مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دوره 15، شماره 12، ص‌ص 175-182

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه میکروسختی و لایه سفید در فرزکاری فولاد سخت با استفاده از روش طراحی آزمایش رویه پاسخ

حامد حسن‌پور[1]، محمدحسین صادقی[2*]، امیر راستی[1]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق‌پستی 143-14115، sadeghim@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 11 مهر 1394
پذیرش: 09 آبان 1394
ارائه در سایت: 30 آبان 1394

کلید واژگان:
فولاد سخت
میکروسختی
لایه سفید
سطوح پاسخ

چکیده

فولادهای سخت با دارا بودن استحکام و مقاومت سایشی بالا، کاربرد گسترده‌ای در صنعت خودروسازی، قالب‌سازی و ساخت سرمته‌های حفاری دارند. ماشین‌کاری این مواد در حالت سخت‌کاری شده با هدف دست‌یابی به‌دقت ابعادی و هندسی بالا، افزایش تولیدپذیری و بهبود خواص قطعه‌کار رو به گسترش است. در این پژوهش، رابطه بین پارامترهای برش و کیفیت سطح نهایی در فرزکاری سخت قطعه‌کاری از جنس فولاد 4340 و در حضور روان‌کاری با حداقل سیال برشی بررسی گردیده است. پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش محوری و شعاعی، به‌عنوان پارامترهای اصلی فرآیند فرزکاری سخت در سه سطح درنظر گرفته شدند و با استفاده از روش طراحی آزمایش رویه پاسخ، اثر این پارامترها روی میکروسختی سطح و ضخامت لایه سفید بررسی گردید. تحلیل واریانس نشان داد که مدل درجه 2 برای تخمین میکروسختی سطح به‌خوبی می‌تواند نتایج تجربی را تخمین بزند درحالی‌که مدل خطی تغییرات ضخامت لایه سفید را بهتر برآورد می‌کرد. تحلیل آماری نیز مشخص نمود که تمامی پارامترهای برش اثر افزاینده‌ای روی اندازه میکروسختی و ضخامت لایه سفید داشتند. نرخ پیشروی با 73.1%، سرعت برشی با 14.4% سهم تأثیر بالاتری را روی میکروسختی به خود اختصاص دادند. ضخامت لایه سفید نیز با تغییر شرایط برش بین 7.6 تا 16.1 میکرومتر تغییر می‌کرد و سرعت برشی با سهم 81.3% و نرخ پیشروی با سهم 9.4%، مؤثرترین پارامترهای روی ضخامت آن لایه بودند.

Investigation of Microhardness and White Layer in Milling of Hardened Steel Using Response Surface Methodology

Hamed Hassanpour, Mohammad Hossein Sadeghi*, Amir Rasti

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 03 October 2015
Accepted 31 October 2015
Available Online 21 November 2015

Keywords:
Hard Steel
Microhardness
White Layer
Response Surface

ABSTRACT

Hard steels are widely used in automotive industry, molding and production of well drilling bits because of their high wear resistance and strength. Tendency toward hard machine of these steels is growing with the purpose being to achieve high dimensional and geometrical accuracy, increased productivity and improved workpiece properties. In this research, relation between cutting parameters and final surface integrity in hard milling process of a workpiece made out of 4340 steel while using minimum quantity lubrication system is studied. Different parameters were considered in three levels as main milling parameters including: cutting speed, feed rate, axial and radial depth of cut, consequently the effect of these parameters on surface microhardness and white layer thickness were studied using Response Surface Methodology (RSM). The analysis of variance (ANOVA) showed that a model of quadratic polynomial function would work perfectly to estimate microhardness and it can also estimate experimental results while a linear model can evaluate white layer thickness changes, better. Also, Statistical analysis revealed that all cutting parameters increase microhardness and white layer thickness. Feed rate with 73.1% and cutting speed with 14.4% had more effect on microhardness comparatively. White layer thickness also varied between 7.6 µm and 16.1 µm while different cutting conditions were applied and cutting speed with 81.3% and feed rate with 9.4% had the most effects on white layer thickness.

1- مقدمه

فولادهای سخت به‌طور گسترده در صنایع سنگین، قالب‌سازی و همچنین مجموعه‌های انتقال قدرت مورداستفاده قرار می‌گیرند. برای ماشین‌کاری سنتی این آلیاژها، ابتدا بایستی قطعه‌کار آنیل یا نرماله شود. در مرحله بعدی فرایند خشن‌کاری روی قطعه صورت می‌گیرد. پس از آن‌که شکل کلی قطعه ایجاد شد، برای رساندن سختی قطعه به مقدار موردنظر، عملیات حرارتی

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
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)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.29.7]

هاردنینگ روی آن انجام می‌گیرد و در پایان برای پرداخت نهایی از روش سنگ‌زنی استفاده می‌شود [1].

حال باید به این نکته دقت کرد که اگر بتوان با استفاده از فرایندی، بدون نیاز مبرم به روان‌کار و باز و بستن قطعه‌کار از ماشینی به ماشین دیگر، فولادهای سخت را یکپارچه (با یک ابزار و روی یک ماشین) ماشین‌کاری کرد، چه مزایایی حاصل خواهد شد. معرفی این فرایند کارا، در اواسط دهه 1980 با ایده تراش‌کاری سخت آغاز و امروزه بسیاری از فرایندهای ماشین‌کاری، خصوصا فرزکاری سخت را نیز شامل می‌شود [2]. گرایش صنعت خودروسازی به‌منظور بهبود فرایند تولید قطعات انتقال قدرت، استفاده از ماشین‌کاری سخت است. یاتاقان‌های چرخ‌دنده از دیگر موارد کاربرد این روش ماشین‌کاری به‌جای سنگ‌زنی می‌باشد. علت اصلی ظهور و گسترش چنین فرایندهایی، پیشرفت‌های صورت گرفته در صنعت ساخت ماشین ابزارهای صلب، ابزارهای با سختی و چقرمگی بسیار بالا و ابزارگیرهای خاص است [3].

به‌منظور جایگزینی ماشین‌کاری سخت با فرایند سنگ‌زنی، نیاز است تا پارامترهای اصلی فرایند برش به‌صورت صحیح انتخاب شوند. پارامترهای فرایند در ماشین‌کاری سخت دارای رنج قابل قبول محدودی نسبت به ماشین‌کاری سنتی می‌باشند و انتخاب نادرست این پارامترها منجر به کاهش عمر ابزار و افت کیفیت سطح قطعه می‌گردد. بنابراین با توجه به این‌که سطح قطعات بیشترین تنش را در حین کارکرد قطعه تحمل نموده و تحت تأثیر عوامل محیطی متعددی قرار دارد، مطالعه تأثیر پارامترهای برشی بر کیفیت سطح قطعات تولید شده به روش ماشین‌کاری سخت بسیار حائز اهمیت است. سلامت سطح[1] به مطالعه خصوصیات و ماهیت لایه سطح ماشین‌کاری شده و تأثیر آن بر خواص مکانیکی و عملکردی قطعه‌کار می‌پردازد [4]. از مهم‌ترین شاخصه‌های سلامت سطح، می‌توان به میکروسختی سطح و ضخامت لایه سفید اشاره کرد [5].

