



مطالعه تأثیر پارامترهای فرآیند برنیشینگ غلتکی بر زبری سطح و میکروسختی قطعات چدنی

محسن عسگری¹، پیام سرائیان^{2*}، احسان شکوری³

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

2- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

* نجف آباد، صندوق پستی 8514143131، p_saraeian@iau-tnb.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 12 مرداد 1399

داوری اولیه: 31 شهریور 1399

پذیرش: 12 آذر 1399

کلیدواژگان:

چدن نشکن

برنیشینگ غلتکی

زبری سطح

میکروسختی

روش سطح پاسخ

با توجه به نیاز صنایع مختلف به تولید محصول با دقت ابعادی و خواص سطحی مطلوب و تأثیر بالای کیفیت سطح نهایی بر کارایی محصولات، انتخاب فرآیندهای مؤثر و مناسب پرداخت جهت تولید محصولات با کیفیت، حائز اهمیت است. در میان روش‌های مختلف پرداخت، استفاده از فرآیند برنیشینگ به دلیل هزینه پایین، امکان نصب روی ماشین‌های مختلف و پرداخت سطوح بدون براده‌برداری بیش از سایرین مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین در این پژوهش، با توجه به کاربرد گسترده چدن نشکن در صنایع مختلف، پس از تهیه نمونه‌های ساخته شده از چدن نشکن، ساخت ابزار برنیشینگ غلتکی و سوار نمودن آن روی ماشین تراش، آزمایش‌ها مطابق با جدول طراحی آزمایش، انجام شد و تأثیر متغیرهای نیروی برنیشینگ، پیشروی و سرعت دوران، بر میکروسختی و زبری سطح نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه به منظور تجزیه و تحلیل آماری نتایج، از نرم‌افزار مینی‌تب و روش سطح پاسخ استفاده شد و طی تحلیل آماری انجام شده با سطح اطمینان 95٪، مؤثرترین پارامترها و مقادیر مطلوب آنها جهت افزایش میکروسختی و کیفیت سطح نمونه‌ها معرفی گردید. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که نیروی برنیشینگ بیشترین تأثیر را بر میکروسختی و زبری سطح نمونه‌ها داشته و طی بهینه‌سازی انجام شده به روش سطح پاسخ، مقدار بهینه برای زبری سطح و میکروسختی نمونه‌ها، به ترتیب، 0/562 میکرومتر و 203/20 ویکرز بدست آمد که در مقایسه با مقادیر بدست آمده برای نمونه شاهد، زبری سطح نمونه‌ها در حدود 58٪ کاهش و میکروسختی نمونه‌ها در حدود 12٪ افزایش یافته است.

Study of the effect of roller burnishing process parameters on surface roughness and micro hardness of cast iron parts

Mohsen Asgari¹, Payam Saraeian^{2*}, Ehsan Shakouri³

1, 3- Department of Mechanical Engineering, Tehran North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

*P.O.B 8514143131, Najafabad, Iran, p_saraeian@iau-tnb.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 3 August 2020

First Decision: 22 September 2020

Accepted: 3 December 2020

Keywords:

Ductile cast iron

Roller burnishing

Surface roughness

Micro hardness

Surface response methodology

Abstract

Due to the needs of different industries to produce high precision dimensional products and desirable surface properties and the highest effect of final surface quality on product performance, selection of effective and suitable polishing processes for production of quality products is important. Among different methods of polishing, the burnishing process due to low cost, the possibility of installation on different machines and the polishing without chip has been consideration. Therefore, in this study, due to the widespread application of ductile cast iron in various industries, after preparing the samples of ductile cast iron, making the roller burnishing tools and mounting it on the lathe machine, experiments were carried out in accordance to experimental design table and the effect of burnishing force, feed rate and number of passes, on microhardness and surface roughness of samples were evaluated. For statistical analysis, the results of minitab software and response surface methodology (RSM) were used and the statistical analysis performed with the confidence level of 95%, the most effective parameters and their desirable values to increase the microhardness and quality of samples were introduced. The results showed that the effect of the burnishing force, had the greatest impact on the microhardness and roughness of samples and the optimization of samples by (RSM), optimum value for surface roughness and microhardness of specimens, respectively, 0.562 μm and 203.20 Vickers were obtained in comparison with the values for the initial sample, the surface roughness of samples about 58% reduction and microhardness of samples were increased about 12%.

Please cite this article using:

M. Asgari, P. Saraeian, E. Shakouri, Study of the effect of roller burnishing process parameters on surface roughness and micro hardness of cast iron parts, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 23- 34, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

امروزه با توجه به اهمیت تولید محصول با دقت ابعادی و کیفیت سطح مطلوب در صنایع مختلف، استفاده از فرآیندهای مختلف پرداخت بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های پرداخت متعددی جهت استفاده در عملیات پایانی ماشین‌کاری متداول است که می‌توان به عنوان نمونه به سنگ‌زنی¹، هونینگ²، لپینگ³ اشاره نمود. این روش‌ها، بر خلاف برنیشینگ⁴، مستلزم انجام براده‌برداری از سطح قطعه‌کار هستند. علاوه بر آن، روش‌های ذکر شده اغلب هزینه بر بوده و اجرای آنها در پاره‌ای از موارد با مشکلاتی همراه است. بنابراین با توجه به اهمیت کیفیت سطح پایانی، در کارآیی محصول و عدم محدودیت و قابلیت این روش برای ایجاد سطوح فوق پرداخت، استفاده از برنیشینگ به عنوان روشی مناسب معرفی شده است [1].

سازوکار فرآیند برنیشینگ مشابه با عملیات نورد است که در ابعاد میکرونی انجام می‌شود. این فرآیند علاوه بر صیقل دادن سطوح، باعث افزایش استحکام، میکروسختی، عمر خستگی، افزایش مقاومت در برابر سایش و خوردگی و ایجاد تنش پسماند فشاری⁵ در محصول می‌شود [2]. بنابراین طبق تعریف، برنیشینگ یک فرآیند تغییر شکل پلاستیک است که در آن، طی نیرویی که توسط ساچمه یا غلتک به سطح قطعه‌کار وارد می‌شود، قله‌های زبری سطح به سمت دره‌ها رانده شده و آنها را پر می‌کنند [3].

یلدوس و همکارانش در سال 2008، طی انجام فرآیند برنیشینگ بر فولاد EN24، دریافتند که با افزایش نیروی برنیشینگ تا یک مقدار مشخص، ابتدا زبری سطح کاهش یافته و ادامه روند افزایش نیروی برنیشینگ، افزایش زبری سطح را در پی داشته است. همچنین نتایج نشان داد که در سرعت‌های پایین، ایجاد چسبندگی بین ابزار و قطعه‌کار، سبب بروز عیوب سطحی شده، اما در سرعت‌های بالا، به دلیل کاهش زمان تماس، از مقدار عیوب سطحی کاسته شده است [4].

پاتلا و همکارانش در سال 2013، تأثیر پارامترهای مختلف فرآیند برنیشینگ را بر زبری سطح فولاد AISI 4340، مورد بررسی قرار دادند، نتایج نشان دهنده کاهش زبری سطح به دنبال افزایش تعداد عبور ابزار بود. در حالی که، افزایش پیشروی، افزایش زبری سطح نمونه‌ها را به همراه داشت [5].

یوان و همکارانش در سال 2016، جهت دستیابی به ترکیبی بهینه از پارامترهای فرآیند برنیشینگ به منظور کاهش زبری سطح و افزایش میکروسختی آلیاژ TA2، از روش سطح پاسخ بهره گرفتند. نتایج نشان داد که از بین پارامترهای فرآیند، سرعت اسپیندل و عمق برنیشینگ، تأثیر چشمگیری بر کاهش زبری سطح و افزایش میکروسختی نمونه‌ها داشته است و ترکیبی از سرعت برنیشینگ بالا، پیشروی پایین و عمق برنیشینگ بالا در بهبود خواص میکروسختی سطح مؤثر بوده است [6].

