Archive of SID

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

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

امیرحسین مقدسی[۱]، محمد جعفر حداد[۲*]، محمدکاظمی نصر آبادی[۳]

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک-ساخت وتولید، دانشگاه تهران، تهران

۲- استادیار، مهندسی مکانیک-ساخت وتولید، دانشگاه تهران، تهران

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

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۳ دی ۱۳۹۷

پذیرش: ۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۸

ارائه در سایت: دی ۱۳۹۸

کلیدواژگان:

موادسخت برش

ماشین‌کاری داغ

صافی سطح

روان‌کاری کمینه (MQL)

چکیده

فولاد ضدزنگ 17-4 PH یکی از فولادهای ضدزنگ با استحکام بالا می‌باشد که کاربرد بسیاری در صنایع نظامی، نفت وگاز و غیره دارد که به دلیل استحکام بالا مانندیگر موادسخت برش ماشین‌کاری آن دارای معضلات بسیاری می‌باشد.با توجه به پیشرفت‌های بسیار در بهبود خواص مواد به ویژه استحکام و سختی آن‌ها در سالیان اخیر،این امراهمیت بیشتری به خود گرفته است.استفاده از منبع حرارتی کنترل شونده درکنار ماشین‌کاری (ماشین‌کاری داغ) به عنوان شیوه ای کارآمد برای ماشین‌کاری مواد سخت برش معرفی شده است.این امر همچنین باعث بهبود چشمگیر پارامترهای خروجی فرایند می‌شود. برای از بین بردن معضلات دیگر مانند سایش ابزار و نفوذ در دمای بالا در کنار فرایند از روان‌کاری کمینه (MQL) استفاده شده است .صافی سطح به عنوان یک پارامتر مهم در ماشین‌کاری به علت استحکام و سختی بسیار بالا یکی از چالش‌های ماشین‌کاری این فولاد می‌باشد. با استفاده ازین روش صافی سطح و همین‌طور 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 تراش‌کاری بررسی شده است. با استفاده از ماشین‌کاری ترکیبی صافی سطح نهایی ۷۰ تا ۱۰۰ درصد بهبود داده شده است و همچنین بدست اوردن پروفیل یکنواخت زبری سطح نیز نشان داده شده است.ماشین‌کاری ترکیبی نشان داده است که تمامی عیوب سطحی مانندترک و میکروترک‌ها و همچنین ذرات چسبیده شده روی سطح را از بین می‌برد که نشان دهنده بهبود چشمگیر در استحکام خستگی نیز می‌تواند 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 Moghadasi[1], Mohammad Jafar Hadad[1*], Mohammad kazemi Nasrabadi[2]

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 tricks and micro cracks, sticking particles Eliminates at the surface, which can indicate a dramatic improvement in fatigue strength.

۱- مقدمه

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

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)

www.SID.ir

Archive of SID

طول عمر مورد انتظارشان داشته باشند؛ برای این کار، قطعات باید از شکل هندسی، دقت ابعادی و صافی سطح مطلوب برخوردار باشند. تراش‌کاری نیز یکی از مهمترین فرایندهای ماشین‌کاری 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 ماشین‌کاری می‌باشند. این مواد از آلیاژهای پایه نیکل، فولادهای آلیاژی، تنگستن، مولیبدن، تانتالیم و تیتانیم فرآوری می‌شوند. به‌علاوه تعداد بسیاری از دیگر آلیاژها وجود دارند که در دمای اتاق ماشین‌کاری می‌شوند، اما مطلوب‌تر است که با سرعت‌های بالاتر قابل ماشین‌کاری باشند و درسرعت‌های بالاتر، از عمرابزار بیشتری بهره برده شود. ابتدایی‌ترین مسئله هنگام ساخت قطعه‌ای با این مواد، رفتار آنها هنگام ماشین‌کاری و مشکلات متعددی مانند سایش ابزار و کیفیت سطح نامطلوب آن‌ها می‌باشد.

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

این امر به عنوان ماشین‌کاری داغ[1] یا ماشین‌کاری به کمک حرارت[2] شناخته می‌شود. در این روش از یک منبع حرارتی خارجی به عنوان عامل ایجاد کننده حرارت در منطقه برش قبل ماشین‌کاری 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 ماشین‌کاری 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 ماشین‌کاری در نتیجه بهبود دیگر پارامترهای ماشنکاری مانند صافی سطح، سایش ابزار و در نتیجه بالاتر رفتن عمر ابزار و کاهش هزینه‌های ماشین‌کاری می‌شود. شماتیک کلی فرایند تراش‌کاری داغ در اینجا با استفاده از منبع حرارت دهی لیزر در شکل ۲ قابل مشاهده است.

