

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

حامد حسنپور<sup>1</sup>, امیر راستی<sup>1</sup>, محمدحسین صادقی<sup>2</sup>, جواد هاشمی خسروشاهی<sup>3</sup>

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

\* تهران، صندوق پستی 14115-143

sadeghim@modares.ac.ir

### چکیده

سطح جانبی ابزار به علت تماس مستقیم با سطح ماشین کاری شده می‌تواند اثرات ناهمelogی روی سلامت سطح قطعه کار در فرزکاری سرعت بالا داشته باشد. به همین منظور، در این پژوهش اثر پهنای سایش ابزار روی مشخصه‌های اصلی سلامت سطح شامل؛ زبری، بافت، میکروسختی و نیز مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی سطح در فرایند فرزکاری سرعت بالا بررسی شده است. آزمایش‌ها توسط 12 ابزار با سایش جانبی صفر، 0.4 و 0.6 میلی‌متر با سه بار تکرار روی فولاد آلیازی 4340 با سختی 425 ویکرز و در شرایط برش ثابت انجام گرفت. تابع نشان داد که تا سایش جانبی ابزار 0.4 میلی‌متر، زبری سطح و میکروسختی سیر صعودی یکنواختی را تجربه می‌کنند (آفایش زبری سطح تا 95% و میکروسختی سطح تا 6.3% نسبت به ابزار نو). اما استفاده از ابزاری با سایش جانبی 0.6 میلی‌متر، مقادیر زبری سطح و میکروسختی را به ترتیب تا 484% و 18.6% نسبت به ابزار نو آفایش می‌دهد. تصاویر بافت سطح نیز نشان داد که استفاده از ابزار با سایش جانبی 0.6 میلی‌متر، باعث جریان غیریکنواخت ماده روی سطح می‌شود. استفاده از ابزاری با سایش جانبی 0.4 میلی‌متر 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 0.6 میلی‌متر سایده شده به ترتیب باعث افت مقادیر  $R_{corr}$  به مقدار 22% و 83% نسبت به نمونه فرزکاری شده با ابزار نو می‌گردد. این امر نشان از مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی پایین سطح فرزکاری شده با ابزار 0.6 میلی‌متر سایده شده دارد.

### 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

## 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.

تأثیر آن بر خواص مکانیکی و عملکردی قطعه کار می‌پردازد [1]. از مهم‌ترین

مشخصه‌های یکپارچگی سطح ماشین کاری می‌توان به زبری، میکروسختی،

توپوگرافی و مقاومت به خوردگی اشاره کرد که خواص سطحی مانند مقاومت

### 1- مقدمه

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:

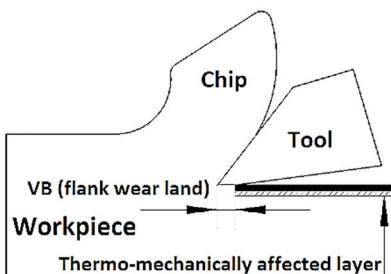


Fig. 1 The effect of tool flank wear on surface quality

شکل ۱ اثر سایش جانبی ابزار روی کیفیت سطح

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

رج و همکاران [9] مطالعاتی در زمینه اثرات رخ پیش روی، سرعت برشی و سایش ابزار در تراش کاری سخت چرخدنده ای 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 بلندی های مسیر حرکت ابزار توسط ماده قطعه کار شده و سطح یکنواخت و همگنی را نتیجه می دهد. آنها همچنین مشاهده نمودند که ابزارهای پوشش دار سلامت سطح بهتری را نسبت به ابزارهای بدون پوشش ایجاد می کنند.