نستلر و همکارانش در سال 2018، طی بررسی تأثیر استفاده از فرآیند برنیشینگ، جهت پرداخت کامپوزیت زمینه فلزی AMC، دریافتند که استفاده از روش برنیشینگ، تولید سطوح صاف با تنش‌های باقیمانده فشاری قوی را در ماتریس آلیاژی امکان‌پذیر می‌سازد [7]. نیوین و همکارانش در سال 2018، تأثیر پارامترهای فرآیند برنیشینگ را بر کیفیت سطح فولاد AISI 1045 با استفاده از روش سطح پاسخ مورد بررسی قرار دادند و برای تولید مجموعه‌ای از راه‌حل‌های مطلوب و تعیین بهترین شرایط ماشین‌کاری، یک الگوریتم تکاملی با استفاده از الگوریتم ژنتیک طراحی نمودند. نتایج نشان داد که ادغام مدل سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک می‌تواند به عنوان رویکردی قدرتمند برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیندهای برنیشینگ در نظر گرفته شود و نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی نیز حاکی از آن بود که مقدار زبری سطح، با افزایش سرعت اسپیندل و عمق برنیشینگ ابتدا کاهش یافته و پس از عبور از نقطه بهینه با افزایش این پارامترها، افزایش یافته است [8].

رامش و همکارانش در سال 2019، تأثیر بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند برنیشینگ را بر رفتار خوردگی نمونه آلیاژی Mg-Zn-Ca مورد بررسی قرار دادند. ایشان دریافتند که طی فرآیند برنیشینگ، اعمال تنش فشاری و ایجاد نظم در آرایش دانه‌ها، بهبود رفتار خوردگی نمونه‌ها را در پی داشته است [9].

لی و همکارانش در سال 2019، به بهینه‌سازی فرآیند برنیشینگ، جهت بهبود خواص سطحی فولاد با استفاده از مدل کریجینگ پرداختند. ایشان جهت بررسی تنش فشاری در سطح خارجی قطعات و بررسی مورفولوژی سطح در حالت‌های فرآیندی مختلف، از روش پراش اشعه ایکس و تصاویر میکروسکوپ الکترونی بهره گرفتند. نتایج حاصل نشان داد که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل، با نتایج تجربی توافق خوبی دارند [10].

1 Grinding

2 Honing

3 Lapping

4 Burnishing

5 Compressive Residual Stress

آزمایشگاه و با استفاده از دستگاه اسپکتروسکوپی نشری Ndry Master در محدوده دامنه گواهینامه استاندارد ISO/IEC 17025 و طی استاندارد مرجع ASTM E1010-16 انجام گردیده است.

در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند برنیشینگ بر زبری سطح و میکروسختی نمونه‌ها، ابتدا طی انجام فرآیند تراش کاری، قطعات استوانه‌ای شکل به طول 250 میلی‌متر و قطر 40 میلی‌متر آماده‌سازی گردید.

سپس به منظور مشخص نمودن محدوده برنیشینگ به ازای هر حالت فرآیندی، نمونه‌ها به قسمت‌هایی به طول 25 میلی‌متر تقسیم‌بندی شده است. در شکل 1، نمایی از قطعه کار نشان داده شده است.

جدول 1 ترکیب شیمیایی قطعه کار بر حسب درصد

Table 1 Chemical composition of the workpiece in percentage						
W	Cr	V	Cu	Mo	Ni	AL
0/006	0/05	0/005	0/04	0/006	0/04	0/013
Co	Sn	Si	Mn	P	S	C
0/006	0/018	2/70	0/55	0/013	0/01	4/60
Ti	Zr	Sb	Pb	Fe	Nb	As
0/005	Trace	None	None	Base	None	0/002



Fig. 1 View of the workpiece

شکل 1 نمایی از قطعه کار

ابزار برنیشینگ غلتکی ساخته شده جهت این پژوهش، از جنس فولاد 2312 و غلتک بکار رفته در این ابزار، از جنس تنگستن کارباید (WC)، با قطر خارجی 32 میلی‌متر و پهنای 9/5 میلی‌متر بوده است.

سطح تماس غلتک با قطعه کار 2/5 میلی‌متر بوده و در قسمت محور مرکزی بلوک، فنر فولادی ساخت کشور ایتالیا با کد (G20-076) و ثابت فنر 140 نیوتن بر میلی‌متر با استاندارد

نیوین و همکارانش در سال 2020، طی بهینه‌سازی فرآیند برنیشینگ، جهت بهبود زبری سطح و سختی در فولاد H 13 دریافتند که طی انجام فرآیند برنیشینگ، زبری سطح و سختی نمونه‌ها، به ترتیب در حدود 8% و 30% نسبت به نمونه اولیه بهبود یافته است [11].

کائو و همکارانش در سال 2020، به بهینه‌سازی فرآیند برنیشینگ طی روش سطح پاسخ و الگوریتم میکروژنتیک و بررسی تأثیر آن بر خواص سطحی فولاد SKD61 پرداختند. نتایج نشان داد، پیشروی و عمق برنیشینگ به ترتیب بیشترین تأثیر را بر بهبود خواص سطحی نمونه‌ها داشته است [12].

چدن نشکن با دارا بودن خواص نظیر انعطاف‌پذیری، مقاومت در برابر ضربه و خستگی، قابلیت ماشین‌کاری عالی، مقاومت به دماهای بالا، قابلیت عملیات حرارتی، تولید آسان و قیمت مناسب نسبت به فولادها، برای تولید انواع قطعات صنعتی استفاده می‌شوند. با توجه به نیاز صنایع به تولید محصول با کیفیت و ارزان و همچنین اهمیت کیفیت سطح در کارآیی محصول، استفاده از روش برنیشینگ به دلیل امکان استفاده از این فرآیند در ماشین‌های مختلف، انجام پرداخت روی قطعات بدون نیاز به براده‌برداری و صرفه اقتصادی مورد توجه قرار گرفته است.

طی پیشینه مقالات مطالعه شده در این زمینه، موارد مختلفی از جمله تأثیر پارامترهای مختلف فرآیند و جنس غلتک‌های بکار رفته در ابزار برنیشینگ بر کیفیت سطح نهایی قطعات ماشین‌کاری شده که عمدتاً جزء دسته مواد شکل‌پذیر بودند مورد مطالعه قرار گرفته است. در صورتی که در ارتباط با تأثیر پارامترهای فرآیند برنیشینگ بر کیفیت سطح قطعات ساخته شده از مواد تردی مانند چدن نشکن، موردی یافت نشد. بنابراین در این پژوهش با هدف دستیابی به خواص سطحی مطلوب، به بررسی تأثیر پارامترهایی نظیر نیروی برنیشینگ، سرعت، پیشروی و تعداد عبور ابزار بر زبری سطح و سختی قطعات چدنی پرداخته شده است. ایجاد خواص ذکر شده، در موادی مانند چدن نشکن سبب بهبود عملکرد و کارایی محصولات ساخته شده از این ماده و گسترش استفاده از آن در صنایع مختلف می‌شود.

2- روش تجربی

قطعه کار مورد استفاده در این پژوهش، چدن نشکن (GGG40) است که آنالیز عناصر تشکیل دهنده آن در جدول 1 ارائه گردیده است.

این آنالیز به روش اسپکتروسکوپی نشری در شرایط محیطی

آزمون‌های مقدماتی نشان داد که استفاده از مقادیر کوچک‌تر برای پیشروی، کیفیت سطح بهتری را نتیجه می‌دهد ولی با توجه به افزایش هزینه و زمان ماشین‌کاری به ازای مقادیر کوچک برای پیشروی، حد پائینی آن 0/05 میلی‌متر بر دور در نظر گرفته شد [14].