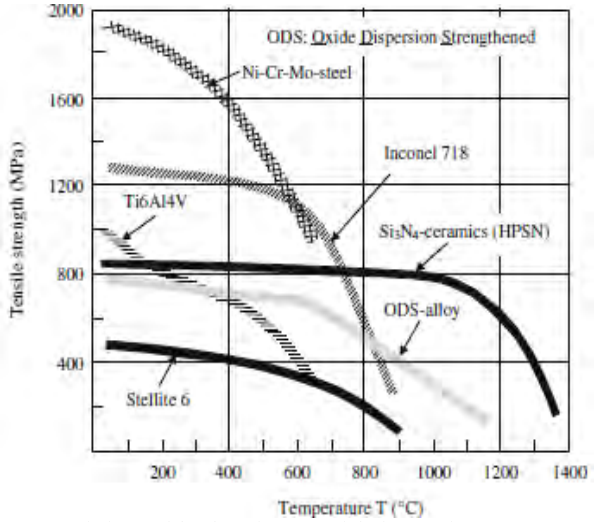


Fig. 1 Variations of hard-cutting materials in a ratio to temperature changes [1]

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

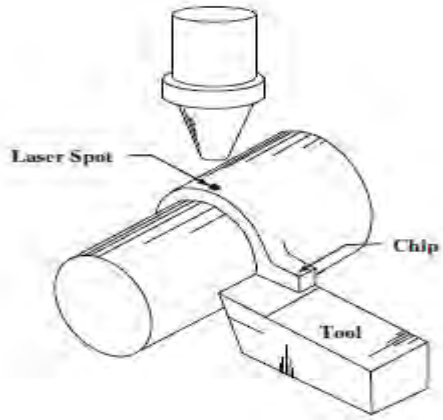


Fig. 2 Laser-assisted turning [4]

شکل ۲ شماتیک فرایند تراش‌کاری داغ به کمک لیزر [۴]

روان‌کاری و خنک‌کاری کمینه (MQL[3]): پژوهشگران و مهندسان صنایع مختلف با به‌کارگیری 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 به‌کار رفته در این زمینه می‌توان به خنک‌کارهای سنتزی، خنک‌کارهای تحت فشار، خنک‌کارهای برودتی، خنک‌کارهای گاز فشرده و یا ترکیبی از آن‌ها اشاره کرد. امّا 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 روان‌کاری است. در این روش، مقدار بسیار کمی از روان‌کار/خنک‌کار با هوا مخلوط شده و

[1] Hot Machining
[2] Heat Assisted Machining
[3] Minimum Quantity Lubrication

www.SID.ir

Archive of SID

به‌صورت اِروسول (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 دوستدار 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 به‌خصوص 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 ماشین کاری 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 ماشین کاری 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 مساله، نوع‌آوری وذکر اهداف

همان‌طور که در بخش قبل گفته شد اعمال حرارت به قطعه قبل از انجام فرایند تراش‌کاری 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 وتوان ماشین‌کاری خود را نشان می‌دهد.

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

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

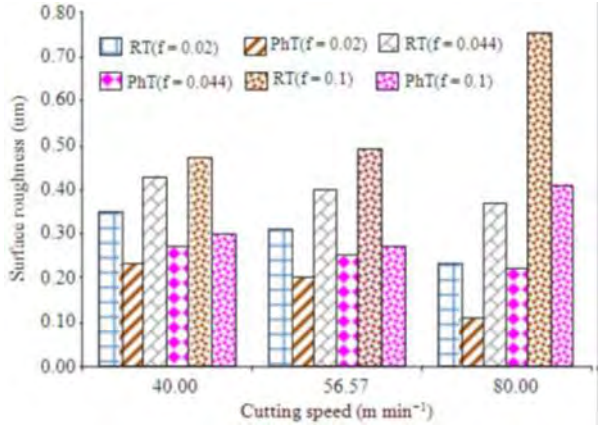


Fig. 4 The effect of cutting velocity and preheating on surface roughness

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 ایم 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 تراش‌کاری داغ در سرعت‌های برشی و پیشروی بالاتر کاهش می‌یابد این موضوع در شکل ۵ قابل مشاهده است.

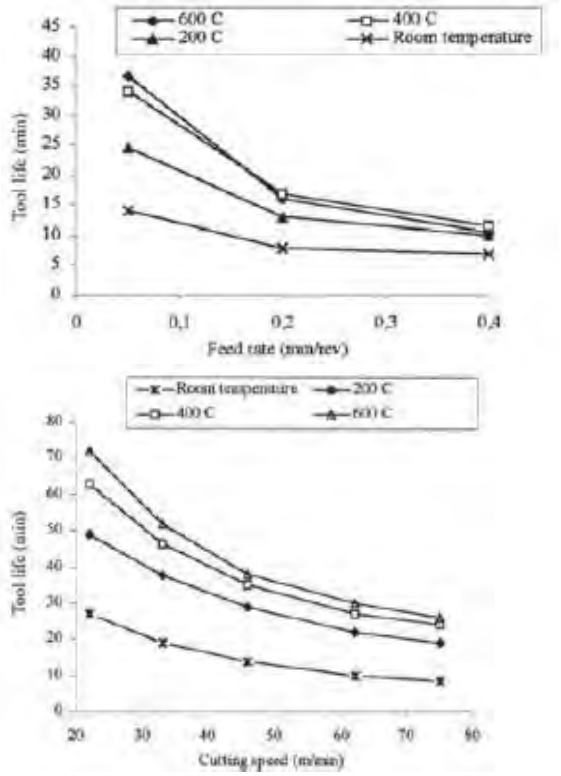


Fig. 5 Effect of heating on tool life at different cutting speeds and feed rates

شکل ۵ ارتباط بین عمر ابزار و سرعت‌های برشی و پیشروی در دماهای مختلف [۸]

www.SID.ir

Archive of SID

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

الف) امکان انجام ماشین‌کاری 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) صرفه‌جویی اقتصادی به‌واسطه کاهش نیرو و توان ماشین‌کاری؛

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 می‌شود، تغییرات ریز ساختاری خاصی بر روی آن اتفاق نمی‌افتد؛ در نتیجه استحکام و سختی خود را بعد از انجام فرایند تغییر زیادی نخواهد داشت.

