‌یابد و باعث می‌شود زبری سطح کاهش یابد. شکل ۱۳ تأثیر شرایط روان‌کاری مختلف بر روی زبری سطح را نشان می‌دهد.

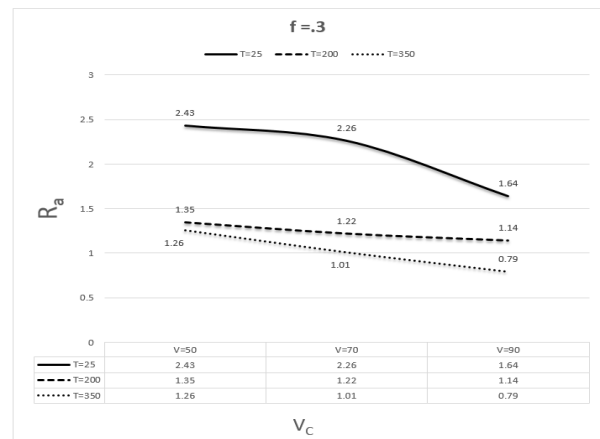
همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود زبری سطح در حالت استفاده از روان‌کار کمینه MQL و روان‌کاری امولوسیون به ترتیب کاهش بیشتری نسبت به حالت بدون استفاده از روان‌کار در دمای محیط داشته است. روان‌کاری کمینه در حدود ۲۰ درصد و ۵ درصد و در نرخ پیشروی بالاتر تا ۳۸ و ۶ درصد زبری سطح را به ترتیب نسبت به حالت خشک و خیس کاهش داده است. همان‌طور که مشخص است زبری سطح در حالت خشک بدترین و در حالت MQL بهترین شرایط را دارا می‌باشد. زبری سطح MQL بسیار نزدیک به زبری حالت استفاده از امولوسیون می‌باشد.



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 12 Surface roughness variation in different cutting velocity, feed rates, and heating temperature

شکل ۱۲ تأثیر سرعت برشی و دما بر روی زبری سطح الف- $f=0.106$ ب- $f=0.19$ ج- $f=0.3$

این موضوع باعث نرم شدن حرارتی و افزایش تغییر شکل پلاستیک در منطقه برش در نتیجه کمتر شدن نیروی شخم‌زنی و در نهایت راحت‌تر شدن ماشین‌کاری و زبری سطح

³ Chatter marks

¹ Thermal softening

² Ploughing force

عملیات‌های تکمیلی بهبود سطح مانند سنگ زنی شده که خود در هزینه‌های تولیدی تأثیر شگرفی دارا می‌باشد. علت این موضوع کاهش سختی ماده در اثر حرارت و همین‌طور تشدید کاهش اصطحکاک و در نتیجه نیروی ماشین‌کاری و سایش تولیدی می‌باشد که در نهایت سطح نهایی بهتری را تحویل می‌دهد.

نحوه ایجاد پروفیل زبری و شکل پستی‌وبلندی‌ها در فرایندهای مختلف خود می‌تواند مسئله دارای اهمیتی باشد. شکل اعوجاج و فرم ایجاد شده بر اثر حرکت ابزار خود می‌تواند نشان‌دهنده راحتی یا سختی انجام فرایند برش باشد. بر همین اساس تحت شرایط مختلف در فرایند اثر پارامترهای مختلف مخصوصاً دمای پیش گرم و همین‌طور شرایط روان کاری مختلف بر روی فرم و پروفیل زبری ایجاد شده بر روی سطح مقایسه و تحلیل شده است.

اثر ماشین‌کاری ترکیبی بر روی شکل و فرم ایجادشده بر روی سطح نهایی در شکل ۱۴ آورده شده است.

انجام فرایند در حضور روان‌کاری کمینه و همین‌طور تراش کاری به کمک حرارت باعث شده سطح به علت نیروی برشی و سایش کمتر ابزار به دلیل کمتر شدن اصطکاک و دمای منطقه برش سطح با زبری بسیار کم همراه با یکنواختی بسیار زیادی بدست آید تا بتوان از این فرایند بدون استفاده از فرایندهای تکمیلی مانند سنگ‌زنی برای تولید سطوح باکیفیت بسیار بالا استفاده کرد. مقدار اندازه پستی‌وبلندی‌ها به‌طور چشمگیری کاهش یافته، یکنواختی بیشتری در الگوی ایجاد پستی‌وبلندی‌ها مشاهده می‌شود و نشان‌دهنده تشکیل براده راحت‌تر از روی سطح می‌باشد. در حالت دمابالای روان کاری کمینه کیفیت بالای سطح ایجاد شده به‌طور کاملاً مشهودی قابل مقایسه با دیگر شرایط است در این کیفیت سطح با مقدار زبری سطح در حدود 0.3 میکرومتر بدست آمده است