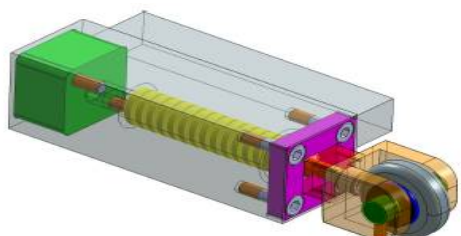


Fig. 2 Schematic of the roller burnishing tool

شکل 2 شماتیک ابزار برنیشینگ غلتکی



Fig. 3 Roller burnishing operation

شکل 3 عملیات برنیشینگ غلتکی

جدول 2 پارامترها و سطوح انتخابی فرآیند

Table 2 Selected process parameters and their levels

نمایش متغیرها	پارامترهای ورودی	سطح 1	سطح 2	سطح 3
X_1	نیروی برنیشینگ (N)	250	350	450
X_2	پیشروی (mm/rev)	0/05	0/08	0/11
X_3	سرعت دوران (RPM)	355	500	710

همچنین، طی آزمایش‌های مقدماتی انجام شده مشخص شد که بهترین نتایج برای کمیت‌های مورد بررسی، به ازای 5 بار عبور ابزار حاصل شده، به همین دلیل در طراحی آزمایش انجام شده تعداد عبور ثابت فرض شده است و پارامترهای نیروی برنیشینگ، سرعت پیشروی و سرعت دوران هر کدام در 3 سطح مورد بررسی قرار گرفته و جهت اطمینان از صحت مقادیر به‌دست آمده، هر آزمون سه بار تکرار شده است.

در این پژوهش، به منظور بهره‌مندی از تحلیل آماری نتایج، از نرم‌افزار مینی‌تب 17 و روش سطح پاسخ استفاده شده است.

ISO10243 مستقر گردیده است.

برای تنظیم میزان فشردگی فنر و اعمال نیروی لازم طی فرآیند، در قسمت انتهایی محور مرکزی بلوک، یک پیچ با گام 1 میلی‌متر تعبیه شده است. در شکل 2، شماتیک ابزار برنیشینگ ساخته شده ارائه شده است.

پس از بستن قطعه‌کار میان دو مرغک، ابزار برنیشینگ توسط دینامومتر Kistler مدل 9257BA کالیبره گردید و سپس با استفاده از ماشین تراش TN50D ساخت ماشین‌سازی تبریز، عملیات برنیشینگ روی نمونه‌ها، انجام شد. در ضمن عملیات برنیشینگ، به منظور کاهش اصطکاک از روغن K10 محصول شرکت بهران با گرانروی 50 Cst به عنوان روان‌کار استفاده گردید. در شکل 3، نحوه انجام فرآیند برنیشینگ روی نمونه‌ها نشان داده شده است.

به منظور اندازه‌گیری زبری سطح نمونه‌های برنیشینگ شده، از زبری سنج Mahr مدل M300C، با دقت 0/5 میکرومتر و مطابق با استاندارد ISO 4287 استفاده شد. اندازه‌گیری زبری سطح نمونه‌ها، طی حرکت رفت و برگشتی نوک سوزنی شکل دستگاه در مسیری به‌طول 4 mm، شامل 5 قسمت بطول 0/8 mm، انجام شد. اندازه‌گیری زبری سطح برای هر حالت فرآیندی، در راستای عمود بر حرکت ابزار برنیشینگ روی نمونه‌ها انجام گردید و جهت اطمینان از درستی نتایج، هر آزمون 3 بار تکرار شد و باین ترتیب، میانگین مقدار زبری سطح در هر حالت فرآیندی، اندازه‌گیری و گزارش شده است.

اندازه‌گیری میکروسختی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه سختی‌سنج INNOVA TEST و مطابق با استاندارد ASTM E140، انجام شده است. اعمال نیرو در این دستگاه توسط سیستم کنترل دیجیتال بوده که با یک لودسل¹ دقیق اندازه‌گیری و کنترل می‌شود. باین ترتیب آزمون میکروسختی ویکرز با اعمال نیروی یک کیلوگرم روی نمونه‌ها انجام شد و عمق نفوذ فرورونده نیز با دقت 0/1 میکرون اندازه‌گیری گردید. بررسی مورفولوژی سطح نمونه‌ها نیز با استفاده از میکروسکوپ نوری Metallux آلمان بایزرگ‌نمایی 200 برابر در محدوده دامنه استاندارد ISO/IEC17025 انجام شد.

برای بررسی تجربی تأثیر پارامترهای فرآیند برنیشینگ بر زبری سطح و میکروسختی نمونه‌ها، مطابق با جدول 2 به معرفی پارامترها و سطوح آزمایش، پرداخته شد. انتخاب سطوح با استفاده از انجام آزمایش‌های مقدماتی و مراجعه به پیشینه تحقیقات مطالعه شده در این زمینه انجام شده است [13].

¹ Load Cell

همچنین به منظور مقایسه مقادیر زبری سطح بدست آمده، طی مدل طراحی شده به روش سطح پاسخ (RSM) و مقادیر حاصل از آزمایش‌های انجام شده، نمودار زبری سطح بر حسب ترتیب و نظم آزمایش‌ها، در شکل 4 ارائه شده است. برای بررسی درصد خطا و مقایسه مقادیر بدست آمده برای زبری سطح طی دو روش سطح پاسخ و روش تجربی، مقدار خطا برای بیشترین خطای ایجاد شده در اندازه‌گیری زبری سطح طی جدول 4 ارائه شده است.

جدول 3 نتایج آنالیز واریانس برای زبری سطح

Table 3 ANOVA results for surface roughness

Source	Degrees of freedom	Adjusted sum of squares	Adjusted mean of squares	F-value	P-value
model	9	0/0161	0/0179	28/25	0/000
Linear	3	0/0021	0/0373	58/82	0/000
X_1	1	0/0667	0/0667	105/04	0/000
X_2	1	0/0210	0/0210	33/17	0/000
X_3	1	0/0243	0/0243	38/24	0/000
Square	3	0/0372	0/0124	19/52	0/00
X_1^2	1	0/0014	0/0014	2/27	0/163
X_2^2	1	0/0005	0/0005	0/86	0/376
X_3^2	1	0/0173	0/0173	27/36	0/000
Interaction	3	0/0029	0/0009	1/54	0/265
$X_1 * X_2$	1	0/0001	0/0001	1/10	0/754
$X_1 * X_3$	1	0/0016	0/0016	2/59	0/139
$X_2 * X_3$	1	0/0012	0/0012	1/92	0/196

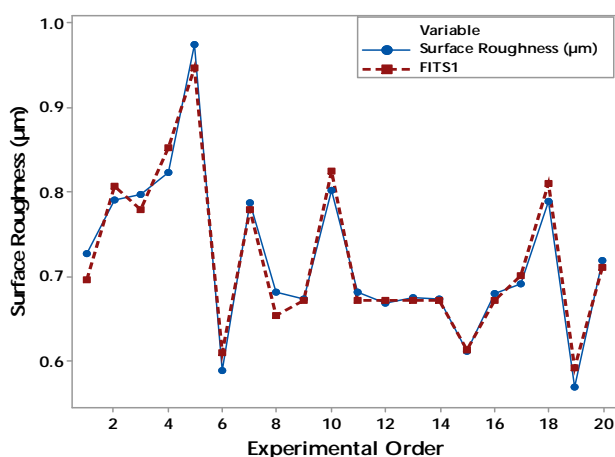


Fig. 4 Comparison of RSM and experimental values of surface roughness

شکل 4 مقایسه مقادیر روش سطح پاسخ و تجربی برای زبری سطح

جدول 4 مقدار خطا میان روش تجربی و سطح پاسخ برای زبری سطح

Table 4 The value of error between experimental and RSM method for surface roughness

NO	X_1 (N)	X_2 (mm/rev)	X_3 (RPM)	SR (μ m)	RSM (μ m)	Error (%)
8	450	0/11	355	0/682	0/649	-4/83

مینی‌تب یک نرم‌افزار کنترل کیفیت آماری و مناسب برای طراحی و تجزیه و تحلیل داده‌ها است. روش سطح پاسخ در برگیرنده دو طرح کلی مرکب مرکزی¹ و باکس بنکن² می‌باشد. در این پژوهش، جهت طراحی آزمایش‌ها از طراحی مرکب مرکزی استفاده شده است.

3- نتایج و بحث

در این قسمت پس از انجام آزمایش‌ها، به تحلیل آماری نتایج حاصل از تأثیر پارامترهای متغیر ورودی بر میزان زبری سطح و میکروسختی نمونه‌ها پرداخته شده است.