زمانی که درجه حرارت قطعه در طول عملیات ماشین‌کاری سخت از دمای آستنیت فراتر رود (به علت اصطکاک، لبه انباشته[2] و کرنش پلاستیک)، فاز آستنیت تغییر کرده و ضمن کوئنچ شدن، لایه تغییر یافته شکننده‌ای بانام لایه سفید روی سطح به وجود می‌آید. در واقع، حجم بالای آستنیت موجود در این ناحیه، پس از ماشین‌کاری، ساختاری با مارتنزیت تمپر نشده تولید کرده و سختی سطح بالایی را در طول عملیات ماشین‌کاری به‌وجود می‌آورد [6]. لایه سفید با ضخامتی بین 2 تا 20 میکرومتر روی سطح قطعه ماشین‌کاری شده تشکیل می‌شود. مشاهدات و بررسی‌های انجام‌شده روی میکروساختار لایه سفید نشان می‌دهد که این لایه، ساختار نانوکریستالی با اندازه دانه‌ای بین 30 تا 500 نانومتر دارد. ظاهر بدون شکل و سفیدرنگ این لایه بعد از اچ کردن[3]، نتیجه مقاومت در برابر محلول اچ نیست و در اثر بازتاب مناسب نور برخوردی به سطح توسط ساختار ریزدانه آن به وجود می‌آید [7]. لایه سفید دارای تنش پسماند و تردی بالا بوده و در نتیجه می‌تواند اثر مخربی بر عملکرد قطعه داشته و روی خواص تریبولوژیکی[4]، مقاومت به خوردگی و عمر خستگی قطعه اثر منفی بگذارد [8]. لذا سختی و ضخامت لایه سفید جزو اصلی‌ترین معیارهای بررسی سلامت سطح قطعه‌کار محسوب می‌شوند.

1- Surface integrity
2- Built-up edge
3- Etching
4- Tribological

یکی دیگر از مسائل مهم در فرآیند ماشین‌کاری فولادهای سخت، حرارت بالای تولیدشده در ناحیه برش است. این حرارت موضعی بالا باعث انحراف ابعادی و خرابی پیش از موعد ابزار شده و به‌علت بروز تنش‌های پسماند کششی، میکروترک‌های سطحی و زیرسطحی، اکسید شدن سریع، سلامت سطح قطعه را تحت‌الشعاع خود قرار می‌دهد [9]. درنتیجه، انتخاب صحیح سیال برشی علاوه بر افزایش دقت و کیفیت سطح، نقش مهمی را نیز در کاهش اصطکاک، خنک‌کاری و جلوگیری از ایجاد گرمای بیش از حد در محیط ماشین‌کاری ایفا می‌کند [10]. تأثیر روان‌کاری در عملیات ماشین‌کاری به‌شدت وابسته به انتخاب نوع سیال روان‌کار و سیستم پاشش آن بر ناحیه برش است. با این وجود، استفاده از سیال برشی در عملیات ماشین‌کاری به علت مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی دردسرساز است. بهترین راه برای کاهش اثرات منفی سیال برشی، حذف کامل آن است که درنهایت، منجر به ماشین‌کاری خشک[5] می‌شود. قطعات سخت، قابلیت ماشین‌کاری در حالت خشک را دارا می‌باشند [11]، اما به‌کارگیری چنین روشی در صنعت با بعضی محدودیت‌ها مواجه است که از آن جمله می‌توان به سایش شدید ابزار برشی و کیفیت سطح پایین قطعه تولیدی اشاره کرد [12]. روان‌کاری با استفاده از حداقل سیال برشی (MQL[6]) به‌عنوان فرآیندی سازگاربامحیط‌زیست، روشی است که در آن مقدار کمی از سیال در داخل جت هوایی، اتمیزه شده و به محل برش پاشیده می‌شود. استفاده از این روش علاوه بر کاهش مصرف سیال برشی، محدودیت‌های روش ماشین‌کاری خشک (حرارت موضعی بالا و اصطکاک زیاد) را حذف می‌کند. در ادامه برخی از مطالعات انجام‌شده در زمینه سلامت سطح در ماشین‌کاری فولاد سخت آورده شده است.

سواچ و گو [13] سلامت سطح را در تراش‌کاری فولاد AISI 52100 با سختی 60 راکول سی بررسی و مشاهده کردند که استفاده از ابزار نو و نرخ پیشروی پایین می‌تواند ضخامت لایه سفید تشکیل‌شده را کاهش دهد. علاوه بر این، سختی لایه سفید حدود 30% بالاتر از سختی ماده قطعه‌کار بود.

چن و همکاران [14] فرایند سنگ‌زنی و فرزکاری سخت را روی فولاد قالب SKD11 مقایسه نموده و مشاهده کردند که در فرایند فرزکاری سخت، به‌واسطه دمای پایین‌تر، تغییرات سختی و متالورژیکی کمتری روی سطح به وجود می‌آید. همچنین تنش‌های پسماند فشاری در سطح قطعه به وجود آمد و ضخامت لایه تحت تأثیر حرارت بسیار کمتر از فرایند سنگ‌زنی بود.

لیو و همکاران، [15] به بررسی مشخصه‌های سلامت سطح فولاد یاتاقانی 15GCR با سختی حدود 60 راکول سی پرداختند. نتایج نشان داد که عمق لایه سخت‌شده سطحی ایجادشده در اثر ماشین‌کاری، با افزایش سختی قطعه‌کار افزایش یافته و مقدار زبری سطح نیز در سختی بحرانی 50 راکول سی دارای بیشترین مقدار خواهد بود.

بارباکی و همکاران [16] حداکثر ضخامت لایه سفید و سیاه را در فرزکاری فولاد سخت براساس تابعی از سرعت برشی، عمق برش و سایش ابزار تقریب زدند. بررسی سختی در راستای ضخامت قطعه نشان داد که لایه سفید به‌طور متوسط 100 ویکرز سخت‌تر از ماده پایه بود. همچنین نشان داده شد که در تراش‌کاری سخت، خنک‌کاری در ضخامت لایه سفید تأثیری نداشته اما باعث باریک شدن لایه سیاه[7] می‌گردد.

5- Dry machining
6- Minimum Quantity Lubrication
7- Dark layer

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.29.7]

مارکز و همکاران [17] تحلیل فازی و توزیع میکروسختی سطح فولاد AISI H13 را پس از فرزکاری بررسی کرده و هیچ‌گونه تغییر فازی در سطح نمونه‌ها مشاهده نکردند. تنها یک لایه تغییرشکل‌یافته نازک روی سطح فرزکاری شده شکل گرفت.

بررسی پژوهش‌های صورت گرفته، نشان می‌دهد که تحقیقات بسیار کمی در زمینه مطالعه اثر پارامترهای برش روی مشخصه‌های اصلی سلامت سطح شامل میکروسختی سطح و ضخامت لایه سفید در فرزکاری سخت فولاد 4340 با استفاده از روش MQL صورت گرفته است. لذا در این پژوهش، سلامت سطح در فرآیند فرزکاری سخت این فولاد با کمک روش طراحی آزمایش رویه پاسخ[1] و تحلیل آماری بررسی شد و تأثیر پارامترهای مختلف فرزکاری روی میکروسختی و ضخامت لایه سفید مطالعه گردید. لازم به ذکر است که برخلاف اغلب کارهای انجام شده در زمینه به‌کارگیری روش MQL، که از یک نازل پاشش بهره برده بودند [18]، در این پژوهش از دو نازل پاشش استفاده شد.

