



The Effect of the Machining Parameters of Magnetic Abrasive Finishing on the Concave Surface of Cold-Worked Steel



ARTICLE INFO

Authors

Rasouli S.A.^{1*},
Vahdati M.²,
Jaberi A.E.³

¹Department of Mechanical Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

²Department of Mechanical Engineering, Khajeh Nassir-Al-Deen Toosi (K. N. Toosi)-University of Technology, University Name, Tehran, Iran.

³Department of Mechanical Engineering, Malek ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

* Correspondence

Malayer, Iran
seyedalirezarasouli@gmail.com

How to cite this article

Rasouli S.A, Vahdati M, Jaberi A.E. The Effect of the Machining Parameters of Magnetic Abrasive Finishing on the Concave Surface of Cold-Worked Steel. Modares Mechanical Engineering, Proceedings of 2nd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2022;22(10):201-207.

ABSTRACT

Magnetic abrasive finishing process (MAF) is one of the latest advanced machining processes. After eight decades have passed since the registration of the magnetic abrasive polishing process, the applicability of this method has been proven in finishing all kinds of surfaces, including flat, cylindrical and free surfaces. In this research, the influence of MAF process movement parameters on the concave surface of cold-worked steel has been investigated experimentally using the response surface method. These parameters include rotational speed, linear speed, gap between abrasive brush and workpiece, magnetic flux density and curvature angle. For this purpose, a spherical head magnet is used and the powder used is prepared by mechanical alloying method. Cold-worked steel is used in the manufacture of roll forming molds, which is used in air engines to shape compressor and turbine blades, and also to investigate the feasibility of the MAF process on the workpiece surface with high hardness and yield stress, such as Cold work steel is selected. According to the results, the optimal value of the magnetic flux density is 0.55 tesla, and with the increase of the distance between the abrasive brush and the workpiece, the surface roughness changes initially increase and decrease after passing the optimal value.

Keywords Magnetic abrasive finishing, machining, steel, concave surface, free surface, Design of Experiments, response surface method

ماهانامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه‌نامه مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته. مهر ۱۴۰۱، دوره ۲۲، شماره ۱۰، صفحه ۲۰۱-۲۰۷.



تأثیر پارامترهای حرکتی پرداخت کاری به روش سایشی مغناطیسی بر روی سطح مقعر فولاد سردکار



چکیده

فرآیند پرداخت کاری سایشی مغناطیسی (MAF) جزء جدیدترین فرآیندهای پیشرفته ماشین‌کاری می‌باشد. بعد از گذشت هشت دهه از ثبت فرآیند پرداخت کاری سایشی مغناطیسی کاربردی بودن این روش در پرداخت انواع سطوح از جمله سطوح تخت، استوانه‌ای و آزاد به اثبات رسیده است. در این پژوهش، تأثیر پارامترهای حرکتی فرآیند MAF، بر سطح مقعر فولاد سردکار بصورت تجربی با استفاده از روش سطح پاسخ، بررسی شده است. این پارامترها شامل سرعت دورانی، سرعت خطی، فاصله برس ساینده تا قطعه‌کار، چگالی شار مغناطیسی و زاویه انحنا می‌باشد. برای این منظور از آهنربای سر کروی استفاده شده و پودر مورد استفاده از روش آلیاژ سازی مکانیکی تهیه شده است. فولاد سردکار به دلیل کاربرد در ساخت قالب‌های رول فرمینگ، که در موتورهای هوایی جهت شکل‌دهی پره‌های کمپرسور و توربین کاربرد دارد، و همچنین بررسی امکان پذیري فرآیند MAF بر سطح قطعه‌کاری با سختی و تنش تسلیم بالا مانند فولاد سرد کار، انتخاب شده است. بر اساس نتایج، مقدار بهینه چگالی شار مغناطیسی ۰/۵۵ تسلا بوده و با افزایش فاصله برس ساینده تا قطعه‌کار، تغییرات زبری سطح در ابتدا افزایش و پس از عبور از مقدار بهینه، کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها پرداخت کاری سایشی مغناطیسی، ماشین‌کاری، فولاد، سطح مقعر، سطح آزاد، طراحی آزمایش، روش سطح پاسخ

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها

سید علیرضا رسولی^{۱*}
مهرداد وحدتی^۲
امیر احسان جابری^۳

^۱ دانشگاه ملایر، ملایر

^۲ دانشگاه خواجه صنعتی نصیرالدین طوسی، تهران

^۳ دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

* نویسنده مسئول

آدرس: ایران، ملایر کیلومتر ۴ جاده ملایر- اراک، دانشگاه ملایر، ۸۴۶۳۱-۲۵۷۴۱
seyedalirezarasouli@gmail.com

