



تأثیر سایش جانبی ابزار روی زبری، بافت، میکروسختی و مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی سطح در فرایند فرزکاری سرعت بالا

حامد حسن پور¹، امیر راستی¹، محمدحسین صادقی^{2*}، جواد هاشمی خسروشاهی³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* صندوق پستی 143-14115 sadeghim@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 آذر 1394

پذیرش: 18 بهمن 1394

ارائه در سایت: 15 اسفند 1394

کلید واژگان:

فرزکاری سرعت بالا

زبری سطح

میکروسختی

مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی

چکیده

سطح جانبی ابزار به علت تماس مستقیم با سطح ماشین کاری شده می تواند اثرات نامطلوبی روی سلامت سطح قطعه کار در فرزکاری سرعت بالا داشته باشد. به همین منظور، در این پژوهش اثر پهنای سایش ابزار روی مشخصه های اصلی سلامت سطح شامل: زبری، بافت، میکروسختی و نیز مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی سطح در فرایند فرزکاری سرعت بالا بررسی شده است. آزمایش ها توسط 12 ابزار با سایش جانبی صفر، 0.2، 0.4 و 0.6 میلی متر با سه بار تکرار روی فولاد آلیاژی 4340 با سختی 425 ویکرز و در شرایط برشی ثابت انجام گرفت. نتایج نشان داد که تا سایش جانبی ابزار 0.4 میلی متر، زبری سطح و میکروسختی سیر صعودی یکنواختی را تجربه می کنند (افزایش زبری سطح تا 95% و میکروسختی سطح تا 6.3% نسبت به ابزار نو). اما استفاده از ابزاری با سایش جانبی 0.6 میلی متر، مقادیر زبری سطح و میکروسختی را به ترتیب تا 484% و 18.6% نسبت به ابزار نو افزایش می دهد. تصاویر بافت سطح نیز نشان داد که استفاده از ابزار با سایش جانبی 0.6 میلی متر، باعث جریان غیریکنواخت ماده روی سطح می شود. استفاده از ابزاری با سایش جانبی 0.4 میلی متر و کمتر از آن، تأثیر ناچیزی بر توزیع میکروسختی در عمق قطعه داشت. همچنین مقادیر طیفسنجی امپدانس الکتروشیمیایی سطوح فرزکاری شده نشان داد که استفاده از ابزارهای 0.4 و 0.6 میلی متر ساییده شده به ترتیب باعث افت مقادیر R_{corr} به مقدار 22% و 83% نسبت به نمونه فرزکاری شده با ابزار نو می گردند. این امر نشان از مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی پایین سطح فرزکاری شده با ابزار 0.6 میلی متر ساییده شده دارد.

Influence of tool flank wear width on roughness, topography, microhardness and electrochemical corrosion resistance in high speed milling

Hamed Hassanpour, Amir Rasti, Mohammad Hossein Sadeghi*, Javad Hashemi Khosrowshahi

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran. sadeghim@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 17 December 2015

Accepted 07 February 2016

Available Online 05 March 2016

Keywords:

High Speed Milling

Surface Roughness

Microhardness

Electrochemical Corrosion Resistance

ABSTRACT

Owing to direct contact with the machined surface, the flank surface can cause unfavorable effects on the surface integrity in high speed milling. Thus, in this study, the influences of flank wear width on the main characteristics of surface integrity like roughness, topography, microhardness and electrochemical corrosion resistance during high speed milling process is investigated. Milling tests were performed under constant cutting conditions with three repetitions and using 12 tools with flank wear widths on the AISI 4340 hardened steel. It was concluded that using the tool with flank wear width up to 0.4 mm increases roughness and microhardness, uniformly (95% for surface roughness and 6.3% for microhardness relative to new tool). However, using a tool with the flank wear of 0.6 mm increases these outputs up to 484% and 18.6%, respectively. Surface topography images also revealed that using the tool with the flank wear width of 0.6 mm can cause irregular forms of material flow on the surface. Using the tool with the flank wear of 0.4 mm or less had an insufficient effect on the in-depth microhardness distribution. In addition, electrochemical impedance spectroscopy of the milled surfaces showed that relative to new tool, using tools with 0.4 and 0.6 mm flank wear, reduces R_{corr} up to 22% and 83%, respectively. It indicated lower electrochemical corrosion resistance of milled surfaces with 0.6 mm worn-out tools.

1- مقدمه

تأثیر آن بر خواص مکانیکی و عملکردی قطعه کار می پردازد [1]. از مهم ترین مشخصه های یکپارچگی سطح ماشین کاری می توان به زبری، میکروسختی، توپوگرافی و مقاومت به خوردگی اشاره کرد که خواص سطحی مانند مقاومت

سلامت سطح به مطالعه خصوصیات و ماهیت لایه سطح ماشین کاری شده و

Please cite this article using:

H. Hassanpour, A. Rasti, M. H. Sadeghi, J. Hashemi Khosrowshahi, Influence of tool flank wear width on roughness, topography, microhardness and electrochemical corrosion resistance in high speed milling, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 223-231, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Hassanpour, A. Rasti, M. H. Sadeghi, J. Hashemi Khosrowshahi, Influence of tool flank wear width on roughness, topography, microhardness and electrochemical corrosion resistance in high speed milling, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 223-231, 2016 (in Persian)

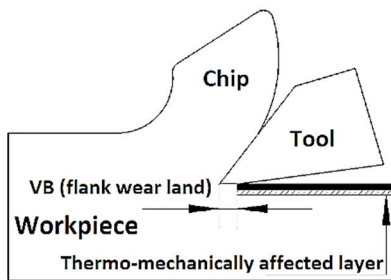


Fig. 1 The effect of tool flank wear on surface quality

شکل 1 اثر سایش جانبی ابزار روی کیفیت سطح

کوشی و همکاران [8] سلامت سطح فولاد ابزار AISI D2 را در فرایند فرزکاری مطالعه کرده و پی بردند که کمترین مقدار زبری با استفاده از ابزار نو به دست می آید. همچنین ابزار سرکروی اینسرتی، کیفیت سطح بهتری را نسبت به نوع یکپارچه آن نتیجه داد. آن‌ها دلیل این پدیده را عملکرد صحیح هندسه اینسرت‌ها در برش ماده مذکور دانستند.

رچ و همکاران [9] مطالعاتی در زمینه اثرات نرخ پیشروی، سرعت برشی و سایش ابزار در تراش کاری سخت چرخ‌دنده‌ای از جنس فولاد 27MnCr5 انجام دادند. نتایج نشان داد که سایش ابزار تأثیر چندانی روی زبری سطح ندارد. افزایش دمای منطقه برش و نرم شدن بیش از حد ماده قطعه کار در اثر استفاده از ابزار ساییده شده، باعث پر شدن پستی و بلندی‌های مسیر حرکت ابزار توسط ماده ساییده کار شده و سطح یکنواخت و همگنی را نتیجه می‌دهد. آن‌ها همچنین مشاهده نمودند که ابزارهای پوشش‌دار سلامت سطح بهتری را نسبت به ابزارهای بدون پوشش ایجاد می‌کنند.

ژی و همکاران [10] در تحقیقاتی، اثر سایش ابزار روی سلامت سطح فولاد آلیاژی AISI 4140 را بررسی کرده و دریافتند که افزایش کرنش ماده در حین عملیات ماشین‌کاری، سایش ابزار را بیشتر می‌کند. این پدیده باعث بالا رفتن انرژی برش شده و آسیب سطح قطعه را در پی دارد. از این رو سایش ابزار به‌عنوان فاکتوری برجسته در ایجاد عیوب سطحی قطعه تولیدی معرفی شد.