3-1- تأثیر پارامترهای فرآیند برنیشینگ بر زبری نمونه‌ها

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند برنیشینگ بر زبری سطح نمونه‌ها، پس از بررسی کفایت مدل طی مواردی نظیر، نرمال بودن مقادیر، فرض ثابت بودن واریانس‌ها، نمودار هیستوگرام و نمودار مستقل از زمان، آنالیز واریانس برای زبری سطح نمونه‌ها، در جدول 3، ارائه شده است.

در این آنالیز، مقایسه انحراف کل نمونه‌ها با استفاده از آزمون F و تعیین سطوح معنادار نیز با استفاده از مقدار P-Value انجام شده است. از آنجایی که پارامترها با سطح اطمینان 95% مدل شده‌اند، بنابراین مقادیر کمتر از 0/05 برای P، به عنوان مقادیر معنادار در نظر گرفته شده است. همچنین، مقدار P-Value برای مدل رگرسیون و برخی از دیگر جملات، کوچکتر از سطح معنادار 0/05 است که نشان می‌دهد که این پیش‌بینی‌کننده‌ها، تأثیر قابل توجهی بر جواب داشته‌اند. ضریب انطباق یا سازگاری مدل R^2_{adj} یا R^2 منطبق شده 93% بدست آمد که به این معنا است که داده‌ها توسط مدل پوشش داده شده است. معادله عمومی رگرسیون برای زبری سطح نمونه‌ها، در قالب رابطه (1)، ارائه شده است.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{21} X_1 * X_2 + \beta_{31} X_1 * X_3 + \beta_{32} X_2 * X_3 \quad (1)$$

در این معادله β_0 ثابت سطح پاسخ، β_1 و β_2 و β_3 ضرایب خطی متغیرها و β_{11} و β_{22} و β_{33} ضرایب جملات مربعی و β_{21} و β_{31} و β_{32} ضرایب تعامل متغیرهای خطی هستند. به این ترتیب، معادله رگرسیون برای زبری سطح نمونه‌ها، با رابطه (2) ارائه گردیده است.

$$\text{Surface Roughness } (\mu\text{m}) = 1.839 - 0.00277 X_1 + 3.14 X_2 -$$

¹ Central Composite Design (CCD)

² Box-Behnken

در شکل 6، روند کاهش زبری سطح، با افزایش نیروی برنیشینگ و کاهش پیشروی، مشهود می‌باشد، به طوری که، کمترین زبری سطح به ازای نیروی برنیشینگ 450 نیوتن و پیشروی 0/05 میلی‌متر بر دور حاصل شده است.

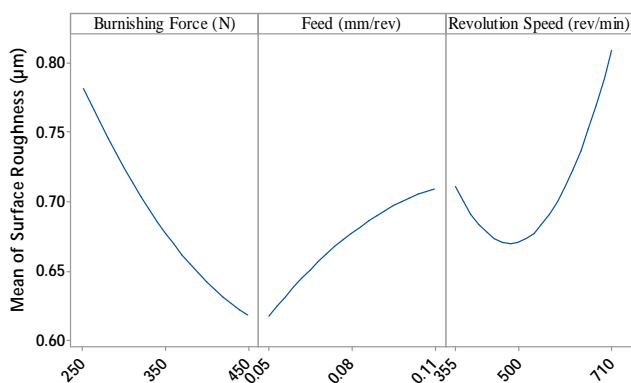


Fig. 5 Main effect of the process parameters on the surface roughness
شکل 5 تأثیر اصلی پارامترهای فرآیند بر زبری سطح

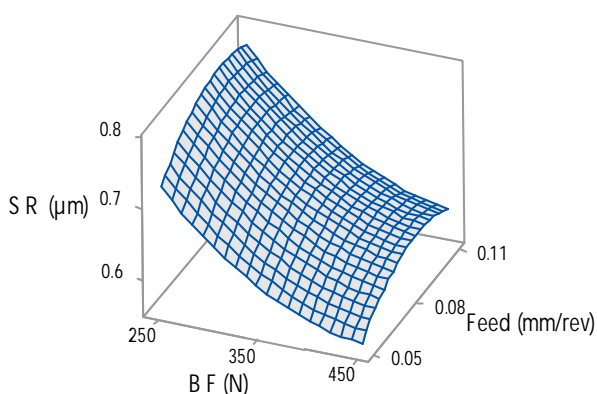


Fig. 6 Interaction effect of burnishing force and feed on the surface roughness (revolution speed 500 rev/min)

شکل 6 تأثیر تعاملی نیروی برنیشینگ و پیشروی بر زبری سطح (سرعت دوران 500 دور بر دقیقه)

با افزایش نیروی برنیشینگ، جریان مواد از قله‌های زبری به سمت دره‌ها افزایش می‌یابد و کاهش پیشروی نیز، با افزایش زمان تماس ابزار با قطعه کار و کاهش فواصل میان مسیر ابزار روی سطح قطعه، کاهش زبری سطح را در پی دارد [8].

همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود، افزایش توأم نیروی برنیشینگ به همراه افزایش سرعت دوران تا مقدار 500 دور بر دقیقه، کاهش زبری سطح را به دنبال داشته است و با ادامه روند افزایش سرعت دوران، زبری سطح افزایش یافته است. زیرا در ابتدا با افزایش سرعت دوران، میزان تماس ابزار با قطعه کار در واحد زمان افزایش یافته و به این ترتیب زبری سطح

مقادیر گزارش شده، نشان دهنده سازگاری و دقت پیش‌بینی مدل می‌باشد. همچنین، جهت تعیین مؤثرترین پارامتر بر فرآیند، نمودار مقادیر میانگین سازگار شده بر حسب زبری سطح نمونه‌ها ترسیم شد.

با توجه به شکل 5، بعد از نیروی برنیشینگ، سرعت دوران بیشترین تأثیر را بر کنترل زبری سطح نمونه‌ها داشته است. افزایش نیروی برنیشینگ، کاهش زبری سطح نمونه‌ها را در پی داشته است و این روند با افزایش نیروی برنیشینگ به مقادیر بالاتر از 450 نیوتن، با شیب کمتری ادامه یافته است. زیرا با افزایش نیروی برنیشینگ، میزان تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده در سطح نمونه‌ها افزایش یافته و به دنبال آن میزان پرشدگی دره‌ها توسط قله‌های زبری افزایش می‌یابد و به این ترتیب از زبری سطح نمونه‌ها کاسته می‌شود. این در حالی است که افزایش بیش از اندازه نیروی برنیشینگ، می‌تواند با ایجاد لرزش در ابزار، سبب پوسته پوسته شدن¹ سطح و کاهش کیفیت سطح برنیشینگ شده گردد [10، 15].

همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش پیشروی، زبری سطح افزایش یافته است. با افزایش پیشروی، تماس ابزار با قطعه کار در واحد زمان، کاهش یافته و زمان کافی برای مسطح نمودن لبه‌های برآمده² فراهم نشده و به این ترتیب زبری سطح افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش پیشروی، فاصله میان مسیر ابزار روی قطعه کار افزایش یافته و کیفیت سطح کاهش می‌یابد [15، 16].

شکل 5 نشان می‌دهد که افزایش سرعت تا 500 دور بر دقیقه، کاهش زبری سطح را به دنبال داشته و با ادامه روند افزایش سرعت دوران به 710 دور بر دقیقه، مقدار زبری سطح نمونه‌ها افزایش یافته است. زیرا، با افزایش سرعت دوران تا 500 دور بر دقیقه، به سبب کفایت زمان لازم جهت جریان قله‌های زبری به سمت دره‌ها، ابتدا زبری سطح کاهش یافته و با ادامه روند افزایش سرعت برنیشینگ به 710 دور بر دقیقه، به سبب افزایش حرارت و ایجاد ارتعاش³ در موضع برنیشینگ شده زبری سطح افزایش می‌یابد [15].

تأثیر تعاملی پارامترهای فرآیند بر زبری سطوح برنیشینگ شده نیز در شکل‌های 6 تا 8، مورد بررسی قرار گرفته است. تعیین نوع پارامترهای تعاملی و تعیین سطح مقدار پارامتر ثابت برای آن، بر پایه مقالات مطالعه شده در این زمینه انجام گرفته است [13].