جدول ۱) خلاصه‌ای از مقالات در زمینه بررسی پرداخت کاری سایشی مغناطیسی بر سطوح آزاد

نویسنده	سال	خلاصه
لیه دای یانگ [۱۱]	۲۰۰۷	بررسی تاثیر فاکتورهای موثر بر فرآیند MAF بر سطح آزاد مقعرشکل با شعاع انحنا بزرگ (نعلبکی شکل) توسط روش تاگوچی
جین [۱۲]	۲۰۱۳	بررسی فرآیند MAF بر سطوح شبه‌استوانه برنجی- بررسی تاثیر فاکتورهای موثر بر میزان نیروی عمودی، نیروی برشی و تغییرات زبری توسط تحلیل واریانس و روش سطح پاسخ - استخراج مدل رگرسیون جهت خروجی های مذکور - استفاده از کنترل عددی فاصله برس ساینده تا قطعه کار- سرعت پیشروی - درصد آهن مس
آنرای [۱۳]	۱۹۹۶	انجام فرآیند بر سطوح انحنا دار پس از فرآیند فرزکاری و واسپارک توسط کنترل عددی- مقایسه شرایط سطوح مذکور
بان هون دینگ [۱۴]	۲۰۰۸	انجام فرآیند MAF بر سطوح تخت و انحنا دار- ساخت ابزارهای جدید مغناطیسی بصورت مدار باز و بسته و بررسی عملکرد آنها بر سطوح تخت و منحنی - مقایسه عملکرد MAF با شرایط و ابزار یکسان بر سطوح محدب- مقعر - استفاده از کنترل عددی
سان [۱۵]	۲۰۰۴	انجام فرآیند MAF بر سطوح آزاد با ماشین ابزار ۵ درجه آزادی محورهای مجازی موازی - بررسی تاثیر گپ و درصد ذرات آهن بر عملکرد فرآیند
رسولی و همکاران [۵]	۲۰۲۱	بررسی پارامترهای حرکتی (ماشین کاری) بر سطح محدب و مقعر آلومینیوم آلیاژی به روش سطح پاسخ

۱- مقدمه

۱-۱- مقدمه

فرآیند پرداخت کاری سایشی مغناطیسی (MAF) جزء جدیدترین فرآیندهای پیشرفته ماشین کاری می‌باشد. در مورد این فرآیند علاوه بر توانمندی‌ها و پتانسیل‌های بالای آن برای پرداخت انواع مواد مهندسی، تجهیزات مورد استفاده نیز بسیار ساده بوده و با هزینه پایین در مقایسه با سایر فرآیندهای پرداخت کاری، قابل اجرا می‌باشد که این امر منجر به استفاده گسترده و روز افزون از این فرآیند در صنایع مختلف نظامی، هوایی، ایتیکی، الکترونیکی و پزشکی شده است.

با توجه به مزیت منعطف بودن ابزار در این فرآیند، بعد از گذشت هشت دهه از ثبت فرآیند پرداختکاری سایشی مغناطیسی کاربردی بودن آن در پرداخت انواع سطوح از جمله سطوح تخت، استوانه‌ای و آزاد به اثبات رسیده است.

۲-۱- اشاره به مراجع

چن و همکارانش در سال ۲۰۰۴ پرداخت کاری دو نوع سطح مقعر و محدب را توسط روش MAF مطالعه کردند [1]. وحدتی و رسولی، پارامترهای موثر در فرآیند MAF بر سطح مقعر آلومینیوم آلیاژی، را بررسی نمودند [2]. در سال ۲۰۰۷ چینگ لین تین و همکارانش در یک تحقیق تجربی سطوح آزاد فولاد زنگ نزن SUS304 را با استفاده از روش MAF پرداخت کاری کردند [3]. چوپانی و همکاران، اثر پارامترهای فاصله برس تا قطعه کار، سرعت دورانی قطعه کار استوانه‌ای و نوع ساینده در فرآیند پرداختکاری سایشی مغناطیسی، بر زبری سطح بیرونی قطعات استوانه‌ای از جنس فولاد زنگ نزن C4۴۰، را بررسی نمودند [4]. رسولی و همکاران، مقایسه‌ای پیرامون پرداخت سایشی مغناطیسی سطوح محدب و مقعر آلومینیوم آلیاژی انجام دادند [5]. پروهیت و همکاران، تاثیر فرآیند MAF بر سطح غیرمغناطیس آلومینیوم ۶۰۶۱ با ابزار سرتخت توسط آهنربای الکتریکی را بررسی نمودند [6].