ژی و همکاران [10] در تحقیقاتی، اثر سایش ابزار روی سلامت سطح فولاد آیاژی AISI 4140 را بررسی کرده و دریافتند که افزایش کرنش ماده در حین عملیات ماشین کاری، سایش ابزار را بیشتر می کند. این پدیده باعث بالا رفتن انرژی برش شده و آسیب سطح قطعه را در پی دارد. ازین رو سایش ابزار به عنوان 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 برگذاری مکانیکی سبب افزایش میکروسختی سطح ماشین کاری نسبت به لایه های زیرین می شود. در همین تحقیق آنها پی برندن که سایش جانبی ابزار (VB) تا 0.2 میلی متر 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 کاربایدی در سرعت های پایین، پدیده نفوذ<sup>۳</sup>، چسبندگی<sup>۴</sup> و تغییر شکل پلاستیک ابزار<sup>۵</sup> می باشد. این در حالی است که پدیده لبریدگی<sup>۶</sup> و شکست لبه ابزار<sup>۷</sup> در سرعت های بالا مکانیزم های غالب خواهد بود.

ژانگ و همکاران [13] در بررسی فرزکاری فولاد سخت با استفاده از رون کاری<sup>۸</sup> CMQL و حالت خشک دریافتند که پوشش ابزارهای کاربایدی در اثر تنفس های حرارتی و مکانیکی از بستر ابزار جداسده و این امر سبب کاهش مقاومت ابزار می شود. رون 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 می دهد. 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 برآبدرباری مکانیکی، تغییر شکل پلاستیک قابل توجه ماده، باعث بالا رفتن سختی لایه سطحی و زیرسطحی قطعه در مقیاس میکرو می شود [3]. به علت این کرنش پلاستیک شدید، درجه حرارت قطعه در طول عملیات ماشین کاری از دمای آستانته فراتر رفته و تغییرات فازی<sup>۹</sup> رخ می دهد.

از دیگر معیارهای مهم سلامت سطح، توبوگرافی سطح بوده که بیانگر حفره ها، عیوب و ناهمواری های ایجاد شده در سطح پس از ماشین کاری می باشد. با استفاده از نتایج توبوگرافی می توان اثرات بر جای مانده و عیوب احتمالی ناشی از فرایند ماشین کاری را تحلیل کرد. خوردگی گالوانیکی یکی از مهم ترین اقسام خوردگی الکتروشیمیایی می باشد که همواره به عنوان یک مسئله جدی صنایع مختلف را تهدید می کند. این نوع خوردگی هنگامی که دو فلز به پتانسیل الکتروشیمیایی مختلف به واسطه یک محلول الکتروولیت با یکدیگر در تماس باشند رخ می دهد. در صنایع نفت و گاز هنگامی که یک لوله زیرزمینی از دو نوع خودگی رخ می دهد. انجام پروسه های ساخت روى یک نوع می کند این نوع خوردگی رخ می دهد. انجام پروسه های ساخت روى یک نوع جنس خاص باعث تغییر مقاومت خوردگی می گردد به عنوان مثال، کارسرد، سطح فعلی ایجاد می کند که نسبت به یک فلز آنل شده به عنوان آند عمل می کند. در برش فلزات، پدیده های مختلفی نظیر بار مکانیکی ضربه ای، شوک حرارتی در اثر تغییر شکل سریع و نیز ناخالصی و ناهمواری در ماده اولیه باعث می گردد تا سطوح مختلف ابزار مورد استفاده، در حین فرایند ساییده شود. این آسیب های غیرقابل اجتناب ابزار، کیفیت قطعه ماشین کاری شده را تحت تأثیر قرار داده و دقت ابعادی و سلامت سطح را کاهش می دهد [4]. بنابراین برای رسیدن به سلامت سطح قابل قبول، لزوم استفاده از ابزاری با هندسه برشی مناسب و پایداری حرارتی و شیمیایی بالا در طی ماشین کاری امری ضروری است [5].

زاویه جانبی ابزار مستقیما روی عمر آن، استحکام لبه برشی و انتقال حرارت از موضع ماشین کاری اثر دارد. افزایش زاویه جانبی موجب کاهش نیروهای وارد بر سطح آزاد می شود که این اثر در مقادیر پیش روی کمتر بیشتر مشهودتر است. نتیجه ای این عمل کاهش حرارت تولیدی و افزایش عمر ابزار می باشد. مقدار نرمال زاویه جانبی برای ابزار بین 6 تا 10 درجه است. مقادیر بزرگ تر آن در ماشین کاری مواد سخت که تمایل به پیوند با لبه برش دارند کاربرد دارد [6].