¹ Flaking

² Bulged Edges

³ Chatter

3-2- تأثیر پارامترهای فرآیند برنیشینگ بر میکروسختی

نمونه‌ها

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند برنیشینگ بر میکروسختی نمونه‌ها، پس از اندازه‌گیری مقدار میکروسختی در هر حالت فرآیندی و بررسی کفایت مدل ریاضی، به منظور بررسی اهمیت نسبی پارامترها، از آنالیز واریانس (ANOVA) استفاده شد. به این ترتیب، آنالیز واریانس برای میکروسختی نمونه‌ها، در جدول 5 ارائه شده است.

جدول 5 نتایج آنالیز واریانس برای میکروسختی

Table 5 ANOVA results for microhardness

Source	Degrees of freedom	Adjusted sum of squares	Adjusted mean of squares	F-value	P-value
model	9	385/651	42/850	129/89	0/000
Linear	3	337/864	112/621	365/87	0/000
X ₁	1	326/339	326/339	989/25	0/000
X ₂	1	3/268	3/268	9/91	0/079
X ₃	1	8/257	8/257	25/03	0/000
Square	3	10/423	3/474	10/53	0/002
X ₁ ²	1	0/142	0/142	0/43	0/527
X ₂ ²	1	4/455	4/455	13/50	0/004
X ₃ ²	1	0/566	0/566	1/72	0/219
Interaction	3	17/247	5/749	17/43	0/000
X ₁ *X ₂	1	0/500	0/500	1/52	0/246
X ₁ *X ₃	1	4/691	4/491	14/22	0/004
X ₂ *X ₃	1	12/056	12/056	36/54	0/000

از آنجایی که در این آنالیز پارامترها با سطح اطمینان 95% مدل شده‌اند، بنابراین مقادیر کمتر از 0/05 برای P، به عنوان مقادیر معنادار در نظر گرفته شده است.

همچنین مقدار P-Value برای برخی از جملات، کوچک‌تر از سطح معنادار 0/05 است که نشان می‌دهد که این پیش‌بینی کننده‌ها، تأثیر قابل توجهی بر جواب داشته‌اند. همچنین ضریب انطباق یا سازگاری مدل R² یا R² adj منطبق شده نیز، حدود 98% بدست آمد که به این معنا است که داده‌ها توسط مدل پوشش داده شده است. به این ترتیب، معادله رگرسیون برای میکروسختی نمونه‌ها، با معادله (3)، ارائه شد.

$$\text{Hardness (HV)} = 185.13 + 0.0138 X_1 + 62.9 X_2 - 0.0119 X_3 + 0.000023 X_1^2 - 1414 X_2^2 - 0.000015 X_3^2 + 0.0833 X_1 * X_2 + 0.000043 X_1 * X_3 + 0.2298 X_2 * X_3 \quad (3)$$

در ادامه، به منظور مقایسه خطای میکروسختی بدست

کاهش می‌یابد. در صورتی که با افزایش سرعت دوران به مقادیر بالاتر، به دلیل ایجاد لرزش و افزایش حرارت در موضع ماشین‌کاری، زبری سطح افزایش یافته است [13].

در شکل 8 مشاهده می‌شود، کاهش توأم پیشروی همراه با افزایش سرعت دوران تا مقدار 500 دور بر دقیقه، کاهش زبری سطح را به دنبال داشته است و کمترین مقدار برای زبری سطح، به ازای سرعت دوران 500 دور بر دقیقه و پیشروی 0/05 میلی‌متر بر دور حاصل شده است. بنابراین می‌توان بیان نمود که بهترین کیفیت سطح مربوط به حالتی است که پیشروی کمترین مقدار را دارد، در پیشروی بالا حرکت ابزار بر روی سطح کار بسیار سریع است و به عبارتی تماس بین ابزار و قطعه‌کار در واحد زمان کاهش یافته و جریان مواد به داخل دره‌ها کمتر می‌گردد. این در حالی است که، کاهش پیشروی سبب منظم شدن این جریان شده و سطح صیقلی‌تری را سبب می‌شود [17].

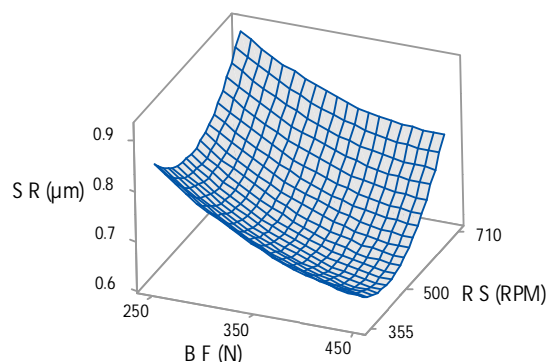


Fig. 7 Interaction effect of burnishing force and revolution speed on the surface roughness (feed 0.08 mm/rev)

شکل 7 تأثیر تعاملی نیروی برنیشینگ و سرعت دوران بر زبری سطح (پیشروی 0/08 میلی‌متر بر دور)

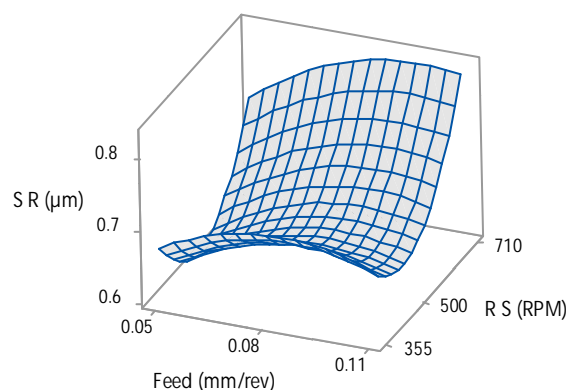


Fig. 8 Interaction effect of feed and revolution speed on the surface roughness (burnishing force 350 N)

شکل 8 تأثیر تعاملی پیشروی و سرعت دوران بر زبری سطح (نیروی برنیشینگ 350 نیوتن)

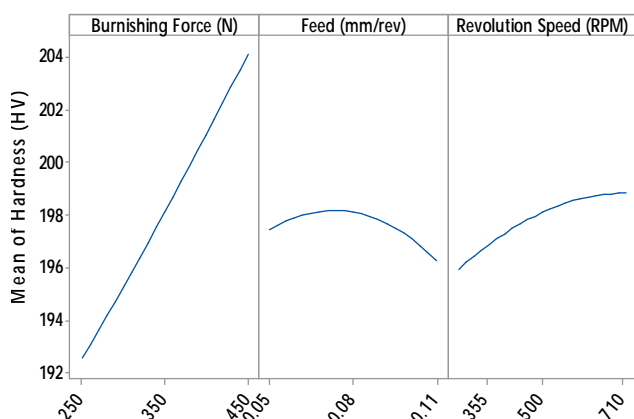


Fig. 10 Main effect of the process parameters on the microhardness

شکل 10 تأثیر اصلی پارامترهای فرآیند بر میکروسختی

با افزایش پیشروی تا 0/08 میلی‌متر بر دور، ابتدا سختی نمونه‌ها به مقدار جزئی افزایش یافته و با ادامه روند افزایش پیشروی، از سختی نمونه‌ها کاسته شده است. زیرا اعمال پیشروی‌های پایین روی قطعه‌کار، اثری مشابه با تکرار فرآیند برنیشینگ دارد که افزایش سختی قطعه را سبب می‌شود. یا به عبارتی، با اعمال مقادیر کوچک پیشروی، فاصله بین آثار ابزار روی قطعه‌کار کم شده و عملکردی مشابه با تعداد عبور بیشتر ابزار از روی قطعه‌کار را نشان می‌دهد که افزایش سختی سطح نمونه‌ها را به دنبال دارد. درحالی‌که، با افزایش پیشروی، زمان تماس ابزار با قطعه‌کار در واحد زمان کاهش یافته و مقدار سطحی از قطعه‌کار که در واحد زمان تحت تغییر شکل پلاستیک قرار می‌گیرد، کاهش می‌یابد که کاهش سختی نمونه‌ها را به دنبال دارد. همچنین، بی‌نظمی ایجاد شده در ایجاد تغییر شکل پلاستیک روی نمونه به ازای پیشروی بالا نیز، از دیگر عوامل کاهش سختی نمونه‌ها در این حالت می‌باشد [8، 16، 17].

