مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹٤، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص ۲۶۵-۲۶۹

مجموعه مقالات کنفرانس ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳ و ۱٤ آبان ۱۳۹٤

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی مکانیزم مؤثر بر روی کیفیت سطح دیواره شیار در فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی

آرمان ابطحی[۱]، پیام سرائیان[۲*]، مسعود فرحناکیان[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

* نجف آباد، صندوق پستی ۸۵۱۴۱۴۳۱۳۱، p_saraeian@iaun.ac.ir

چکیده

امروزه، برخی از قطعات به یک سطح پرداخت شده بسیار دقیق نیاز دارند. که در میان آن‌ها، شیارها به دلیل محدودیت شکل و جریان نداشتن براده‌ها، پرداخت‌کاری آن‌ها با روش‌های پرداخت‌کاری سنتی‌کاری دشوار و هزینه بر است. جهت پاسخ‌گویی به این نیازها پرداخت‌کاری ساینده مغناطیس که یکی از فرآیندهای پیشرفته ماشین‌کاری است، رشد و توسعه یافته است. در این مقاله یک روش مؤثر به روی خروجی درمورد زبری سطح شیار با در نظر گرفتن گپ کاری، سرعت دورانی، اندازه ذرات ساینده و زمان انجام فرآیند مورد بررسی قرار گرفته شده است. برای انجام آزمایش‌ها مکانیزمی تعبیه شد که یک آهن‌ربای دائمی نئودیوم دیسکی به صورت افقی و دیگری در آنطرف قطعه‌کار قرار گرفته شد. بعد از انجام آزمایش‌ها و تحلیل نتایج به دست آمده با توجه به اهمیت ویژه اندازه ذرات ساینده و نیز نتایج زبری‌سنج و تحلیل نرم‌افزار Design Expert، نشان داده شد که در این مکانیزم بر خلاف روش‌های قبلی اندازه گپ بیشتر باعث بهبود کیفیت سطح می‌شود و همچنین با کاهش اندازه ذرات ساینده و افزایش سرعت، نتایج مطلوبی گرفته شد.

کلید واژگان: پرداخت‌کاری ساینده مغناطیسی، صافی سطح، شیار، دیواره شیار

Analyzing the effective mechanism on quality of the groove wall in magnetic abrasive finishing

Arman Abtahi, Payam Saraean*, Masoud Frahnakian

Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Esfahan, Iran
* P.O.B. 8175858661 Esfahan, Iran, saraean@smc.iaun.ac.ir

ABSTRACT

Today, some parts require accurate finished surfaces. Among them, the finishing process of grooves is difficult and costly with traditional finishing methods due to their geometrical limitations and lack of chip flow. Magnetic abrasive finishing has been developed as one of the advanced machining processes to meet these requirements. In this paper, an effective method on output has been developed for investigating the workpiece surface roughness by considering the gap size, rotational speed, the size of abrasive particles and process time as the main parameters. Tests were performed using disc shaped Neodymium permanent magnet that was mounted horizontally at both sides of the workpiece. The results showed that in this mechanism, unlike the previous methods, the large gap sizes improves the surface quality considering the high importance of abrasive material size and the analysis of Design Expert software. Also, desired results were achieved with decreased abrasive particles size and increased speed.

Keywords: Groove, Magnetic Abrasive Finishing, Surface Smoothness, Wall Groove.