یکی از چالش های موجود در ماشین کاری فولادهای آبیاژی سخت، عیوب مکانیکی و حرارتی ناشی از سایش جانبی ابزار<sup>۲</sup> (VB) روی سطح قطعه کار می باشد [7]. این نوع سایش در اثر مالش سطح آزاد ابزار با سطح ماشین کاری شده به وجود می آید و در نتیجه کیفیت سطح نهایی قطعه را تحت شاعع خود قرار می دهد (شکل ۱).

در ادامه به بررسی پژوهش های انجام گرفته در زمینه تأثیر پهنه ای ساییدگی ابزار بر مشخصه های سلامت سطح پرداخته می شود.

<sup>3</sup> Diffusion<sup>4</sup> Sticking<sup>5</sup> Tool Plastic Deformation<sup>6</sup> Chipping<sup>7</sup> Tool Edge Breakage<sup>8</sup> Cryogenic Minimum Quantity Lubrication<sup>1</sup> Phase Transformation<sup>2</sup> Tool Flank Wear

## 2- مواد، تجهیزات و روش انجام آزمایش

جنس ماده قطعه کار در این تحقیق، فولاد آلیاژی 4340 با سختی 425 ویکرز بود. آزمایش‌های طرح‌بیزی شده روی نمونه‌هایی مکعبی شکل با ابعاد  $20 \times 30 \times 40$  میلی‌متر انجام گرفت. ترکیب شمیمیایی این فولاد که با آنالیز کوانتمتری بدست آمده در جدول 1 ارائه شده است. بهمنظور افزایش سختی، نمونه‌ها در کوره با دمای 870 درجه سانتی‌گراد آستینتیه گشته، سپس به مدت 2 ساعت در دمای 425 درجه سانتی‌گراد برگشت داده شدند و درنهایت در حمام روغن به دمای محیط رسیدند [17].

برای انجام آزمایش‌ها، از ماشین فرز کنترل عددی چهار محوره کنترل همزمان مایکرون<sup>1</sup> 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 سندویک<sup>2</sup> 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 روان کار از سیستم (MQL<sup>3</sup>) 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 تعییه 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 هوای-روغن تولید شده، برای روان کاری ناحیه فرزکاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. روان کاری MQL در آزمایش‌ها با استفاده از روغن معدنی با دبی 240 میلی‌لیتر بر ساعت و فشار 6 بار انجام گرفت. بهمنظور عملکرد بهتر سیستم روان کاری، از دو نازل پاشش با زاویه 45 درجه نسبت به ابزار بهره گرفته شد [18, 19].

در این تحقیق، ماکریم ساییدگی سطح جانبی ابزار به عنوان 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 طرح‌بیزی شدند. سایش جانبی ابزار با استفاده از میکروسکوپ نوری استریوی الیمپوس<sup>4</sup> مدل SX16 و نرمافزار آنالیز تصویر اندازه‌گیری شد (شکل 3).

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

درنهایت، با استفاده از همین اینسترهای ساییده شده، 12 آزمایش در شرایط برشی آورده شده در جدول 2 و در حالت فرزکاری موفق صورت گرفت.

برای اندازه‌گیری زبری سطح، از دستگاه زبری‌سنج پرتاپل ماهر<sup>5</sup> مدل PS1 با دقت 0.001 میکرومتر و طول کورس 5.6 میلی‌متر استفاده گردید.