2- مواد و تجهیزات مورد استفاده

جنس ماده قطعه‌کار در این تحقیق، فولاد 4340 با سختی5± 450 ویکرز بود. به‌منظور افزایش سختی، نمونه‌ها در کوره با دمای 870 درجه سانتی‌گراد آستنیته گشته، سپس به مدت 2 ساعت در دمای 425 درجه سانتی‌گراد برگشت داده شدند و در نهایت در حمام روغن به دمای محیط رسیدند. آزمایش‌های طرح‌ریزی شده روی نمونه‌هایی مکعبی شکل به ابعاد 40×40×20 میلی‌متر انجام شد. برای انجام آزمایش‌ها، از ماشین فرز کنترل عددی چهار محوره کنترل همزمان مایکرون[2] مدل HSM700 با حداکثر نرخ پیشروی میز 20000 میلی‌متر بر دقیقه و دوران اسپیندل 42000 دور بر دقیقه استفاده گردید. همچنین از تیغچه فرز سرتخت تنگستن‌کارباید 4 لبه، با پوشش TIALN و قطر 12 میلی‌متر، محصول شرکت هم‌تولز 2 بهره گرفته شد. به‌منظور اطمینان از صحت نتایج و حذف اثر ساییدگی احتمالی ابزار، به‌طور میانگین بعد از هر 4 آزمایش، ابزارها تعویض می‌شدند.

به‌منظور اعمال جریان روان‌کار MQL، از سیستم نشان داده شده در شکل 1 استفاده گردید. در این سیستم از یک کمپرسور جهت تولید هوای فشرده استفاده می‌شود که فشار آن توسط رگلاتور دستگاه و دبی‌سنج گاز قابل تنظیم است. از طرف دیگر روغن موجود در محفظه بالای دستگاه، توسط یک لوله پلاستیکی با قطر کم و به کمک یک پمپ به نازل هدایت می‌شود و میزان دبی روغن با تغییر فرکانس پمپ قابل تنظیم می‌باشد.

دستگاه دارای نازل اتمیزه کننده‌ای است که جریان هوا و روغن به‌طور جداگانه وارد آن می‌شود. سرعت جریان گاز نسبت به جریان روغن بسیار بیشتر بوده که همین پدیده باعث شکستن روغن و تبدیل آن به قطرات ریز در خروجی نازل می‌گردد. قطرات روغن در جریان گاز حامل، تشکیل اسپری روغن- هوا داده که از آن برای روان‌کاری ناحیه ماشین‌کاری استفاده می‌شود.

در آزمایش‌ها روش MQL با استفاده از روغن معدنی، دبی 240 میلی‌لیتر بر ساعت و فشار 6 بار انجام شد. به‌منظور عملکرد بهتر سیستم روان‌کاری، مطابق شکل 2 از دو نازل پاشش با زاویه °30 نسبت به ابزار بهره گرفته شد.

در این تحقیق اندازه‌گیری میکروسختی سطح با استفاده از دستگاه سختی‌سنج ساخت شرکت باریس[3] مدل وی-تست[4] با دقت 1 ویکرز انجام شد. در هر آزمایش، مقدار میانگین سختی اندازه‌گیری شده در 3 ناحیه مختلف از سطح به‌عنوان معیار میکروسختی مدنظر قرار گرفت. اندازه‌گیری تحت نیروی 0.5 کیلوگرمی و در مدت زمان 4 ثانیه انجام گردید.

برای اندازه‌گیری ضخامت لایه سفید نیز، ابتدا نمونه‌ها با استفاده از فرایند وایرکات برش خورده و مقطع عرضی آن‌ها پس از پولیش‌زنی، در محلول اسید نایتال[5] 2% (ترکیب 2% اسید نیتریک با اتانول) به مدت 10 ثانیه اچ گردید. سپس با استفاده از میکروسکوپ نوری الیمپوس[6] مدل DP25 با حداکثر بزرگ‌نمایی 1000 برابر و نرم‌افزار تحلیل تصویر، ضخامت لایه سفید بدست آمد.

3- روش انجام آزمایش

به‌منظور بررسی تأثیر شرایط فرزکاری سخت فولاد 4340 روی مشخصه‌های میکروسختی سطح و ضخامت لایه سفید، چهار پارامتر سرعت برشی (V_c)، نرخ پیشروی (f_z)، عمق برش محوری (a_p) و عمق برش شعاعی (a_e) به‌عنوان اصلی‌ترین پارامترهای فرزکاری، در 3 سطح تغییر داده شدند. در این تحقیق، روش رویه پاسخ برای طرح‌ریزی آزمایش‌ها به‌کار گرفته شد. در این روش با توجه به تعداد عوامل و سطوح، از تعداد آزمایش‌های ثابتی استفاده می‌شود. در حالت فاکتوریل کامل (حالت عمومی)، باوجود 4 عامل که در 3 سطح تغییر می‌کنند، تعداد حالت‌های آزمایش کل برابر با 3^4=81 خواهند بود. با استفاده از روش سطوح پاسخ، تنها 30 حالت از 81 حالت ممکن در نظر گرفته می‌شود. در این 30 آزمایش، به‌غیراز آزمایش مربوط به نقطه مرکزی

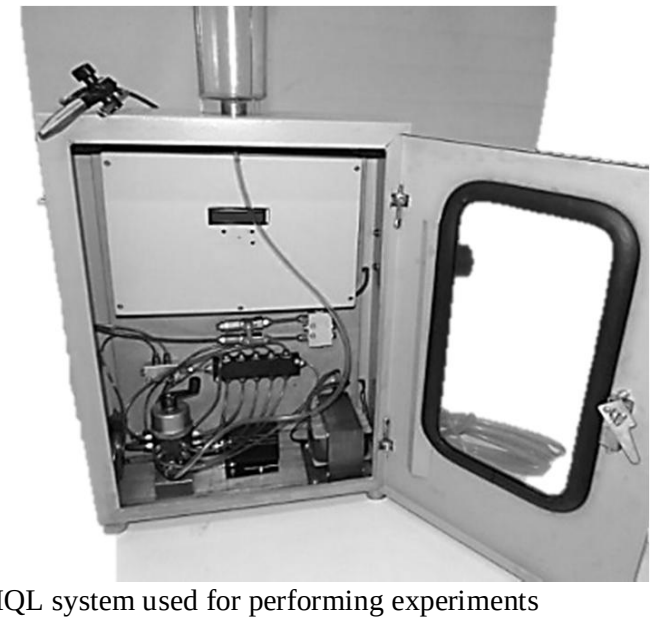

Fig. 1 MQL system used for performing experiments

شکل 1 دستگاه MQL استفاده شده جهت انجام آزمایش‌ها

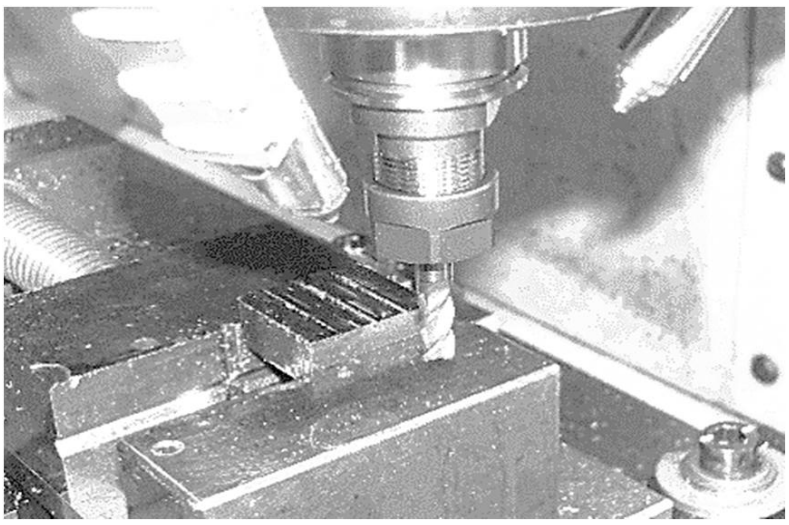

Fig. 2 Experiments setup and nozzles position in milling

شکل 2 چیدمان انجام آزمایش و نحوه قرارگیری نازل‌ها در فرزکاری

1- Response Surface Methodology (RSM)
2- Mikron
3- Bareiss
4- V-test

5- Nital
6- Olympus

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.29.7]