لی و همکاران [11] به بررسی سلامت سطح در فرزکاری خشک فولاد سخت پرداختند. با توجه به مشاهدات مشخص شد که کار سختی حاصل از بارگذاری مکانیکی سبب افزایش میکروسختی سطح ماشین‌کاری نسبت به لایه‌های زیرین می‌شود. در همین تحقیق آن‌ها پی بردند که سایش جانبی ابزار (VB) تا 0.2 میلی‌متر تأثیر چندانی بر روی زبری سطح ندارد.

دوگرا و همکاران [12] طی بررسی سلامت سطح فولاد آلیاژی 8620 AISI اظهار داشتند که مکانیزم شکست ابزارهای کاربیدی در سرعت‌های پایین، پدیده نفوذ³، چسبندگی⁴ و تغییر شکل پلاستیک ابزار⁵ می‌باشد. این درحالی است که پدیده لب‌پریدگی⁶ و شکست لبه ابزار⁷ در سرعت‌های بالا، مکانیزم‌های غالب خواهند بود.

ژانگ و همکاران [13] در بررسی فرزکاری فولاد سخت با استفاده از روان کاری⁸ CMQL و حالت خشک دریافتند که پوشش ابزارهای کاربیدی در اثر تنش‌های حرارتی و مکانیکی از بستر ابزار جدا شده و این امر سبب کاهش مقاومت ابزار می‌شود. روان کاری CMQL نیز به دلیل نفوذ عالی به منطقه برش و کم کردن اصطکاک، قادر است تا سایش ابزار را نسبت به حالت

به خستگی، استحکام و خوردگی قطعه را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. از این رو، دستیابی به سلامت سطح مناسب، یکی از نیازهای اساسی در چرخه تولید محصول است [2].

زبری سطحی روی عمر خستگی و دیگر خواص سطحی قطعه نهایی تأثیرگذار بوده و در بسیاری از مواقع، تنها معیار رد و یا قبول قطعه تولیدی است. علاوه بر این، در فرایندهای براده‌برداری مکانیکی، تغییر شکل پلاستیک قابل توجه ماده، باعث بالا رفتن سختی لایه سطحی و زیرسطحی قطعه در مقیاس میکرو می‌شود [3]. به علت این کرنش پلاستیک شدید، درجه حرارت قطعه در طول عملیات ماشین‌کاری از دمای آستنیت‌ه فراتر رفته و تغییرات فازی¹ رخ می‌دهد.

از دیگر معیارهای مهم سلامت سطح، توپوگرافی سطح بوده که بیانگر حفره‌ها، عیوب و ناهمواری‌های ایجاد شده در سطح پس از ماشین‌کاری می‌باشد. با استفاده از نتایج توپوگرافی می‌توان اثرات برجای‌مانده و عیوب احتمالی ناشی از فرآیند ماشین‌کاری را تحلیل کرد. خوردگی گالوانیکی یکی از مهم‌ترین اقسام خوردگی الکتروشیمیایی می‌باشد که همواره به‌عنوان یک مسئله جدی صنایع مختلف را تهدید می‌کند. این نوع خوردگی هنگامی که دو فلز به پتانسیل الکتروشیمیایی مختلف به‌واسطه یک محلول الکترولیت با یکدیگر در تماس باشند رخ می‌دهد. در صنایع نفت و گاز هنگامی که یک لوله زیرزمینی از دو نوع خاک متفاوت عبور کرده و یا جنس لوله‌ها تغییر پیدا می‌کند این نوع خوردگی رخ می‌دهد. انجام پروسه‌های ساخت روی یک نوع جنس خاص باعث تغییر مقاومت خوردگی می‌گردد به‌عنوان مثال، کارسرد، سطح فعال‌تری ایجاد می‌کند که نسبت به یک فلز آنیل شده به‌عنوان آند عمل می‌کند. در برش فلزات، پدیده‌های مختلفی نظیر بار مکانیکی ضربه‌ای، شوک حرارتی در اثر تغییر شکل سریع و نیز ناخالصی و ناهمواری در ماده اولیه باعث می‌گردد تا سطوح مختلف ابزار مورد استفاده، در حین فرایند ساییده شود. این آسیب‌های غیرقابل اجتناب ابزار، کیفیت قطعه ماشین‌کاری شده را تحت تأثیر قرار داده و دقت ابعادی و سلامت سطح را کاهش می‌دهد [4]. بنابراین برای رسیدن به سلامت سطح قابل قبول، لزوم استفاده از ابزارهای با هندسه برشی مناسب و پایداری حرارتی و شیمیایی بالا در طی ماشین‌کاری امری ضروری است [5].

زاویه جانبی ابزار مستقیماً روی عمر آن، استحکام لبه برشی و انتقال حرارت از موضع ماشین‌کاری اثر دارد. افزایش زاویه جانبی موجب کاهش نیروهای وارد بر سطح آزاد می‌شود که این اثر در مقادیر پیشروی کمتر بیشتر مشهودتر است. نتیجه‌ی این عمل کاهش حرارت تولیدی و افزایش عمر ابزار می‌باشد. مقدار نرمال زاویه جانبی برای ابزار بین 6 تا 10 درجه است. مقادیر بزرگ‌تر آن در ماشین‌کاری مواد سخت که تمایل به پیوند با لبه برش دارند کاربرد دارد [6].

یکی از چالش‌های موجود در ماشین‌کاری فولادهای آلیاژی سخت، عیوب مکانیکی و حرارتی ناشی از سایش جانبی ابزار² (VB) روی سطح قطعه کار می‌باشد [7]. این نوع سایش در اثر مالش سطح آزاد ابزار با سطح ماشین‌کاری شده به وجود می‌آید و در نتیجه کیفیت سطح نهایی قطعه را تحت شعاع خود قرار می‌دهد (شکل 1).

در ادامه به بررسی پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه تأثیر پهنای ساییدگی ابزار بر مشخصه‌های سلامت سطح پرداخته می‌شود.

³ Diffusion

⁴ Sticking

⁵ Tool Plastic Deformation

⁶ Chipping

⁷ Tool Edge Breakage

⁸ Cryogenic Minimum Quantity Lubrication

¹ Phase Transformation

² Tool Flank Wear

2- مواد، تجهیزات و روش انجام آزمایش

جنس ماده قطعه‌کار در این تحقیق، فولاد آلیاژی 4340 با سختی 425 ویکرز بود. آزمایش‌های طرح‌ریزی شده روی نمونه‌هایی مکعبی شکل با ابعاد 40×30×20 میلی‌متر انجام گرفت. ترکیب شیمیایی این فولاد که با آنالیز کوانتومتری به‌دست‌آمده در جدول 1 ارائه شده است. به‌منظور افزایش سختی، نمونه‌ها در کوره با دمای 870 درجه سانتی‌گراد آستنیت‌گشته، سپس به مدت 2 ساعت در دمای 425 درجه سانتی‌گراد برگشت داده شدند و در نهایت در حمام روغن به دمای محیط رسیدند [17].

برای انجام آزمایش‌ها، از ماشین فرز کنترل عددی چهار محوره کنترل هم‌زمان میکرون¹ مدل HSM700 با حداکثر نرخ پیشروی میز 20000 میلی‌متر بر دقیقه و حداکثر دوران اسپیندل 42000 دور بر دقیقه استفاده شد. در تمامی آزمایش‌ها، ابزار فرز سرکروی دو لبه اینسرتی کاربایدی محصول شرکت سندویک² با کد 16A20-045 و قطر 16 میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. تصویر مربوط به آزمایش‌های فرزکاری سرعت بالا در شکل 2 آمده است.