همان‌گونه که اشاره شد، مهم ترین عیب فرایند ماشین‌کاری داغ، افزایش دمای ابزار و در نتیجه افزایش فرسایش ابزار می‌باشد. لذا برخی از محققان از روش ترکیبی گرم کردن قطعه کار و خنک کاری ابزار در حین فرایند ماشن‌کاری استفاده کرده اند و نام این فرایند را ماشین‌کاری ترکیبی[1]نامیده‌اند. به عنوان نمونه دریک تحقیق [۶] اثر خنک کاری ابزار با نیتروژن مایع در حین فرایند ماشین کاری داغ با پلاسما بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از خنک کاری برودتی سبب افزایش ۴۰ درصدی عمر ابزار می‌شود.

۱-۲- ترکیب ماشین‌کاری داغ و روان‌کاری کمینه

با توجه به این که گفته شد با پیش‌گرم کردن قطعه که باعث کاهش سختی آن میشود شرایط ماشین‌کاری بهبود می‌یابد، اما با این وجود موضوع چسبندگی براده به ابزار و پدیده براده با لبه انباشته به وجود می‌آید که خود این موضع باعث بدتر شدن شرایط و خروجی‌های فرایند ماشین‌کاری به ویزه موضوع مورد بررسی یعنی صافی سطح وسلامت سطح خواهد شد که برای حل این موضوع روان‌کاری کمینه پیشنهاد شده است که نه تنها این موضوع را حل خواهد کرد بلکه با کاهش اصطکاک و خنک‌کاری و روان‌کاری موضعی باعث بهبود خروجی‌ها مثل نیروی ماشین‌کاری و زبری سطح نیز خواهد شد. به‌صورت جزئی‌تر این سیستم از طریق روان‌کاری، اصطکاک سطح مشترک براده و ابزار را کاهش داده و درنتیجه کاهش انواع سایش و در نهایت زبری سطح را در پی خواهد داشت.

با توجه به نکات مطرح‌شده، ماشین‌کاری هیبریدی می‌تواند دو هدف مهم کاهش هزینه‌های تعویض ابزار و بهبود پارامترهای خروجی ماشین‌کاری (به‌طور مثال کیفیت سطح)را ارضا کند. ناگفته نماند که این فرایند به‌طور خاص برای ماشین‌کاری مواد سخت‌برش طراحی‌شده است و بهره‌گیری از آن در براده‌برداری فلزات معمولی توجیه اقتصادی ندارد.

۱-۳- اهمیت و ضرورت اجرای طرح

امکان افزایش نرخ براده‌برداری، ایجاد کیفیت سطحی خوب و کاهش هزینه‌های تعویض ابزار همواره از دغدغه‌های اصلی در ماشین‌کاری مواد سخت برش اعم از PH 17-4 بوده است. با بهره‌گیری از ماشین‌کاری هیبریدی، تمامی پارامترهای مذکور بهبود می‌یابد و گاه آن‌قدر نتایج مطلوب می‌شود که برای مثال کیفیت سطحی به حدی می‌رسد که به حذف فرایند تکمیلی سنگ‌زنی می‌انجامد. یا حتی برخی مواد مانند اینکونل‌ها که برای ماشین‌کاری نیاز به ابزارهای سرامیکی گران‌قیمت داشتند با استفاده از این فرایند قابلیت ماشین‌کاری با ابزارهای به‌مراتب ارزان‌تر را با همان طول عمر پیداکرده‌اند.

۱-۴- جنبه‌های نوآوری طرح

استفاده از سسیتم MQL در کنار پیش گرم کردن قطعه باعث می‌شود خصوصیات ماشین‌کاری به شکل چشم گیری بهبود یابد دلیل این امر نرم شدن ماده قبل از ماشین‌کاری در کنار روان کاری و خنک کاری ماده مربوطه است. در مطالعات گذشته تا هم‌اکنون 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 ماشین‌کاری هیبریدی کرده است که انتخابی کاملاً هدف‌مند بوده است. به‌طور جزئی‌تر، مزیت برجسته MQL نسبت به سیستم مذکور، قابلیت روان‌کاری و درنتیجه بهبود پارامترهای مربوطه است امّا توانایی خنک‌کاری آن از سیستم‌های برودتی ضعیف‌تر است که با توجه به رفتار فولاد مارتنزیتی PH 17-4 که براده‌های ترد و ناپیوسته تولید می‌کند، توجیه‌پذیر است.