همچنین در شکل 10 مشاهده می‌شود که افزایش سرعت دوران، افزایش سختی نمونه‌ها را به دنبال داشته و این روند با افزایش سرعت دوران به مقادیری بالاتر از 710 دور بر دقیقه با شیب کمتری ادامه یافته است. زیرا با افزایش سرعت دوران، تماس ابزار با قطعه‌کار در واحد زمان افزایش یافته و به این ترتیب رفتاری مشابه با افزایش تعداد عبور ابزار رخ می‌دهد که افزایش سختی نمونه‌ها را به دنبال دارد این در حالی است که افزایش بیش از حد سرعت دوران، سبب افزایش حرارت در موضع و ایجاد لرزش و ارتعاش شده که کاهش سختی نمونه‌ها را در پی دارد [10، 16، 19].

در ادامه، تأثیر تعاملی پارامترهای فرآیند بر میکروسختی

آمده، طی مدل طراحی شده به روش سطح پاسخ و مقادیر حاصل از آزمایش‌های انجام شده، نمودار میکروسختی بر حسب ترتیب و نظم آزمایش‌ها، مطابق شکل 9 ارائه شده است. برای بررسی درصد خطا و مقایسه مقادیر بدست آمده برای میکروسختی نمونه‌ها، طی دو روش سطح پاسخ و روش تجربی، بیشترین مقدار خطای اندازه‌گیری شده، در جدول 6 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار خطا 0/38- است، که نشان دهنده سازگاری مطلوب و دقت پیش بینی مدل می‌باشد. همچنین، جهت تعیین مؤثرترین پارامترها بر فرآیند، نمودار مقادیر میانگین سازگار شده بر حسب میکروسختی نمونه‌ها ترسیم شد.

همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌شود، بعد از نیروی برنیشینگ، سرعت دوران بیشترین تأثیر را بر میکروسختی نمونه‌ها داشته است. مطابق شکل 10، افزایش نیروی برنیشینگ، افزایش سختی نمونه‌ها را در پی داشته است. زیرا، با اعمال نیروی برنیشینگ به مقداری فراتر از استحکام تسلیم قطعه‌کار، میزان تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده در سطح نمونه‌ها افزایش یافته که سبب افزایش کارسختی قطعه‌کار می‌شود. این در حالی است که افزایش بیش از اندازه نیروی برنیشینگ می‌تواند موجب پوسته پوسته شدن سطح و ایجاد ترک در لایه زیر سطحی شده و کاهش را سختی قطعه‌کار را سبب شود [17، 18].

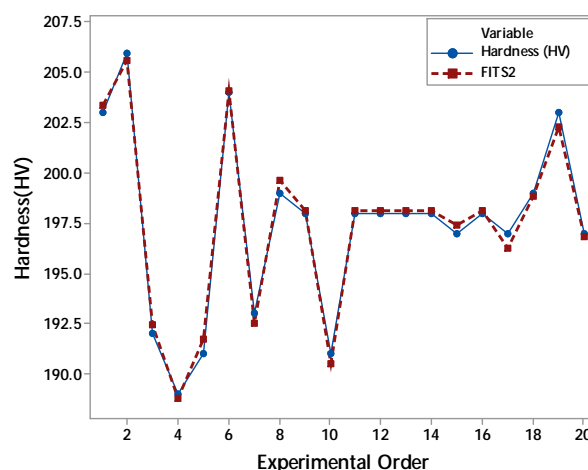


Fig. 9 Comparison of RSM and experimental values of microhardness

شکل 9 مقایسه مقادیر روش سطح پاسخ و تجربی برای میکروسختی

جدول 6 مقدار خطا میان روش تجربی و سطح پاسخ برای میکروسختی

Table 6 The value of error between experimental and RSM method for microhardness

NO	X ₁ (N)	X ₂ (mm/rev)	X ₃ (RPM)	HV	RSM (HV)	Error (%)
17	350	0/11	500	197	196/25	-0/38

نرم‌افزار برای توابع هدف، به ازای کمترین مقدار برای زبری سطح و بیشترین مقدار برای میکروسختی تنظیم شده است.

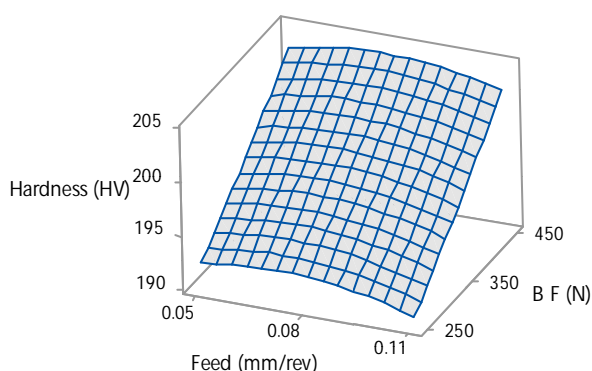


Fig. 11 Interaction effect of feed and burnishing force on the microhardness (revolution speed 500 rev/min)

شکل 11 تأثیر تعاملی پیشروی و نیروی برنیشینگ بر میکروسختی (سرعت دوران 500 دور بر دقیقه)

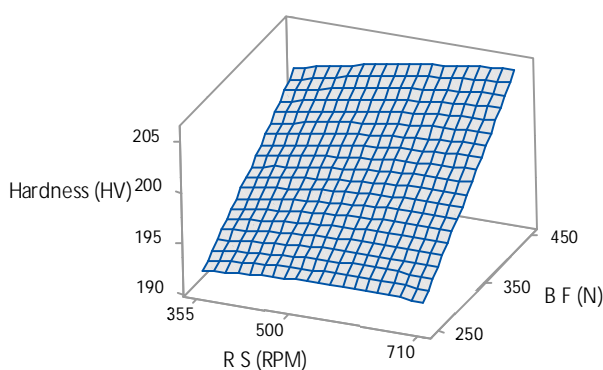


Fig. 12 Interaction effect of revolution speed and burnishing force on the microhardness (feed 0.08 mm/rev)

شکل 12 تأثیر تعاملی سرعت دوران و نیروی برنیشینگ بر میکروسختی (پیشروی 0/08 میلی‌متر بر دور)

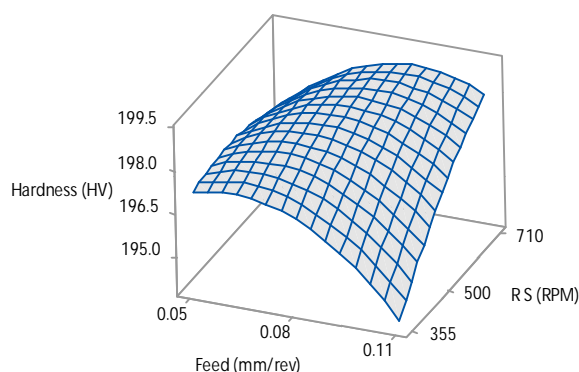


Fig. 13 Interaction effect of feed and revolution speed on the microhardness (burnishing force 350 N)

شکل 13 تأثیر تعاملی پیشروی و سرعت دوران بر میکروسختی (نیروی برنیشینگ 350 نیوتن)

سطوح برنیشینگ شده نیز در شکل‌های 11 تا 13، مورد بررسی قرار گرفته است. تعیین نوع پارامترهای تعاملی و تعیین سطح مقدار پارامتر ثابت برای آن، بر پایه مقالات مطالعه شده در این زمینه انجام گرفته است [13].

همان‌طور که در شکل 11 مشاهده می‌شود، مقدار میکروسختی، با افزایش نیروی برنیشینگ افزایش یافته است و بیشترین سختی به ازای نیروی برنیشینگ 450 نیوتن و پیشروی 0/08 میلی‌متر بر دقیقه حاصل شده است. با افزایش نیروی برنیشینگ، میزان تغییر شکل پلاستیک و جریان مواد از قله‌های زبری به سمت دره‌ها، افزایش یافته و به این ترتیب، سختی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در صورتی که، افزایش بیش از حد پیشروی، سبب افزایش بی‌نظمی در ایجاد تغییر شکل پلاستیک در سطح نمونه‌ها شده و کاهش سختی نمونه‌ها را در پی دارد [17].