کومار و سینگ در سال ۲۰۲۰، پارامترهای موثر برفرآیند MAF بر سطح تخت اینکونل ۷۱۸ با ابزار سرتخت با چپینش خاص آهنربا را مطالعه کردند [7]. ژو و همکاران، مجموعه‌ای از تجهیزات آزمایشگاهی جهت بهبود عملکرد فرآیند و ارزیابی عملکرد آن ارائه دادند [8]. تی کی و همکاران پارامترهای موثر در فرآیند بر سطح تخت استیل با استفاده از آهنربای الکتریکی را بررسی کردند [9]. کیان و همکاران در سال ۲۰۲۰، پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه فرآیند MAF را مورد مطالعه قرار دادند [10]. جدول ۱ خلاصه‌ای از پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه پرداخت سطوح آزاد به روش سایشی مغناطیسی را نشان می‌دهد.

۳-۱- شرح کلی مسئله

در این پژوهش، تاثیر پارامترهای حرکتی (ماشین کاری) فرآیند MAF، بر سطح مقعر فولاد سردکار بصورت تجربی بررسی شده است. این پارامترها شامل سرعت دورانی، سرعت خطی، فاصله برس ساینده تا قطعه کار، چگالی شار مغناطیسی و زاویه انحنا می‌باشد. برای این منظور از آهنربای سر کروی استفاده شده و پودر مورد استفاده از روش آلیاژ سازی مکانیکی تهیه شده است.

۲- مواد و آزمایش

۲-۱- قطعه کار

جهت طراحی قطعه کار از نرم افزار سالیدورک نسخه ۲۰۲۱ استفاده شده است. جهت ساخت قطعه از فولاد سردکار D3 و ماشین ابزار فرز سی ان سی سه محوره FMP45 استفاده شده است. فولاد سردکار به دلیل کاربرد در ساخت قالب‌های رول فرمینگ، که در موتورهای هوایی جهت شکل‌دهی پره‌های کمپرسور و توربین کاربرد دارد، و همچنین بررسی امکان‌پذیری فرآیند MAF بر سطح قطعه کاری با سختی و تنش تسلیم بالا مانند فولاد سرد کار، انتخاب شده است. جدول ۲ برخی از خواص آلیاژ مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۲) خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و مغناطیسی قطعه استفاده شده

کد آلیاژ	چگالی (kg/m ³)	سختی (HB)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	مدول یانگ (Gpa)	مغناطیسی نسبی at 16kA/m	ضریب نفوذ
D3	۷۸۶۰	۷۲۶	---	---	۲۱۰	فرومغناطیس	

جدول ۴) پارامترها و سطوح آنها

پارامترها	علامت اختصاری	سطوح پارامترها				
		۲	۱	۰	-۱	-۲
چگالی شارمغناطیسی (تسلا)	B	۰/۷	۰/۶	۰/۵	۰/۴	۰/۳
گپ (mm)	G	۳	۲/۵	۲	۱/۵	۱
سرعت دورانی (rpm)	R	۲۰۰۰	۱۴۰۰	۱۰۰۰	۶۰۰	۲۰۰
سرعت پیشروی (mm/min)	F	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵
زاویه انحنا	A	-۶۰	۹۰	۶۰	۴۵	۳۰

۳- نتیجه و بحث

۳-۱- نتایج

نتایج آنالیز واریانس پس از حذف جمله‌های غیر مؤثر در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵) نتایج آنالیز واریانس پس از حذف جمله‌های غیر مؤثر

جمله‌ها	درجات آزادی	جمع مربعات SS	میانگین مربعات MS	مقدار F	مقدار P
مدل	14	3457/06	246/933	8/63	0/000
خطی	5	2241/94	448/387	15/68	0/000
فاصله برس ساییده تا قطعه کار (GAP)	1	477/31	477/306	16/69	0/000
سرعت دورانی (RPM)	1	360/28	360/275	12/60	0/001
چگالی شار مغناطیسی (MFD)	1	278/26	278/262	9/73	0/004
نرخ پیشروی (Feed)	1	422/97	422/967	14/79	0/000
زاویه‌ی انحراف (Angle)	1	703/13	703/125	24/59	0/000
مجذور	5	439/50	87/900	3/07	0/021
GAP×GAP	1	350/42	350/417	12/25	0/001
RPM×RPM	1	1/67	1/667	0/06	0/811
MFD×MFD	1	70/42	70/417	2/46	0/126
Feed×Feed	1	0/42	0/417	0/01	0/905
Angle×Angle	1	1/03	1/028	0/04	0/851
تداخل دوتایی	4	775/63	193/906	6/78	0/000
GAP×MFD	1	105/12	105/125	3/68	0/063
GAP×Feed	1	162/00	162/000	5/66	0/023
RPM×Angle	1	288/00	288/000	10/07	0/003
MFD×Angle	1	220/50	220/500	7/71	0/009
خطا	35	1000/94	28/598		
عدم برازش	26	670/44	25/786	0/70	0/771
خطای کلی	9	330/50	36/722		
مجموع	49	4458/00			

توزیع پراکندگی باقیمانده‌ها و نمودار احتمال نرمال نیز در شکل ۲ نشان داده شده است. توزیع نامتوازن باقیمانده‌ها و غیر مؤثر بودن عدم برازش مدل نشان دهنده‌ی دقت مناسب مدل می‌باشد.