۲- روش تحقیق

ماده مورد بررسی در این پژوهش فولاد ضد زنگ رسوب سخت

[1] Hybrid Machining

www.SID.ir

Archive of SID

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]. ازجمله 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 الیاژی 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 درنتیجه 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 ان از طریق تست فشار در دمای محیط بدست اورده 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 نمی کند. این ویژگی عامل اصلی ترغیب برای انجام فرایند ماشین‌کاری داغ بر روی این فولاد است.

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]

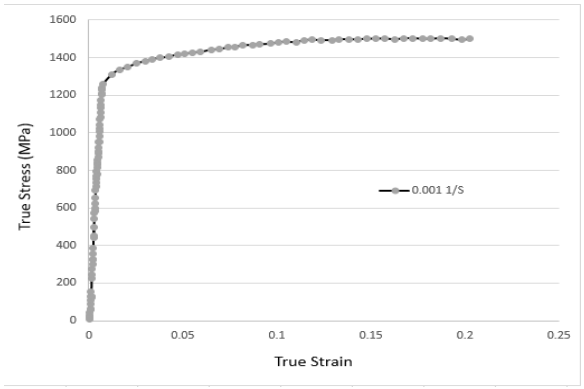


Fig. 7 True stress - true strain diagram of 17-4 PH

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 حرارت دهی و بعد از آن و همچنین اندازه‌گیری افت دما برای ازمایش استفاده شده است. انجام عملیات بدین صورت می‌باشد که قطعه از طریق کوره المنتی به دمای مورد نظر رسانده شده و بعد ار آن ازمایش 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 ازمایش 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.

www.SID.ir

Archive of SID

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.

Fih. 8 Heating setup on the machine

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

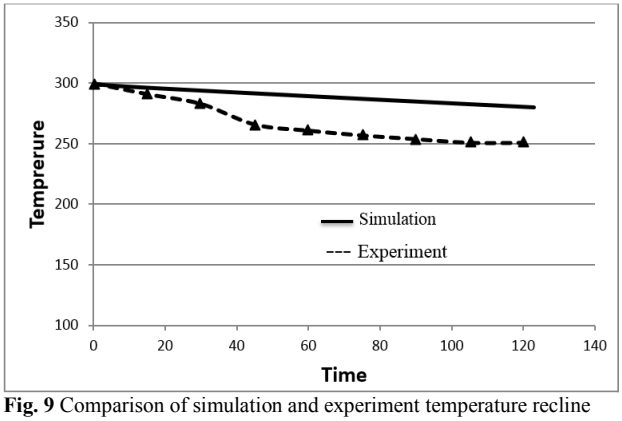


Fig. 9 Comparison of simulation and experiment temperature recline

شکل ۹ مقایسه مقدار افت دما در آزمایش تجربی و عددی

همان‌طور که در نمودار مشخص است با توجه به خاصیت 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 پیش گرم ۳۰ ثانیه بوده است.

در مطالعه تجربی پیش رو 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 (^{o}c) می‌باشد که هرکدام در ۳ سطح به صورتی که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، در نظر گرفته شده است. ازمایش به صورت جایگشتی برای تمامی حالات صورت گرفته است. پارامتر ورودی دیگر مورد بررسی تأثیر روان‌کار بر فرایند بوده است ازمایش که در سه حالت خشک، روان‌کاری امولسیون و روان‌کاری کمینه به مانند انچه در در جدول ۲ اورده 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 اب و روغن bar ۵ و همین‌طور روغن اعمالی ml/min ۳۰ بوده است. نحوه اعمال مخلوط روغن و هوا را در منطقه تراش‌کاری در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.

۱-۲- 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 ازجمله 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 ازجمله نیروهای ماشین‌کاری، سایش ابزار، کیفیت سطح و نحوه تشکیل براده را بهبود بخشید.

جدول ۱ پارامترهای ورودی در آزمایش

Table 1 Process parameters and levels

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

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲ حالات مختلف روان‌کاری در نظر گرفته شده

Table 2 Experiment lubrication modes

	T=25 ^{O}C	T=200 ^{O}C	T=300 ^{O}C
خشک- بدون روان‌کار	*	*	*
امولسیون (۵۰٪ روغن-۵۰٪ آب)	*	-	-
MQL	*	*	*

Fig. 10 MQL setup

شکل۱۰ نحوه اعمال روان‌کاری کمینه MQL در منطقه تراش

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

استفاده از این دو روش در کنار هم می‌تواند تکمیل‌کننده و بهبوددهنده هر یک برای ایجاد شرایط ماشین‌کاری مطلوب برای ماشین‌کاری این مواد با خصوصیات ویژه باشد. کاهش دمای ماشین‌کاری از طریق این روش روان‌کاری و همین‌طور کاهش اصطکاک کاری در مناطق برش در کنار فواید ماشین‌کاری به کمک حرارت ازجمله نرمش حرارتی[1] و بهبود در سختی کرنشی[2] که باعث کاهش سختی ماده در لحظه برش و تشکیل براده و درنتیجه سهولت تشکیل براده می‌شود می‌تواند تکمیل‌کننده و تشدیدکننده تمامی پارامترهای ماشین‌کاری ذکرشده در قبل گردد.