۱- مقدمه

امروزه در سرتاسر دنیا، صنایع به‌دنبال روش‌هایی برای کاهش قیمت محصولات و افزایش کیفیت آن‌ها هستند. از این رو روش‌هایی که بتواند با کاهش نیرو و توان مصرفی هزینه را کاهش دهد یا با کاهش زبری سطح کیفیت قطعات را بالا ببرد حائز اهمیت خواهد بود. بررسی کارایی این روش‌ها برای شرایط ویژه که گاهی اوقات با به‌کارگیری شیارها می‌باشد از نکات مهمی است که باید به آن توجه شود. با توجه به این مطالب، نیاز به جایگزین نمودن فرآیند پرداخت‌کاری سنتی با فرآیند پرداخت‌کاری پیشرفته احساس می‌شود. هدف اساسی فرآیندهای پرداخت‌کاری سایشی، استفاده از تعداد زیادی لبه‌های برنده نامنظم برای برداشت مؤثر ماده به صورت براده می‌باشد. این براده‌ها کوچکتر از براده‌هایی می‌باشند که در فرآیندهای ماشین‌کاری با استفاده از ابزار برشی با لبه‌های منظم و مشخص تولید می‌شوند. روش ماشین‌کاری بوسیله ذرات ساینده مغناطیسی که یکی از روش‌های نوین و غیر سنتی ماشین‌کاری سایشی می‌باشد، این روش از توانایی مناسب برای عملیات پرداخت نهایی قطعات پیچیده، قالب‌های بسته، سطوح غیر قابل دسترس در قطعات ترکیبی، شیارها و حفره‌ها که تقریباً با دیگر روش‌های ماشین‌کاری غیر ممکن، و یا با محدودیت‌هایی رو به رو است برخوردار می‌باشد. این فرآیند یکی از روش‌های مؤثر و کارآمد برای پرداخت سطوح می‌باشد به گونه‌ای که در مسائل کاربردی این فرآیند کارایی بالای خود را در پرداخت سطوح قطعات صنعتی پیچیده به اثبات رسانده است.

استفاده از فرآیند پرداخت ساینده مغناطیسی به عنوان یکی از روش‌های ماشین‌کاری سایشی، بسیار مناسب و موفقیت آمیز بوده زیرا این روش موجب

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Abtahi, P. Saraean, M. Frahnakian, Analyzing the effective mechanism on quality of the groove wall in magnetic abrasive finishing, *Modares Mechanical Engineering*, *Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 265-269, 2015 (in Persian فارسی)

بهبود صافی سطح، همراه با بالا رفتن نرخ براده برداری در پولیش قطعات می‌شود و با توجه به قابلیت‌های ویژه‌اش برای پرداخت سطوحی که شکل منظمی ندارند گردکردن لبه‌ها و صافی سطح، یک جایگاه خاص را به عنوان یک فرآیند پرداخت سطوح به خود اختصاص داده و مورد توجه روزافزون در صنایع مختلف قرار گرفته است.