۲-۲- میدان مغناطیسی

در این پژوهش، آهنربای سر کروی با جنس نئودیم-بر-آهن استفاده شده است [5]. جدول ۳ مشخصات مغناطیسی آهنربای استفاده شده را نشان می‌دهد.

جدول ۳) مشخصات مغناطیسی آهنربای استفاده شده در آزمایش

آهنربا	B_r (KG)	H_c (kA/m)	$(BH)_{max}$ (kJ/m ³)
گرید N۳۵	۱۱-۱۲/۷	۸۶۰	۲۶۳-۲۷۷

۲-۳- پودر سایشی

همچنین، از کاربید سیلسیم و آهن به عنوان ذره ساییده و ذره مغناطیس، به ترتیب، استفاده شده [5] و برای تهیه پودر، روش آلیاژ سازی مکانیکی استفاده شده است.

۲-۴- اندازه‌گیری زبری و نرخ براده برداری

خروجی‌های در نظر گرفته شده در این پژوهش تغییرات زبری سطح و نرخ براده برداری می‌باشند. جهت این مهم از دو دستگاه زبری سنج تماسی پرتابل 3+ surtronic و ثابت Perthometer Mahr M3 استفاده شده است.

۲-۵- استراتژی حرکتی ابزار

در این پژوهش، از استراتژی حرکتی رستر صفر درجه دو طرفه (موافق و مخالف) برای مسیر حرکت ابزار استفاده شده است. شکل ۱ مسیر حرکت ابزار را با استفاده از این استراتژی نشان می‌دهد.



شکل ۱) مسیر استراتژی رستر دو طرفه بر سطح قطعه کار

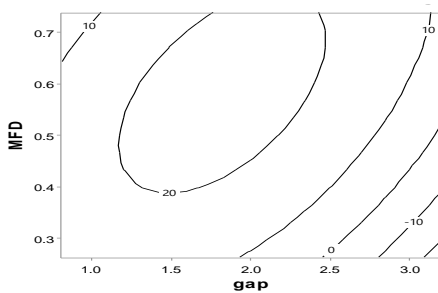
۲-۶- طراحی آزمایش

در طراحی آزمایش‌ها، از روش سطح پاسخ مورد استفاده قرار گرفته است. رعایت انجام آزمایش‌ها بصورت تصادفی جهت کاهش و حذف تأثیر نویزهای حاصل از سیستم و محیط، بسیار ضروری می‌باشد. جدول ۴ پارامترها و سطوح آنها را نشان می‌دهد. نرم افزار مینی‌تب نسخه ۲۰، برای تحلیل و تفسیر نتایج همچنین بدست آوردن ضرایب معادله ریاضی حاکم بر آزمایش استفاده شده است. کفایت مدل توسط، پارامتر R^2 (ضریب تعیین) و $(R^2_{adjusted})$ ، آزمون عدم برازش، نمودار احتمال نرمال و تحلیل مانده‌ای (باقیمانده‌ها) بررسی شده است. لازم به ذکر است که در تمامی آزمایشات اولیه پس از تحلیل نتایج آزمایش‌ها توسط آنالیز واریانس مشخص گردید که تمامی فاکتورها مؤثر می‌باشند.

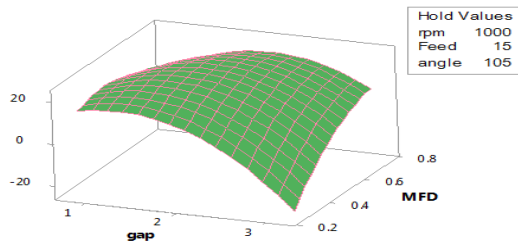
باشد که با افزایش چگالی شار مغناطیسی و کاهش مقدار فاصله برس ساینده تا قطعه کار، این مهم اتفاق می افتد. البته لازم به ذکر است که در فاصله ۱ میلی متر به علت کاهش بیش از حد فاصله، نیروی مکانیکی فشردگی پودر بر سطح بسیار زیاد شده و در نتیجه پودر نسبت به سطح دچار چسبیدگی می گردد. همین مهم باعث کاهش کارآمدی فرایند و کاهش تغییرات زبری سطح می گردد.