(با 6 بار تکرار) هیچ آزمایش دیگری تکرار نمی‌شود. روش سطوح پاسخ یکی از پرکاربردترین روش‌های طرح‌ریزی آزمایش است که با استفاده از آن، بهتر و واضح‌تر می‌توان تغییرات خروجی را برحسب ورودی‌های فرایند نشان داد [20,19]. پارامترهای فرزکاری، تعداد سطوح و مقادیر آن‌ها در جدول 1 آمده است. بر این اساس، تعداد 30 آزمایش انجام گرفت. آزمایش‌ها به‌منظور جلوگیری از بروز خطا، به‌صورت تصادفی انجام شدند. استراتژی ماشین‌کاری، فرزکاری موافق بود و در هر آزمایش، 120 میلی‌متر از طول قطعه ماشین‌کاری گردید.

4- نتایج و بحث

همان‌طور که اشاره شد، در مجموع 30 آزمایش انجام گرفت و پس از انجام هر آزمایش، مقادیر میکروسختی سطح (H) و ضخامت لایه سفید (WLT) ناحیه ماشین‌کاری شده اندازه‌گیری شدند. جدول 2 مقادیر پارامترهای برشی در هر آزمایش به همراه تمامی مقادیر اندازه‌گیری شده پارامترهای خروجی، در حضور روان‌کاری با روش MQL را نشان می‌دهد.

جدول 1 پارامترهای اصلی آزمایش‌های فرزکاری به همراه سطوح تغییرات

Table 1 Milling experiments and their variation levels

فاکتورها	سطوح		
	سطح 1	سطح 2	سطح 3
عمق برش محوری (a_p) (mm)	0.5	1	1.5
عمق برش شعاعی (a_e) (mm)	1	2	3
نرخ پیشروی (f_z) (mm/tooth)	0.02	0.04	0.06
سرعت برشی (v_c) (m/min)	50	100	150

جدول 2 آرایه طراحی آزمایش رویه پاسخ به همراه نتایج

Table 2 Response surface design array and results

شماره آزمایش	a_p	a_e	v_c	f_z	H (Hv)	WLT (μm)
1	1.5	1	50	0.02	479	9.4
2	1	2	100	0.04	519	13
3	1	2	100	0.04	522	13.5
4	0.5	3	50	0.02	472	7.6
5	1.5	1	150	0.06	602	1.55
6	0.5	3	150	0.02	498	14.4
7	0.5	1	150	0.02	510	12.7
8	1.5	3	50	0.06	574	1.50
9	1	2	100	0.04	531	12.9
10	0.5	1	50	0.02	470	8.7
11	1.5	3	150	0.06	607	15.6
12	1.5	3	50	0.02	478	8.1
13	1	2	100	0.04	524	11.9
14	0.5	3	150	0.06	596	16.1
15	0.5	1	150	0.06	589	1.55
16	0.5	1	50	0.06	534	8.8
17	0.5	3	50	0.06	541	9.6
18	1.5	1	50	0.06	568	1.50
19	1.5	3	150	0.02	509	13.3
20	1.5	1	150	0.02	502	13.1
21	0.5	2	100	0.04	513	11.8
22	1.5	2	100	0.04	553	1.52
23	1	2	150	0.04	537	1.54
24	1	3	100	0.04	522	13.1
25	1	2	100	0.04	533	11.6
26	1	2	100	0.02	492	11.1
27	1	2	50	0.04	498	8.2
28	1	2	100	0.04	526	12.2
29	1	2	100	0.06	567	13.1
30	1	1	100	0.04	497	10.8

به‌منظور تحلیل دقیق‌تر نتایج و بررسی معنی‌داری پارامترها، از تحلیل واریانس و مدل‌سازی رگرسیونی خطی چندگانه درجه 2 استفاده گردید. مدل‌های ارائه شده، برازشی از داده‌های آزمایش‌ها بوده و نحوه اثر متغیرهای ورودی بر روی متغیرهای پاسخ را توصیف می‌کنند. در حالت کلی مدل درجه دوم را می‌توان به‌صورت معادله (1) در نظر گرفت:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 AB + \beta_4 A^2 + \beta_5 B^2 \qquad (1)$$

که در آن Y متغیر پاسخ (میکروسختی و ضخامت لایه سفید) و ثوابت β_i، ضرایب جزئی رگرسیون یا به‌اختصار ضرایب رگرسیون هستند. β_1 و β_2 نشان‌دهنده اثرات خطی A و B، β_3 نشان‌دهنده اثر خطی متقابل A و B و β_4 و β_5 نشان‌دهنده اثرات درجه دوم A و B بر روی متغیر پاسخ می‌باشد. این ضرایب براساس روش حداقل مربعات محاسبه شدند.

در این تحقیق ابتدا یک مدل درجه دو، شامل تمامی متغیرهای اصلی، تداخل دوتایی و توان دوم متغیرها بسط داده شد و سپس، فاکتورهای دارای اثر بی‌معنی حذف و به‌عنوان خطا فرض شدند. برای انجام تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار مینی‌تب[1] بهره گرفته شد. در ادامه، هرکدام از خروجی‌ها به‌صورت جداگانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

4-1- میکروسختی سطح

بررسی مقادیر میکروسختی سطح به‌دست آمده نشان می‌دهد که فارغ از شرایط برشی، در تمامی آزمایش‌ها سختی سطح فرزکاری شده بالاتر از سختی اولیه ماده است. همچنین مقادیر میکروسختی با تغییر شرایط برش بین 470 تا 607 ویکرز تغییر می‌کند که نشان از معنی‌دار بودن تأثیر شرایط برش بر میکروسختی سطح دارد.

جدول3 تحلیل واریانس مدل توسعه‌یافته برای تخمین میکروسختی را نشان می‌دهد. مقدار R_{adj} برای این مدل 94.5% به‌دست آمد. نتایج حاکی از معنی‌داری تأثیر پارامترهای اصلی به‌جز عمق برشی شعاعی، تداخل نرخ پیشروی و سرعت برشی و توان دوم فاکتورهای عمق برشی محوری و نرخ پیشروی بود. مقدار P برای فاکتور عدم انطباق نیز، معنی‌دار نبودن این فاکتور را اثبات کرد. براساس تحلیل آماری، نرخ پیشروی با 73.1%، سرعت برشی با 14.4% و عمق برش محوری تنها با 5.1% دارای بیشترین تأثیر روی میکروسختی بودند. در شکل 3 نمودار تأثیر پارامترهای برش بر میکروسختی سطح نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تمامی پارامترهای برشی مورد بررسی اثر افزاینده‌ای روی اندازه میکروسختی دارند.