به‌منظور اعمال جریان روان‌کار از سیستم (MQL³) استفاده گردید. در این سیستم از یک کمپرسور جهت تولید هوای فشرده استفاده شده که فشار آن توسط رگلاتور قابل تنظیم است. روغن از مخزن تعبیه شده در بالای دستگاه، توسط لوله‌های پلاستیکی و به کمک یک پمپ به نازل هدایت می‌گردد.

در دهانه خروجی نازل، به علت سرعت زیاد جریان هوا، روغن به قطرات ریز شتاب‌داری تبدیل می‌شود. این اسپری هوا-روغن تولید شده، برای روان‌کاری ناحیه فرزکاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. روان‌کاری MQL در آزمایش‌ها با استفاده از روغن معدنی با دبی 240 میلی‌لیتر بر ساعت و فشار 6 بار انجام گرفت. به‌منظور عملکرد بهتر سیستم روان‌کاری، از دو نازل پاشش با زاویه 45 درجه نسبت به ابزار بهره گرفته شد [18,19].

در این تحقیق، ماکزیمم ساییدگی سطح جانبی ابزار به‌عنوان پارامتر ورودی در نظر گرفته شد. بر این اساس، 12 آزمایش در 4 سطح و با 3 بار تکرار، شامل سایش جانبی صفر، 0.2، 0.4 و 0.6 میلی‌متر طرح‌ریزی شدند. سایش جانبی ابزار با استفاده از میکروسکوپ نوری استرویوی الیمپوس⁴ مدل SZX16 و نرم‌افزار آنالیز تصویر اندازه‌گیری شد (شکل 3).

به همین منظور ابتدا قبل از بررسی اثر سایش ابزار روی سلامت سطح، عملیات ماشین‌کاری با شرایط فرزکاری یکسان و در یک بازه زمانی مشخص انجام شد. سپس، اینسرت‌ها از ابزارگیر جدا شده و میزان سایش آن‌ها با میکروسکوپ بررسی گردید. به محض این‌که میزان سایش جانبی به مقدار موردنظر رسید، عملیات متوقف شد. شکل 4 دو اینسرت ساییده شده و نحوه اندازه‌گیری سایش ابزار با استفاده از نرم‌افزار آنالیز تصویر روی این اینسرت‌ها را نشان می‌دهد.

در نهایت، با استفاده از همین اینسرت‌های ساییده شده، 12 آزمایش در شرایط برشی آورده شده در جدول 2 و در حالت فرزکاری موافق صورت گرفت.

برای اندازه‌گیری زبری سطح، از دستگاه زبری‌سنج پرتابل ماهر⁵ مدل PS1 با دقت 0.001 میکرومتر و طول کورس 5.6 میلی‌متر استفاده گردید.

خشک به‌طور چشمگیری کاهش دهد. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که افزایش سایش ابزار سبب تشدید میزان تغییر شکل پلاستیک (کارسختی) سطح ماشین‌کاری می‌شود که این امر افزایش ضخامت لایه سفید را در پی خواهد داشت.

در پژوهشی دیگر کامینسکی و همکاران [14] سعی در کاهش حرارت منطقه برش با کمک فشار جت آب در تراش‌کاری فولاد ضدزنگ داشتند. نیروهای برشی کمتر، طول تماس کوچک‌تر، نسبت فشرده‌گی براده کمتر و سطح پرداخت مطلوب‌تر، نتیجه به‌کارگیری سیستم فشار بالای جت آب به‌جای حالت روان‌کاری سنتی بود.

نگ و همکاران [15] نیز در پژوهشی، تأثیر سایش ابزار در سلامت سطح آلیاژ اینکونل 718 را بررسی کردند. آزمایش‌ها در سه حالت بدون سایش، با پهنای سایش 0.15 میلی‌متر و نیز با پهنای سایش 0.3 میلی‌متر انجام گرفت. بیشترین نیروی ماشین‌کاری مربوط به ابزار با بیشترین پهنای سایش اختصاص داشت و همچنین میزان تغییرات تنش پسماند در ابزار نو کمتر از دو حالت دیگر بود. از طرفی این محققان برای مشخص کردن عمق تغییر شکل پلاستیک حاصل از عملیات ماشین‌کاری، با اندازه‌گیری چگالی مرزانه‌ها نسبت به عمق دریافتند که در حالت ابزار ساییده شده بیشترین تغییرات میکروساختاری رخ می‌دهد.

ژانگ و همکاران [16] در بررسی تجربی میکروسختی در فرایند فرزکاری فولاد سخت H13 دریافتند که میکروسختی سطح ماشین‌کاری شده به راستای اندازه‌گیری وابسته است، به‌طوری‌که اندازه سختی در راستای پیشروی و عمود بر آن با یکدیگر متفاوت می‌باشد. عامل اصلی این تغییرات، اثرات مکانیکی حاصل از نیروی ماشین‌کاری گزارش گردید. به دلیل تأثیر ناچیز حرارت، هیچ دگرگونی فازی و ساختاری مشاهده نشد.

بررسی پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که تاکنون تحقیقات بسیار اندکی در زمینه مطالعه اثر سایش جانبی ابزار بر مشخصه‌های سطحی نظیر میکروسختی، بافت و مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی سطح در عملیات فرزکاری انجام گرفته است. از سوی دیگر سایش سطح آزاد ابزار در فرزکاری پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر و از علل اساسی خرابی سطح قطعات می‌باشد. لذا در تحقیق حاضر، تأثیر سایش ابزار روی سلامت سطح فولاد AISI 4340 با سختی 425 ویکرز در فرایند فرزکاری سرعت بالا مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور از 12 اینسرت برشی با هندسه و جنس یکسان و میزان پهنای ساییدگی متفاوت استفاده شد. آزمایش‌ها در شرایط برشی ثابت انجام گرفت و اثرات سایش ابزار روی زبری سطح، میکروسختی در سطح و لایه زیرسطح و همچنین مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی بررسی گردید. بررسی پژوهش‌های مطالعه شده در مقاله حاضر نشان می‌دهد که مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی نمونه‌های فرزکاری شده تاکنون گزارش نشده است. لذا در این مقاله به بررسی اثر سایش ابزار روی این خروجی در فرایند فرزکاری سرعت بالا پرداخته می‌شود. همچنین تصاویر بافت سطوح فرزکاری شده در حالت استفاده از ابزار نو و ساییده شده با یکدیگر مقایسه شد.

لازم به ذکر است با توجه به مکانیزم براده‌برداری در فرایند فرزکاری، همواره تنش بالایی میان ابزار و براده وجود دارد که فشرده‌گی شدیدی را در محل تماس ابزار و قطعه‌کار باعث می‌شود و نفوذ سیال را به این ناحیه محدود می‌کند. به همین منظور در این تحقیق، روان‌کاری با استفاده از حداقل سیال برشی با پاشش پرفشار اسپری روان‌کار از طریق دو نازل انجام گرفت.