۳-۲-۱- تداخل اثر پارامترها بر تغییرات زبری

با توجه به مقادیر p-value در جدول ۵، تداخل پارامترهای گپ-چگالی شار مغناطیسی، گپ-سرعت پیشروی، سرعت برشی-زاویه ای انحناء و چگالی شار مغناطیسی-زاویه ای انحناء بر میزان تغییرات زبری سطح اثر می گذارند. نحوه ی تأثیرگذاری موارد مذکور در شکل ۴ الی شکل ۶ آورده شده است. با توجه به شکل ۴، در مقادیر کم فاصله برس ساینده تا قطعه کار با افزایش چگالی شار مغناطیسی شاهد کاهش میزان تغییرات زبری سطح و با افزایش گپ این روند معکوس می باشد. با کاهش فاصله ی گپ میزان چگالی شار مغناطیسی افزایش پیدا می کند. با افزایش بیش از حد چگالی شار مغناطیسی و از طرف دیگر با توجه به جنس فرومغناطیس قطعه کار، جاروبک ساینده مغناطیسی بسیار صلب شده و کارایی چندانی در جهت حذف پستی و بلندی های سطح ندارد. اما با افزایش فاصله برس ساینده تا قطعه-کار، میزان چگالی شار مغناطیسی کاهش یافته و افزایش میزان چگالی شار مغناطیسی باعث جبران کاهش مذکور می گردد.

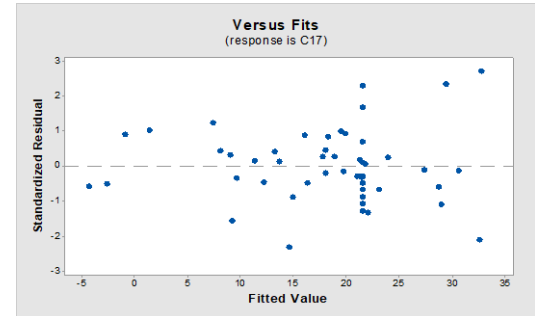
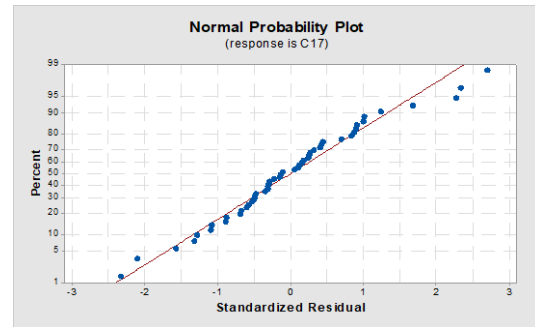


(الف)



(ب)

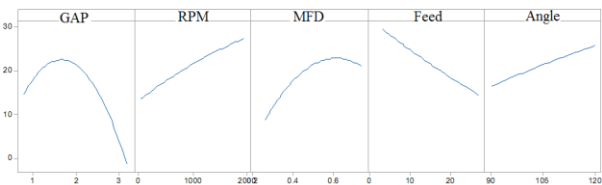
شکل ۴) نمودارهای الف) ۲ بعدی و ب) ۳ بعدی تداخل اثر گپ-چگالی شار مغناطیسی



شکل ۲) نمودارهای توزیع باقیمانده ها و احتمال نرمال خروجی آنالیز واریانس آزمایش های انجام شده بر سطح قطعه کار

۳-۲-۳- بحث

نحوه ی تأثیرگذاری پارامترها بر میزان تغییرات زبری سطح در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳) نحوه ی تأثیر پارامترها بر میزان تغییرات زبری سطح

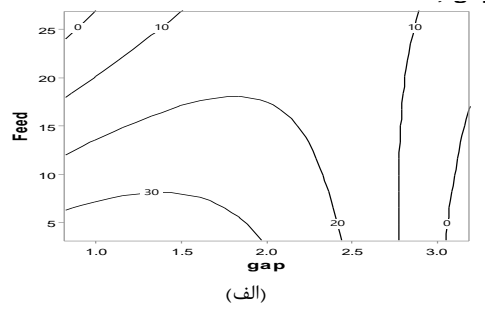
با توجه به شکل ۳ و مقادیر مجذور p-value، مشخص است که فاصله برس ساینده تا قطعه کار و چگالی شار مغناطیسی حالت منحنی شکل (محدب) داشته و رفتار سایر پارامترها خطی می-باشد. با افزایش زاویه ای انحناء و با توجه به سطح مؤثر نیم کره ای آهنربا، شاهد افزایش تغییرات زبری سطح هستیم. افزایش میزان پیشروی باعث کاهش در تغییرات زبری می گردد. با توجه به فرومغناطیس بودن قطعه کار و تشکیل مدار بسته مابین آهنربا و قطعه کار و افزایش استحکام جاروبک ساینده مغناطیسی، امکان افزایش سرعت دورانی می باشد. افزایش سرعت دورانی نیز منجر به سطوحی با کیفیت بهتر می گردد. افزایش بیش از حد فاصله برس ساینده تا قطعه کار با توجه به زاویه ای انحناء در سطح مقعر منجر به کاهش تغییرات زبری می-گردد. با افزایش میزان چگالی شار مغناطیسی، در ابتدا تغییرات زبری افزایش و پس از عبور از مقدار بهینه کاهش و توقف میزان تغییرات زبری سطح اتفاق می افتد. با توجه به سختی بالای فولاد سردکار، جهت نفوذ نیاز به نیروی مغناطیسی بیشتری می-