جدول3 تحلیل واریانس مدل میکروسختی سطح فرزکاری شده

Table 3 Analysis of variance for milled surface microhardness model

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مقدار F	مقدار P	سهم تأثیر (%)
a_p	2233.4	1	14.73	0.0001	5.14
v_c	6272	1	74.92	0	14.44
f_z	31768	1	391.42	0	73.13
a_p^2	872/8	1	9.89	0.04	1.91
$a_p \times f_z$	333.1	1	3.98	0.058	0.77
باقیمانده	2009.2	24			4.62
عدم انطباق	1866.3	19	3.44	0.088	
خطا	142.8	5			
کل	43443.4	29			100

1- Minitab

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.29.7]

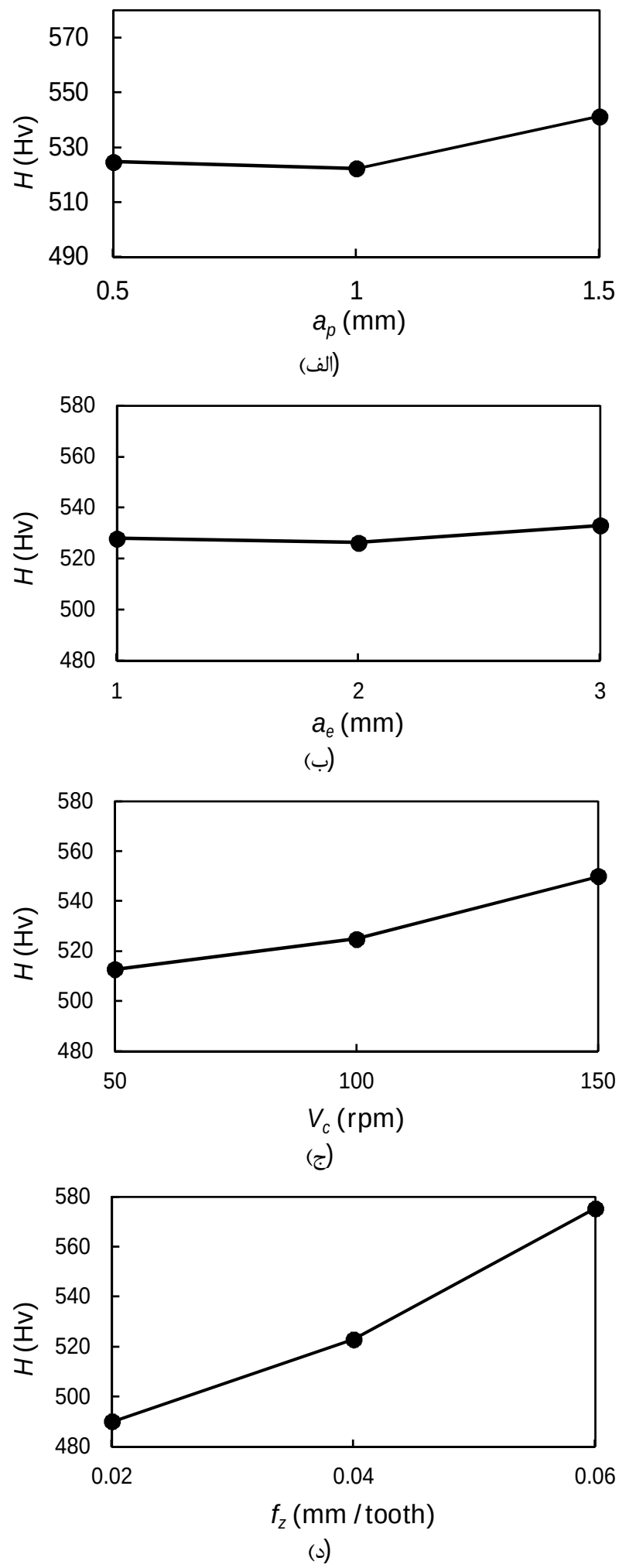

Fig. 3 Milled surface microhardness variations versus cutting parameters a)axial depth of cut b)radial depth of cut c) cutting speed d) feed rate

شکل 3 تغییرات میکروسختی سطح فرزکاری شده با پارامترهای برش الف) عمق برش محوری ب) عمق برش شعاعی ج) سرعت برشی د) نرخ پیشروی

تغییرات سختی سطح قطعه فرزکاری شده، توسط سه مکانیزم اصلی قابل توجیه است. در مکانیزم اول گرادیان دمایی شدید ناحیه برش، باعث تغییرفاز ماده شده و با سرد شدن سریع سطح، افزایش سختی را نتیجه می‌دهد. مکانیزم دوم، تغییر شکل و اندازه دانه به علت تغییر شکل پلاستیک شدید در اثر کار مکانیکی و بروز پدیده کارسختی است. مکانیزم سوم نیز، اثرات محیطی مانند واکنش نیتریده شدن و یا اکسید شدن سطح ماشین‌کاری شده را شامل می‌شود [21]. در مجموع، میزان اثرگذاری این مکانیزم‌ها و برهم‌کنش آن‌ها بر یکدیگر، سختی سطح نهایی را تعیین می‌کنند.

مطابق شکل 3 (الف) و (ب)، عمق برش محوری و شعاعی کمتر از دو پارامتر دیگر باعث افزایش سختی سطح می‌شوند. این افزایش ناچیز به علت بیشترشدن سطح تماس بین ابزار و قطعه‌کار بوده که به دنبال آن، کارسختی ناشی از تغییرشکل پلاستیک افزایش یافته و سختی بیشتر می‌شود. افزایش سرعت برشی نیز، سطح ماشین‌کاری شده را سخت‌تر می‌کند (شکل 3 ج). این پدیده ناشی از بیشتر شدن درجه حرارت در موضع برش بوده که باعث تغییر فاز ماده شده و به دنبال آن، با سریع سرد شدن سطح، سختی افزایش می‌یابد [22]. همچنین با افزایش نرخ پیشروی، سختی سطح بیشترین افزایش را دارد و با تغییر نرخ پیشروی از 0.02 میلی‌متر بر دندانه تا 0.06 میلی‌متر بر دندانه، سختی سطح ماشین‌کاری از 490 ویکرز تا 575 ویکرز (21%) بالا می‌رود (شکل 3 د). در واقع، ماده نرخ کرنش بالاتری را در نرخ پیشروی‌های بالا تجربه می‌کند و در اثر افزایش نیروهای ماشین‌کاری و کارسختی ناشی از آن، سختی سطح بالاتر می‌رود [23].

تداخل نرخ پیشروی با عمق برش محوری هم دارای اثر معناداری بود که رویه پاسخ آن با فرض ثابت بودن سرعت برشی و عمق برش شعاعی در سطوح میانی خود (100 متر بر دقیقه و 2 میلی‌متر) در شکل 4 آورده شده است. این رویه نشان می‌دهد که در سطح پایین نرخ پیشروی، با افزایش عمق برش محوری، روند تغییرات میکروسختی سطح ابتدا یک افت ناچیز داشته و سپس روند صعودی را در پیش می‌گیرد. این کاهش سختی را می‌توان ناشی از حذف اثر شخم‌زنی[1] دانست. شخم‌زنی جریان پلاستیک غیریکنواختی در ماده به وجود آورده و سختی سطح را بالا می‌برد که اثر آن با افزایش عمق برش محوری حذف می‌گردد.