¹ Micron
² Sandvic
³ Minimum Quantity Lubrication
⁴ Olympus
⁵ Mahr

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد آلیاژی 4340

Table 1 Chemical composition of 4340 alloy steel

عنصر	درصد وزنی (%)
کربن	0.38
نیکل	1.7
کروم	0.9
منگنز	0.69
مولیبدن	0.3
سیلیسیوم	0.28
آهن	پایه

علاوه بر میکروسختی سطح، تغییرات سختی در عمق قطعه و لایه زیرسطحی نیز بررسی شد. به همین منظور، ناحیه‌ای از سطح فرزکاری شده به صورت عرضی توسط دستگاه وایرکات، برش خورده و پس از پولیش‌زنی، سختی سنجی در عمق و در چهار نقطه به فواصل 20، 70، 120 و 17 میکرومتری از لایه سطحی صورت گرفت [20].

تصاویر بافت سطح حاصل از فرزکاری توسط میکروسکوپ نوری الیمپوس مدل DP25 با حداکثر بزرگ‌نمایی 1000 برابر انجام گردید. برای تعیین خواص الکتروشیمیایی سطوح فرزکاری شده، نمونه‌ها تحت آزمایش تعیین پتانسیل مدار باز (OCP) و طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) قرار گرفتند. محلول کلرید سدیم 3.5% برای انجام بررسی‌ها استفاده گردید.

از سل استاندارد³ دستگاه EG&G به همراه الکترودهای مرجح کالومل اشباع، الکتروکد کمکی پلاتین و نمونه مورد آزمایش، بنابر استاندارد ASTM G5 استفاده شد (شکل 3). دمای محلول‌ها برابر دمای آزمایشگاه بود. در مقاله حاضر از دستگاه پتانسیوستات IVIUMSTAT ساخت کشور هلند استفاده گردید. برای تحلیل داده‌های امپدانس و ارائه مدار معادل، نرم‌افزار زد-ویو⁴ به کار گرفته شد.

قبل از رسم منحنی‌های امپدانس، هر نمونه به مدت 1 ساعت بدون اعمال جریان، در محلول آزمایش قرار گرفته و هم‌زمان نمودار پتانسیل آن برحسب زمان رسم شد. در نهایت مقدار پتانسیل مدار باز برای هر نمونه نیز مشخص گردید.

برای فیت نتایج، مدار نشان داده شده در شکل 6 تشکیل شده از دو

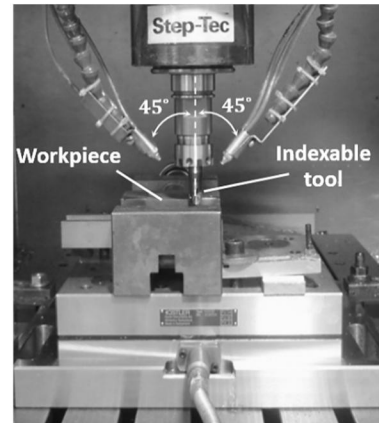
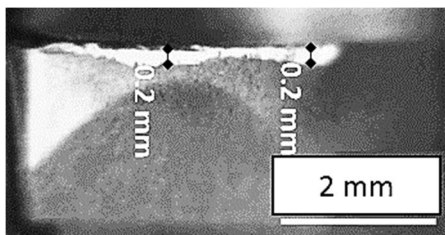
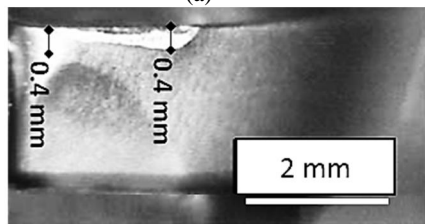


Fig. 2 Experimental setup; tool, workpiece, fixture and MQL nozzles

شکل 2 چیدمان آزمایش؛ ابزار، قطعه کار، فیکسچر و نازل‌های MQL



(a)



(b)

Fig. 4 Tool wears on flank face in high speed milling a) $VB_{max}=0.2$ mm b) $VB_{max}=0.4$ mm

شکل 4 سایش ابزار اندازه‌گیری شده روی سطح جانبی ابزار در فرزکاری سرعت بالا (a) $VB_{max}=0.4$ mm (b) $VB_{max}=0.2$ mm

جدول 2 پارامترهای فرزکاری سرعت بالای مورد استفاده در آزمایش‌ها

Table 2 High speed milling parameters used in experiments

مقادیر	پارامترهای برش
300	سرعت برشی (V_c) (m/min)
0.02	پیشروی (f_z) (mm/tooth)
3	عمق برش محوری (a_p)
2	عمق برش شعاعی (a_e)

³ Flat Cell

⁴ Zveiw



Fig. 3 Measuring setup of tool wear using SZX16 optical microscope

شکل 3 چیدمان اندازه‌گیری سایش ابزار با استفاده از میکروسکوپ نوری SZX16

در این تحقیق، زبری براساس معیار زبری متوسط (Ra) گزارش شد. زبری سنجی در پنج ناحیه مختلف از سطح نمونه‌ها انجام گرفت و میانگین آن‌ها به‌عنوان زبری نهایی منظور گردید.

به‌منظور اندازه‌گیری میکروسختی نیز، دستگاه سختی‌سنج باریس¹ مدل وی-تست² به کار گرفته شد. سختی‌سنجی براساس معیار ویکرز و تحت نیروی 0.5 کیلوگرمی، در مدت زمان 4 ثانیه انجام پذیرفت. میانگین میکروسختی سه ناحیه مختلف از یک سطح فرزکاری شده به‌عنوان معیار میکروسختی آن آزمایش مدنظر قرار گرفت.

¹ Bareiss

² V-Test

ساییده توزیع شده و منجر به جریان پلاستیک غیریکنواخت روی سطح قطعه کار می‌شود. در نتیجه با توجه به ماهیت دینامیکی نیرو در فرایند فرزکاری، ضربات عملیات براده برداری به دلیل افزایش نیرو و ارتعاشات ابزار شدیدتر شده و زبری سطح بالاتری را نتیجه می‌دهد [23].

همچنین این نمودار بیانگر آن است که تا سایش جانبی 0.4 میلی‌متری، زبری سطح با نرخ ثابتی افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت که فرزکاری با ابزاری تا سایش جانبی 0.4 میلی‌متر، دارای شرایط برشی پایدار است. با بالاتر رفتن سایش و رسیدن به ساییدگی 0.6 میلی‌متری، زبری سطح رشد چشمگیری یافته و با افزایش 2.2 برابری (نسبت به زبری سطح در سایش جانبی 0.4 میلی‌متری) به مقدار 2.63 میکرومتر می‌رسد. در واقع سایش بیش از حد ابزار باعث بروز پدیده شخم‌زنی در ناحیه برش شده که این پدیده جریان غیریکنواخت ماده و زبری سطح نامطلوب قطعه کار را به دنبال دارد [24].