همان‌طور که در شکل 12 مشاهده می‌شود، افزایش توأم نیروی برنیشینگ و سرعت دوران، افزایش سختی نمونه‌ها را به دنبال داشته است. به‌طوری‌که، بیشترین سختی به ازای سرعت دوران 710 دور بر دقیقه و نیروی برنیشینگ 450 نیوتن حاصل شده است. زیرا با افزایش نیروی برنیشینگ جریان مواد از قله‌های زبری به سمت دره‌ها افزایش یافته و با افزایش توأم سرعت دوران نیز، تماس ابزار با قطعه‌کار در واحد زمان افزایش می‌یابد و به این ترتیب سختی سطح نمونه افزایش می‌یابد. این در حالی است که افزایش بیش از حد سرعت دوران، سبب افزایش حرارت در موضع و ایجاد لرزش و ارتعاش شده که کاهش سختی نمونه‌ها را در پی دارد [10، 19].

در شکل 13 مشاهده می‌شود، که بیشترین مقدار برای سختی نمونه‌ها، به ازای سرعت دوران 710 دور بر دقیقه و پیشروی 0/08 میلی‌متر بر دور حاصل شده و ادامه روند افزایش پیشروی، کاهش سختی نمونه‌ها را به دنبال داشته است. زیرا، با افزایش پیشروی، ایجاد تغییر شکل پلاستیک بر سطح نمونه‌ها، دچار بی‌نظمی می‌شود که کاهش سختی نمونه را به همراه دارد. علاوه بر آن با افزایش پیشروی، مقدار مساحتی از قطعه‌کار که در واحد زمان تحت تغییر شکل پلاستیک قرار می‌گیرد نیز کاهش می‌یابد که کاهش سختی نمونه‌ها را سبب می‌شود [17].

روش سطح پاسخ، مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که جهت مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل مسائلی که پاسخ آنها تحت تأثیر چندین متغیر قرار دارد استفاده می‌شود و هدف آن، بهینه‌سازی پاسخ بوده و قادر است چندین متغیر پاسخ را به ازای قیود داده شده بهینه‌سازی نماید. پارامترهای وارد شده به

فشرده‌گی به عمق میانگین 117/3 میکرومتر در نمونه‌ها شده و مطابق شکل 17 با ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها، افزایش نیروی برنیشینگ از 250 به 450 نیوتن، افزایش عمق فشرده‌گی در حدود 69% را در پی داشته است. دلیل افزایش عمق فشرده‌گی با افزایش نیروی برنیشینگ را می‌توان به افزایش تراکم و کشیدگی دانه‌ها با افزایش نیروی برنیشینگ نسبت داد [18، 20]. به همین ترتیب، افزایش میکروسختی در نمونه‌ها را نیز می‌توان با افزایش تنش فشاری و فشرده‌گی دانه‌ها، طی افزایش نیروی برنیشینگ از 250 نیوتن به 450 نیوتن توجیه نمود.

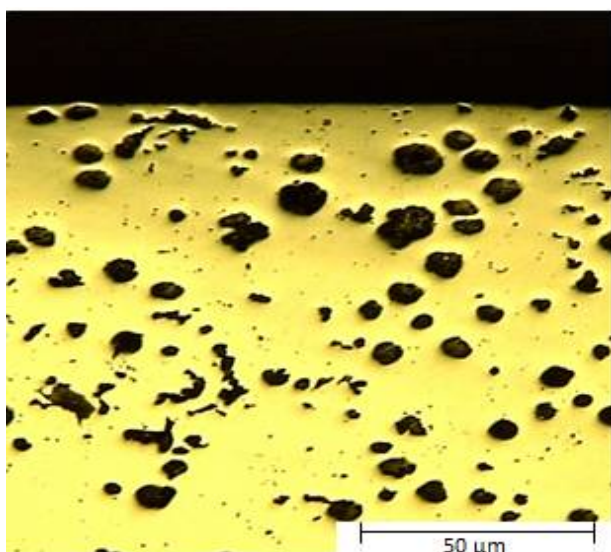


Fig. 15 Optical microscopic image of the initial surface

شکل 15 تصویر میکروسکوپ نوری از سطح نمونه اولیه

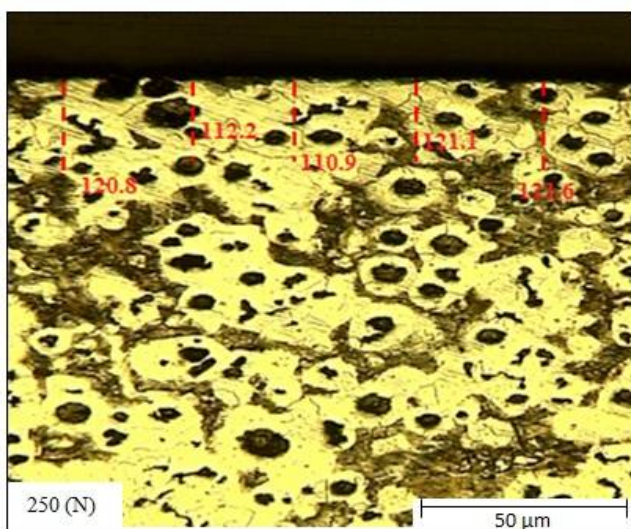


Fig. 16 Optical microscopic image of the Burnished surface, burnishing force 250 (N)

شکل 16 تصویر میکروسکوپ نوری از سطح برنیشینگ شده (نیروی برنیشینگ 250 نیوتن)

مطابق شکل 14، مقدار بهینه شده توسط مدل، برای زبری سطح، 0/562 میکرومتر و برای سختی 203/20 ویکرز به‌دست آمده است.

با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده برای زبری و سختی نمونه شاهد که به ترتیب 1/34 میکرومتر و 181 ویکرز به‌دست آمده با مقادیر حاصل از بهینه‌سازی انجام شده، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با انجام عملیات برنیشینگ روی نمونه‌ها زبری نمونه‌ها در حدود 58% و سختی نمونه‌ها در حدود 12% نسبت به نمونه شاهد بهبود یافته است.

در ادامه به منظور بررسی تأثیر عملیات برنیشینگ بر روی نمونه‌ها، در شکل‌های 15 تا 17 تصاویر مربوط به مورفولوژی سطح نمونه‌ها ارائه شده است. در این تصاویر با توجه به اینکه نیرو بیشترین تأثیر را بر کنترل زبری سطح و سختی نمونه‌ها داشته است، به مقایسه مورفولوژی سطح اولیه و تغییرات ناشی از افزایش نیروی برنیشینگ بر آن پرداخته شده است. در شکل 15، نمایی از مورفولوژی سطح اولیه با نمای گرافیت‌های کروی و کرمی شکل ارائه شده که ناهمواری‌های سطح نمونه در آن قابل رؤیت است.

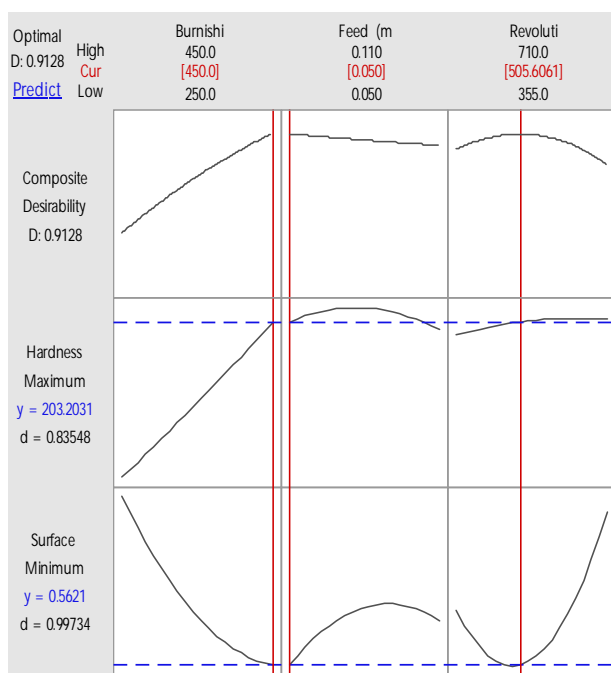


Fig. 14 Optimized plots of the burnishing parameters

شکل 14 نمودار منحنی‌های بهینه‌سازی شده برای پارامترهای برنیشینگ

همان‌طور که در شکل 16 مشاهده می‌شود که به ازای سرعت دوران 500 دور بر دقیقه و پیشروی 0/08 میلی‌متر بر دور، اعمال نیروی برنیشینگ به مقدار 250 نیوتن، سبب ایجاد

- طی بهینه‌سازی انجام شده به روش سطح پاسخ، مقدار بهینه برای زبری و سختی سطح نمونه‌ها، به ترتیب، 0/562 میکرومتر و 203/20 ویکرز بدست آمد که در مقایسه با نمونه شاهد، زبری سطح نمونه‌ها در حدود 58% کاهش یافته و سختی نمونه‌ها در حدود 12% افزایش یافته است.