خشک بهطور جشمگیری کاهش دهد. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که افزایش سایش ابزار سبب تشدید میزان تغییر شکل پلاستیک (کارسختی) سطح ماشین کاری 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 تراش کاری فولاد ضدزنگ داشتند. نیروهای برشی کمتر، طول تماس کوچک‌تر، نسبت فشردگی براده کمتر و سطح پرداخت مطلوب‌تر، نتیجه به کارگیری سیستم فشار بالای جت آب بهجای حالت روان کاری 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 پهنهای سایش 0.15 میلی‌متر و نیز با پهنهای سایش 0.3 میلی‌متر انجام گرفت. بیشترین نیروی ماشین کاری مربوط به ابزار با بیشترین پهنهای سایش اختصاص داشت و همچنین میزان تغییرات تنفس پسماند در ابزار نو کمتر از دو حالت دیگر بود. از طرفی این محققان برای مشخص کردن عمق تغییر شکل پلاستیک حاصل از عملیات ماشین کاری، با اندازه‌گیری چگالی مرزدانه‌ها 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 ماشین کاری شده به راستای اندازه‌گیری واپسیه است، بهطوری که اندازه سختی در راستای پیشروی و عمود بر آن با یکدیگر متفاوت می‌باشد. عامل اصلی این تغییرات، اثرات مکانیکی حاصل از نیروی ماشین کاری 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 زبری سطح در فرایند فرزکاری سرعت بالا مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور از 12 اینسترهای برشی با هندسه و جنس یکسان و میزان پهنهای ساییدگی متفاوت شد. آزمایش‌ها در شرایط برشی ثابت انجام گرفت و اثرات سایش ابزار روی زبری سطح، میکروسختی در سطح و لایه زبرسطح 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 گزارش نشده است. 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 تنفس بالایی میان ابزار و براده وجود دارد که فشردگی شدیدی را در محل تماس ابزار و قطعه کار باعث می‌شود و نفوذ سیال را به این ناحیه محدود می‌کند. به همین منظور در این تحقیق، روان کاری با استفاده از حداقل سیال برشی با پاشش پرفشار اسپری روان کار از طریق دو نازل انجام گرفت.

<sup>1</sup> Micron<sup>2</sup> Sandvic<sup>3</sup> Minimum Quantity Lubrication<sup>4</sup> Olympus<sup>5</sup> Mahr

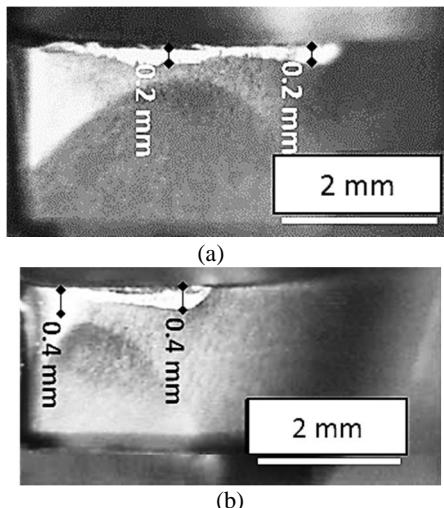
علاوه بر میکروسختی سطح، تغییرات سختی در عمق قطعه و لایه زیرسطحی نیز بررسی شد. به همین منظور، ناحیه‌ای از سطح فرزکاری شده به صورت عرضی توسط دستگاه واپرکات، برش خورده و پس از پولیش زنی، سختی سنجی در عمق و در چهار نقطه به فواصل 20، 70، 120 و 17 میکرومتری از لایه سطحی صورت گرفت [20].

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 استاندارد<sup>3</sup> دستگاه EG&G به همراه الکترودهای مرجع کالومل اشباع، الکترود 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 پتانسیواستات IVIUMSTAT ساخت کشور هلند استفاده گردید. برای تحلیل داده‌های امپدانس و ارائه مدار معادل، نرم‌افزار زد-ویوو<sup>4</sup> 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 بر حسب زمان رسم شد. در نهایت مقدار پتانسیل مدار باز برای هر نمونه نیز مشخص گردید.

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



شکل ۴ سایش ابزار اندازه‌گیری شده روی سطح جانبی ابزار در فرزکاری سرعت بالا (a)

$VB_{max}=0.4 \text{ mm}$  (b)  $VB_{max}=0.2 \text{ mm}$

جدول ۲ پارامترهای فرزکاری سرعت بالای مورد استفاده در آزمایش‌ها

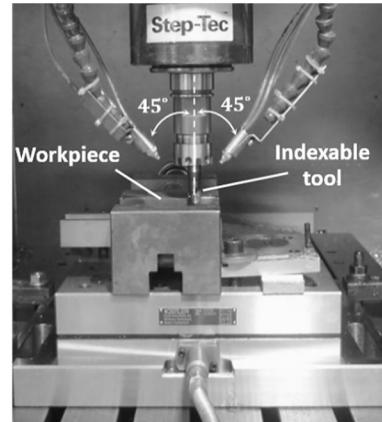
Table 2 High speed milling parameters used in experiments