ای سی وانگ[1] و همکارانش در سال ۲۰۰۹ میلادی تحقیقاتی در زمینه امکان بازیابی پودرهای ساینده حین فرآیند پرداخت‌کاری ساینده مغناطیسی[2] در داخل لوله‌ها انجام داده و یک نوع ژل پلیمری را به عنوان ماده چسبان به ترکیب شناخته شده قبلی اضافه نمودند. با توجه به مشکل پخش شدن پودرهای ساینده از ناحیه پرداخت‌کاری که اغلب موجب کاهش بازدهی فرآیند پرداخت‌کاری ساینده مغناطیسی می‌شود، استفاده از این ژل باعث می‌شود برس ساینده به راحتی فرو نپاشد و پیوستگی خود را در اثر نیروی میدان مغناطیسی حفظ نماید. نتایج آزمایش این دانشمندان همچنین نشان داده است در صورت استفاده از ژل مذکور در فرآیند پرداخت‌کاری ساینده مغناطیسی می‌توان ۱۵ قطعه را بدون این‌که از درصد بهبود کیفیت سطح کاسته شود با همان پرداخت قبلی پرداخت نمود و نیازی به تعویض دوباره ترکیب ساینده نیست. پس می‌توان نتیجه گرفت استفاده چندباره از مواد ساینده از بازدهی فرآیند نمی‌کاهد و برس ساینده قدرت بازیابی مناسبی داراست [۱]. در سال ۲۰۱۱ سانگ[3] و همکارانش به ارزیابی چگالی شار مغناطیسی در فرآیند پرداخت به وسیله ذرات مغناطیسی پرداختند که در این آزمایش با طراحی ۳۲ حالت الکترومغناطیس با جابجایی قطبیت با هدف بهبود نیروی مغناطیسی در روش پرداخت کاری ساینده مغناطیسی از مواد غیرآهنی با شبیه‌سازی به این نتیجه رسیدند که قطبیت S به طور مؤثر بیشترین کارایی را دارا می‌باشد [۲]. راهول[4] و همکارانش در سال ۲۰۱۰ در قالب یک پژوهش آزمایشگاهی ایده استفاده از ارتعاشات آلتراسونیک در پرداخت‌کاری سایشی به کمک میدان مغناطیسی را مطرح کرد. در این پژوهش ارتعاش به قطعات مورد آزمایش اعمال شده است. لذا وی با محدود کردن قطعات کار به ابعاد هندسی خاصی به مطالعه تأثیر ارتعاشات در پرداخت سطوح پرداخته است. با توجه به شرایط خاص آزمایش‌های صورت گرفته در ابن پژوهش از مکانیزم های مربوط به باربرداری امواج آلتراسونیک نظیر پدیده کاویتاسیون و یا کوبش پودرهای ساینده بر روی سطح استفاده نشده می‌باشد. در مقابل پدیده نانو سایش به دلیل ارتعاشات اعمالی، مکانیزم پرداخت کارایی این دستگاه نمی‌باشد. این مطالعه کاهش نیروهای اعمالی به سطح از جمله اثرات، ارتعاشات وارده به قطعه کار گزارش شده است [۳]. راهول و همکارانش در سال ۲۰۱۱ با ادغام سایش مغناطیسی و ارتعاشات آلتروسونیک برای رسیدن به دقت سطح نانومتر در یک زمان کوتاه به مطالعه و ساخت و راه اندازی UAMAF با توجه به جنس قطعه‌کار که AISI52100 و مواد ساینده کاربید سیلیسیم غیر متصل پرداختند، نتایج به دست آمده حاکی از آن است که زبری سطح به ۲۲ نانومتر در ۸۰ ثانیه رسیده است [۴]. در سال ۲۰۱۲ طی مقاله‌ای کلا[5] و همکارانش در طی یک کار تجربی برای پرداخت مواد غیرآهنی با تغییراتی که براساس روش تاگوچی برنامه‌ریزی شده به نتایج با تجزیه و تحلیل واریانس می‌رسد که نشان می‌دهد ولتاژ آهن ربا نقش عمده‌ای را ایفا می‌کند و می‌توان از این روش برای مواد فرومغناطیس که در صنعت الکترونیک کاربرد دارند استفاده کرد [۵].

یکی از مواردی که به آن پرداخته نشده، تأثیر این فرآیند بر روی سطوح غیرقابل دسترس مخصوصاً دیواره‌های شیار می‌باشد. در این مقاله اثر پارامترهای ورودی فرآیند مانند گپ‌کاری، سرعت دورانی قطعه‌کار و اندازه ذرات در نظر گرفته شده است و زمان ماشین‌کاری (۱۰ دقیقه) و سرعت پیشروی (۱۲میلی‌متر بر دقیقه) به عنوان پارامترهای ثابت در نظر گرفته شده است.

۲- اصول فرآیند پرداخت‌کاری با ذرات ساینده مغناطیسی

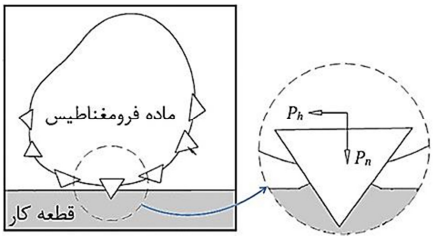
پایه و اساس عملکرد فرآیند پرداخت‌کاری ساینده مغناطیسی استفاده از تعداد بی‌نهایت لبه برنده به صورت اتفاقی و یا تصادفی، با جهت و هندسه نامحدود برای براده‌برداری از سطح قطعه‌کار می‌باشد. در واقع دانه‌های ساینده موجود در خمیر ساینده به صورت اتفاقی با سطح در تماس از قطعه تماس پیدا کرده و در اثر نیروهای اعمالی (شعاعی و محوری) بر آن باعث براده-برداری از روی سطح قطعه می‌گردد. ابزار برشی مورد استفاده در این فرایند، تشکیل شده است از دانه‌های ریز ساینده که در یک میدان مغناطیسی قرار گرفته است که در شکل ۱ نشان داده شده است [۶]. اگر قدرت میدان مغناطیسی کم باشد ذرات ساینده توانایی براده‌برداری ندارند و در صورتی که این میدان زیاد باشد باعث صلبیت توده ساینده، افزایش دمای قطعه‌کار و کیفیت نامناسب سطح را به‌دنبال دارد. ذرات ساینده در این فرآیند با مقداری پودرآهن مخلوط شده تا در میدان مغناطیسی نگه‌داشته شود. از مواد معدنی نظیر اکسید آلومینیوم، کاربید سیلیکون و کاربید بور به‌عنوان دانه‌های ساینده، در تهیه ذرات ساینده مورد استفاده قرار می‌گیرد، اندازه دانه‌های ساینده و درصد وزنی دانه‌های ساینده نسبت به مواد واسطه از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در فرآیند می‌باشد.