براساس این مدل توسعه یافته، یک فرمول تجربی برای تخمین میکروسختی سطح براساس معادله (2) بدست آمد. شکل 5 مقایسه نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل گسترش یافته و مقادیر واقعی میکروسختی سطح را در هر آزمایش نشان می‌دهد.

این نمودار تخمین بسیار خوب مقادیر واقعی میکروسختی توسط مدل توسعه‌یافته را بیان می‌کند. در مجموع خطای میانگین این تخمین 1.18% و بیشینه خطای مدل 5% به‌دست آمد.

$$H = 444.25 - 87.47222a_p + 0.37333v_c + 1677.08333f_z + 456.25a_p \times f_z + 42.88889a_p^2 \quad (2)$$

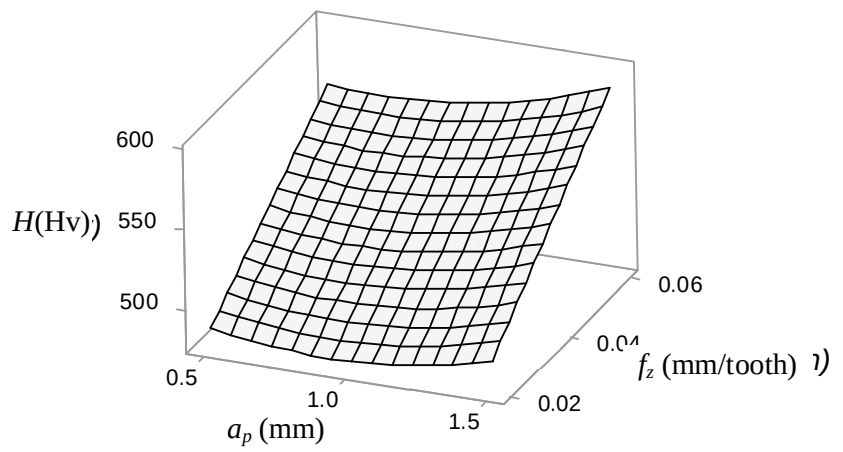

Fig. 4 Response surface for significant interaction of axial depth of cut and feed rate on the surface microhardness

شکل 4 رویه پاسخ تداخل معنی‌دار عمق برش محوری و نرخ پیشروی روی میکروسختی سطح

1- Plowing Effect

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.29.7]

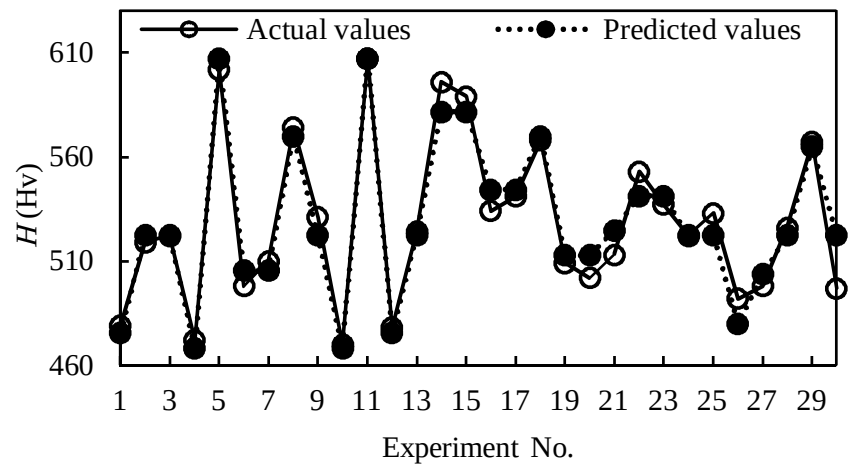

Fig. 5 Comparison of predicted and empirical results for microhardness in each experiments

شکل 5 مقایسه مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده میکروسختی سطح در هر آزمایش

4-2- ضخامت لایه سفید

نتایج بدست آمده بیانگر شکل‌گیری لایه سفید فارغ از شرایط برشی، در تمامی آزمایش‌های فرزکاری است. همچنین ضخامت این لایه با تغییر شرایط برش بین 7.6 تا 16.1 میکرومتر تغییر می‌کند. جدول 4 تحلیل واریانس مدل توسعه‌یافته برای تخمین ضخامت لایه سفید را نشان می‌دهد. نتایج حکایت از معنی‌دار بودن تأثیر تنها دو پارامتر سرعت برشی و نرخ پیشروی دارد. مقدار R_{adj} به بزرگی 90.5% برای مدل نهایی بدست آمد. همچنین مقدار P برای فاکتور عدم انطباق، معنی‌دار نبودن این فاکتور را اثبات کرد. تحلیل آماری نشان داد که سرعت برشی با 81.3% و نرخ پیشروی با 9.4% به ترتیب بیشترین تأثیر را روی ضخامت لایه سفید دارا هستند.

دلیل شکل‌گیری لایه سفید ترکیبی از دو مکانیزم اصلی است؛ اولی تغییر شکل پلاستیکی سریع که موجب ریزدانه شدن ساختار شده و دومی تغییر فازهای متالوژیکی به خاطر گرادیان دمایی شدید قطعه‌کار [25,24]. فرایند برشی که دمای بالا و فشار زیادی هنگام برش روی سطح ایجاد کند، می‌تواند موجب بروز هر دو مکانیزم گردیده و لایه سفید ضخیمی را به‌وجود آورد. شکل 6 نمونه‌ای از لایه سفید تشکیل‌شده و نحوه اندازه‌گیری ضخامت آن را برای آزمایش شماره 23 نشان می‌دهد. مطابق شکل، ضخامت لایه سفید با استفاده از نرم‌افزار تحلیل تصویر در پنج نقطه اندازه‌گیری شد و میانگین اعداد به‌دست‌آمده، به‌عنوان ضخامت این لایه گزارش گردید.

نمودار تأثیر پارامترهای برش بر ضخامت لایه سفید در شکل 7 آمده است. مشاهده می‌شود که عمق برش محوری و شعاعی تأثیر چندانی بر ضخامت لایه سفید ندارند (شکل 7 (الف) و (ب)). این در حالی است که با افزایش سرعت برشی و نرخ پیشروی، ضخامت این لایه به‌شدت افزایش می‌یابد (شکل 7 (ج) و (د)). در واقع لایه سفید، لایه‌ای از ماده است که از دمای آستنیته شدن فراتر رفته و سپس در هوا کوئنچ می‌گردد [13]. زمانی که از سرعت‌های برش و نرخ پیشروی بالاتر استفاده می‌گردد، دمای ضخامت بیشتری از قطعه از دمای آستنیته شدن بالاتر می‌رود و در نتیجه لایه سفید ضخیم‌تری تشکیل خواهد شد [26]. افزایش سرعت برشی از 50 متر بر دقیقه تا 150 متر بر دقیقه، ضخامت لایه سفید را تا 5.5 میکرومتر (60%) افزایش می‌دهد.

علاوه‌بر این با افزایش نرخ کرنش در پیشروی‌های بالا، ضخامت بیشتری از ماده تحت تأثیر تغییر شکل و کارسختی ناشی از فرزکاری قرار می‌گیرد که خود عاملی کمکی در جهت افزایش ضخامت لایه سفید خواهد شد. همچنین تغییرات نرخ پیشروی از 0.02 میلی‌متر بر دندانه تا 0.06، میلی‌متر بر دندانه این لایه را تا 1.9 میکرومتر (17%) ضخیم‌تر می‌کند.