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 ( $a_t$ )

جدول ۱ 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
پایه	
آهن	



شکل ۲ چیدمان آزمایش؛ ابزار، قطعه‌کار، فیکسچر و نازل‌های MQL



شکل ۳ چیدمان اندازه‌گیری سایش ابزار با استفاده از میکروسکوپ نوری SZX16

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

به منظور اندازه‌گیری میکروسختی نیز، دستگاه سختی سنج باریس<sup>1</sup> مدل V-Test<sup>2</sup> به کار گرفته شد. سختی سنجی 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 به عنوان معیار میکروسختی آن آزمایش مدنظر قرار گرفت.

<sup>3</sup> Flat Cell  
<sup>4</sup> Zview

<sup>1</sup> Bareiss  
<sup>2</sup> 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 شرایطی برشی پایداری 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 رسید. در واقع سایش بیش از حد ابزار باعث بروز پدیده سخمنزی در ناحیه برش شده که این پدیده جریان غیریکنواخت ماده و زبری سطح نامطلوب قطعه کار را به دنبال دارد [24].

### 2- بافت سطح

توصیف بافت سطحی حاصل از فرایند ماشین کاری، سیار 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 بر حسب میزان سایش ابزار

Table 3 Output parameters values for each flank wear width

پارامترهای خروجی	ماکریم سایش	شماره آزمایش	میکروسختی سطح (VB <sub>max</sub> ) (mm)	زبری سطح (R <sub>a</sub> ) (μm)	میکروسختی سطح (HV <sub>0.5</sub> ) (H)
			1		
		0	2	0.49	455
		3	4	0.45	451
		5	6	0.65	468
		6	7	0.59	466
		7	8	0.62	470
		8	9	0.81	480
		10	11	0.79	485
		11	12	0.85	488
				2.85	536
				0.6	544
				2.60	539

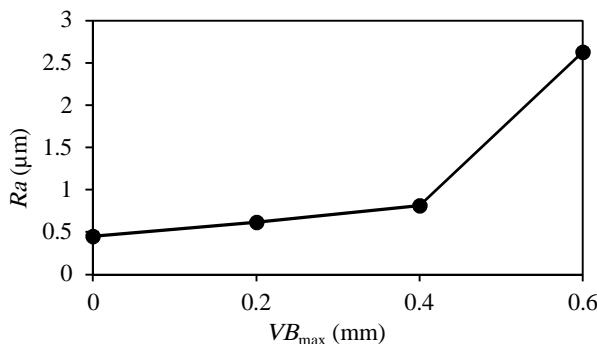


Fig. 7 Effect of tool flank wear width on surface roughness

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  $Rs$  مقاومت الکتروولیت ناشی از افت پتانسیل بین نوک لگین و سطح الکتروولیت می‌باشد به عبارتی می‌توان آن را مقاومت محلول دانست. مقاومت الکتریکی مربوط به انتقال بار الکتریکی از داخل الکتروولیت به داخل فیلم اکسیدی شکل گرفته بر روی لایه سطحی است.

بار الکتریکی هدایت‌کننده جریان می‌تواند الکتروون‌ها یا یون‌ها باشند. انتقال بار از درون الکتروولیت علاوه بر ایجاد مقاومت حقیقی در برابر عبور جریان، در جریان‌های متناوب به دلیل وجود یک اختلاف پتانسیل بین سطح الکتروولیت و الکتروولیت و نیز وجود میدان الکتریکی، ایجاد یک خاصیت خازنی می‌کند که در اینجا با عنصر فاز ثابت  $C_{oxide}$  نشان داده شده است. 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 اینسربت‌هایی 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، هر کدام از این خروجی‌ها به صورت جداگانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

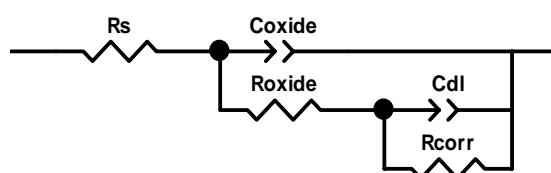
#### 1-3- زبری سطح

تغییرات زبری سطح بر حسب 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 ماشین کاری شده قطعه کار افزایش یافته و به تبع آن، اصطکاک و نیروی ماشین کاری بالا می‌رود [22]. همچنین، تنش‌های برشی به صورت غیریکنواخت روی سطح ابزار