بر اساس شکل ۶، در زاویه‌ی انحناء ۹۰ درجه افزایش سرعت برشی تأثیر زیادی بر میزان تغییرات زبری سطح دارد، در حالیکه در زاویه ۱۲۰ درجه با افزایش سرعت دورانی، زبری سطح تغییر چندانی نمی‌کند. در توضیح این رخداد، مجدداً نیاز به بررسی سطح مؤثر نیم‌کره‌ی آهنربا در مطابقت با سطح قطعه‌کار و تغییرات سرعت برشی و چگالی شار مغناطیسی بر سطح نیم‌کره آهنربا می‌باشد. در زاویه‌ی ۹۰ درجه، سطح پایینی نیم‌کره آهنربا در مطابقت با سطح قطعه‌کار فرومغناطیس می‌باشد. ناحیه‌ی پایینی نیم‌کره آهنربا نسبت به سایر نواحی آهنربا دارای سرعت برشی کمتری می‌باشد. در سرعت‌های برشی پایین نیز شاهد تغییر شکل پلاستیک بیشتر، افزایش نیروهای وارده و در نتیجه افزایش زبری خواهیم بود. افزایش سرعت دورانی باعث کاهش اتفاقات مذکور و افزایش کیفیت سطح می‌گردد. اما در زاویه‌ی ۱۲۰ درجه، سطح بالایی نیم‌کره آهنربا در مطابقت با سطح قطعه‌کار می‌باشد. این ناحیه دارای سرعت دورانی برشی مناسبی است. افزایش بیش از حد سرعت برشی باعث افزایش نیروی گریز از مرکز و تغییر نوع شکل‌گیری جاروبک ساینده‌ی مغناطیسی و فرار تعدادی از ذرات ساینده می‌گردد که این امر موجب کاهش و توقف تغییرات زبری سطح می‌شود.

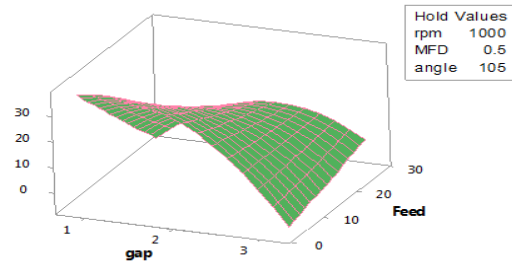
مطابق آنچه در قسمت قبل پیرامون سطح مؤثر نیم‌کره آهنربا و خصوصیات آن در تماس با زاویه‌ی انحناء ۹۰ درجه گفته شد، افزایش چگالی شار مغناطیسی باعث استحکام بیشتر جاروبک ساینده‌ی مغناطیسی شده و تأمین نیروی لازم جهت نفوذ ذرات ساینده بر سطح سخت قطعه‌کار فولادی را فراهم می‌کند. اما در زاویه‌ی ۱۲۰ درجه افزایش بیش از حد چگالی شار مغناطیسی باعث افزایش صلبیت و توقف جاروبک و نفوذ بیش از حد ذرات ساینده بر سطح می‌گردد. به همین دلیل، در زاویه انحناء ۱۲۰ درجه، ابتدا با افزایش میزان چگالی شار مغناطیسی شاهد افزایش میزان تغییرات و در ادامه شاهد کاهش کیفیت سطح هستیم.

در ادامه و جهت بررسی بیشتر تداخل اثر فاصله برس ساینده تا قطعه‌کار-زاویه‌ی انحناء و سرعت پیشروی-زاویه‌ی انحناء نیز در شکل ۷ آورده شده است.

بر اساس شکل ۷، روند تأثیر پارامتر فاصله برس ساینده تا قطعه‌کار و سرعت پیشروی بر تغییرات زبری سطح در تمامی زوایای انحناء یکسان می‌باشد و تنها میزان اثرگذاری متناسب با زاویه‌ی انحناء تغییر می‌کند. مدل ریاضی زیر بر اساس جمله‌های مؤثر و به صورت غیرکد شده استخراج شده است. رابطه ۱، این مدل را نشان می‌دهد.



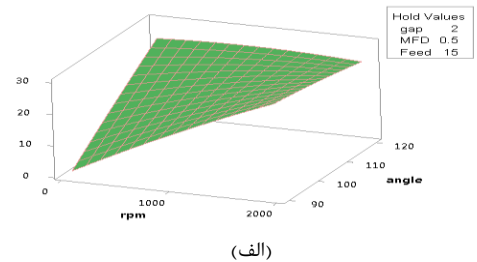
(الف)



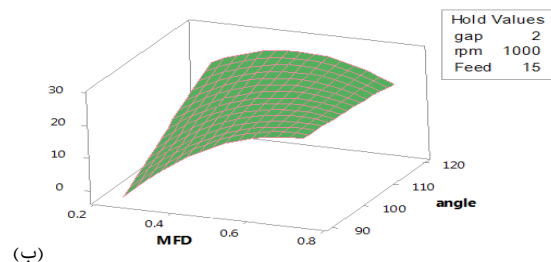
(ب)

شکل ۵) نمودارهای (الف) ۲ بعدی و (ب) ۳ بعدی تداخل اثر فاصله برس ساینده تا قطعه‌کار-سرعت پیشروی

با توجه به شکل ۵ مشخص است که در فاصله پایین، افزایش میزان پیشروی باعث کاهش تغییرات زبری سطح با شیب نسبتاً زیاد می‌گردد. کاهش زمان تماس ذرات ساینده با دره و قله‌های موجود بر سطح قطعه‌کار می‌تواند دلیل وقوع این رویداد باشد. اما در فاصله ۳ میلی‌متر با افزایش سرعت پیشروی، شاهد افزایش ملایم تغییرات زبری هستیم. در فاصله بالا، نیروی اعمالی بر ذرات ساینده جهت نفوذ کاهش می‌یابد. در نتیجه، میزان نفوذ ذرات ساینده کاهش پیدا کرده و ممکن است کمتر از مقدار بحرانی عمق برش باشد. بنابراین، شاهد پدیده‌ی شخم زنی خواهیم بود و پیرو آن کاهش سرعت پیشروی باعث افزایش بیشتر تشکیل پلیسه می‌گردد.



(الف)



(ب)

شکل ۶) (الف) تداخل اثر زاویه‌ی انحناء-سرعت برشی و (ب) تداخل اثر زاویه‌ی انحناء-چگالی شار مغناطیسی

- ۳- با افزایش سرعت برشی از ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ (دور بر دقیقه)، افزایش تغییرات زبری سطح روی می‌دهد.
- ۴- با افزایش چگالی شار مغناطیسی، تغییرات زبری سطح در ابتدا افزایش و پس از عبور از مقدار بهینه، کاهش می‌یابد.
- ۵- مقدار بهینه چگالی شار مغناطیسی ۰/۵۵ تسلا می‌باشد.
- ۶- با افزایش گپ، تغییرات زبری سطح در ابتدا افزایش و پس از عبور از مقدار بهینه، کاهش می‌یابد.
- ۷- مقدار بهینه گپ ۱/۶۷، می‌باشد.
- ۸- در مقادیر بهینه گپ، بیشینه تغییرات زبری ۲۲/۵۳ درصد، بدست آمده است.

۵-مراجع

1- Chen H, Zhang Y, Yan W. The technology of finishing process of die space based upon magnetic abrasive finishing. In Key Engineering Materials. 2004. Trans Tech Publ.

2-Vahdati M, Rasouli S. Evaluation of parameters affecting magnetic abrasive finishing on concave freeform surface of Al alloy via RSM method. Advances in Materials Science and Engineering. 2016. 2016.

3-Lin C.-T, Yang L.-D, Chow H.-M. Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the Taguchi method. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2007. 34(1): p. 122-130.

4-Razfar M, Khajezadeh M, Chopani Y. The optimization of effective parameters of magnetic abrasive finishing by surface response method. Journal of Amirkabir mechanical engineering. 2019, 52:p 2691-2708.(In Persian)

5-Rasouli S.A, Vahdati M, Jaberi A. The effect of machining parameter of magnetic abrasive finishing on free surface of aluminium alloy. Journal of manufacturing engineering. 2022. 8: p.63-75. (In Persian)

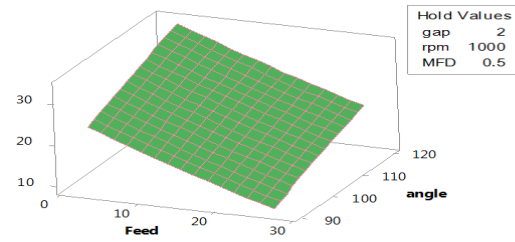
6- Purohit R, et al. Magnetic abrasive finishing of non-magnetic materials (Al 6061) using flexible magnetic brush. Materials Today: Proceedings. 2021. 44: p. 2205-2210.

7-Singh G, Kumar H. Influence of chemically assisted magnetic abrasive finishing process parameters on external roundness of Inconel 625 tubes. Materials Today: Proceedings. 2021. 37: p. 3283-3288.

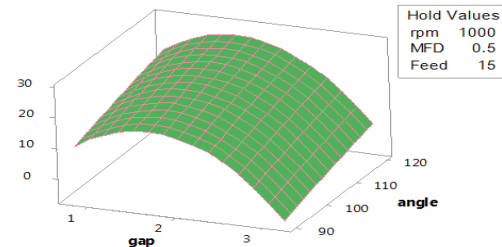
8-Zou Y, Xie H, Zhang Y. Study on surface quality improvement of the plane magnetic abrasive finishing process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. 109(7): p. 1825-1839.

9- Kanish T, Narayanan S, Kuppan P. Experimental investigations on magnetic field assisted abrasive finishing of SS 316L. Procedia Manufacturing, 2019. 30: p. 276-283.

10-Qian C, et al. A review on magnetic abrasive finishing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. 112(3): p. 619-634.



(الف)



(ب)

شکل ۷) تداخل اثر پارامترهای (الف) سرعت پیشروی و (ب) فاصله برس ساینده تا قطعه کار با زاویه‌ی انحناء بر میزان تغییرات زبری سطح

$$\begin{aligned} \Delta RA = & -175.6 + 2.7 \text{ gap} + 0.0619 \text{ rpm} + 252 \text{ MFD} - 2.53 \text{ Feed} \\ & + 1.99 \text{ angle} - 10.25 \text{ gap} \times \text{gap} - 0.000001 \text{ rpm} \times \text{rpm} \\ & - 114.9 \text{ MFD} \times \text{MFD} + 0.0035 \text{ Feed} \times \text{Feed} \\ & - 0.00144 \text{ angle} \times \text{angle} + 36.3 \text{ gap} \times \text{MFD} \\ & + 0.900 \text{ gap} \times \text{Feed} - 0.000500 \text{ rpm} \times \text{angle} - 1.750 \text{ MFD} \times \text{angle} \end{aligned} \quad (1)$$

۳-۲-۲-آزمایش بهینه

مقادیر بهینه‌ی پارامترها، متناسب با زاویه‌ی انحناء ۹۰ و ۱۲۰ درجه و حد مطلوبیت ۱ در جدول ۶ آورده شده است. با تنظیم پارامترها، مطابق با شرایط بهینه‌ی، ۲ آزمایش دیگر جهت تأییدیه‌ی مدل انجام می‌گیرد. مقادیر حاصل از اندازه‌گیری نمونه‌های آزمایش شده و پیش‌بینی شده توسط مدل در جدول ۶ آورده شده است. بیشینه میزان اختلاف ۱۲/۱٪ می‌باشد.

جدول ۶) مقادیر بهینه‌ی پارامترها به همراه نتایج آزمایش‌های تأیید مدل

اختلاف	مقادیر اندازه گیری شده	پیش‌بینی مقدار تغییرات	MFD	GAP	Feed	RPM	Angle		
	۴۶/۰۷	۰/۶۲	۱/۳۸	۳/۱	۱۹۵۱	۹۰			
	۴۴/۳	۰/۳۱	۰/۸۱	۳/۱	۸۷۵	۱۲۰		مقادیر بهینه	
	۱۱/۷	۳۰/۴	۴۲/۱	۰/۵	۱/۵	۳	۱۹۵۱	۹۰	آزمایش ۱
	۱۲/۱	۲۸/۳	۴۰/۴	۰/۳	۱	۳	۸۷۵	۱۲۰	آزمایش ۲

۴-نتیجه‌گیری

- ۱- بر اساس نتایج آزمایشات انجام شده بر سطح قطعه کار، تغییرات زبری بر سطح مقعر قابل توجه می‌باشد.
- ۲- با افزایش سرعت پیشروی از ۵ تا ۲۵ (میلی‌متر/دقیقه)، تغییرات زبری به میزان ۵۷/۳ درصد، کاهش می‌یابد.

- 11–Sathua C.S, et al. Analysis of forces and surface roughness in magnetic abrasive finishing with a ball-end tool. *International Journal of Precision Technology*. 2013. 3(2): p. 131-142.
- 12–Anzai M, Yoshida T, Nakagawa T. Magnetic abrasive automatic polishing of curved surface, focused on experimental equipments and characterization. *RIKEN Review No. 12*, 1996: p. 15-16.
- 13–Ding Y.H, et al. Study on the performances of the ferromagnetic poles based on the curved surface magnetic abrasive finishing. in *Key engineering materials*. 2008. Trans Tech Publ.
- 14–Sun Y, et al. Research on magnetic abrasive finishing for the free form surface of mould by 5-DOF parallel virtual axis machine tool. in *Key Engineering Materials*. 2004. Trans Tech Publ.