در این تحقیق بررسی ترکیب ماشین‌کاری به کمک حرارت و همین‌طور روان کاری کمینه بر روی پارامترهای خروجی که در ادامه توضیح خواهد داده شد، انجام گرفته است تا امکان استفاده از این ماشین‌کاری ترکیبی به‌عنوان یک روش کارآمد برای ماشین‌کاری قطعات با سختی و استحکام بالابررسی شود. شکل ۱۱ شماتیک نحوه انجام ماشین‌کاری ترکیبی را نمایان می‌سازد.

برای اندازه‌گیری زبری سطح از دستگاه مدل Huatec SRT-6210 استفاده شده است. برای عکس‌های سطح و براده نیز از دوربین Microcapture و میکروسکوپ نوری استفاده شده است.

۳- ارائه نتایج و بحث

در این ازمایش تأثیر برهم‌کنش پارامترهای ورودی گفته شده بر روی زبری سطح، کیفیت و سلامت سطح تولیدی و نحوه شکل‌گیری براده بحث و تحلیل شده است. شکل ۱۲ تأثیر سرعت برشی و همین‌طور دما در سرعت پیشروی ثابت برای هر نمودار و حالت بدون روان‌کار بر روی زبری سطح در واحد R_a را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص است به طور کلی با افزایش سرعت برشی در حالت‌های 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 ماشین‌کاری افزایش می‌یابد.

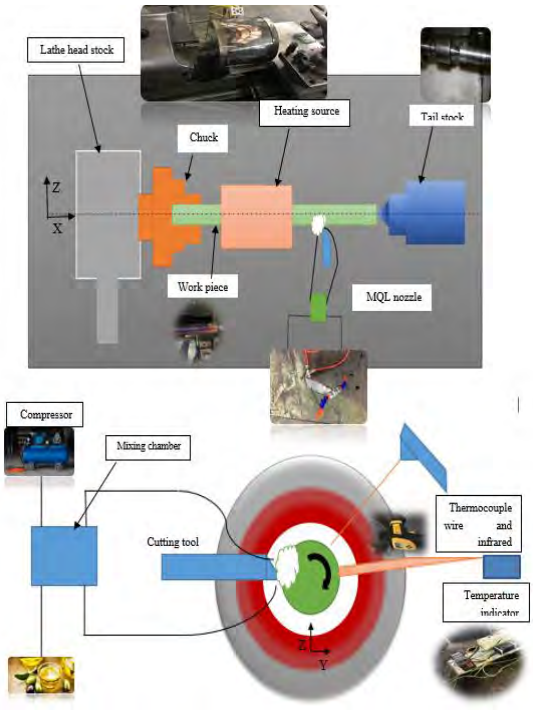


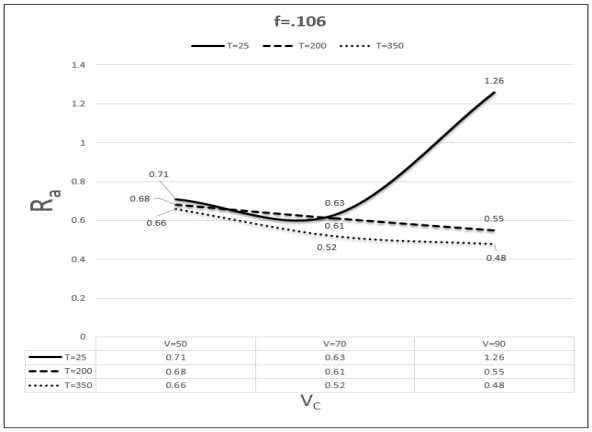
Fig. 11 Schematic of hybrid machining

شکل ۱۱ شماتیک ماشین‌کاری ترکیبی

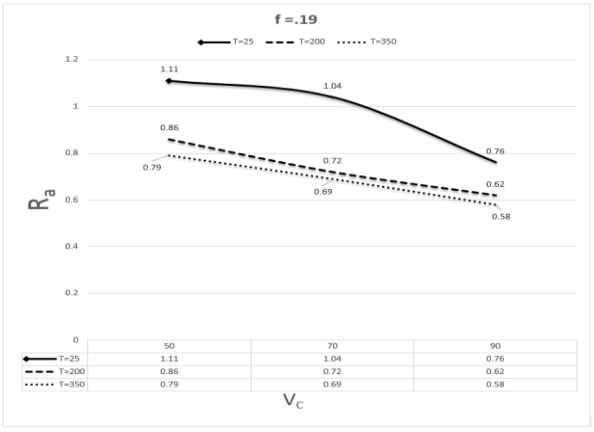
[1] Thermal softening
[2] Strain hardening