شکل 5 نحوه اندازه‌گیری مقاومت به خوردگی الکتروشیمیابی سطوح فرزکاری شده

Fig. 5 Measuring method of electrochemical resistance of milled surfaces



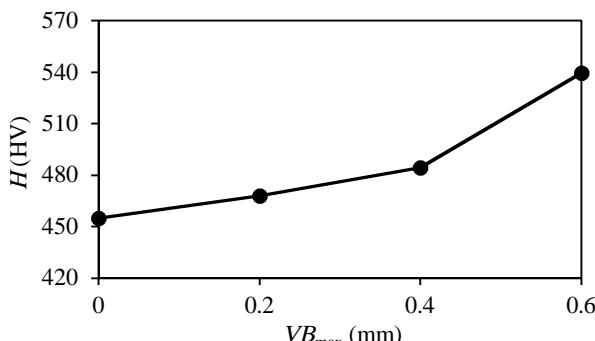
شکل 6 مدار معادل مورداستفاده برای فیت نمودارهای امپدانس

تحت تأثیر خود فرار می‌دهد. مقادیر میکروسختی نیز با تغییر اندازه سایش ابزار به طور میانگین بین 455 تا 540 ویکرز تغییر می‌کند که نشان از معنی دار 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 برهمناسن 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 برندۀ ابزار برشی، نیروهای ماشین‌کاری بالا می‌روند. همچنین سطح آزاد ساییده شده ابزار، روی سطح ماشین‌کاری شده مالیده<sup>۱</sup> می‌شود. بنابراین فشار بیشتری صرف جداسازی ماده و لهیگری سطح جدید قطعه کار شده و بهتی 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 قطعه کار وارد می‌شود. درنتیجه سختی سطحی حاصل از تغییرات فازی و سریع سرد شدن سطح قطعه، بالا می‌رود. نکته دیگر در مورد این نمودار، اختلاف 29 ویکرزی سختی به دست آمده در استفاده از ابزاری با سایش جانبی ۰.۴ میلی‌متر در مقایسه با ابزار نو ۰.۶ میلی‌متر (افزایش ۶۳٪). این درحالی است که ابزار با سایش جانبی ۰.۶ میلی‌متر، ۸۵ ویکرز سختی سطح بیشتری را نسبت به ابزار نو نتیجه می‌دهد (افزایش ۱۸.۶٪) 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 ۰.۴ میلی‌متر سایش به ۰.۶ میلی‌متر ساییده شده، افزایش بیش از حد حرارت، انجام واکنش‌های سطح قطعه کار با محیط ماشین‌کاری و تشکیل فازهای سخت می‌باشد. به منظور 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 قطعه کار اندازه‌گیری شدند.

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



شکل 9 اثر سایش جانبی ابزار روی میکروسختی سطح

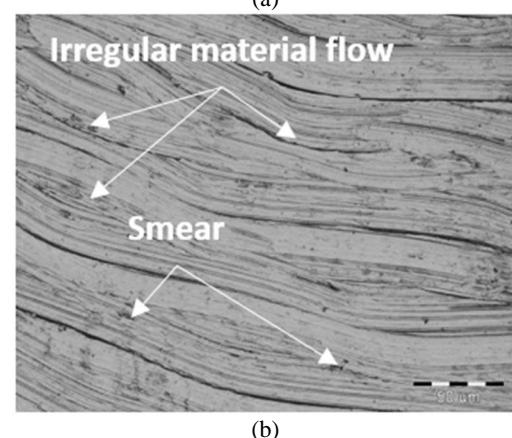
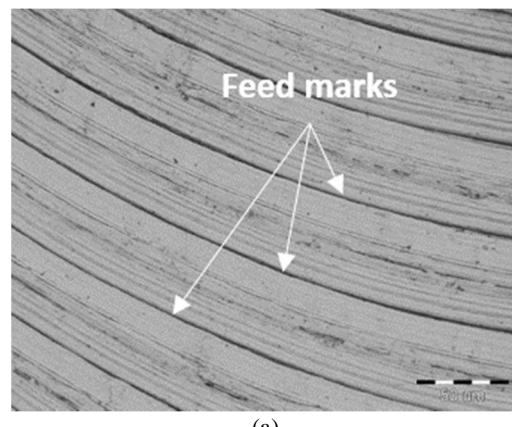
<sup>۱</sup> Rubbing