- مقایسه تصاویر میکروسکوپی نشان دهنده بهبود کیفیت سطح نمونه‌ها طی فرآیند برنیشینگ و افزایش عمق فشردگی با افزایش نیروی برنیشینگ می‌باشد.

5- مراجع

- [1] N. El-Tayeb, K. Low, P. Brevern, Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium 6061, *Journal of materials processing technology*, 186(1-3) (2007) 272-278.
- [2] N. El-Tayeb, K. Low, P. Brevern, Enhancement of surface quality and tribological properties using ball burnishing process, *Machining Science and Technology*, 12(2) (2008) 234-248.
- [3] J.M. Rao, A.C.K. Reddy, P.R. Rao, Experimental investigation of the influence of burnishing tool passes on surface roughness and hardness of brass specimens, *Indian Journal of Science and Technology*, 4(9) (2011) 1113-1118.
- [4] B.C. Yeldose, B. Ramamoorthy, An investigation into the high performance of TiN-coated rollers in burnishing process, *Journal of materials processing technology*, 207(1-3) (2008) 350-355.
- [5] N. k Patela, M.K.A. Patel, Parametric optimization of process parameter for roller burnishing process: a review, *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, 2(2) (2013) 53-56.
- [6] X. Yuan, Y. Sun, L. Gao, S. Jiang, Effect of roller burnishing process parameters on the surface roughness and microhardness for TA2 alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(5-8) (2016) 1373-1383.
- [7] A. Nestler, A. Schubert, Roller Burnishing of Particle Reinforced Aluminium Matrix Composites, *Metals*, 8(2) (2018) 95.
- [8] T.-T. Nguyen, X.-B. Le, Optimization of interior roller burnishing process for improving surface quality, *Materials and Manufacturing Processes*, 33(11) (2018) 1233-1241.
- [9] S. Ramesh, S.A. Kudva, G. Anne, B. Manne, S. Arya, Optimization of ball-burnishing process parameters on surface roughness, micro hardness of Mg-Zn-Ca alloy and investigation of corrosion behavior, *Materials Research Express*, 6(10) (2019) 1065-1068.
- [10] T.-T. Nguyen, X.-B. Le, Optimization of roller burnishing process using Kriging model to improve surface properties, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of*

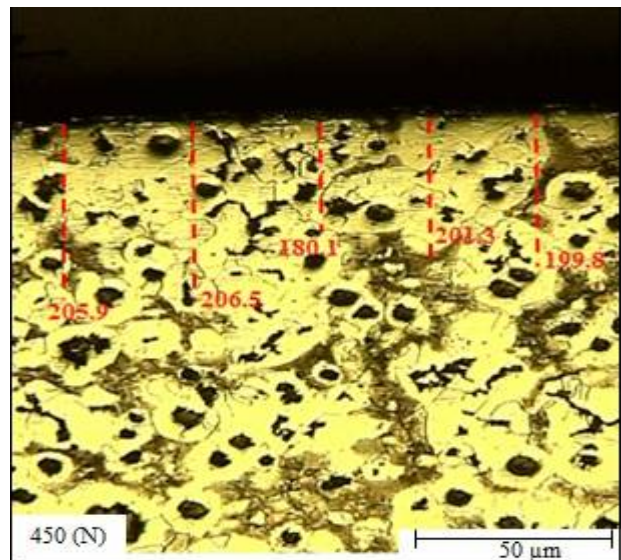


Fig. 17 Optical microscopic image of the Burnished surface, burnishing force 450 (N)

شکل 17 تصویر میکروسکوپ نوری از سطح برنیشینگ شده (نیروی برنیشینگ 450 نیوتن)

4- نتیجه‌گیری

این تحقیق، به منظور بررسی تأثیر پارامترهای نیروی برنیشینگ، پیشروی و سرعت دوران بر زبری سطح و میکروسختی نمونه‌ها طی فرآیند برنیشینگ انجام شده است که اهم نتایج بدست آمده به شرح ذیل می‌باشد:

- تحلیل آماری با سطح اطمینان 95%، برای بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند برنیشینگ بر زبری سطح و میکروسختی نمونه‌ها انجام شد و طی تحلیل آماری انجام شده، مشخص شد که نیروی برنیشینگ بیشترین تأثیر را بر زبری سطح و میکروسختی نمونه‌ها داشته است و پس از نیروی برنیشینگ، سرعت دوران و پیشروی، به ترتیب بیشترین تأثیر را بر خروجی‌ها داشته‌اند.

- نتایج نشان داد که زبری سطح نمونه‌ها با افزایش نیروی برنیشینگ کاهش یافته است. درحالی‌که، افزایش پیشروی، افزایش زبری سطح نمونه‌ها را در پی داشته است. علاوه بر آن، افزایش سرعت دوران تا 500 دور بر دقیقه، کاهش زبری سطح نمونه‌ها و ادامه روند افزایش سرعت دوران، افزایش زبری سطح نمونه‌ها را به دنبال داشته است.

- نتایج حاصل از آزمون میکروسختی نشان داد، افزایش نیروی برنیشینگ و سرعت دوران، افزایش سختی نمونه‌ها را به دنبال داشته است. این درحالی است که افزایش پیشروی تا 0/08 میلی‌متر بر دور، افزایش سختی نمونه‌ها را سبب شده و ادامه روند افزایش پیشروی، کاهش سختی نمونه‌ها را در پی داشته است.

- cryogenic diamond burnishing of 17-4 PH stainless steel with a novel diamond burnishing tool, *Journal of Manufacturing Processes*, 38 (2019) 564-571.
- [17] M.S. John, N. Banerjee, K. Shrivastava, B. Vinayagam, Optimization of roller burnishing process on EN-9 grade alloy steel using response surface methodology, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39(8) (2017) 3089-3101.
- [18] Q.-N. Banh, F.-J. Shiou, Determination of optimal small ball-burnishing parameters for both surface roughness and superficial hardness improvement of STAVAX, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(2) (2016) 639-652.
- [19] T. El-Taweel, M. El-Axir, Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(3-4) (2009) 301-310.
- [20] M. Kowalik, T. Trzepieciniski, Experimental Assessment of the Depth of the Deformed Layer in the Roller Burnishing Process, *matec Web of Conferences*, 6(290) (2019) 1-7.
- Engineering Manufacture, (2019) 1-11.
- [11] T.-T. Nguyen, L.-H. Cao, T.-A. Nguyen, X.-P. Dang, Multi-response optimization of the roller burnishing process in terms of energy consumption and product quality, *Journal of Cleaner Production*, 245 (2020) 1-10.
- [12] T.-T. Nguyen, L.-H. Cao, Optimization of the Burnishing Process for Energy Responses and Surface Properties, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, (2020) 1-10.
- [13] M.S. John, B. Balaji, B. Vinayagam, Optimisation of internal roller burnishing process in CNC machining center using response surface methodology, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39(10) (2017) 4045-4057.
- [14] G. Boothroyd, *Fundamentals of metal machining and machine tools*, Crc Press, 1988.
- [15] P. Kumara, G. Purohit, Investigations on Effect of Different Ball Burnishing Conditions on Surface Roughness Using Response Surface Methodology, *Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology*, 2(1) (2019) 51-60.
- [16] B. Sachin, S. Narendranath, D. Chakradhar, Effect of working parameters on the surface integrity in