2-3- بافت سطح

توصیف بافت سطحی حاصل از فرایند ماشین‌کاری، بسیار پیچیده است. اما نقایص و عیوب، الگوی غالب سطح و پستی و بلندی‌ها، معیارهایی برای مطالعه و اندازه‌گیری این شاخصه به شمار می‌آیند [26,25]. در این تحقیق برای بررسی خصوصیات بافت سطح، از تصاویر ثبت شده توسط میکروسکوپ

جدول 3 مقادیر پارامترهای خروجی برحسب میزان سایش ابزار

Table 3 Output parameters values for each flank wear width

شماره آزمایش	پارامترهای خروجی		ماکزیمم سایش جانبی (VB_{max}) (mm)
	میکروسختی سطح ($HV_{0.05}$) (H)	زبری سطح (R_a) (μm)	
1	459	0.42	
2	455	0.49	0
3	451	0.45	
4	468	0.65	
5	466	0.59	0.2
6	470	0.62	
7	480	0.81	
8	485	0.79	0.4
9	488	0.85	
10	536	2.85	
11	544	2.44	0.6
12	539	2.60	

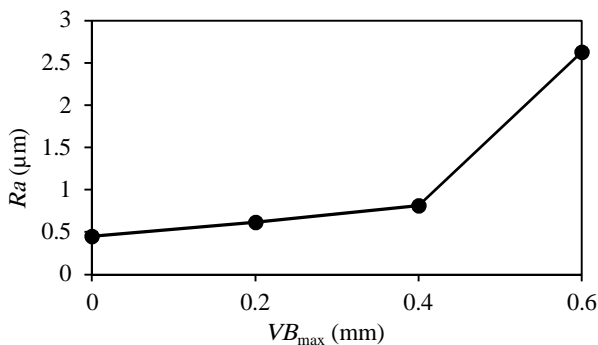


Fig. 7 Effect of tool flank wear width on surface roughness

شکل 7 اثر سایش جانبی ابزار روی زبری سطح

حلقه RC به صورت سری همراه با مقاومت محلول مورد استفاده قرار گرفت. در این مدار R_s مقاومت الکترولیت ناشی از افت پتانسیل بین نوک لاگین و سطح الکتروود می‌باشد به عبارتی می‌توان آن را مقاومت محلول دانست. R_{corr} مقاومت الکترولیتی مربوط به انتقال بار الکترونیکی از داخل الکترولیت به داخل فیلم اکسیدی شکل گرفته بر روی لایه سطحی است.

بار الکترونیکی هدایت‌کننده جریان می‌تواند الکترون‌ها یا یون‌ها باشند. انتقال بار از درون الکترولیت علاوه بر ایجاد مقاومت حقیقی در برابر عبور جریان، در جریان‌های متناوب به دلیل وجود یک اختلاف پتانسیل بین سطح الکتروود و الکترولیت و نیز وجود میدان الکترونیکی، ایجاد یک خاصیت خازنی می‌کند که در این‌جا با عنصر فاز ثابت C_{oxide} نشان داده شده است. R_{oxide} نیز مقاومت انتقال بار درون فیلم اکسیدی تشکیل شده روی لایه سطحی می‌باشد. در این‌جا به دلیل ماهیت اکسیدی فیلم و نیمه‌هادی بودن آن، انتقال جریان با مقاومت بیشتری مواجه است. C_{oxide} نیز به اثر خازنی همین فیلم مربوط می‌شود [21]. در این تحقیق، برای فیت کردن بهتر مدار معادل از عنصر فاز ثابت به جای خازن ایده‌آل استفاده شده است.

3- نتایج و بحث

همان‌طور که اشاره شد، در مجموع 12 آزمایش با استفاده از اینسرت‌هایی با سایش جانبی متفاوت انجام گرفت. جدول 3 مقادیر زبری و میکروسختی سطح اندازه‌گیری شده در هر آزمایش را به ازای مقادیر مختلف سایش ابزار نشان می‌دهد. در ادامه، هرکدام از این خروجی‌ها به صورت جداگانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

1-3- زبری سطح

تغییرات زبری سطح برحسب سایش جانبی ابزار، در شکل 7 نشان داده شده است. نتایج حکایت از افزایش زبری سطح در اثر ساییده شدن ابزار دارد. در واقع با بالا رفتن سایش ابزار، میزان درگیری ابزار و سطح ماشین‌کاری شده قطعه کار افزایش یافته و به تبع آن، اصطکاک و نیروی ماشین‌کاری بالا می‌رود [22]. همچنین، تنش‌های برشی به صورت غیریکنواخت روی سطح ابزار



Fig. 5 Measuring method of electrochemical resistance of milled surfaces

شکل 5 نحوه اندازه‌گیری مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی سطوح فرزکاری شده

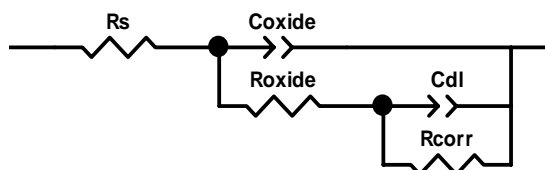


Fig. 6 Equivalent circuit for fitting impedance diagrams

شکل 6 مدار معادل مورد استفاده برای فیت نمودارهای امپدانس

تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. مقادیر میکروسختی نیز با تغییر اندازه سایش ابزار به‌طور میانگین بین 455 تا 540 ویکرز تغییر می‌کند که نشان از معنی‌دار بودن تأثیر میزان سایش بر میکروسختی سطح دارد.

تغییرات سختی سطح قطعه فرزکاری شده، توسط دو مکانیزم اصلی قابل توجیه است. در مکانیزم اول گرادیان دمایی شدید ناحیه برش، باعث تغییر فاز ماده شده و با سرد شدن سریع سطح، افزایش سختی را نتیجه می‌دهد. مکانیزم دوم نیز، تغییر شکل و اندازه دانه به علت تغییر شکل پلاستیک شدید در اثر کار مکانیکی و بروز پدیده کارسختی است [27]. در مجموع، میزان اثرگذاری این مکانیزم‌ها و برهم‌کنش آن‌ها بر یکدیگر، سختی نهایی سطح را تعیین می‌کنند. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، در فرزکاری با ابزار ساییده شده، به علت کند شدن لبه برنده ابزار برشی، نیروهای ماشین‌کاری بالا می‌روند. همچنین سطح آزاد ساییده شده ابزار، روی سطح ماشین‌کاری شده مالیده¹ می‌شود. بنابراین فشار بیشتری صرف جداسازی ماده و لهیدگی سطح جدید قطعه‌کار شده و به‌تبع آن، کارسختی به وجود آمده در سطح قطعه افزایش می‌یابد [28].

از سوی دیگر، با بالا رفتن اصطکاک به دلیل افزایش سطح درگیری ابزار و قطعه، گرمای تولید شده در ناحیه برش نیز افزایش یافته و حرارت بیشتری به قطعه‌کار وارد می‌شود. در نتیجه سختی سطحی حاصل از تغییرات فازی و سریع شدن سطح قطعه، بالا می‌رود.

نکته دیگر در مورد این نمودار، اختلاف 29 ویکرز سختی به‌دست آمده در استفاده از ابزاری با سایش جانبی 0.4 میلی‌متر در مقایسه با ابزار نو می‌باشد (افزایش 6.3%). این درحالی است که ابزار با سایش جانبی 0.6 میلی‌متر، 85 ویکرز سختی سطح بیشتری را نسبت به ابزار نو نتیجه می‌دهد (افزایش 18.6%) که نشان‌دهنده تأثیر مشهود این میزان سایش بر افزایش مضاعف سختی نهایی سطح قطعه نسبت به سختی اولیه است. دلیل این افزایش عمده در سختی سطح از فرزکاری با ابزار 0.4 میلی‌متر سایش به 0.6 میلی‌متر ساییده شده، افزایش بیش‌ازحد حرارت، انجام واکنش‌های سطح قطعه‌کار با محیط ماشین‌کاری و تشکیل فازهای سخت می‌باشد.

به‌منظور بررسی بهتر اثر سایش ابزار روی تغییرات سطح و لایه‌های زیرسطحی قطعه، مطابق شکل 10، مقادیر میکروسختی در چهار نقطه به فواصل 20، 70، 120 و 170 میکرومتری نسبت به سطح قطعه‌کار اندازه‌گیری شدند.