اثر افزایش دمای پیشگرم بر سطح تولیدی را می‌توان در شکل ۱۵ مشاهده نمود. با افزایش دمای پیشگرم باعث این می‌شود که براده از سطح ماده راحت‌تر جدا شده و با توجه به نیروی ماشین‌کاری کمتر و سایش کمتر عیوب کمتری بر روی سطح ایجاد شود. همان‌طور که مشخص است عیوب مانند خطوط خراش و ترک‌ها و حفره و غیره در فرایند در حالت تراش کاری داغ تقریباً از بین رفته است.

اثر حضور شرایط روان کاری مختلف را بر روی سطح تولیدی را می‌توان در شکل ۱۶ مشاهده نمود.

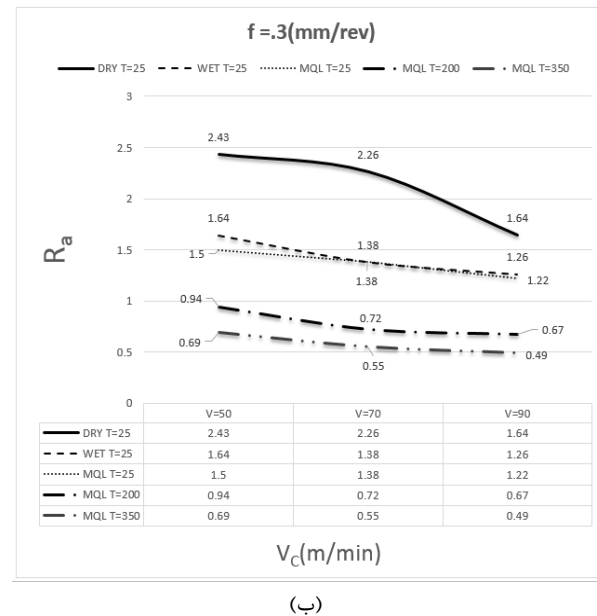
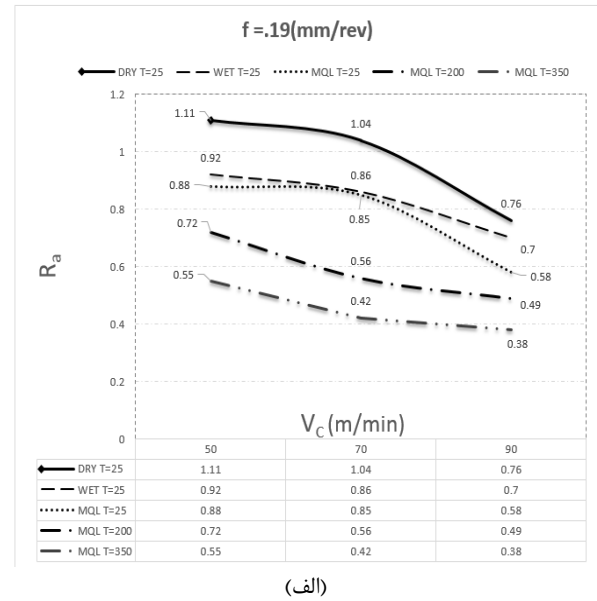


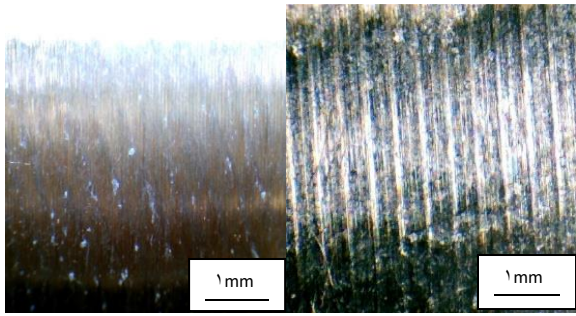
Fig. 13 Surface roughness variation in different hybrid-machining conditions

شکل ۱۳ تأثیر شرایط روان کاری مختلف بر روی زبری سطح الف- $f=0.19$ ب- $f=0.3$

علت اصلی این امر کاهش سایش ابزار تولیدی در فرایند به علت کاهش اصطحکاک منطقه برش و بالطبع کاهش دمای منطقه ماشین‌کاری می‌باشد. این علت باعث می‌شود تشکیل براده از سطح راحت‌تر شده در نتیجه عیوب کمتری در سطح ایجاد شود که ماحصل آن کیفیت سطح بالاتری است.