جدول 4 تحلیل واریانس مدل ضخامت لایه سفید

Table 4 Analysis of variance for white layer thickness model

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مقدار F	مقدار P	سهم تأثیر (%)
v_c	135.027	1	237.55	0.0001	81.31
f_z	15.68	1	27.59	0.0001	9.44
باقیمانده	15.347	27			9.24
عدم انطباق	12.679	22	1.08	0.517	
خطا	0.534	5			
کل	166.054	29			100

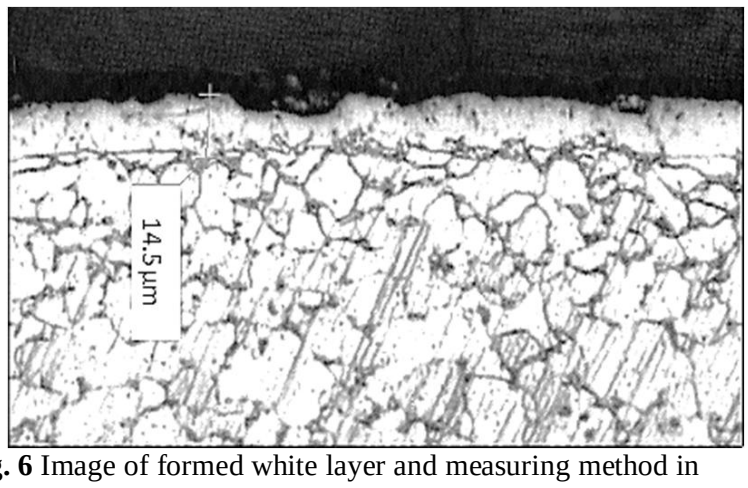

Fig. 6 Image of formed white layer and measuring method in experiment No. 23

شکل 6 تصویر لایه سفید تشکیل‌شده و نحوه اندازه‌گیری در آزمایش شماره 23

براساس مدل توسعه‌یافته، فرمول تجربی برای تخمین ضخامت لایه سفید به‌صورت معادله (3) بدست آمد. شکل 8 مقایسه نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل گسترش یافته و مقادیر واقعی ضخامت لایه سفید را در هر آزمایش نشان می‌دهد. این نمودار حکایت از تخمین بسیار خوب مقادیر واقعی ضخامت لایه سفید توسط مدل توسعه‌یافته دارد. مجموع خطای میانگین این تخمین 5.2% و بیشینه خطای آن نیز 15.69% بدست آمد.

$$WLT = 4.64222 + 0.054778v_c + 46.66667f_z \quad (3)$$

5- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش فرزکاری سخت فولاد 4340 در حضور روش MQL مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از تکنیک طراحی آزمایش رویه پاسخ، اثر پارامترهای فرآیند روی میکروسختی و ضخامت لایه سفید تعیین گردید. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش به‌صورت خلاصه در ادامه آمده است:

1. با استفاده از روش طراحی آزمایش رویه پاسخ و تحلیل رگرسیون، مدلی درجه 2 برای تخمین میکروسختی سطح و مدلی خطی برای تخمین ضخامت لایه سفید توسعه داده شدند.
2. تمامی پارامترهای فرزکاری اثر افزاینده‌ای روی اندازه میکروسختی داشتند. همچنین نرخ پیشروی با 73.1%، سرعت برشی با 14.4% و عمق برش محوری تنها با 5.1% روی میکروسختی مؤثر بودند.
3. ضخامت لایه سفید تشکیل‌شده در فرزکاری با تغییر شرایط برش بین 7.6 تا 16.1 میکرومتر تغییر می‌کرد. سرعت برشی با 81.3% و نرخ پیشروی با 9.4% تنها پارامترهای مؤثر روی ضخامت لایه سفید بودند.
4. در بین پارامترهای برشی مورد بررسی، عمق برشی شعاعی کمترین اثر را روی سختی سطحی و ضخامت لایه سفید داشت.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.29.7]

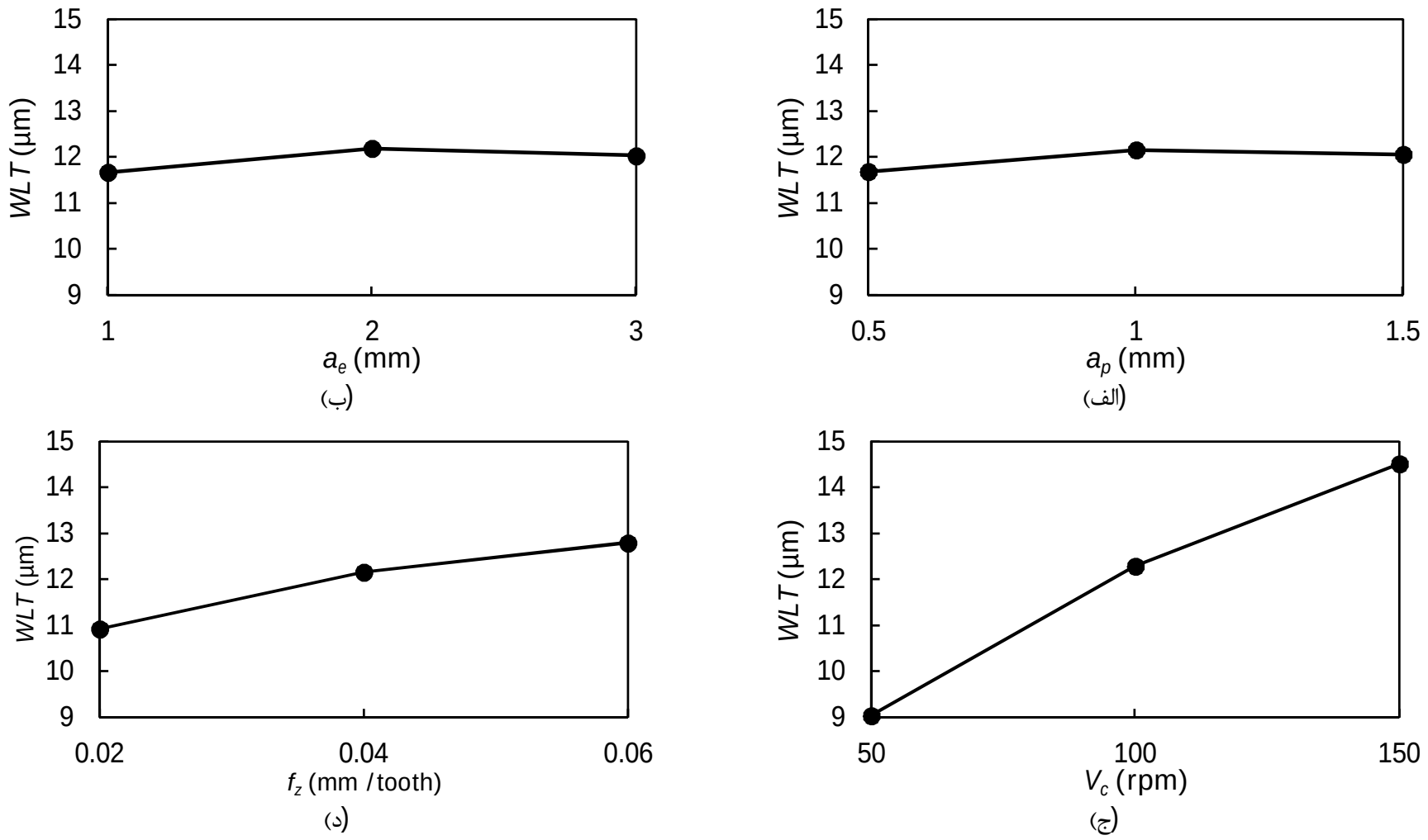

Fig. 7 white layer thickness variations versus cutting parameters a) axial depth of cut b) radial depth of cut c) cutting speed d) feed rate