شکل 11 تغییرات میکروسختی در عمق قطعه‌کار و در این نقاط را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله از سطح، سختی کاهش می‌یابد.

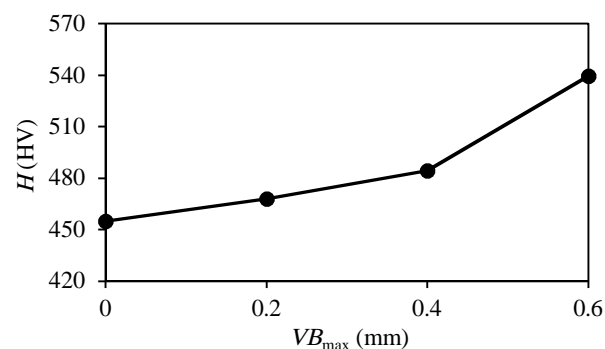


Fig. 9 Effect of tool flank wear width on surface microhardness

شکل 9 اثر سایش جانبی ابزار روی میکروسختی سطح

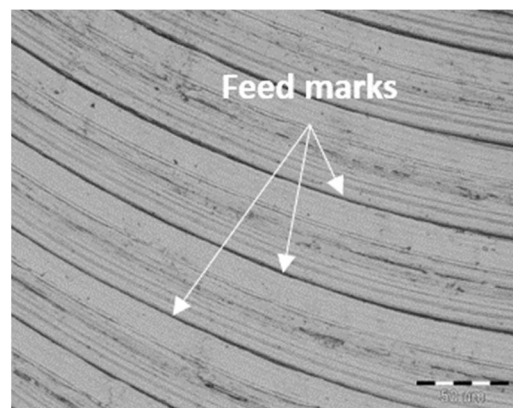
¹ Rubbing

نوری و الکترونی استفاده گردید. شکل 8 (a) تصویری از بافت سطح نمونه فرزکاری شده با ابزار نو را ارائه می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، استفاده از ابزار بدون سایش، بافت سطحی یکنواخت، هموار و همراه با عیوب کمتری را به وجود می‌آورد.

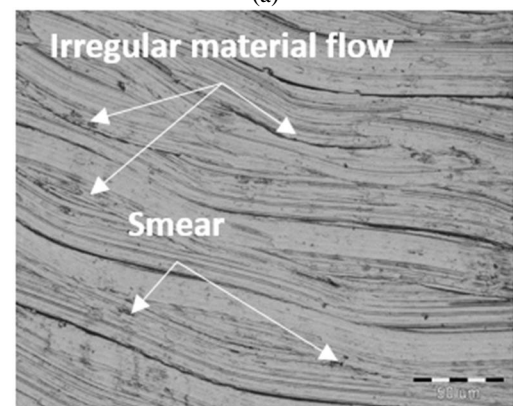
در شکل 8 (b) نیز بافت سطح به‌دست آمده برای نمونه فرزکاری شده با ابزار ساییده (سایش جانبی 0.6 میلی‌متر) قابل مشاهده است. پر واضح است که در هنگام فرزکاری با ابزار ساییده شده، اصطکاک بالا می‌رود. این اصطکاک به‌عنوان عاملی بازدارنده برای حرکت آزادانه ابزار و قطعه‌کار عمل کرده و تأثیر چشم‌گیری بر جریان ماده و تغییر شکل سطح خواهد داشت. اثر الگوی سیلان غیریکنواخت سطح حاصل از فرزکاری با ابزار ساییده شده در شکل 8 (b) مشهود است. از سوی دیگر، با افزایش اصطکاک، درجه حرارت منطقه برش افزایش می‌یابد. این افزایش درجه حرارت، باعث بروز نوعی سوختگی سطحی روی قطعه‌کار شده که به‌صورت نقاطی تیره در تصویر مشخص است.

3-3- میکروسختی سطح و عمق

شکل 9 تغییرات میکروسختی سطح فرزکاری شده را برحسب سایش ابزار نشان می‌دهد. در نگاه اول و با مشاهده مقادیر میکروسختی به‌دست آمده می‌توان دریافت که فارغ از میزان سایش ابزار، سختی سطح فرزکاری شده در تمامی آزمایش‌ها بالاتر از سختی اولیه قطعه (425 ویکرز) است. از طرفی استفاده از ابزاری با سایش جانبی بالاتر، میکروسختی سطح قطعه را بیشتر



(a)



(b)

Fig. 8 Surface texture of milled surface a) new tool #1 b) tool with 0.6 mm flank wear width #10

شکل 8 بافت سطح فرزکاری شده (a) ابزار نو آزمایش شماره 1 (b) ابزار با سایش جانبی 0.6 میلی‌متر آزمایش شماره 10

بررسی خواص الکتروشیمیایی سطح می‌پردازد. روش اول اندازه‌گیری پتانسیل مدار باز و دومی طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی سطح فرزکاری شده می‌باشد. شکل 12 نمودار تغییرات پتانسیل مدار باز مربوط به سطوح فرزکاری شده با ابزارهایی با پهنای ساییدگی مختلف را در محلول کلرید سدیم و در دمای محیط نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقدار پتانسیل مدار باز برای نمونه فرزکاری شده با ابزار نو، نجیب‌ترین (مثبت‌ترین) و برای نمونه فرزکاری شده با ابزار با پهنای ساییدگی 0.6 میلی‌متر، فعال‌ترین (منفی‌ترین) می‌باشد. در واقع پتانسیل مدار باز، تمایل ترمودینامیکی سطح برای انجام واکنش‌های الکتروشیمیایی را نشان می‌دهد که از عوامل مختلفی تأثیر می‌پذیرد. از جمله این عوامل می‌توان به وجود و یا عدم وجود ترکیب‌های فعال، ضخامت فیلم سطحی، ترک‌ها و یا حفره‌ها در لایه سطحی و نیز زبری اشاره کرد. با افزایش میزان ساییدگی تا 0.4 میلی‌متر، تمایل سطح برای انجام واکنش الکتروشیمیایی بیشتر می‌شود (منفی‌تر شدن میزان پتانسیل سطح)، ولی همچنان اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین مقدار این تمایل ترمودینامیکی با میزان تمایل به خوردگی نمونه فرزکاری شده با پهنای ساییدگی 0.6 میلی‌متر وجود دارد.

از آنجایی که ولتاژ مدار باز مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی سطح را به‌صورت کیفی بررسی می‌کند، در ادامه با استفاده از روش طیف‌سنجی امپدانس به بررسی دقیق‌تر این پارامتر پرداخته می‌شود.

اطلاعات حاصل از نمودارهای امپدانس با استفاده از مدار پیشنهادی شکل 6 برای مقادیر R_{COFF} در شکل 13 نشان داده شده است. این مقادیر که بیانگر مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی نمونه‌های فرزکاری شده با ابزارهایی با پهنای سایش متفاوت است، در محدوده 27 تا 161 کیلو اهم قرار دارند. در واقع، تغییرات در سایش ابزار با تغییر در مقادیر امپدانس و سیستم الکتروشیمیایی همراه است. پارامتر R_{COFF} مستقیماً به شارش الکترون‌ها و یون‌ها در سیستم الکتروشیمیایی مربوط می‌شود. افزایش این پارامتر به‌منزله افزایش مقاومت انتقال بار یا یون در فیلم سطحی است و کاهش این پارامتر تخریب یا تضعیف این لایه سطحی را نشان می‌دهد. با این توضیحات ملاحظه می‌شود که مقادیر R_{COFF} برای نمونه‌های فرزکاری شده با ابزارهای تا 0.4 میلی‌متر سایش تفاوت چندانی ندارند (تغییر 22% نسبت به نمونه‌های فرزکاری شده با ابزار نو). اما در نمونه فرزکاری شده با ابزار 0.6 میلی‌متر سایش شده مقدار R_{COFF} کاهش چشمگیری یافت (کاهش 83% نسبت به نمونه فرزکاری شده با ابزار نو).