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود برهم‌کنش روان کاری کمینه و افزایش دمای پیش گرم در تراش کاری داغ باعث کاهش بسیار چشمگیر تا ۷۰ درصد زبری سطح تولیدی فرایند شده است. این موضوع می‌تواند باعث از بین بردن

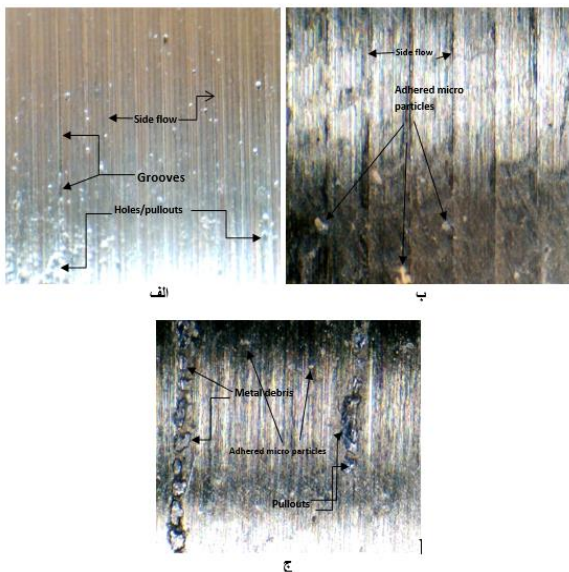
عیوب سطح تولیدی بیشتر مانند جریان جانبی، آوار، شیارها و ذرات ریزخرد شده (در ماشین کاری خشک و مرطوب نسبت به حالت MQL بیشتر می باشد). بهبود سطح تولیدی برآمده از تشکیل براده راحت تر است؛ این موضوع را می توان در شکل ۱۷ مشاهده نمود.



(ب) (الف)

Fig. 15 Surface integrity in a) room temperature b) 350

شکل ۱۵ تغییر یکنواختی سطح در فرایند: الف- در دمای محیط، ب- در دمای ۳۵۰، سرعت برشی ۹۰ m/min، سرعت پیشروی ۰/۱۹ mm/rev، عمق برشی ۰/۵ mm بدون روان کار

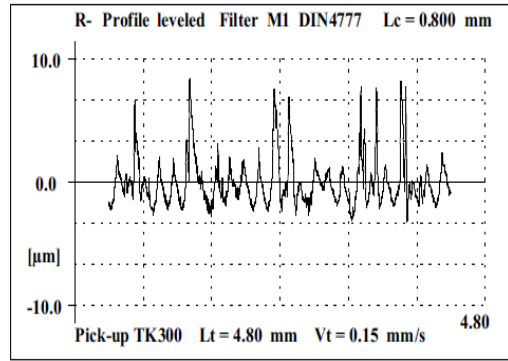


الف ب ج

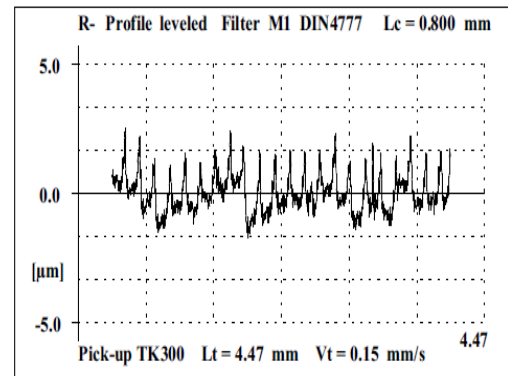
Fig. 16 Surface topography defects eliminations in hybrid-machining conditions

شکل ۱۶ سطح ماشین کاری شده در سرعت برشی ۵۰ m/min، نرخ پیشروی ۰/۱۹ mm/rev، عمق برش ۰/۵ mm، دمای ۲۵ °C، تحت شرایط روان کاری مختلف الف- mql، ب- wet، ج- dry

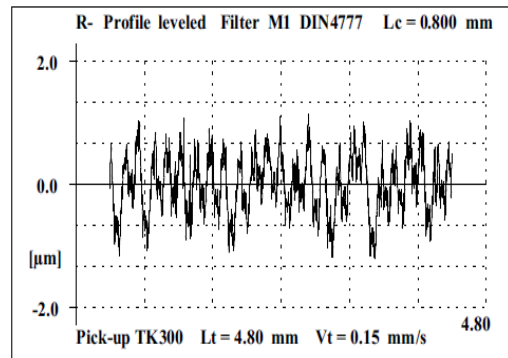
به طور کلی براده ها با افزایش مقدار پیشگرم ماده پیوسته و ارتفاع دندان اره ها کاهش می یابد و این دندانها یکنواخت تر^۵