www.SID.ir

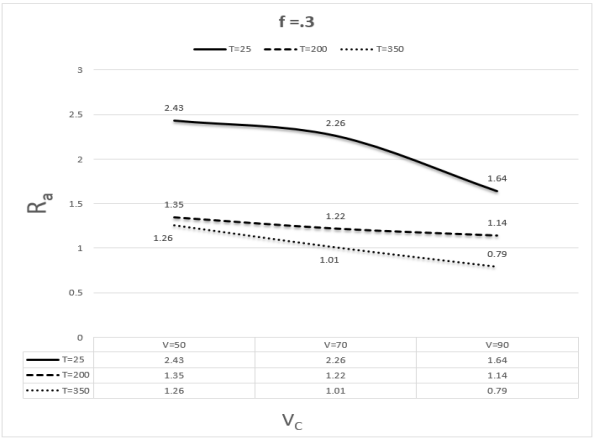
Archive of SID



(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=0/3 ج- f=0/19

این موضوع باعث نرم شدن حرارتی[1]و افزایش تغییر شکل پلاستیک در منطقه برش در نتیجه کمتر شدن نیروی شخم‌زنی[2]و در نهایت راحت‌تر شدن ماشین‌کاری و زبری سطح پایین تر شده است.

علت دیگر کاهش زبری سطح در اثر افزایش سرعت برشی را می‌توان کمتر شدن نیروی ماشین‌کاری به علت شکل 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 لبه انباشته 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 اصطحکاک 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[3]روی سطح ماشین‌کاری بیشتر است، در نتیجه زبری سطح بالاتر بدست امده است.

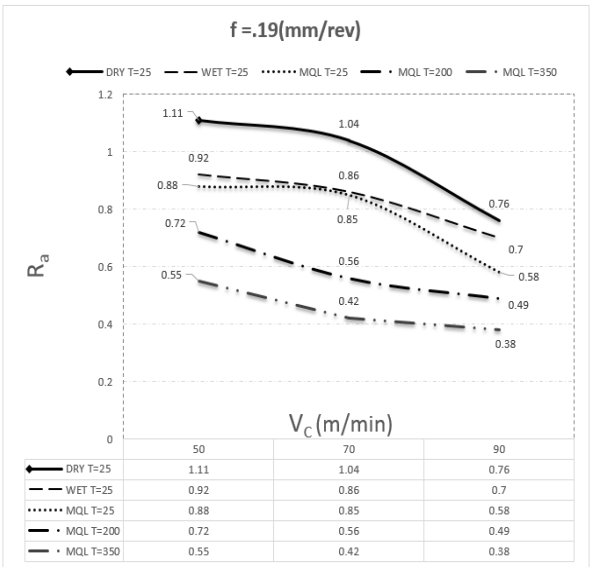
همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود با افزایش دمای پیش‌گرم برای نمونه در حالت تراش‌کاری داغ زبری سطح به مقدار بسیار قابل توجهی کاهش یافته است. علت اصلی این کاهش، کاهش سختی ماده اولیه در اثر بالاتر رفتن دما و درشت شدن دانه‌ها می‌باشد. البته این موضوع را باید دانست که سختی اولیه ماده مورد نظر بعد انجام فرایند تغییری نمی‌کند. علت مهم بعد این می‌باشد که فولاد 17-4 PH 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.

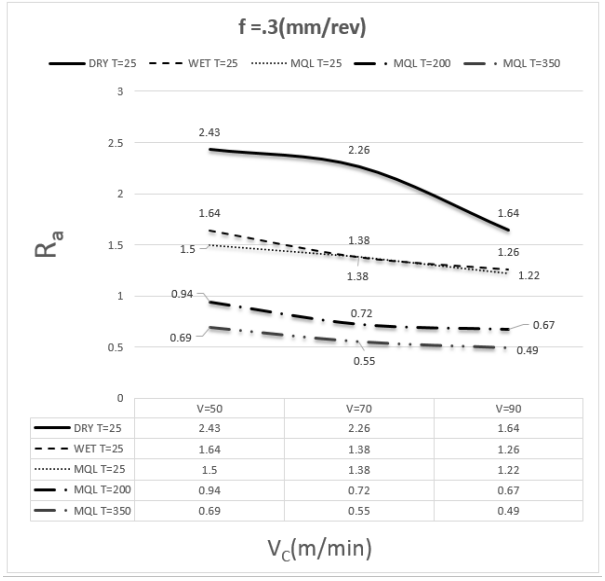
[1] Thermal softening
[2] Ploughing force
[3] Chatter marks

www.SID.ir

Archive of SID



(الف)



(ب)

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

شکل ۱۳ تأثیر شرایط روان‌کاری 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 ان کیفیت سطح بالاتری است.

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود برهم‌کنش روان‌کاری کمینه و افزایش دمای پیش‌گرم در تراش‌کاری داغ باعث کاهش بسیار چشمگیر تا ۷۰ درصد زبری سطح تولیدی فرایند شده است. این موضوع می‌تواند باعث ازبین بردن 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 براثر 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 تحلیل‌شده است.

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

انجام فرایند در حضور روان‌کاری‌کمینه و همین‌طور تراش‌کاری 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 قابل‌مقایسه با دیگر شرایط است در این کیفیت سطح با مقدار زبری سطح در حدود ۰/۳ 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 باتوجه 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 تراش‌کاری داغ تقریباً از بین رفته است.