همچنین بهره‌گیری از ابزاری با سایش بالاتر، میکروسختی عمق قطعه را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد و سختی بالاتری را در لایه زیرسطح قطعه‌کار به وجود می‌آورد. از سوی دیگر، کمترین بازه تغییرات سختی مربوط به ابزار نو و بیشترین تغییرات مربوط به ابزاری با سایش جانبی 0.6 میلی‌متر است. نکته قابل توجه دیگر، نزدیک بودن تقریبی توزیع میکروسختی در عمق برای ابزارهای با پهنای ساییدگی صفر، 0.2 و 0.4 میلی‌متر می‌باشد. مستقل از میزان سایش این ابزارها، سختی زیرلایه ماشین‌کاری شده در فاصله 70 میکرومتری از سطح قطعه، به سختی فولاد پایه (425 ویکرز) می‌رسد. در حقیقت اثرات بار حرارتی و کارسختی ناشی از تغییر شکل پلاستیک که عوامل افزایشدهنده سختی بودند، از این عمق به بعد حذف می‌شود. از سوی دیگر، در فرزکاری با ابزاری با سایش 0.6 میلی‌متر، در فاصله 120 میکرومتری از سطح، سختی به سختی اولیه می‌رسد.

3-4- مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی

به‌طور کلی مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی نمونه‌های فرزکاری شده وابسته به عواملی همچون ترکیب شیمیایی سطح بعد از ماشین‌کاری، ضخامت لایه اکسیدی سطح، وجود ترک‌های ریز و درشت، ناهمواری‌های سطحی و همچنین زبری سطح است. این پارامتر عاملی کلیدی و مهم در کارکرد قطعاتی است که در طی چرخه عمر خود تحت بارگذاری دینامیکی قرار دارند [29]. همان‌طور که قبلاً گفته شد، مقاله حاضر با دو روش به

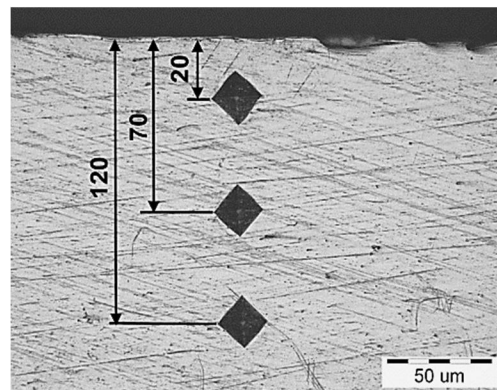


Fig. 10 Microhardness measuring points on the cross section of the workpiece

شکل 10 نقاط اندازه‌گیری میکروسختی مقطع عرضی قطعه‌کار

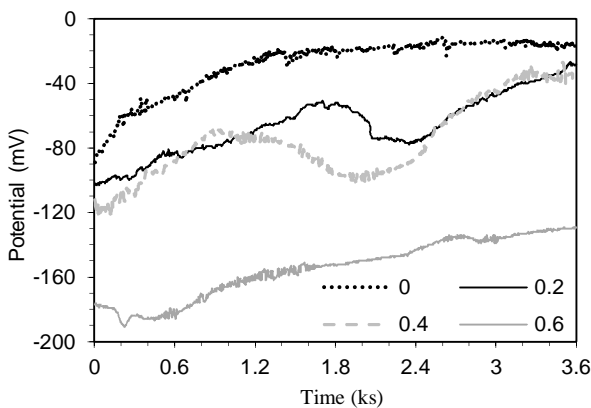


Fig. 12 Variations of open circuit potential values versus time for milled samples using tools with different flank wear.

شکل 12 مقادیر تغییرات پتانسیل مدار باز با زمان برای نمونه‌های فرزکاری شده با ابزارهایی با سایش‌های ابزار متفاوت

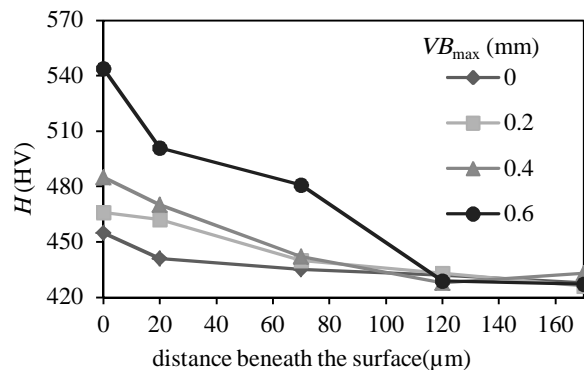


Fig. 11 Microhardness distribution and variations in sub-surface of milled surface for different flank wear widths

شکل 11 توزیع و تغییرات میکروسختی در زیر سطح فرزکاری شده برای مقادیر مختلف سایش جانبی ابزار

5- مقادیر طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی سطوح فرزکاری شده نشان داد که استفاده از ابزارهای 0.4 و 0.6 میلی‌متر ساییده شده به ترتیب باعث افت مقادیر R_{corr} به مقدار 22% و 83% نسبت به نمونه فرزکاری شده با ابزار نو می‌گردند. این امر نشان از مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی پایین سطح فرزکاری شده با ابزار 0.6 میلی‌متر ساییده شده دارد.