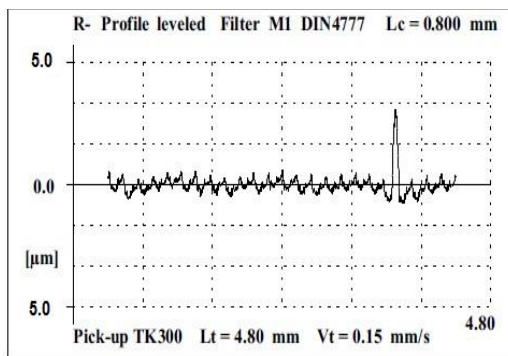
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

Fig. 14 Rogness profile in different conditions

شکل ۱۴ پروفیل زبری ایجاد شده تحت شرایط: $f = 0.19$ $V_c = 90$ mm/rev
الف - dry، T=25 °C ب- dry، T=200 °C ج- MQL، T=350 °C د- MQL، T=350 °C

¹ Side flow

² Debris

³ Grooves

⁴ Adhered micro particles

⁵ Uniform saw teeth

با استفاده از این فرایند کاهش زبری سطح به ترتیب ۳۰ تا ۲۰ درصد به ترتیب در دمای ۳۵۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به تراش کاری در دمای محیط مشاهده می‌شود. این زبری سطح مطلوب در کنار سلامت سطح مطلوب از طریق وجود عیوب سطحی کمتر در حالت تراش کاری داغ مشاهده می‌شود. نیرو و سایش کمتر تراش کاری داغ باعث تشکیل براده راحتتر در حالت تراش کاری به کمک حرارت شده است. ماشین کاری ترکیبی باعث شده است پروفیل زبری ایجاد شده بسیار یکنواخت، با پستی و بلندی‌های بسیار کم ایجاد شود که نشان از سطح با کیفیت بسیار بالاتر نسبت به ماشین کاری معمولی و دیگر شرایط ماشین کاری دیده شده، می‌باشد. حضور روان کار به صورت امولسیون و همین‌طور روان کاری کمینه MQL نیز توانسته با کاهش مقدار اصطحاک و دمای تولیدی کاهش زبری سطح را به ترتیب در حدود ۱۷ تا ۲۰ درصد نسبت به حالت بدون استفاده از روان کار ایجاد کند. اعمال این شرایط کیفیت سطح بهتری از طریق عیوب سطحی کمتر و همین‌طور تشکیل براده راحتتر را نیز باعث شده است.

برهم‌کنش اثر تراش کاری به کمک حرارت یا تراش کاری داغ با حضور روان کاری کمینه نیز بررسی شده است که این برهم‌کنش بهبود بسیار چشمگیر سطح تولیدی را در بر داشته است. به طوری که زبری سطح را تا ۸۰ درصد نسبت به حالت تراش کاری در دمای محیط و همین‌طور حالت خشک کاهش یافته است.

به طور کلی ماشین کاری ترکیبی ایجاد توانایی ماشین کاری مواد بسیار سخت برش مانند فولاد PH-417 در کنار بهبود کیفیت سطح، نرخ براده برداری، هزینه ماشین کاری و غیره را نشان می‌دهد.

۵- فهرست علائم

V_c (m/min) سرعت برشی

f (mm/rev) نرخ پیشروی

T (°C) دمای براده تغییر شکل نیافته (دمای پیش گرم سطح)

T_c (°C) دمای ماشین کاری

a_p (mm) عمق برشی

P (l/min) نرخ اعمال سیال

h ضریب هدایت حرارتی

F_c (N) نیروی برشی

BUE براده با لبه انباشته

MQL روان کاری کمینه

HAT تراش کاری به کمک حرارت

خواهد بود. این موضوع به خاطر تغییر شکل و برش راحت‌تر ماده در دماهای بالاتر به علت کاهش سختی ماده اتفاق می‌افتد. این حالت را می‌توان به مانند شکل ۱۸ در اثر اعمال روان کار نیز مشاهده نمود که تأثیر آن بروی نحوه تشکیل براده به چه صورت می‌باشد. به طور کلی با توجه به اثر اصطحاک و تولید دما بر مقدار راحتی تغییر شکل براده، مقدار دندانه اره‌ای بودن براده و سخت تر جدا شدن آن در حالت خشک، مرطوب به ترتیب نسبت به حالت روان کاری کمینه بیشتر است.