۳- مکانیزم مورد استفاده

در این پژوهش، برای انجام آزمایش‌ها از مکانیزمی استفاده شد که براساس آن، آهن‌ربای دیسکی در حال چرخش و آهن‌ربای پشت شیار ثابت می‌باشد و در این بین قطعه‌کار و مخلوطی از پودرهای ساینده قرار می‌گیرد که با چرخش آهن‌ربای دیسکی مخلوط پودرهای ساینده در میدان به وجود آمده شروع به چرخش می‌کنند. حرکت دورانی آهن‌ربا توسط یک دستگاه فرز تولید گردید. در شکل ۲ شماتیک به‌کار رفته برای انجام آزمایش‌ها و در (شکل a۳) مکانیزم به‌کار رفته شده برای انجام آزمایش و در (شکل b۳) برس ساینده تشکیل شده در حین انجام آزمایش نشان داده شده است.

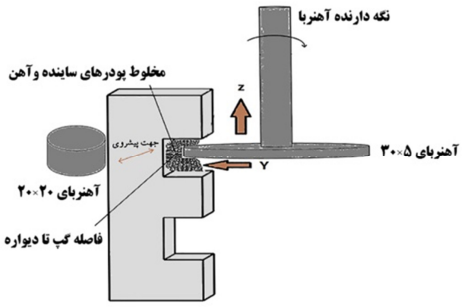
٤- نتایج و بحث

در این مقاله با استفاده از روش‌های آماری آنالیز واریانس در نرم‌افزار طراحی



شکل ۱ شکل‌گیری ذرات ساینده [۶]

1. A.S.Wang
2. Magnetic Abrasive Finishing (MAF)
3. Sung Kang
4. Rahul
5. Kala



شکل ۲ شماتیک حرکت مکانیزم

شکل ۳ a) مکانیزم به کار رفته b) برس ساینده تشکیل شده درحین انجام آزمایش

جدول ۱ نتایج آزمایش‌ها

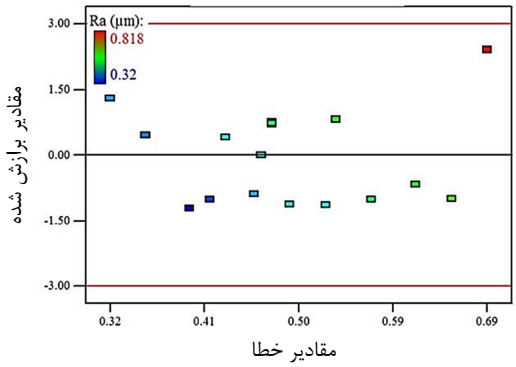
شماره آزمایش	اندازه ذرات ساینده (میکرون)	سرعت (rev/min)	گپ (mm)	R_a (μm)
۱	۱۴	۲۰۰	۰/۵	۰/۴۸۶
۲	۲۵	۲۰۰	۰/۵	۰/۸۱۸
۳	۱۴	۶۳۰	۰/۵	۰/۳۸۲
۴	۲۵	۶۳۰	۰/۵	۰/۵۱۸
۵	۱۴	۲۰۰	۱/۵	۰/۴۵۷
۶	۲۵	۲۰۰	۱/۵	۰/۵۹۶
۷	۱۴	۶۳۰	۱/۵	۰/۳۹۶
۸	۲۵	۶۳۰	۱/۵	۰/۵۸۵
۹	۱۴	۴۰۰	۱	۰/۳۲۰
۱۰	۲۵	۴۰۰	۱	۰/۵۷۴
۱۱	۱۸	۲۰۰	۱	۰/۴۵۷
۱۲	۱۸	۶۳۰	۱	۰/۳۵۴
۱۳	۱۸	۴۰۰	۰/۵	۰/۴۲۳
۱۴	۱۸	۴۰۰	۱/۵	۰/۴۰۴
۱۵	۱۸	۴۰۰	۱	۰/۵۲۶

آزمایش[1] به طراحی آزمایش‌ها با روش RSM[2] پرداخته شد، نتایج به دست آمده به همراه مدل طراحی آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. آزمون مستقل بودن خطاها و ثابت بودن واریانس با استفاده از نمودار مقادیر خطا در برابر مقادیر برازش شده به دست می‌آید. در شکل ۴ نمودار مقادیر برازش شده برای زبری سطح نشان داده شده است.

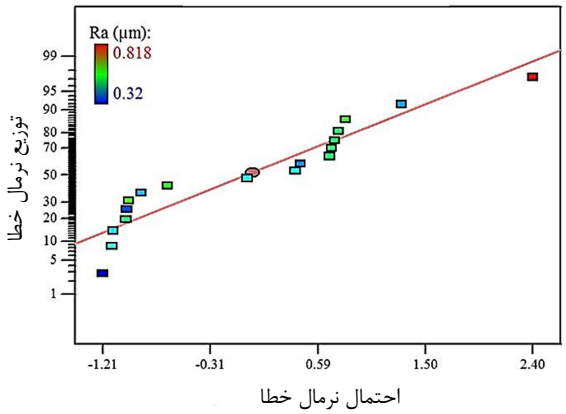
همان‌طور که در شکل مشهود است، نقاط به صورت تصادفی توزیع شده‌اند و از مدل خاصی پیروی نمی‌کنند و این نشان دهنده ارضا شدن شرط مستقل بودن خطاهاست.

نمودار توزیع احتمال نرمال به بررسی فرض نرمال بودن توزیع خطاهای آزمایش که لازمه شروع تحلیل واریانس است کمک می‌کند. این نمودار در شکل ۵، آورده شده است.

1. Design Expert
2. Response Surface Methodology



شکل ۴ نمودار خطا در برابر مقادیر برازش شده

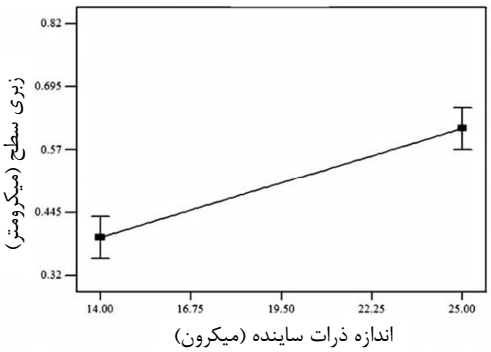


شکل ۵ نمودار توزیع احتمال نرمال برای خروجی فرآیند

نرم‌افزار طراحی آزمایش دارای این توانایی می‌باشد که تأثیر پارامترهای ورودی را بر خروجی فرآیند (زبری سطح) مورد بررسی قرار دهد. نتایج خروجی از این نرم‌افزار به قرار زیر است.

۴-۱- تأثیر اندازه ذرات ساینده بر خروجی فرآیند

همان‌طور که در شکل ۶، نشان داده شده است هرچه اندازه دانه‌های ذرات ساینده کاربید سیلیسیم (Sic) بیشتر شود زبری سطح افزایش می‌یابد. که این به دلیل ریزتر بودن دانه‌های ساینده می‌باشد که چون نسبت ذرات آهن به کاربید سیلیسیم به طور مساوی لحاظ گردیده، فشار بیشتری برای پرداخت کاری در اندازه دانه‌های کوچکتر به وجود می‌آید که نتیجه آن در نمودار مشاهده می‌شود.



شکل ۶ تأثیر پارامتر ورودی مش ذرات ساینده بر خروجی فرآیند (زبری سطح)

۴-۲- تأثیر سرعت چرخش برس ساینده بر خروجی فرآیند

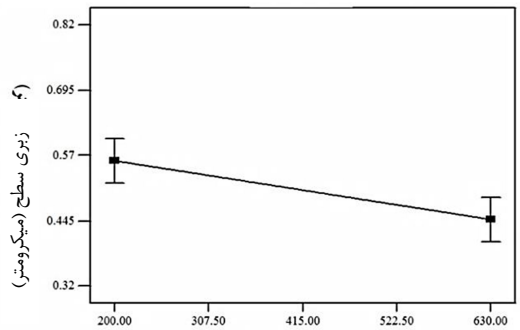
از روی شکل ۷، چنین بر می‌آید که هرچه سرعت چرخشی افزایش یابد، زبری سطح کاهش یافته و میزان صافی سطح بهتری خواهیم داشت تا جایی که پاشش در ابزار ساینده به وجود نیاید که در پیش آزمایش‌ها سرعت ۶۳۰ دور بر دقیقه هیچ‌گونه پاششی مشاهده نشد. دلیل صافی سطح بهتر در سرعت‌های بالاتر بخاطر افزایش نیروی گریز از مرکز و تعداد دفعات برخورد ذرات ساینده در یک دقیقه می‌باشد که باعث بالا رفتن صافی سطح مورد نظر می‌شوند.

۴-۳- تأثیر گپ کاری بر خروجی فرآیند (زبری سطح)

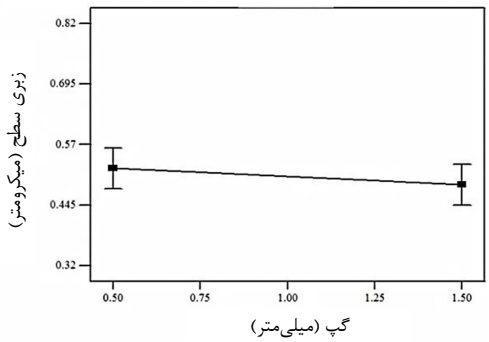
همان‌طورکه از روی شکل ۸ برداشت می‌شود، به میزان افزایش گپ‌کاری، زبری سطح کاهش می‌یابد و صافی سطح بیشتری خواهیم داشت که این مطلب ارتباط مستقیمی با فشار لازم برای پرداخت‌کاری سطح مورد نظر دارد. یعنی با کاهش گپ و نیروی گریز از مرکز آهن‌ربای دیسکی دوار، نیروی فشاری برای پرداخت سطح نیز افزایش خواهد یافت که این امر باعث افزایش صافی سطح خواهد شد.

۴-۵- تأثیر همزمان اندازه ذرات و سرعت چرخش بر خروجی فرآیند

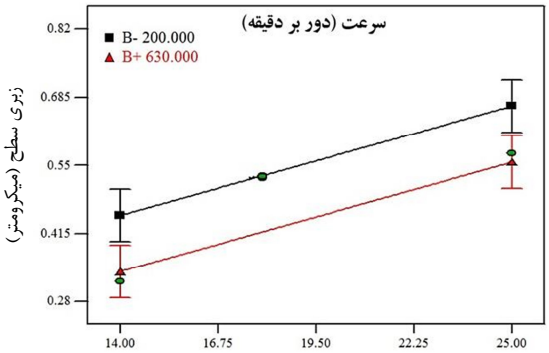
با مشاهده شکل ۹ و شکل سه بعدی ۱۰، متوجه می‌شویم که در سرعت‌های پایین با افزایش اندازه ذرات با افزایش زبری سطح مواجه شده‌ایم که این به دلیل فشار بیشتر ذرات مغناطیسی بر روی دانه‌های ریزتر و همچنین به دلیل کاهش اندازه دانه‌ها، سطح بیشتری در تماس باذرات ساینده می‌باشد. و همچنین در سرعت‌های بالاتر با افزایش اندازه ذرات با کاهش زبری سطح مواجه می‌شویم که این مطلب به خاطر پرتاب ذره‌های ساینده به لبه‌های



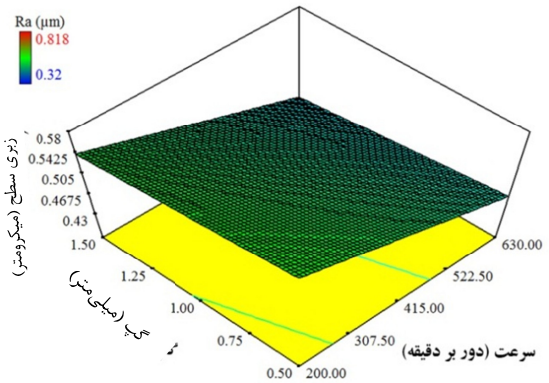
شکل ۷ تأثیر پارامتر ورودی سرعت دورانی برس ساینده بر خروجی فرآیند (زبری سطح)



شکل ۸ تأثیر پارامتر ورودی گپ کاری بر خروجی فرآیند (زبری سطح)



شکل ۹ تأثیر همزمان اندازه دانه و سرعت چرخش بر خروجی فرآیند (زبری سطح)

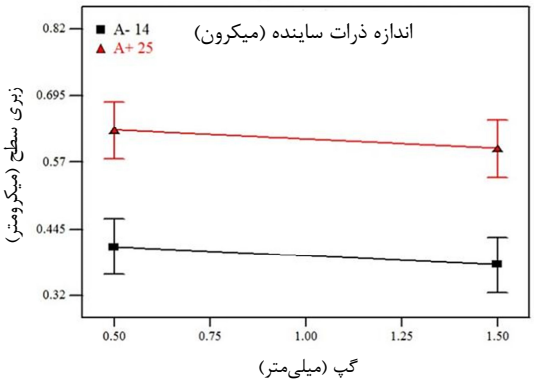


شکل ۱۰ تأثیر همزمان اندازه دانه و سرعت چرخش بر خروجی فرآیند

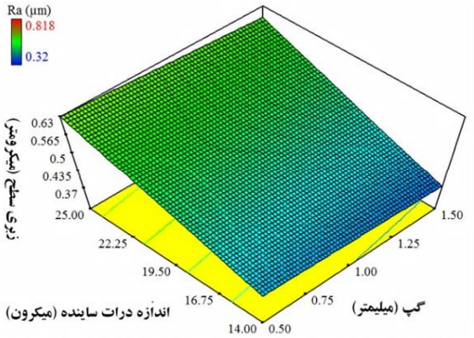
بیرونی برس به خاطر نیروی گریز از مرکز می‌باشد که با درصدی از خطا و پیشروی برس ساینده قابل چشم پوشی می‌باشد.

۴-۶- تأثیر همزمان اندازه ذرات و گپ‌کاری بر خروجی فرآیند

با توجه به شکل ۱۱ و ۱۲، با افزایش همزمان گپ‌کاری و اندازه ذرات ساینده، زبری سطح کاهش می‌یابد و این به خاطر زیاد شدن گپ و در نتیجه کاهش نیروی فشاری بر روی سطح می‌باشد. در صورتی که با کاهش گپ و افزایش اندازه ذرات همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌نمایید با افزایش زبری سطح به دلیل افزایش نیروی فشاری مواجه شده‌ایم.



شکل ۱۱ تأثیر همزمان اندازه ذرات و گپ‌کاری بر خروجی فرآیند (زبری سطح)



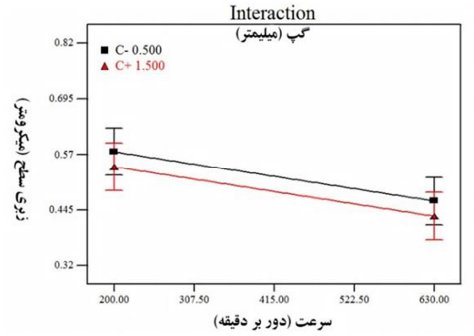
شکل۱۲ تأثیر همزمان اندازه دانه و سرعت چرخش بر خروجی فرآیند

۴-۷- تأثیر همزمان سرعت چرخش و گپ‌کاری بر خروجی فرآیند

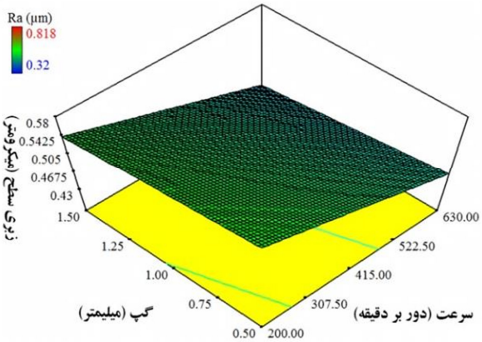
همان‌طور که در شکل ۱۳ و۱۴، مشاهده می‌نمایید با افزایش پارامتر ورودی سرعت چرخشی و افزایش گپ‌کاری به کمترین زبری سطح دست پیدا می‌شود و این به دلیل افزایش تعداد برخورد لبه‌های ساینده با قطعه‌کار در یک دقیقه و همچنین افزایش دوجانبه نیروی فشاری بر روی سطح می‌باشد. البته لازم به ذکر است با افزایش همزمان این دو پارامتر نیز همچنان با کاهش زبری سطح مواجه هستیم که به دلیل افزایش نیروی گریز از مرکز در سرعت‌های بالاتر همچنان با وجود گپ بالاتر فشار لازم برای پرداخت‌کاری حفظ خواهد شد.

۴-۸- عکس میکروسکوپ نوری از سطح دیواره

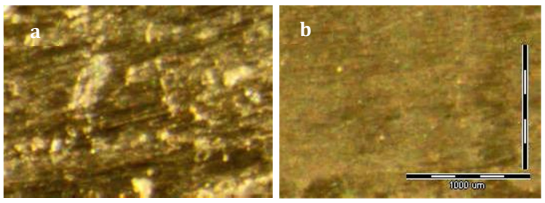
در شکل ۱۵، عکس میکروسکوپ نوری از سطح دیواره شیار تحت شرایط آزمایش اندازه ذرات ساینده ۱۴ میکرون، سرعت ۶۳۰ دور بر دقیقه و گپ کاری ۰/۵ میلی‌متر نشان داده شده است.



شکل ۱۳ تأثیر همزمان سرعت چرخشی و گپ‌کاری بر خروجی فرآیند (زبری سطح)



شکل ۱۴ تأثیر همزمان سرعت چرخشی وگپ‌کاری بر خروجی فرآیند



شکل ۱۵ عکس میکروسکوپ از سطح دیواره، a) قبل از فرآیند b) بعد از فرآیند

۵- نتیجه‌گیری

از تعامل بین شرایط گفته شده در مقاله چنین استنباط می‌شود که:

- تأثیر پارامترهای ورودی بر پرداخت سطح دیواره شیار مؤثر بوده است.
- بیشترین تأثیر را اندازه مش ذرات ساینده بر روی سطح دیواره دارا است، با بزرگتر شدن اندازه که منجر به ریزتر شدن ذرات می‌باشد بهترین کیفیت بدست آمد.
- تأثیر سرعت به عنوان عامل دوم شناخته شد، وقتی از سرعت‌های بالاتر استفاده شود زبری سطح به صورت چشم گیری کاهش یافت.
- افزایش گپ روند پرداخت سطح را بهبود بخشید، که این فاصله با پرتاب مواد ساینده توسط نیروی گریز از مرکز دیسک دوار جبران گردید.

٦- مراجع

[1] W. Lee , Study the characteristics of magnetic finishing with gel abrasive, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, pp 1063–1069, 2009.
[2] Kwak, S. Kang , Assessment on Magnetic Flux Density of Magnetic Array Table in Magnetic Abrasive Polishing Process, *Computer - Manufacturing Technology*, pp 16-18, 2011.
[3] R. Mulik, P. Pandey , Mechanism of Surface Finishing in Ultrasonic-Assisted Magnetic Abrasive Finishing Proces, *Materials and Manufacturing Processes*, pp 1418–1427, 2010.
[4] R. Mulik, P. Pandey , Ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing of hardened AISI 52100 steel using unbonded SiC abrasives, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, pp 68–77, 2013.
[5] P. Kala, S. Kumar, P. Pandey , Polishing of Copper Alloy Using Double Disk Ultrasonic Assisted Magnetic Abrasive Polishing, *Materials and Manufacturing Processes*, pp 200–206, 2013.
[6] T. Mori, K. Hirota, Kawashima, Clarification of magnetic abrasive finishing mechanism, *Journal of Materials Processing Technology*, pp 682-686, 2003.