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

www.SID.ir

Archive of SID

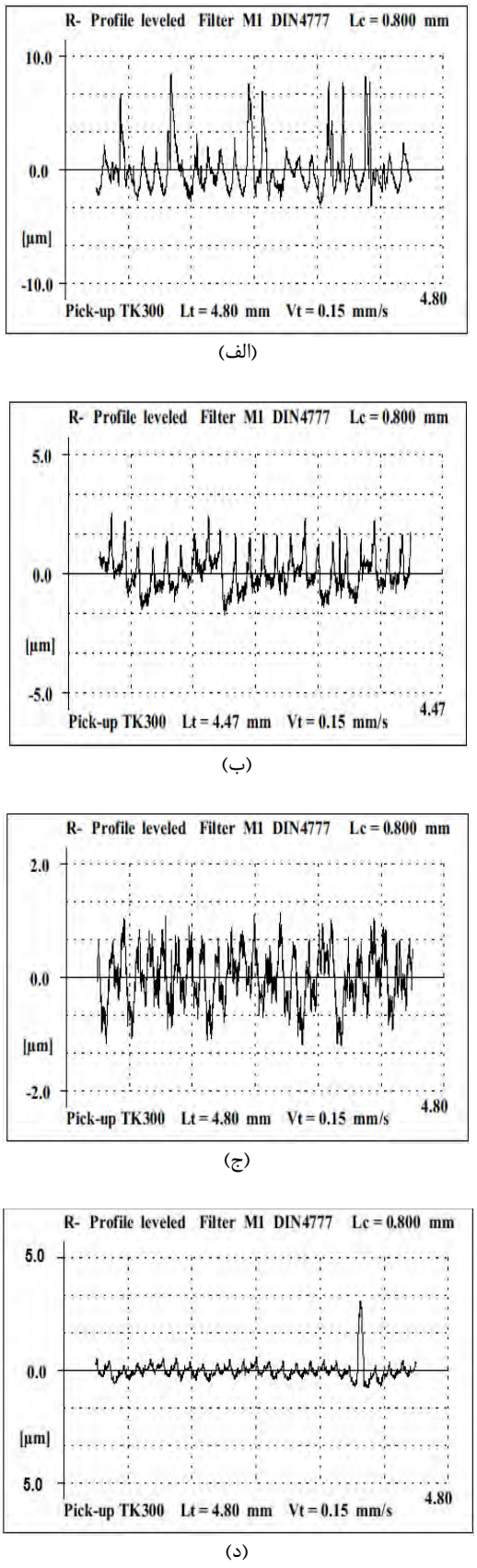
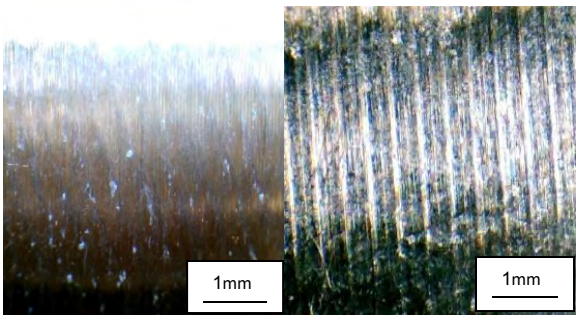


Fig. 14 Roghness profile in different conditions

شکل ۱۴ پروفیل زبری ایجاد شده تحت شرایط: $f = 0.19$ $V_c = 90$ m/min mm/rev
الف- dry $T=25\ ^0c$، ب- dry $T=350\ ^0c$، ج- MQL $T=350\ ^0c$، د- MQL $T=200\ ^0c$

عیوب سطح تولیدی بیشتر مانند جریان جانبی[1] آوار[2]، شیارها[3] و ذرات ریزخرد شده[4](در ماشین‌کاری خشک و مرطوب نسبت به حالت MQL بیشتر می‌باشد.

بهبود سطح تولیدی برامده از تشکیل براده راحت‌تر است؛ این موضوع را می‌توان 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 روان‌کار

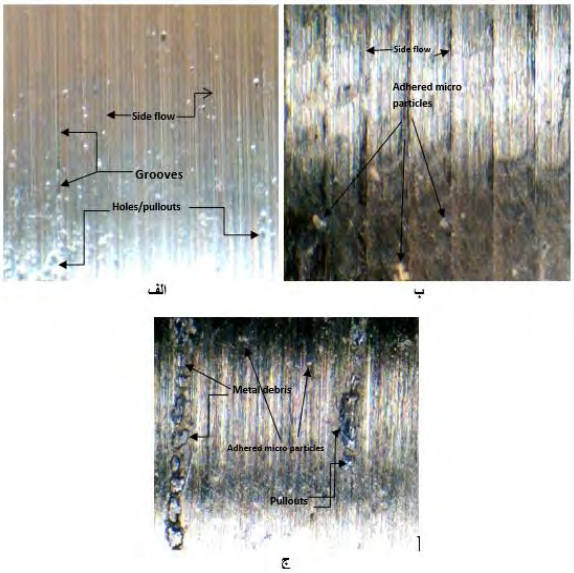


Fig. 16 Surface topography defects eliminations in hybrid-machining conditions

شکل ۱۶ سطح ماشین‌کاری شده در سرعت برشی ۵۰ m/min، نرخ پیشروی ۰/۱۹ mm/rev، عمق برش ۰/۵ mm، دمای ^0c ۲۵، تحت شرایط روان‌کاری مختلف الف- mql ، ب- wet، ج- dry