شکل 7 تغییرات ضخامت لایه سفید با پارامترهای برش الف) عمق برش محوری ب) عمق برش شعاعی ج) سرعت برشی د) نرخ پیشروی

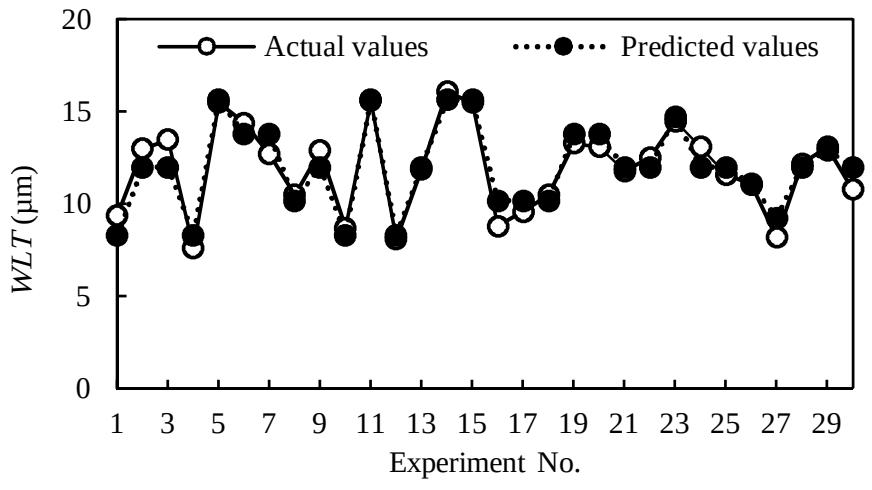

Fig. 8 comparison of predicted and empirical results for white layer thickness at each experiment

شکل 8 مقایسه مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده ضخامت لایه سفید در هر آزمایش

6- مراجع

[1] M. Dogra, V. S. Sharma, A. Sachdeva, N. M. Suri, J. S. Dureja, Tool wear, chip formation and workpiece surface issues in CBN hard turning: A review, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 11, No. 2, pp. 341-358, 2010.

[2] V. P. Astakhov, *Machining of hard materials–definitions and industrial applications*, in: *Machining of Hard Materials*, (Eds.), pp. 1-32, London: Springer, 2011.

[3] W. Grzesik, *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications*: Elsevier, 2008.

[4] J. P. Davim, *Surface integrity in machining*, London: Springer, 2010.

[5] A. M. Abrão, J. L. S. Ribeiro, J. P. Davim, *Surface integrity*, in: *Machining of Hard Materials*, (Eds.), pp. 115-141, London: Springer, 2011.

[6] S. Zhang, T. Ding, J. Li, Microstructural alteration and microhardness at near-surface of AISI H13 steel by hard milling, *Machining Science and Technology*, Vol. 16, No. 3, pp. 473-486, 2012.

[7] I. S. Harrison, T. R. Kurfess, E. J. Oles, P. M. Singh, Inspection of white layer in hard turned components using electrochemical methods, *Journal of manufacturing science and engineering*, Vol. 129, No. 2, pp. 447-452, 2007.

[8] S. Akcan, W. S. Shah, S. Moylan, S. Chandrasekar, P. Chhabra, H. Yang, Formation of white layers in steels by machining and their characteristics, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 33, No. 4, pp. 1245-1254, 2002.

[9] H. Tonshoff, E. Brinkomeier, Determination of the mechanical and thermal influences on machined surfaces by microhardness and residual stress analysis, *Annals of the CIRP*, Vol. 29, No. 2, pp. 519-530, 1980.

[10] E. Oberg, C. J. McCauley, *Machinery's Handbook & Guide to Machinery's Handbook*: Industrial Press, 2004.

[11] T. G. Dawson, *Machining hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride cutting tools*, Thesis, Georgia Institute of Technology, Georgia, 2002.

[12] Y. K. Chou, C. J. Evans, M. M. Barash, Experimental investigation on CBN turning of hardened AISI 52100 steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 124, No. 3 ,pp. 274-283, 2002.

[13] D. W. Schwach, Y. Guo, Feasibility of producing optimal surface integrity by process design in hard turning, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 395, No. 1, pp. 116-123, 2005.

[14] M. Chen, L.-l. Jing, X.-k. Li, The surface integrity in machining hardened steel SKD11 for die and mold, *Machining science and technology*, Vol. 11, No. 1, pp. 99-116, 2007.

[15] X. Liu, D. Wen, Z. J. Li, L. Xiao, F. Yan, Experimental study on hard turning hardened GCr15 steel with PCBN tool, *Journal of Materials processing technology*, Vol. 129, No. 1, pp. 217-221, 2002.

[16] A. Barbacki, M. Kawalec, A. Hamrol, Turning and grinding as a source of microstructural changes in the surface layer of hardened steel, *Journal of materials processing technology*, Vol. 133, No. 1, pp. 21-25, 2003.

[17] M. J. Marques, J. Outeiro, A. M. Dias, R. M'Saoubi, H. Chandrasekaran, Surface integrity of H13 ESR mould steel milled by carbide and CBN tools, In *Proceeding of Materials Science Forum*, Vol. 514, pp. 564-568, 2006.

[18] X. J. Cai, Z. Q. Liu, M. Chen, Q. L. An, An experimental investigation on effects of minimum quantity lubrication oil supply rate in high-speed end milling of Ti–6Al–4V, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 226, No. 11, pp. 1784-1792, 2012.

[19] K. Palanikumar, Application of Taguchi and response surface methodologies for surface roughness in machining glass fiber reinforced plastics by PCD tooling, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 36, No. 1-2, pp. 19-27, 2008.

[20] U. Çaydaş, A. Hasçalik, Modeling and analysis of electrode wear and white layer thickness in die-sinking EDM process through response surface methodology, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 38, No. 11-12, pp. 1148-1156, 2008.

[21] 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.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.29.7]

[22] Y. K. Chou, C. J. Evans, White layers and thermal modeling of hard turned surfaces, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No. 12, pp. 1863-1881, 1999.

[23] C. Ezilarasan, A. Velayudham, Effect of Machining Parameters on Surface Integrity in Machining Nimonic C-263 Super Alloy Using Whisker-Reinforced Ceramic Insert, *Journal of materials engineering and performance*, Vol. 22, No. 6, pp. 1619-1628, 2013.

[24] A. Aramcharoen, P. Mativenga, White layer formation and hardening effects in hard turning of H13 tool steel with CrTiAlN and CrTiAlN/MoST-coated carbide tools, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 36, No. 7-8, pp. 650-657, 2008.

[25] D. Umbrello, Analysis of the white layers formed during machining of hardened AISI 52100 steel under dry and cryogenic cooling conditions, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 64, No. 5-8, pp. 633-642, 2013.

[26] D. Umbrello, Influence of material microstructure changes on surface integrity in hard machining of AISI 52100 steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 9-12, pp. 887-898, 2011.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.29.7]