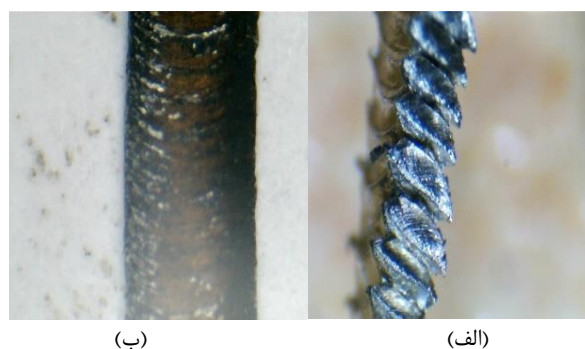


Fig. 17 Chip morphology in different conditions

شکل ۱۷ تغییر شکل براده الف- دمای ۲۵ °C، ب- دمای ۲۰۰ °C، نرخ پیشروی ۳ mm/rev، سرعت برشی ۵۰ m/min و عمق برش ۵ mm بدون روان کار

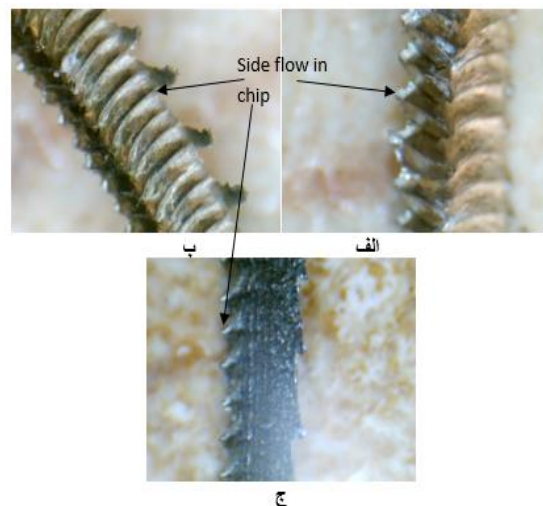


Fig. 18 Chip morphology in different conditions a.dry b.wet c.MQL

شکل ۱۸ شکل‌گیری براده تولیدی در $v=90$, $f=0.19$ mm/rev, $d=0.5$ mm در $T=25^\circ\text{C}$, m/min تحت شرایط روان کاری مختلف الف-dry، ب-wet، ج-mql

۴- نتیجه‌گیری

تراش کاری داغ و اعمال دمای پیش گرم به قطعه در فرایند باعث ایجاد سطح بهتر و زبری سطح پایین‌تر از طریق ایجاد نیروی ماشین کاری کمتر و سایش کمتر ابزار می‌شود.

FEM آنالیز المان محدود

HRC مقدار سختی بر حسب راکول

۷- مراجع

- case study in turning process," *Tribology International*, Vol. 101, pp. 234-246, 2016.
- [6] S. Khani, M. Farahnakian, and M. R. Razfar, "Experimental study on hybrid cryogenic and plasma-enhanced turning of 17-4PH stainless steel," *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 30, pp. 868-874, 2015.
- [7] M. A. Lajis, A. Amin, A. Karim, C. Daud, M. Radzi, and T. L. Ginta, "Hot machining of hardened steels with coated carbide inserts," *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 2, pp. 421-427, 2009.
- [8] A. K. Parida and K. Maity, "Experimental investigation on tool life and chip morphology in hot machining of Monel-400," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 21, pp. 371-379, 2018.
- [9] J. R. Davis, *ASM specialty handbook: heat-resistant materials*: ASM International, 1997.
- [10] A. Mohanty, S. Gangopadhyay, and A. Thakur, "On applicability of multilayer coated tool in dry machining of aerospace grade stainless steel," *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 31, pp. 869-879, 2016.
- [1] Konig, W. "Laser-assisted Hot Machining of Ceramics and Composite Materials", NIST Special Publication 847. In Proc. Int. Conf. Machining of Advanced Materials, pp. 455-463, 1993.
- [2] G. Chryssolouris, N. Anifantis, and S. Karagiannis, "Laser assisted machining: an overview," *Journal of manufacturing science and engineering*, Vol. 119, pp. 766-769, 1997.
- [3] S. Sun, M. Brandt, and M. Dargusch, "Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials—a review," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 50, pp. 663-680, 2010.
- [4] S. Lei and F. Pfefferkorn, "A review of thermally assisted machining," in *Proceedings of the ASME international conference on manufacturing science and engineering, Atlanta, GA, 2007*, pp. 1-12.
- [5] B. Behera, S. Ghosh, and P. Rao, "Application of nanofluids during minimum quantity lubrication: A