به طور کلی براده‌ها با افزایش مقدار پیشگرم ماده پیوسته و ارتفاع دندان اره‌ها کاهش می‌یابد و این دندانه‌ها یکنواخت‌تر[5]

[1] Side flow
[2] Debris
[3] Grooves
[4] Adhered micro particles
[5] Uniform saw toothes

www.SID.ir

Archive of SID

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 روان‌کار 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 روان‌کاری کمینه بیشتر است.

(ب) (الف)

Fig. 17 Chip moroholgy in different conditions

شکل ۱۷ تغییر شکل براده الف- دمای ^{0}c ۲۵، ب- دمای ^{0}c ۲۰۰، نرخ پیشروی mm/rev ۰/۳ ، سرعت برشی m/min ۵۰ و عمق برش mm ۰/۵ بدون روان‌کار

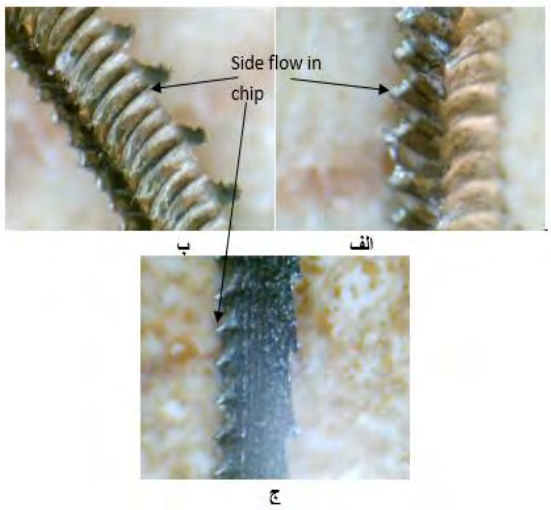


Fig. 18 Chip morphology in different conditions a.dry b.wet c.MQL

شکل ۱۸ شکل‌گیری براده تولیدی در d=0.5mm، f=0.19 mm/rev، v=90 m/min، T= 25^{0}c، تحت شرایط روان‌کاری مختلف الف- dry، ب- wet، ج- mql

۴- نتیجه‌گیری

تراش‌کاری داغ و اعمال دمای پیش‌گرم به قطعه در فرایند باعث ایجاد سطح بهتر و زبری سطح پایین‌تر از طریق ایجاد نیروی ماشین‌کاری کمتر و سایش کمتر ابزار می‌شود.

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 تراش‌کاری در دمای محیط مشاهده می‌شود.

این زبری سطح مطلوب در کنار سلامت سطح مطلوب از طریق وجود عیوب سطحی کمتر در حالت تراش‌کاری داغ مشاهده می‌شود. نیرو وسایش کمتر تراش‌کاری داغ باعث تشکیل براده راحتتر در حالت تراش‌کاری به کمک حرارت شده است.

ماشین‌کاری ترکیبی باعث شده است پروفیل زبری ایجاد شده بسیار یکنواخت، با پستی‌وبلندی‌های بسیار کم ایجاد شود که نشان از سطح باکیفیت بسیار بالاتر نسبت به ماشین‌کاری معمولی و دیگر شرایط ماشین‌کاری دیده شده، می‌باشد.

حضور روان‌کار به صورت امولسیون و همین‌طور روان‌کاری کمینه MQL نیز توانسته با کاهش مقدار اصطحکاک و دمای تولیدی کاهش زبری سطح را به ترتیب در حدود ۱۷ تا ۲۰ درصد نسبت به حالت بدون استفاده از روان‌کار 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 تراش‌کاری به کمک حرارت یا تراش‌کاری داغ با حضور روان‌کاری 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 تراش‌کاری در دمای محیط و همین‌طور حالت خشک کاهش یافته است.

به طور کلی ماشین‌کاری ترکیبی ایجاد توانایی ماشین‌کاری مواد بسیار سخت برش مانند فولاد 17-4PH در کنار بهبود کیفیت سطح، نرخ براده برداری، هزینه ماشین‌کاری و غیره را نشان می‌دهد.

۵- فهرست علایم

Vc سرعت برشی (m/min)

f نرخ پیشروی (mm/rev)

T دمای براده تغییر شکل نیافته (دمای پیش‌گرم سطح) (^{0}C)

T_C دمای ماشین‌کاری (^{0}C)

a_p عمق برشی (mm)

P نرخ اعمال سیال (l/min)

h ضریب هدایت حرارتی

Fc نیروی برشی (N)

BUE براده با لبه انباشته

MQL روان کاری کمینه

HAT تراش‌کاری به کمک حرارت

www.SID.ir

Archive of SID

FEM آنالیز المان محدود

HRC مقدار سختی برحسب راکول

۷- مراجع

[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 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 Sceices,* 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.

www.SID.ir