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 به دست آمده برای نمونه فرزکاری شده با ابزار ساییده (سایش جانبی ۰.۶ میلی‌متر) قابل مشاهده است. پر واضح است که در هنگام فرزکاری با ابزار ساییده شده، اصطکاک بالا می‌رود. این اصطکاک به عنوان عاملی بازدارنده برای حرکت آزادانه ابزار و قطعه کار 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 سوتگی سطحی روی قطعه کار شده که به صورت نقاطی تیره در تصویر مشخص است.

### 3-3- میکروسختی سطح و عمق

شکل 9 تغییرات میکروسختی سطح فرزکاری شده را بر حسب سایش ابزار نشان می‌دهد. در نگاه اول و با مشاهده مقادیر میکروسختی به دست 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

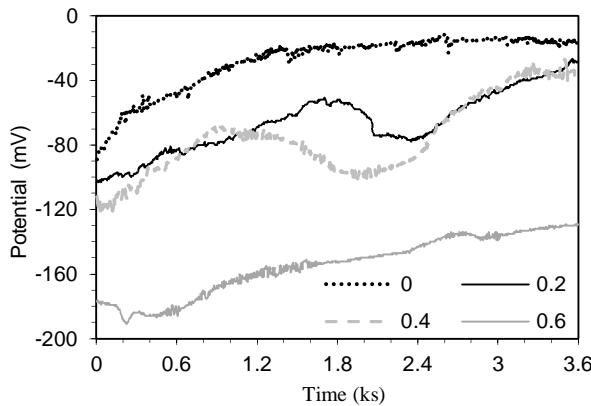


شکل 8 بافت سطح فرزکاری شده (a) ابزار نو آزمایش شماره 1 (b) ابزار با سایش ۰.۶ میلی‌متر آزمایش شماره 10

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 (مشبت‌ترین) و برای نمونه فرزکاری شده با ابزاری با پهنای ساییدگی 0.6 میلی‌متر، فال‌ترین (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 یا عدم وجود ترکیب‌های فعال، ضخامت فیلم سطحی، ترکها و یا حفره‌ها در لایه سطحی و نیز ذبیری اشاره کرد. با افزایش میزان ساییدگی تا 0.4 میلی‌متر، تمایل سطح برای انجام واکنش‌های الکتروشیمیایی بیشتر می‌شود (منفی ترشدن 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 به صورت کیفی بررسی می‌کند، در ادامه با استفاده از روش طیفسنجی امپدانس به بررسی دقیق‌تر این پارامتر پرداخته می‌شود.

اطلاعات حاصل از نمودارهای امپدانسی با استفاده از مدار پیشنهادی شکل 6 برای مقادیر  $R_{corr}$  در شکل 13 نشان داده شده است. این مقادیر که بیانگر مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی نمونه‌های فرزکاری شده با ابزارهایی با پهنای سایش ابزار با تغییر در مقادیر امپدانس و سیستم الکتروشیمیایی همراه است. پارامتر  $R_{corr}$  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  $R_{corr}$  برای نمونه‌های فرزکاری شده با ابزارهای تا 0.4 میلی‌متر سایش ثابت چندانی ندارند (تغییر ۲۲٪ نسبت به نمونه‌های فرزکاری شده با ابزار نو). اما در نمونه فرزکاری شده با ابزار 0.6 میلی‌متر ساییده شده مقدار  $R_{corr}$  کاهش چشمگیری یافت (کاهش ۸۳٪ نسبت به نمونه فرزکاری شده با ابزار نو).