5- مراجع

- [1] J. P. Davim, *Surface integrity in machining*, pp. 1-35, London: Springer, 2010.
- [2] J. P. Davim, *Machining: fundamentals and recent advances*, pp. 59-91, London: Springer, 2008.
- [3] D. Axinte, R. Dewes, High-speed milling of AISI H13 hot-work tool steel using polycrystalline cubic boron nitride ball-nose mills: From experimental investigations and empirical modelling to functional testing of the machined surfaces, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 224, No. 1, pp. 15-24, 2010.
- [4] V. P. Astakhov, *Tribology of metal cutting*, pp. 220-273, Amsterdam: Elsevier, 2006.
- [5] H. Hassanpour, M. H. Sadeghi, A. Rasti, Investigation of microhardness and white layer in milling of hardened steel using response surface methodology, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 175-182, 2015 (in Persian).
- [6] T. Childs, *Metal machining: theory and applications*, pp. 35-80, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [7] V. P. Astakhov, The assessment of cutting tool wear, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 6, pp. 637-647, 2004.
- [8] P. Koshy, R. Dewes, D. Aspinwall, High speed end milling of hardened AISI D2 tool steel (~ 58 HRC), *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 127, No. 2, pp. 266-273, 2002.
- [9] J. Rech, A. Moisan, Surface integrity in finish hard turning of case-hardened steels, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 5, pp. 543-550, 2003.
- [10] Q. Xie, A. E. Bayoumi, L. A. Kendall, On tool wear and its effect on machined surface integrity, *Journal of materials shaping technology*, Vol. 8, No. 4, pp. 255-265, 1990.
- [11] W. Li, Y. Guo, C. Guo, Superior surface integrity by sustainable dry hard milling and impact on fatigue, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 62, No. 1, pp. 567-570, 2013.
- [12] M. Dogra, V. Sharma, A. Sachdeva, N. Suri, Tool life and surface integrity issues in continuous and interrupted finish hard turning with coated carbide and CBN tools, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 226, No 3, pp. 431-444, 2012.
- [13] S. Zhang, J. Li, H. Lv, Tool wear and formation mechanism of white layer when hard milling H13 Steel under different cooling/lubrication conditions, *Advances in Mechanical Engineering*, Art. No. 949308, 2014.
- [14] J. Kaminski, B. Alvelid, Temperature reduction in the cutting zone in water-jet assisted turning, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 106, No. 1, pp. 68-73, 2000.
- [15] R. L. Peng, J. Zhou, Surface Integrity and the Influence of Tool Wear in High Speed Machining of Inconel 718, *The 13th International Conference on Fracture (ICF13)*, Vol. 5, pp. 4229-4238, Beijing, China, June 16-21, 2013.
- [16] S. Zhang, W. Li, Y. Guo, Process design space for optimal surface integrity in finish hard milling of tool steel, *Production Engineering*, Vol. 6, No. 4-5, pp. 355-365, 2012.
- [17] H. Chandler, *Heat treaters' guide: practices and procedures for irons and steels*, pp. 27-76: ASM international, 1994.
- [18] I. H. Mulyadi, P. T. Mativenga, Random or intuitive nozzle position in high-speed milling using minimum quantity lubricant, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 228, No. 1, pp. 21-30, 2014.
- [19] L. L. De Lacalle, C. Angulo, A. Lamikiz, J. Sanchez, Experimental and numerical investigation of the effect of spray cutting fluids in high speed milling, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, No. 1, pp. 11-15, 2006.
- [20] A. Mantle, D. Aspinwall, Surface integrity of a high speed milled gamma titanium aluminide, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 118, No. 1, pp. 143-150, 2001.
- [21] A. J. Bard, L. R. Faulkner, *Electrochemical methods: fundamentals and applications*, pp. 632-656, New York: Wiley New York, 1980.
- [22] R. Pavel, I. Marinescu, M. Deis, J. Pillar, Effect of tool wear on surface finish for a case of continuous and interrupted hard turning, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 170, No. 1, pp. 341-349, 2005.
- [23] H. Hassanpour, A. Rasti, M. H. Sadeghi, M. Hosein, A. R. O. Saadatbakhsh, Effect of cutting fluid application on surface roughness in hard milling of 4340-alloyed steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No14, pp 50-60, 2015 (in Persian).
- [24] H. Kishawy, M. Elbestawi, Tool wear and surface integrity during high-

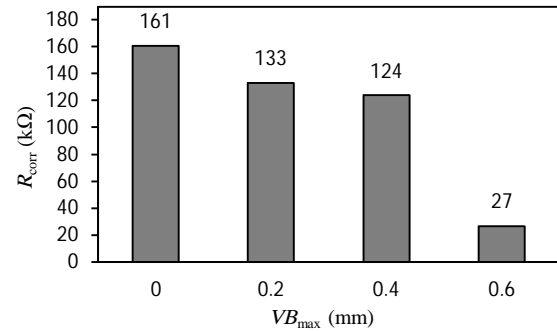


Fig. 13 R_{corr} values obtained from impedance experiment for milled samples with different tool flank wears.

شکل 13 مقادیر پارامتر R_{corr} حاصل از آزمایش امپدانس برای نمونه‌های فرزکاری شده با سایش ابزار مختلف

این تفاوت فاحش با توجه به اختلاف معنادار زبری سطح در نمونه‌های فرزکاری شده با ابزارهایی تا سایش جانبی 0.4 میلی‌متر و ابزار 0.6 میلی‌متر قابل توجه است. از طرفی، همان‌طور که توپوگرافی سطوح فرزکاری شده نشان داد، استفاده از ابزار بیش‌ازحد ساییده شده (سایش 0.6 میلی‌متر)، بافت سطحی غیریکنواخت‌تر و همراه با ترک‌های سطحی بیشتر را به وجود می‌آورد. این ناهمواری‌ها با کاستن یکپارچگی سطح، محل مناسبی برای واکنش الکتروشیمیایی سطح هستند. از این‌رو، با افزایش پهنای ساییدگی ابزار، ولتاژ مدار باز سطوح فرزکاری شده منفی‌تر شده و مقدار R_{corr} کمتر می‌گردد. دلیل دیگر این کاهش شدید را می‌توان ناشی از تجزیه سیال پایه معدنی (روغن برش بهران 11) در اثر حرارت بالاتر در فرزکاری با ابزار 0.6 میلی‌متر ساییده شده دانست. در نتیجه مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی سطح کاهش می‌یابد.

4- نتایج

در این پژوهش فرزکاری سرعت‌بالای فولاد 4340 سخت شده در حضور روان‌کاری MQL مورد بررسی قرار گرفت و اثر سایش جانبی ابزار روی زبری و بافت سطح، توزیع میکروسختی و مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی بررسی گردید. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش به‌صورت خلاصه در ادامه آورده شده است:

- 1- فرزکاری سرعت‌بالا با سایش ابزار تا 0.4 میلی‌متر، قابلیت دستیابی به زبری سطح زیر 0.8 میکرومتر را فراهم می‌سازد. اما با بیشتر شدن سایش ابزار و بروز پدیده شخم‌زنی، زبری سطح تا 2.85 میکرومتر افزایش می‌یابد.
- 2- تصاویر بافت سطح به‌روشنی نشان می‌دهند که استفاده از ابزار بیش‌ازحد ساییده شده باعث ایجاد الگوی غیریکنواخت جریان ماده و سوختگی‌های موضعی روی سطح شده و بافت سطح را به هم می‌ریزد.
- 3- در تمامی آزمایش‌ها و مستقل از شرایط برشی، سختی سطح فرزکاری شده بالاتر از سختی اولیه آلیاژ بود و سخت‌ترین سطح در زمان استفاده از ابزاری با سایش جانبی 0.6 میلی‌متر به دست آمد که افزایش 18.6% را نسبت به فرزکاری با ابزار نو نتیجه می‌دهد.
- 4- استفاده از ابزاری با سایش جانبی بیش‌ازحد (0.6 میلی‌متر)، میکروسختی عمق قطعه را به‌روشنی تحت تأثیر قرار می‌دهد. این در حالی است که مقدار سایش 0.4 میلی‌متر و کمتر، تأثیر ناچیزی بر توزیع میکروسختی عمق قطعه دارند.

- Manufacture*, Vol. 227, No. 2, pp. 191-209, 2013 .
- [27] C. Duan, W. Kong, Q. Hao, F. Zhou, Modeling of white layer thickness in high speed machining of hardened steel based on phase transformation mechanism, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 69, No. 1-4, pp. 59-70, 2013 .
- [28] G. Bartarya, S. Choudhury, State of the art in hard turning, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 53, No. 1, pp. 1-14, 2012 .
- [29] M. G. Fontana, *Corrosion engineering*, pp. 1-9: Tata McGraw-Hill Education, 2005.
- speed turning of hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride tools, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 215, No. 6, pp. 755-767, 2001 .
- [25] G. T. Smith, *Industrial metrology: surfaces and roundness*, pp. 1-63, London: Springer 2002 .
- [26] R. Suresh, S. Basavarajappa, V. N. Gaitonde, G. Samuel, J. P. Davim, State-of-the-art research in machinability of hardened steels, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering*