مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹٤، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص ۲٤۸-۲۵۶

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

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

اندازه‌گیری و شبیه‌سازی چگالی شار مغناطیسی وارد بر ذره ساینده در روش پرداخت-کاری سایشی مغناطیسی

مهرداد وحدتی[۱*]، سید علیرضا رسولی[۲]

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۹۹۹-۱۹۳۹۵، vahdati@kntu.ac.ir

چکیده

از روش‌های غیر سنتی پرداخت‌کاری که برای قطعات با شکل‌ها و جنس‌های مختلف مانند صفحات تخت، سطوح آزاد و پیچیده، و انواع لوله‌ها با قطرهای متفاوت و هر قطعه‌ای که نیاز به صافی سطح بسیار خوب داشته باشد، قابل استفاده است، پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی می‌باشد. مکانیزم براده برداری در حد بسیار کم (میکرو و نانو) را می‌توان با تشکیل جاروبک ساینده مغناطیسی که شامل ذرات مغناطیسی مانند آهن و ذرات ساینده مانند اکسید آلومینیوم، و غیره می‌باشد، توضیح داد. این بررسی شامل اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی در فاصله بین آهن‌ربا با شکل‌های مختلف و قطعه‌کار با جنس‌های متنوع شامل فرومغناطیس و غیر فرومغناطیس می‌باشد. اندازه‌گیری توسط دستگاه تسلامتر صورت گرفته است. همچنین جهت بررسی مدل‌ها و شرایط مختلف به شبیه‌سازی با بسته نرم‌افزاری المان محدود ماکسول نیز پرداخته شده است. تاثیر جنس فیکسچر آهن‌ربا و فیکسچر قطعات نیز بر روی نحوه شکل‌گیری میدان مغناطیسی و شدت آن بررسی شده است. این شبیه-سازی‌ها در هر دو حالت ۲ بعدی و ۳ بعدی انجام شده است.

کلید واژگان: پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی، آزمایشات، شبیه‌سازی، تسلامتر، نرم‌افزار ماکسول

Measurement and simulation of the magnetic flux density exerted on the abrasive particles in Magnetic abrasive finishing (MAF)

Mehrdad Vahdati*, Seyed Alireza Rasouli

Department of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 19395-1999 Tehran, Iran, vahdati@kntu.ac.ir

ABSTRACT

Magnetic abrasive finishing is non-traditional machining process which is applicable for various parts of different shapes and materials, such as flat plates of complex levels and types of pipes with different diameters and every piece that needs good surface finish. Removal mechanism, at the very least (Micro and Nano) can be explained by the formation of magnetic abrasive brushes which include magnetic particles such as iron and aluminum oxide abrasive particles. This study includes the measurement of the intensity of the magnetic field, the distance between the magnets and various forms of workpieces in a variety of materials, including ferromagnetic and non-ferromagnetic. Measurement was performed by tesla meter. The simulation was performed with Maxwell finite element software package to survey the methods and conditions. The effects of the magnet fixture material and fixture components have been studied on the formation of the magnetic field and its severity. These simulations were performed in both 2D and 3D.

Keywords: Abrasive Finishing, Experiment, Magnetic field, Simulation, Tesla Meter.

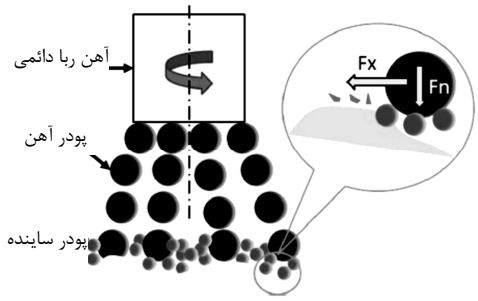
۱- مقدمه

نیاز روزافزون به سطوح پرداخت شده و دقیق در صنایع و ناتوانی روش‌های سنتی در بسیاری موارد، منجر به تحولات بسیاری در زمینه فرآیندهای تولید و پرداخت قطعات شده است. در روش‌های سنتی به‌دلیل این‌که ابزار مورد استفاده برای پرداخت صلب است، در مورد قطعات با منحنی‌های خاص قابلیت تطبیق با شکل قطعه را ندارد و حتی در برخی موارد سبب آسیب دیدن سطح کار می‌شود. برای پرداخت این سطوح نیاز به پرداخت به صورت دستی می‌باشد [۱]. این گونه پرداخت اغلب وقت‌گیر و هزینه‌بر است. بنابراین نیاز به روش‌های جدید که قابلیت پرداخت سطوح با اشکال هندسی و هم‌چنین جنس‌های مختلف را داشته باشند به شدت احساس می‌شود. در این راستا استفاده از میدان مغناطیسی به طور عمومی در کنترل فرآیند تولید و به طور خاص در پرداخت‌کاری مورد توجه واقع شده است. از جمله روش‌هایی که از میدان مغناطیسی برای کنترل براده‌برداری استفاده می‌کند پرداخت-کاری سایشی مغناطیسی است [۲]. مشخصه بارز این فرآیند استفاده از میدان مغناطیسی قابل کنترل برای مطابقت زنجیره سایشی مغناطیسی با فرم سطح ماشین‌کاری است. در این روش پودر ساینده مغناطیسی که یک مخلوط همگن از ذرات ساینده و ذرات فرومغناطیس مانند آهن است روی سطحی از قطعه‌کار که باید پرداخت شود قرار می‌گیرد. هنگامی که ذرات آهن در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، در امتداد خطوط نیروی مغناطیسی به هم متصل می‌شوند و تشکیل زنجیره مغناطیسی را می‌دهند. از اتصال زنجیره‌ها جاروبک ساینده انعطاف‌پذیر به وجود می‌آید. به علت وجود پودر ساینده دارای لبه‌های برنده در برس، جاروبک مانند یک ابزار چند لبه رفتار می‌کند. با حرکت میدان مغناطیسی نسبت به قطعه‌کار این توده پودری به

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. Vahdati, S.A. Rasouli, Measurement and simulation of the magnetic flux density exerted on the abrasive particles in Magnetic abrasive finishing (MAF), *Modares Mechanical Engineering*, *Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 248-256, 2015 (in Persian فارسی)



شکل ۱ شماتیکی از فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی

حرکت در می‌آید و برداشت ماده به‌صورت بسیار ظریف و ریز اتفاق می‌افتد و ناهمواری‌های در حد میکرومتر و نانومتر ماشین‌کاری می‌شوند [۳]. دمای ایجاد شده در فرایند مذکور در مقایسه با سایر روش‌های پرداخت‌کاری بسیار ناچیز می‌باشد. در شکل ۱ شماتیکی از فرایند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی نشان داده شده است [۴].

نیروی مغناطیسی از آهن‌ربا الکتریکی و دائمی حاصل می‌شود. با توجه به مشکلات آهن‌ربا الکتریکی مانند اشغال فضای زیاد و نیاز مبرم به سیستم خنک‌کاری از آهن‌ربا دائمی جهت تولید میدان مغناطیسی استفاده شده است [۵]. از تفاوت‌های عمده روش سایشی مغناطیسی با روش‌های سنتی مقدار نیروی اعمال شده بر ذرات ساینده می‌باشد. مقدار نیروی مغناطیسی وارد بر ذره ساینده در حد میکرونیوتن می‌باشد که باعث نفوذ بسیار ناچیز ذره ساینده در سطح قطعه‌کار می‌گردد. فشار پرداخت‌کاری وارد بر سطح قطعه-کار از رابطه (۱) به دست می‌آید [۶].

$$P = \frac{B^2}{2\mu_0}\left(1-\frac{1}{\mu_m}\right) = \left[\mu_0 H^2\left(1-\frac{1}{\mu_m}\right)\right]/2 \quad (۱)$$

$$\mu_m = \frac{2+\mu_F-2(1-\mu_F)V_i}{2+\mu_F-(1-\mu_F)V_i} \quad (۲)$$

در این رابطه مشخص است که فشار پرداخت‌کاری P رابطه مستقیم با شدت میدان مغناطیسی $H(\mathrm{KA-per-m})$، چگالی شار مغناطیسی $B(\mathrm{T})$، ضریب نفوذ مغناطیسی در خلا μ_0 و رابطه معکوس با ضریب نفوذ مغناطیسی جاروبک ساینده μ_m دارد. ضریب نفوذ مغناطیسی جاروبک ساینده از رابطه (۲) به‌دست می‌آید که درآن μ_F ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی آهن و V_i درصد حجمی ذرات آهن نسبت به کل پودر می‌باشد. با فرض یکسان بودن قطر تمامی ذرات ساینده میزان نیروی اعمالی بر ذرات مغناطیسی طبق رابطه (۳) و (۴) به دست می‌آید. همچنین با فرض این که در هر ذره مغناطیسی یک لبه ساینده وجود دارد مقدار نیروی اعمالی بر ذره ساینده به دست می‌آید.

$$F_n = PA \quad (۳)$$

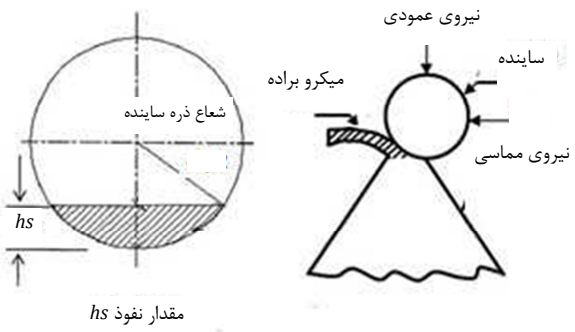
$$f_n = \frac{F_n}{n_a} \quad (۴)$$

که در آن F_n مقدار نیروی وارد بر سطح، A سطح مقطع آهن‌ربا، n_a تعداد ذرات ساینده واقع بر سطح آهن‌ربا می‌باشد. با در نظر گرفتن کروی بودن ذره ساینده میزان عمق نفوذ ذره ساینده h_s را در سطح قطعه‌کار می‌توان از رابطه (۵) به دست آورد [۷].

$$h_s = \frac{ds}{2} - \sqrt{\left(\frac{ds}{2}\right)^2 - \frac{f_n}{H_m \pi}} \quad (۵)$$

که در آن ds قطر ذره ساینده و H_m سختی قطعه‌کار می‌باشد. در شکل ۲ شماتیکی از ذره ساینده به همراه میزان نفوذ نشان داده شده است.

از آن‌جا که هدف رسیدن به زبری سطح کمتر از میکرومتر می‌باشد، بررسی و کنترل دقیق مقدار نیروی وارده بر ذره ساینده بسیار مهم است. در



شکل ۲ شماتیکی از ذره ساینده به همراه مقدار نفوذ

همین راستا بررسی رفتار منشأ نیروی مغناطیسی که همان آهن‌ربا دائم می‌باشد بسیار ضروری است. پیرامون شبیه‌سازی و اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی آهن‌ربا الکتریکی تحقیقاتی در گذشته صورت گرفته است [۹،۸].

میشرا و همکارانش در سال ۲۰۱۴ به شبیه‌سازی حرارتی جاروبک ساینده مغناطیسی در فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی پرداختند. دمای پیش‌بینی شده در جاروبک در محدوده ۵۱-۳۴°C می‌باشد [۱۰]. دای یانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۸ پارامترهای پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ را با روش تاگوچی بررسی کرده‌اند. جهت انتخاب آهن‌ربا دائمی مورد نیاز، آهن‌ربا استوانه‌ای توپر، توخالی و توخالی شیاردار را شبیه‌سازی کرده‌اند [۱۱]. جوی سائب در سال ۲۰۱۱ آهن‌ربا الکتریکی را در میز آهن‌ربا جهت پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی صفحات منیزیمی شبیه‌سازی کرده است. تاثیر آهن‌ربای با قطب مخالف در زیر قطعه-کار بررسی شده است [۱۲]. جای سائب همچنین اثر آهن‌ربا مخالف را در فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی توسط آهن‌ربا دائمی در سال ۲۰۰۹ توسط شبیه‌سازی بررسی کرده است [۱۳].

در این مطالعه با توجه به شکل و سایز آهن‌ربا دائمی، جنس قطعه‌کار، جنس فیکسچر قطعات و جنس فیکسچر آهن‌ربای دائمی به اندازه‌گیری و شبیه‌سازی چگالی میدان مغناطیسی، شدت میدان مغناطیسی و در نهایت نیروی مغناطیسی وارده بر ذره ساینده پرداخته شده است.

۲- بررسی ابعاد هندسی آهن‌ربای دائمی

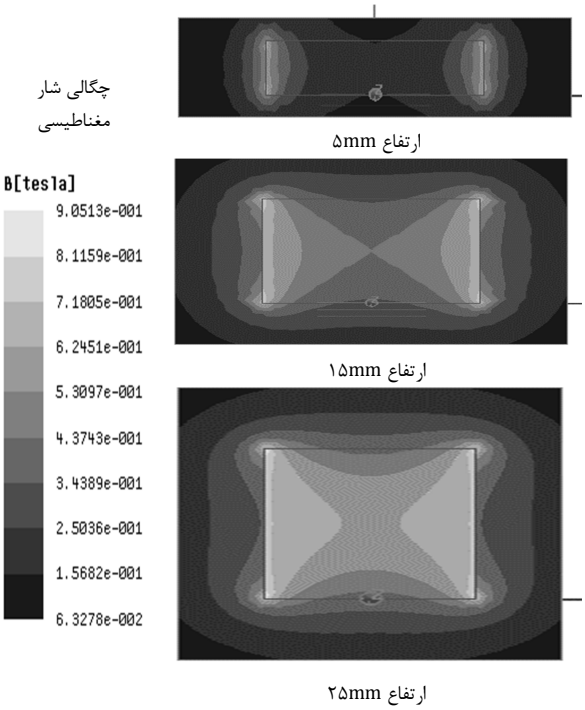
از آن‌جا که در فرآیند پرداخت کاری سایشی مغناطیسی سطوح تخت، آهن‌ربا دارای حرکت دورانی می‌باشد، از آهن‌ربا استوانه‌ای استفاده می‌شود. قطر و ارتفاع آهن‌ربا و همچنین تعداد آهن‌ربا مورد استفاده در حالت دوبعدی و سه بعدی شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار المان محدود ماکسول صورت گرفته است. شاید تصور شود که بطور مثال هر نوع آهن‌ربا Nd۳۵، ۱/۳ تسلا در سطح آهن‌ربا همان مقدار چگالی شار مغناطیسی اسمی را دارد. در حالی‌که با توجه به ابعاد آهن‌ربا و شرایط مجاورتی آهن‌ربا مقدار چگالی شار مغناطیسی خروجی متفاوت می‌باشد. به همین خاطر تسلط بر نوع رفتار آهن‌ربا در سایزهای گوناگون و شرایط هم‌جواری متفاوت جهت بررسی نیروی مغناطیسی وارد بر ذرات ساینده مغناطیسی و در نتیجه میزان عمق نفوذ ذره ساینده بسیار مهم می‌باشد.

۲-۱- بررسی ارتفاع آهن ربا دائمی

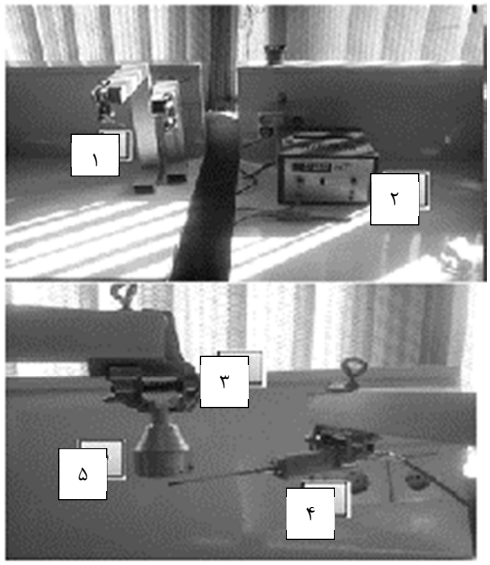
آهن‌ربای دائمی N۳۵ با قطر ۲۰ میلی‌متر و با ارتفاع‌های ۲۵،۲۰،۱۵،۱۰،۵

میلی‌متر به صورت ۲ بعدی شبیه‌سازی شده است. شکل ۳ چگالی شار مغناطیسی را در ارتفاع‌های مختلف نشان می‌دهد.

تایید شبیه‌سازی و بررسی تاثیر ارتفاع آهن‌رباهای استوانه‌ای آزمایشاتی نیز انجام شده است. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری توسط گوس سنج (PHWVE– در محدوده ۲-۰ تسلا) در سطح آهن‌ربا، و فواصل ۱و ۲ میلی‌متری از سطح آهن‌ربا و در ۳ موقعیت صورت گرفته است. تمامی تجهیزات مورد استفاده در اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی از مواد غیرفرومغناطیس ساخته شده است (شکل۴).



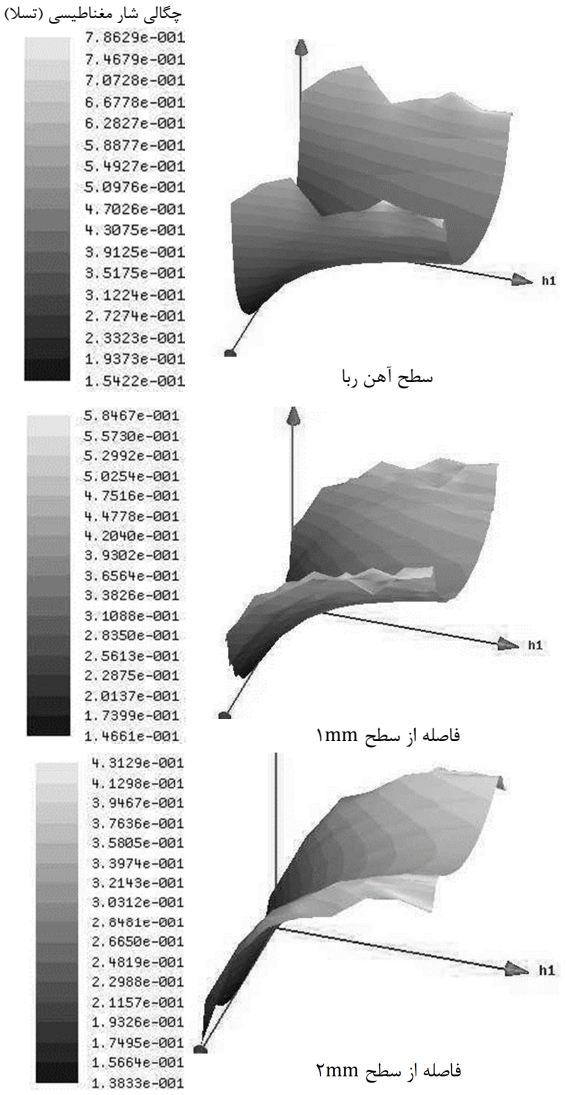
شکل۳ شدت میدان مغناطیسی (H) در ارتفاع‌های متفاوت (آهن‌ربا N۳۵ با قطر ۲۰mm)



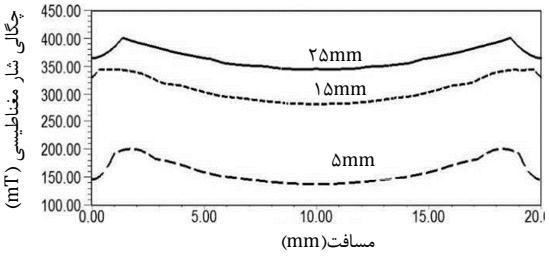
شکل ۴ تجهیزات اندازه‌گیری ۱)پایه‌های آلومینیومی ۲) دستگاه تسلامتر PHWVE بهمراه پروپ۳) گیره آلومینیومی۴) پروپ اندازه‌گیری ۵) فیکسچر آلومینیومی آهن‌ربا

با توجه به منحنی‌های شکل ۵ مشهود است که در قطر ثابت با افزایش ارتفاع آهن‌ربا میزان شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار افزایش پیدا می‌کند. تفاوت چشمگیر مقادیر لبه‌های کناری آهن‌ربا و سایر نواحی به علت اثر لبه می‌باشد که در سطوح لبه‌دار آهن‌ربا صورت می‌گیرد و با فاصله گرفتن از سطح آهن‌ربا این پدیده نیز کاهش پیدا می‌کند.

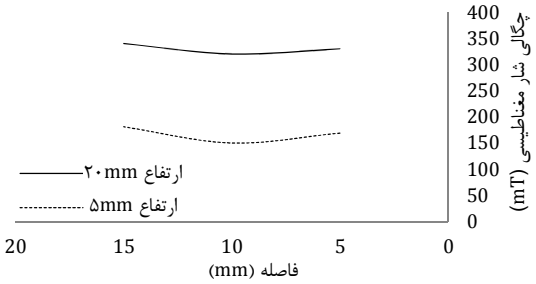
در شکل ۶ نمودار توزیع چگالی شار مغناطیسی حاصل از شبیه‌سازی در فاصله ۲میلی‌متری از سطح آهن‌ربا آورده شده است. در شکل ۷ نیز مقادیر اندازه‌گیری شده از فاصله ۲میلی‌متری از سطح آهن‌رباهای با قطر ۲۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵ و۲۰ میلی‌متر آورده شده است. میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در فواصل مختلف از سطح آهن‌رباهای مذکور در جدول شماره۱ آورده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود روند تغییرات در نمودارهای شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده با یکدیگر مطابقت دارد. تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در کمترین حالت ٪۴ و در بیشترین حالت ٪۱۴ می‌باشد. مقادیر شبیه‌سازی از مقادیر اندازه‌گیری بیشتر است.



شکل۵ چگالی شار مغناطیسی (B) در آهن‌ربا با ارتفاع‌های گوناگون (سطح آهن‌ربا و فواصل ۱و ۲ میلی‌متر)



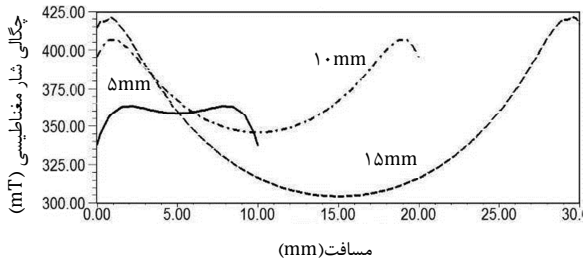
شکل۶ توزیع چگالی شار مغناطیسی (میلی تسلا) در آهن‌ربا با قطر ۲۰ میلی‌متر و ارتفاع‌های مختلف در فاصله ۲ میلی‌متر از سطح (شبیه‌سازی)



شکل۷ توزیع چگالی شار مغناطیسی در فاصله ۲میلی‌متری از سطح آهن‌ربا های با قطر ۲۰ و ارتفاع‌های ۵ و ۲۰ میلی‌متر (اندازه‌گیری)

جدول ۱مقادیر متوسط شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده چگالی شار مغناطیسی (میلی تسلا) در فواصل مختلف از آهن‌ربا

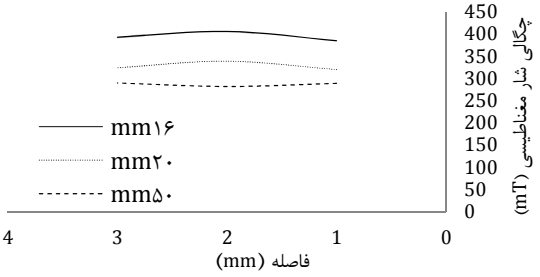
آهن‌ربای N35 قطر۲۰ mm (مقدار متوسط)	ارتفاع ۵ mm شبیه‌سازی	ارتفاع ۵ mm اندازه‌گیری	ارتفاع ۲۰ mm شبیه‌سازی	ارتفاع ۲۰ mm اندازه‌گیری
سطح آهن ربا	۲۶۴/۱	۲۴۳/۳۳	۵۰۳	۴۴۳
فاصله= ۱ mm	۲۰۸	۲۰۰	۴۲۲/۹	۳۷۱
فاصله= ۲ mm	۱۷۸/۳	۱۶۶/۶۶	۳۷۱	۳۴۰



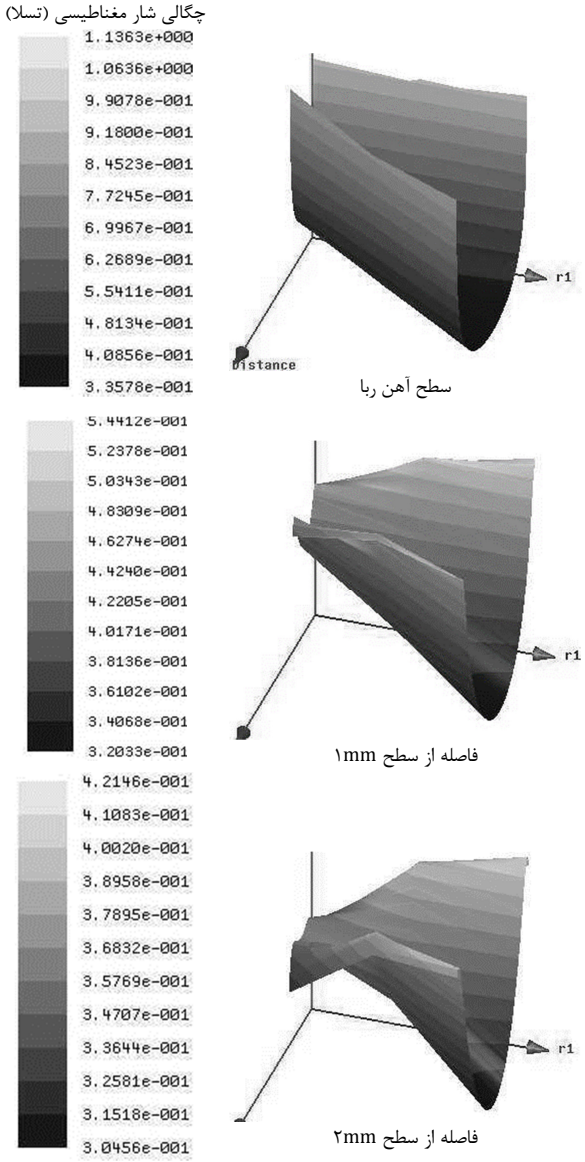
شکل ۸ توزیع چگالی شار مغناطیسی در آهن‌ربا دائمیN۳۵ با ارتفاع ۲۰ میلی‌متر و قطرهای متفاوت در فاصله ۲میلی‌متری از سطح آهن‌ربا (شبیه‌سازی)

۲-۲- بررسی قطر آهن‌ربا دائمی

ارتفاع آهن‌ربا شبیه‌سازی شده ۲۰ میلی‌متر است. قطر ۱۰ میلی‌متر بیشترین میزان چگالی شار مغناطیسی را خواهد داشت. در شکل ۸ نمودار توزیع چگالی شار مغاطیسی ناشی از شبیه‌سازی در فاصله ۲ میلی‌متر از سطح آهن-ربا با قطرهای گوناگون دیده می‌شود. در شکل ۹ مقادیر اندازه‌گیری شده چگالی شار مغناطیسی آهن‌رباهای با ارتفاع ۲۰ و قطرهای ۱۶، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر در فاصله ۲میلی‌متری آورده شده است. مانند قسمت قبل، بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی مطابقت وجود دارد. شکل۱۰ میزان تغییرات چگالی شار مغناطیسی را در سطح و با فواصل ۱ و ۲ میلی‌متری از سطح آهن‌ربا نشان می‌دهد.



شکل ۹ مقادیر اندازه‌گیری شده چگالی شار مغناطیسی در آهن‌رباهای با ارتفاع ثابت و قطر متغیر



شکل۱۰ توزیع چگالی شار مغناطیسی در آهن‌ربا با ارتفاع ۲۰mm و قطرهای متفاوت (در فواصل مختلف از سطح آهن‌ربا)

بیشترین میزان متوسط در آهن‌ربا در محدوده قطر ۱۵ تا ۲۰ میلی‌متر و با ارتفاع ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. همان‌طورکه مشهود است با کاهش قطر تغییرات میزان چگالی شار نیز کمتر می‌شود. به طور کلی از لحاظ ساختار هندسی آهن‌ربای استوانه‌ای را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. آهن‌رباهای دیسکی (آهن‌رباهایی که قطر از ارتفاع بیشتر است) و یا آهن‌رباهای استوانه‌ای که ارتفاع آن‌ها از قطرشان بیشتر است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی و اندازه-گیری مشخص است که استفاده از آهن‌رباهای استوانه‌ای به علت یکنواختی بیشتر چگالی شار مغناطیسی در سطح آهن‌ربا در فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی نتایج بهتری را رقم می‌زند.

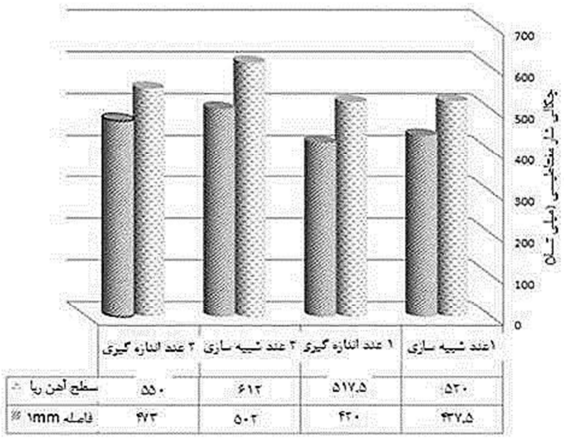
۲-۳- تاثیر تعداد آهن‌ربا

در بعضی مواقع جهت افزایش شدت میدان آهن‌ربا، آهن‌رباها را از سمت قطب مخالف به یکدیگر متصل می‌کنند. همان‌طورکه مشخص است با اتصال آهن‌رباها شدت میدان چند برابر نمی‌گردد. در شکل ۱۱ نمودار مقادیر اندازه-گیری و شبیه‌سازی چگالی شار مغناطیسی ۱ و ۲ عدد آهن‌ربا بر روی سطح و فاصله ۱میلی‌متری از سطح آورده شده است.

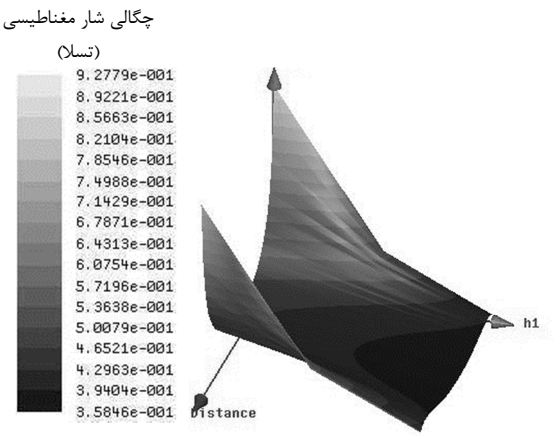
۲-۴- اثر فاصله از آهن‌ربا

از نکات بسیار مهم در میزان شدت میدان مغناطیسی گپ یا فاصله از سطح آهن‌ربا می‌باشد. در فرآیند MAF مقدار بهینه گپ بسیار مهم می‌باشد. در یک آهن‌ربا ثابت با ایجاد فاصله از سطح آهن‌ربا میزان شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی کاهش پیدا می‌کند. اگر فاصله بین سطح قطعه‌کار و سطح آهن‌ربا در فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی بیش از حد کم باشد، برس ساینده صلب شده و باعث خراشیدگی سطح قطعه‌کار می‌گردد و اگر گپ بیش از حد زیاد باشد آهن‌ربا در سرعت‌های دورانی بالا توان نگهداری پودر ساینده مغناطیسی را نخواهد داشت. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ تاثیر گپ در آهن‌ربای دائمیN۳۵ با ابعاد ۱۶mm قطر و ۲۰mm ارتفاع نشان داده شده است. البته لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی فاصله گپ، هوا با نفوذ مغناطیسی (μ=۱) در نظر گرفته شده است.

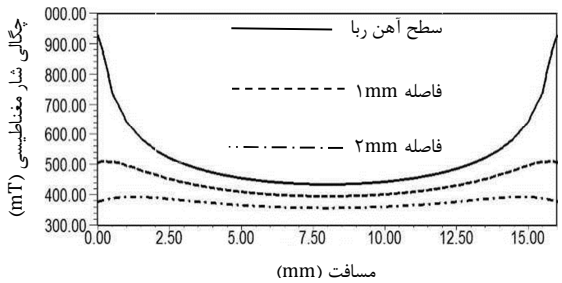
طبق رابطه $B = \mu H$ رفتار شدت میدان و چگالی شار با یکدیگر متناسب می-باشد. البته این هماهنگی در شرایطی است که در رابطه ضریب μ ثابت باشد. در بسیاری از مواد ضریب نفوذ مغناطیسی مواد در شدت میدان‌های مختلف



شکل ۱۱مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده چگالی شار مغناطیسی ۱و ۲ عدد آهن‌ربا (در سطح و فاصله ۱mm)



شکل ۱۲ چگالی شار مغناطیسی آهن‌ربا قطر ۱۶mm و ارتفاع ۲۰mm در فواصل مختلف از آهن‌ربا



شکل ۱۳ توزیع چگالی شار مغناطیسی (B) در فواصل مختلف از آهن‌ربا

متفاوت است. رابطه شدت میدان و چگالی شار به صورت منحنی می‌باشد. همچنین در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که با فاصله‌گیری از سطح آهن‌ربا رفتار منحنی چگالی شار مغناطیسی تغییر پیدا می‌کند و از حالت تقعر به حالت ثابت و تا حدی تحدب تبدیل می‌گردد.

۲-۵- بررسی تاثیر جنس قطعه‌کار، فیکسچر آهن‌ربا و فیکسچر قطعه‌کار بر چگالی شار مغناطیسی

واضح است که در حین انجام فرآیند پرداخت‌کاری سایشی مغناطیسی، آهن-ربا در داخل فیکسچر قرار می‌گیرد. جنس قطعه‌کار و جنس فیکسچر قطعه-کار و فیکسچر آهن‌ربا از لحاظ خصوصیات مغناطیسی بر میزان شدت میدان آهن‌ربا و همچنین نحوه پراکندگی شدت میدان مغناطیسی در سطح آهن‌ربا بسیار تاثیرگذار است. درصد وزنی ذرات فرومغناطیس در برس ساینده نیز بر مقدار چگالی و شدت میدان مغناطیسی و بالتبع بر میزان فشار پرداخت‌کاری و نیروی مغناطیسی اثر می‌گذارد. لازم به ذکر است که یکنواختی میزان شدت میدان در سطح آهن‌ربا نیز بسیار مهم می‌باشد. اگر تفاوت چگالی شار مغناطیسی بین مرکز و لبه آهن‌ربا زیاد باشد بر میزان تغییرات زبری سطح اثر نامناسبی می‌گذارد. شبیه‌سازی صورت گرفته با درنظرگرفتن ۳ فاکتور و هر فاکتور ۲ سطح انجام شده است. آلومینیوم با ضریب نفوذ مغناطیسی نزدیک به ۱ جزء مواد غیرفرومغناطیس بوده و فولاد جزء مواد فرومغناطیس می‌باشد. در شبیه‌سازی و آزمایشات از این مواد استفاده شده است. جهت بدست آوردن فاکتورهای موثر بر میزان چگالی شار مغناطیسی از روش‌های آماری طراحی آزمایشات جهت انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. از روش فول

فاکتوریال[1] جهت طراحی مراحل شبیه‌سازی استفاده شده است. شکل ۱۴مدل شبیه‌سازی شده را در حالت‌های ۲ بعدی و ۳ بعدی نشان می‌دهد. تمامی پارامترهای شبیه‌سازی شده به همراه سطوح انتخابی آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

مقدار میانگین چگالی شار مغناطیسی در فاصله ۲ میلی‌متری از سطح آهن‌ربا به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. در جدول ۳ شبیه‌سازی-های صورت گرفته به همراه مقادیر خروجی آورده شده است. با آنالیز آماری واریانس[2] بر روی مقادیر خروجی، فاکتورهای موثر و همچنین نحوه تاثیر آن-ها بر میزان چگالی شار مغناطیسی به دست می‌آید. در جدول ۳ مقادیر مربوط به آنالیز واریانس آورده شده است. نرم‌افزار مینی‌تب[3] نسخه۱۶، برای تحلیل و تفسیر نتایج و همچنین به دست آوردن ضرایب معادله ریاضی حاکم بر آزمایش استفاده شده است. لازم به ذکر است که متغیرهایی در فرآیند موثر هستند که مقدار p بدست آمده با توجه به قابلیت اطمینان ۹۵ درصد برای آن‌ها از ۰/۰۵کمتر باشد. بر همین اساس جنس قطعه‌کار و جنس فیکسچر قطعه‌کار و برهم‌کنش این دو فاکتور موثر می‌باشند.

طبق شکل‌های بالا مشخص است که تغییر جنس قطعه‌کار و جنس فیکسچر قطعه‌کار بر میزان چگالی شار مغناطیسی تاثیر می‌گذارد ولی جنس فیکسچر آهن‌ربا تاثیر چندانی ندارد. هم‌چنین از اثر برهم‌کنش فاکتورها مشخص است که در قطعه‌کار فرومغناطیس، فیکسچر قطعه‌کار فرومغناطیس باعث افزایش چگالی شار مغناطیسی می‌گردد. البته در شرایطی که قطعه‌کار غیرفرومغناطیس باشد تاثیر فیکسچر قطعه‌کار فرومغناطیس خیلی بیشتر است. هم‌چنین در شرایطی که فیکسچر قطعه‌کار فرومغناطیس باشد، فیکسچر غیرفرومغناطیس آهن‌ربا باعث افزایش بیشتر چگالی شار مغاطیسی بر سطح قطعه‌کار می‌گردد.

جدول ۲ فاکتورها و سطوح انتخابی آن‌ها

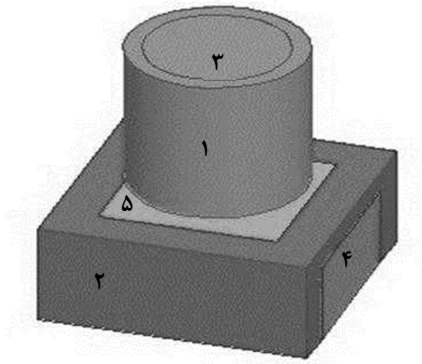
فاکتور	سطح	
جنس قطعه‌کار	Al7075	Steel108
جنس فیکسچر قطعه‌کار	Al7075	Steel1080
جنس فیکسچر آهن‌ربا	Al7075	Steel1080

جدول ۳ شبیه‌سازی‌های انجام شده و مقادیر

شماره شبیه سازی	جنس قطعه‌کار	جنس فیکسچر قطعه‌کار	جنس فیکسچر آهن‌ربا	چگالی شار مغناطیسی(میلی تسلا)
۱	Al	Al	Al	۰/۳۷
۲	steel	Al	Al	۰/۵۳
۳	Al	steel	Al	۰/۵۰۴
۴	steel	steel	Al	۰/۶۱۹
۵	Al	Al	steel	۰/۳۷۸
۶	steel	Al	steel	۰/۵۵
۷	Al	steel	steel	۰/۴۸۸
۸	steel	steel	steel	۰/۶۱

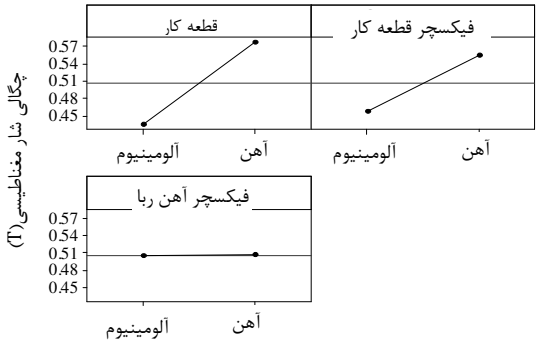
جدول۴ داده‌های خروجی آنالیز واریانس

پارامتر	درجات آزادی	عدد فیشر	مقدار P
فاکتور های اصلی	۳	۶۳۷۶/۲۵	۰/۰۰۹
جنس قطعه‌کار	۱	۱۲۹۵۰/۴	۰/۰۰۶
جنس فیکسچر قطعه‌کار	۱	۶۱۷۷/۹۶	۰/۰۰۸
جنس فیکسچر آهن‌ربا	۱	۰/۳۶	۰/۶۵۶
بر هم کنش ها	۳	۱۶۲/۶۰	۰/۰۵۸
قطعه کار×فیکسچرقطعه کار	۱	۳۶۱/۶۰	۰/۰۳۳
قطعه کار×فیکسچر آهن ربا	۱	۱۴/۴۴	۰/۱۶۴
فیکسچرقطعه کار×فیکسچر آهن ربا	۱	۳۶/۱۲	۰/۰۶
خطا	۱		
مجموع	۷		

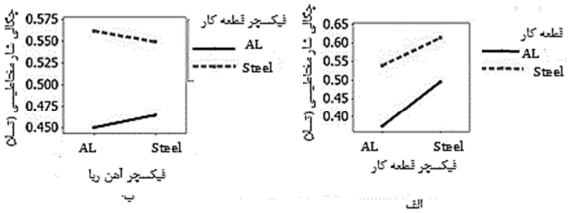


شکل۱۴ مدل استفاده شده در شبیه‌سازی ۳ بعدی ۱) فیکسچر آهن‌ربا ۲) فیکسچر قطعه‌کار ۳) آهن‌ربا ۴) آهن‌ربا ۵) قطعه‌کار

نمودار تاثیر فاکتورهای اصلی و بر هم کنش فاکتورها در شکل‌های ۱۵و ۱۶ آورده شده است.



شکل۱۵ اثر فاکتورهای اصلی



شکل۱۶ اثر بر هم‌کنش‌ها الف) برهم‌کنش قطعه‌کار و فیکسچر قطعه‌کار ب) فیکسچر قطعه‌کار و فیکسچر آهن‌ربا

1. Full factorial
2. Analysis of variance (ANOVA)
3. Minitab

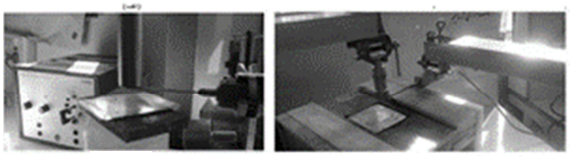
براساس نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در نهایت مدل رگرسیون برای پیش‌بینی مقدار چگالی شار مغناطیسی طبق رابطه (۶) بدست آمده است. مقدار چگالی شار مغناطیسی (B) به عنوان متغیر وابسته و جنس قطعه‌کار (W.P)، جنس فیکسچر قطعه کار (W.P fixture) و جنس فیکسچر آهن‌ربا (*magnet fixture*) به عنوان متغیرهای مستقل می‌باشند.

$$B(T) = 0.506 + 0.07 \times W.P + 0.04 \times W.P\ Fixture - 0.011 \times w.p \times w.p\ fixture \quad (۶)$$

در شکل ۱۷ اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی در شرایط مختلف نشان داده شده است. در شکل۱۷- الف فیکسچر قطعه‌کار و فیکسچر آهن‌ربا و همچنین قطعه‌کار غیر فرومغناطیسی می‌باشند. در شکل ۱۷- ب فیکسچر آهن‌ربا و فیکسچر قطعه‌کار فرومغناطیسی و قطعه‌کار غیرفرومغناطیسی می‌باشد.

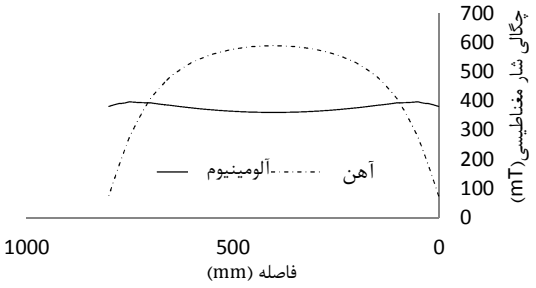
در شکل ۱۸ نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی تاثیر جنس قطعه‌کار و جنس فیکسچر قطعه‌کار آورده شده است. در شکل ۱۸ جنس فیکسچر قطعه‌کار و فیکسچر آهن‌ربا آلومینیومی می‌باشد. اثر تغییر جنس قطعه‌کار بررسی شده است. علت تفاوت در ایجاد حلقه بسته آهن‌ربا با قطعات فرومغناطیسی می‌باشد. به تعبیر دیگر قطعات فرومغناطیسی در مقابل آهن‌ربا مانند قطب مخالف عمل می‌کنند. همچنین جهت تقعر و تحدب منحنی در مقابل قطعات با جنس‌های مختلف نیز در شکل ۱۸دیده می‌شود. هماهنگی بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشات مشخص است. در قطعات فرومغناطیس میزان چگالی شار مغناطیسی در مرکز بیشتر از اطراف آهن‌ربا می‌باشد. در حالی‌که در قطعات غیرفرومغناطیسی برعکس می‌باشد. همچنین مقادیر چگالی شار مغناطیسی در مواد فرومغناطیس بیشتر می‌باشد.

همچنین در شکل ۱۹ تصویر ۳ بعدی حاصل از شبیه‌سازی مربوط به تغییر جنس قطعه‌کار و فیکسچر قطعه‌کار آورده شده است. در شکل۱۹- الف جنس همه قطعات غیرفرومغناطیس می‌باشد، در ۱۹- ب جنس قطعه‌کار فرومغناطیس و مابقی غیرفرومغناطیس و در ۱۹- ج جنس فیکسچر قطعه‌کار فرومغناطیس و مابقی غیرفرومغناطیس می‌باشند. همان طور که مشخص است اثر فیکسچر قطعه‌کار فرومغناطیسی نیز مانند قطعه‌کار فرومغناطیسی می‌باشد. در هنگام پولیش‌کاری مواد غیرفرومغناطیس یکی از راه‌های افزایش

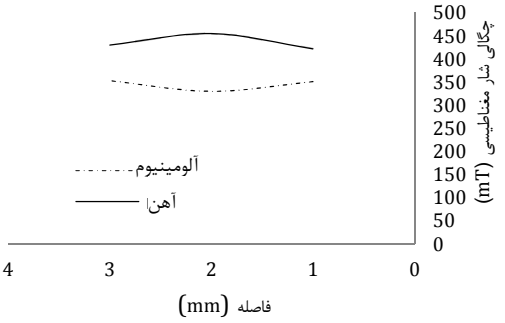


ب الف

شکل۱۷ اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی الف) همگی قطعات غیر فرومغناطیس ب) فیکسچر قطعه‌کار و آهن‌ربا فرومغناطیس، قطعه‌کار غیر فرومغناطیس



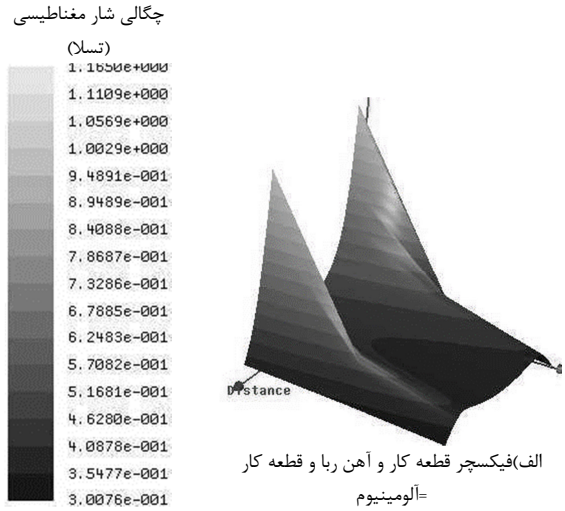
الف) شبیه سازی



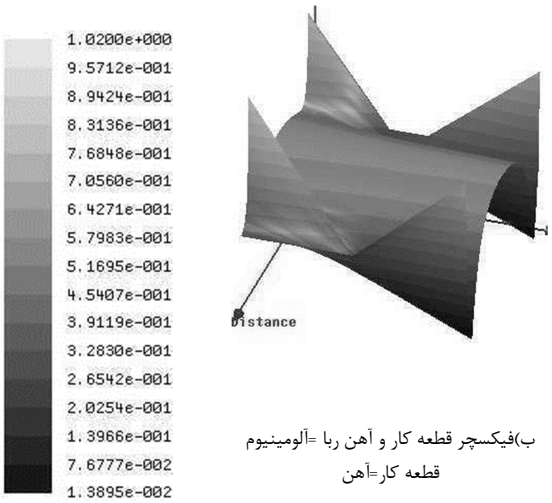
ب) اندازه گیری

شکل ۱۸ شبیه‌سازی و اندازه‌گیری تاثیر جنس قطعه‌کار بر چگالی شار مغناطیسی

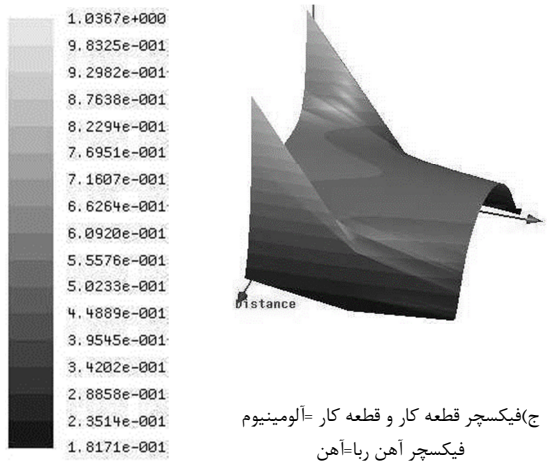
میزان چگالی شار مغناطیسی و ایجاد مدار بسته استفاده از فیکسچر فرومغناطیسی می‌باشد. البته افزایش چگالی شار مغناطیسی در مرکز با توجه به این مطلب که سرعت برشی در مرکز (با توجه به $V = \frac{\pi DN}{60}$) کمتر می‌باشد، می‌تواند باعث خراشیدگی سطح قطعه کار گردد. شیاردار کردن آهن‌ربا یا استفاده از آهن‌رباهای رینگی مواردی است که جهت جلوگیری از این پدیده انجام می‌گیرد. جهت تایید این مطلب نحوه تشکیل جاروبک ساینده در حالت‌های مختلف در شکل ۲۰ نشان داده شده است. زاویه بسته و تمرکز پودرها در قطعه‌کارهای جنس آهنی و یا با فیکسچر آهنی دیده می‌شود. در شکل۲۰- الف قطعه‌کار آهنی و در ۲۰- ب قطعه‌کار از جنس آلومینیوم می‌باشد. نحوه تمرکز پودر بر روی سطح قطعه‌کار آهنی و پراکندگی پودر در قطعه‌کار آلومینیومی در حال حرکت دورانی مشخص است. در شکل ۲۱ نحوه تشکیل زنجیره‌های مغناطیسی دیده می‌شود. پودر استفاده شده از ذرات استیل با قطر۱ میلی‌متر است. جهت بهتر دیده شدن تشکیل جاروبک ساینده مغناطیسی از ذرات نسبتا بزرگ استفاده شده است. در شکل۲۱- الف فیکسچر آهن‌ربا از جنس آلومینیوم و در ۲۱- ب از آهن می‌باشد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود در فیکسچر آهنی مقداری از پودر جذب لبه‌های کناری فیکسچر می‌شود که البته در مغناطیسی فرآیند پرداخت کاری سایشی مواد غیر فرومغناطیس می‌تواند تا حدی باعث افزایش کارآمدی گردد ولی در پولیش‌کاری قطعات فرومغناطیس مناسب نمی‌باشد.



الف)فیکسچر قطعه کار و آهن ربا و قطعه کار =آلومینیوم

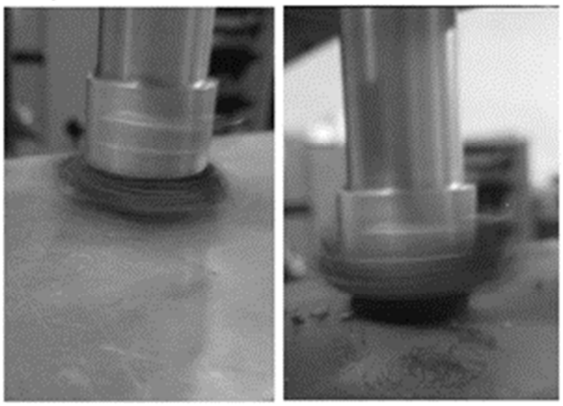


ب)فیکسچر قطعه کار و آهن ربا =آلومینیوم
قطعه کار=آهن



ج)فیکسچر قطعه کار و قطعه کار =آلومینیوم
فیکسچر آهن ربا=آهن

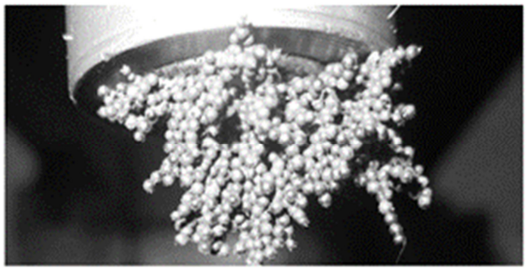
شکل ۱۹ توزیع ۳بعدی چگالی شار مغناطیسی در فاصله ۲میلی‌متری از سطح آهن‌ربا



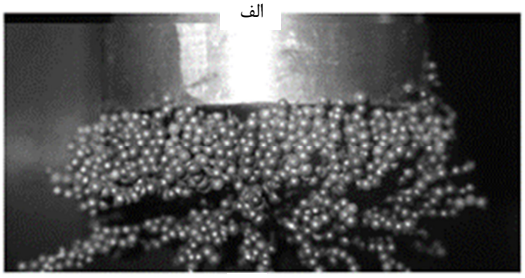
الف ب

شکل ۲۰ الف) قطعه‌کار آهنی ب) قطعه‌کار آلومینیومی

در فیکسچر آلومینیوم پودر به لبه‌های پایینی فیکسچر متصل نمی‌گردد. البته لازم به ذکر است پیرامون لبه‌های جانبی فیکسچرها این رفتار متفاوت می‌باشد. به این معنی که به بدنه فیکسچر آلومینیومی پودرها به راحتی متصل می‌گردند در حالی‌که در فیکسچر آهنی چنین رفتاری دیده نمی‌شود. همان‌طورکه در قبل نیز دیده شد بدنه آهنی فیکسچر آهن‌ربا مانند مسیر برگشت خطوط میدان عمل کرده و مدار بسته آهن‌ربا با بدنه تشکیل می‌گردد. درحالی‌که در فیکسچر آلومینیومی چنین اتفاقی رخ نمی‌دهد. در شکل ۲۲ نحوه ایجاد حلقه بسته دیده می‌شود. در شکل۲۲- الف فیکسچر قطعه‌کار فرومغناطیس ودر شکل۲۲- ب فیکسچر آهن‌ربا فرومغناطیس می‌باشد. سایر قطعات نیز غیر فرومغناطیس می‌باشند.

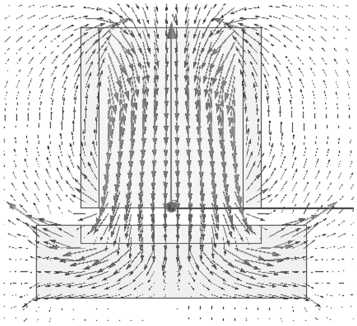


الف

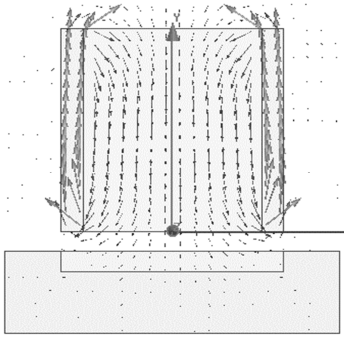


ب

شکل ۲۱ الف) فیکسچر آهن‌ربا غیرفرومغناطیس ب) فیکسچر آهن‌ربا فرومغناطیس



الف) فیکسچر قطعه‌کار فرومغناطیس



ب) فیکسچر آهن ربا فرومغناطیسی

شکل۲۲ نحوه ایجاد مدار بسته الف) فیکسچر قطعه‌کار فرومغناطیس ب) فیکسچرآهن‌ربا فرومغناطیس

۳- نتیجه‌گیری

در آهن‌ربا دائمی با قطر ثابت با افزایش ارتفاع میزان چگالی شار مغناطیسی و شدت میدان مغناطیسی افزایش پیدا می‌کند.

در آهن‌ربا دائمی با ارتفاع ثابت با افزایش قطر میزان چگالی شار مغناطیسی کاهش و میزان تغییرات آن در سطح آهن‌ربا افزایش پیدا می‌کند.

با قرار دادن ۲ عدد آهن‌ربا (استوانه ای قطر ۱۶mm و ارتفاع ۲۰mm) روی یکدیگر میزان چگالی شار مغناطیسی در فاصله ۱ میلی‌متری از سطح آهن‌ربا در شبیه‌سازی تا ٪۱۵ ودر اندازه‌گیری تا ٪۱۳ افزایش پیدا می‌کند.

با افزایش فاصله از سطح آهن‌ربا میزان چگالی شار مغناطیسی و اثر پدیه لبه کاهش پیدا می‌کنند.

میزان نیروی وارده بر ذره ساینده (با قطر ۱۰ میکرون) در آهن‌ربا استوانه‌ای و در فاصله ۲میلی‌متر از سطح آهن‌ربا $۲/۳\times۱۰^{-۷}$ نیوتن و همچنین میزان عمق نفوذ در سطح $۱۰^{-۸}\times$ ۴ متر می‌باشد.

جنس قطعه‌کار، جنس فیکسچر قطعه‌کار و برهم کنش این دو فاکتور بـر میزان چگالی شار مغناطیسی موثر می‌باشند.

جهت تمرکز پودر ساینده مغناطیسی در فرآیند پولیش‌کاری قطعات غیرفرومغناطیسی می‌توان فیکسچر این نوع قطعات را از جنس فرومغناطیس تهیه کرد.

جنس فیکسچر آهن‌ربا تاثیر چندانی در میزان چگالی شار مغناطیسی ندارد. البته جهت افزایش کارآمدی فرآیند سایشی مغناطیسی قطعات فرومغناطیس بهتر است از جنس غیرفرومغناطیس استفاده شود.

٤- مراجع

[1] V. Jain, Magnetic field assisted abrasive based micro-/nano-finishing, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 209, No. 20, pp. 6022-6038, 2009.

[2] N. Jain, V. Jain, S. Jha, Parametric optimization of advanced fine-finishing processes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 34, No. 11-12, pp. 1191-1213, 2007.

[3] S. Jha, V. Jain, *Nanofinishing techniques*, in: *Micromanufacturing and nanotechnology*, Eds., pp. 171-195: Springer, 2006.

[4] V. Ganguly, T. Schmitz ,A. Graziano, H. Yamaguchi, Force Measurement and Analysis for Magnetic Field–Assisted Finishing, *Journal of Manufacturing Science and Engineering,* Vol. 135, No. 4, pp. 041016, 2013.

[5] Y. M. Hamad, Improvement of Surface Roughness Quality for Stainless Steel 420 Plate Using Magnetic Abrasive Finishing Method, *Al-Khwarizmi Engineering Journal,* Vol. 6, No. 4, pp. 10 - 20, 2010.

[6] R. S. Mulik, P. M. Pandey, Experimental investigations and modeling of finishing force and torque in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing, *Journal of Manufacturing Science and Engineering,* Vol. 134, No. 5, pp. 051008, 2012.

[7] S. Jayswal, V. Jain, P. Dixit, Modeling and simulation of magnetic abrasive finishing process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 26, No. 5-6, pp. 477-490, 2005.

[8] D. K. Singh, V. Jain, V. Raghuram, Parametric study of magnetic abrasive finishing process, *Journal of materials processing technology,* Vol. 149, No. 1, pp. 22-29, 2004.

[9] D. K. Singh, V .Jain, V. Raghuram, Experimental investigations into forces acting during a magnetic abrasive finishing process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 30, No. 7-8, pp. 652-662, 2006.

[10] V. Mishra, H. Goel, R. S. Mulik, P .Pandey, Determining work-brush interface temperature in magnetic abrasive finishing process, *Journal of Manufacturing Processes,* Vol. 16, No. 2, pp. 248-256, 2014.

[11] L.-D. Yang, C.-T. Lin, H.-M. Chow, Optimization in MAF operations using Taguchi parameter design for AISI304 stainless steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 42, No. 5-6, pp. 595-605, 2009.

[12] J.-S. Kwak, H.-S. Kang, Assessment on magnetic flux density of magnetic array table in magnetic abrasive polishing process, *Proceeding of the International Multi-Conference of Engineering and Computer Scientists (IMECS), Hong Kong,* Vol. II, 2011.

[13] J.-S. Kwak, Enhanced magnetic abrasive polishing of non-ferrous metals utilizing a permanent magnet, *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 49, No. 7, pp. 613-618, 2009.