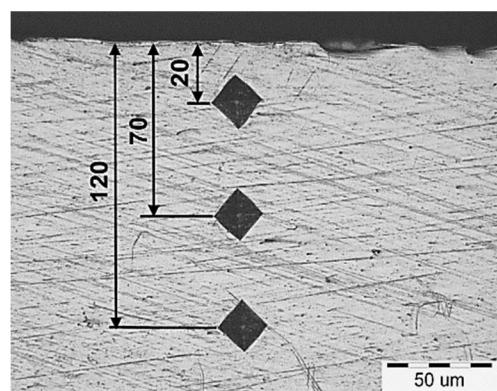
شکل 12 مقادیر تغییرات پتانسیل مدار باز با زمان برای نمونه‌های فرزکاری شده با ابزارهایی با سایش‌های ابزار متفاوت

همچنین بهره‌گیری از ابزاری با سایش بالاتر، میکروسختی عمق قطعه را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد و سختی بالاتری را در لایه زیرسطح قطعه کار 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.

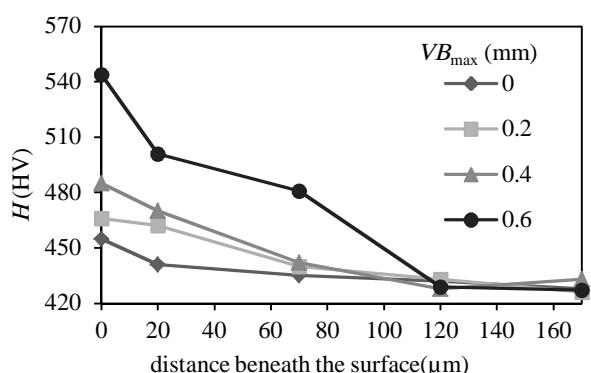
نکته قابل توجه دیگر، نزدیک بودن تقریبی توزیع میکروسختی در عمق برای ابزارهایی با پهنای ساییدگی صفر، 0.2 و 0.4 میلی‌متر می‌باشد. مستقل از میزان سایش این ابزارها، سختی زیرلایه ماشین کاری شده در فاصله 70 میکرومتری از سطح قطعه، به سختی فولاد پایه (42CrMo) می‌رسد. در حقیقت اثرات بار حرارتی و کارسختی ناشی از تغییر شکل پلاستیک که عوامل افزاینده 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.

#### 4-3 مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی

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



شکل 10 نقاط اندازه‌گیری میکروسختی مقطع عرضی قطعه کار



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 مقدار  $R_{corr}$  به مقدار 22% و 83% نسبت به نمونه فرزکاری شده با ابزار نو می‌گردد. 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-

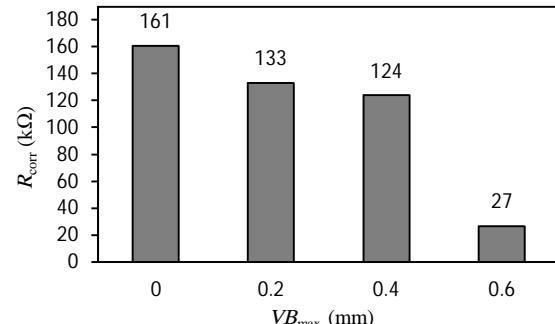


Fig. 13  $R_{corr}$  values obtained from impedance experiment for milled samples with different tool flank wears.

شکل 13 مقدار 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 توجیه است. از طرفی، همان‌طور که توبوگرافی سطوح فرزکاری شده نشان داد، استفاده از ابزار بیش از حد 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 (وغن 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 سرعت بالای 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 به دست آمده از این پژوهش به صورت خلاصه در ادامه آورده شده است:

1- فرزکاری سرعت بالا 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 به روشی نشان می‌دهند که استفاده از ابزار بیش از حد 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 بشري، 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 بیش از حد (0.6 میلی‌متر)، میکروسختی عمق قطعه را به روشی تحت تأثیر قرار می‌دهد. این در حالی است که مقدار سایش 0.4 میلی‌متر و کمتر، تأثیر ناچیزی بر توزیع میکروسختی عمق قطعه دارد.

- 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 Manufacture*, Vol. 215, No. 6, pp. 755-767, 2001 .