



مطالعه تجربی پلیسه‌گیری قطعات سوراخ‌کاری‌شده فولاد زنگ‌نزن توسط ذرات ساینده مغناطیسی

سون‌آذررنگ^۱، حمید باصری^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

* بابل، صندوق پستی ۷۱۱۶۷-۴۷۱۴۸۰، h.baseri@nit.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۳ مهر ۱۳۹۲

پذیرش: ۲۹ آبان ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۳ فروردین ۱۳۹۳

کلید واژگان:

سوراخ‌کاری پلیسه

پلیسه‌گیری

فولاد زنگ‌نزن

سوراخ‌کاری یکی از پرکاربردترین فرایندها در تولید قطعات است. سوراخ‌کاری نیز مانند سایر فرایندهای تولید مواد اضافه‌ای به صورت برآمدگی در لبه‌های ورودی و خروجی سوراخ ایجاد می‌کند. این برآمدگی‌ها که در اثر تغییر شکل پلاستیک ایجاد می‌شوند به عنوان پلیسه شناخته می‌شوند که برای ایجاد قطعات دقیق نیاز است تا برداشته شوند. در این مطالعه روش پلیسه‌گیری با ذرات ساینده مغناطیسی برای بررسی پلیسه‌گیری از ورق فولاد زنگ‌نزن به کار رفته است. نخست برای تعیین ابزار مناسب جهت پلیسه‌گیری شبیه‌سازی‌هایی توسط نرم‌افزار ماکسول صورت گرفته است و سپس تأثیر پارامترهای ارتفاع گپ، اندازه مش ذرات ساینده و سرعت چرخشی اسپیندل دستگاه بر ارتفاع پلیسه برداشته شده بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که مش ذرات ساینده تأثیر به‌سزایی در برداشت پلیسه از ورق فولاد زنگ‌نزن با این فرایند دارد.

Experimental study of the magnetic abrasive deburring of stainless steel drilled parts

Sona Azarrang¹, Hamid Baseri^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran

* P.O.B. 47148-71167 Babol, Iran, h.baseri@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 05 October 2013

Accepted 20 November 2013

Available Online 12 April 2014

Keywords:

Drilling, Burr

Deburring

Stainless steel

ABSTRACT

Drilling is the most widely used process for producing holes through the manufacturing parts. Drilling, as well as other machining processes, produce undesired raised material on both entrance and exit edges. The raised material caused by plastic flow is defined as burr, which is necessary to be removed for critical and precise part. In this work, magnetic abrasive deburring (MAD) was used to investigate the deburring performance of stainless steel. Firstly preliminary simulations were carried out by Maxwell software to determine appropriate MAD tool. Then, influence of MAD variables such as height of gap, mesh number and rotational speed were studied on burr height variation. Results indicated that mesh number of abrasive particles has the dominate effect in burr removal of stainless steel plate by this process.

۱- مقدمه

خودروسازی کاربرد دارد. برای نمونه یکی از قطعات دقیق بخش داغ موتور هواپیما که از جنس فولاد زنگ‌نزن است و وظیفه‌ی آن پایدار کردن شعله توسط ترکیب سوخت و هوای آشفته برای محفظه احتراق است، نیاز به لبه‌هایی با کیفیت و پرداخت سطح بالا دارد و پلیسه‌گیری آن به دلیل اندازه قطعه، هندسه پیچیده، دسترسی مشکل و سطوح بحرانی نزدیک به لبه‌ها، فرآیندی سخت و مشکل است [۲].

فرآیند پرداخت‌کاری با ذرات ساینده مغناطیسی فرآیندی مکانیکی است که جهت پرداخت سطح، گرد کردن لبه‌ها، پلیسه‌گیری و بهبود ویژگی‌های سطح کاربرد دارد [۳]. در فرآیند پلیسه‌گیری با ذرات ساینده، از نیروی حاصل از میدان مغناطیسی برای برداشتن پلیسه استفاده می‌شود. این فرآیند به دلیل استفاده از میدان مغناطیسی فرآیندی قابل کنترل است و از نفوذ

در فرآیند سوراخ‌کاری پلیسه‌هایی در لبه‌های ورودی و خروجی سوراخ ایجاد می‌شوند. به دلیل این‌که پلیسه‌های خروجی به‌طور قابل توجهی بزرگ‌تر از پلیسه‌های ورودی هستند، بیشتر مطالعات صورت گرفته در زمینه شکل‌گیری پلیسه سوراخ‌کاری، بر پلیسه خروجی متمرکز شده است. پلیسه ورودی حاصل فشرده شدن مواد نزدیک به مته و جریان یافتن آن‌ها در طول لبه‌های ابزار است. درحالی‌که پلیسه‌های خروجی به دلیل بریده نشدن لایه آخر قطعه-کار و کشیدگی آن صورت می‌گیرد [۱]. کیفیت قطعات دقیق با کیفیت لبه‌ها و پرداخت سطوح ارزیابی می‌شود و هندسه لبه‌ها از طریق فرآیند پلیسه‌گیری تعیین می‌شود. فولاد زنگ‌نزن به‌طور قابل توجهی در صنایعی چون صنایع فضایی و

Please cite this article using:

S. Azarrang, H. Baseri, Experimental study of the magnetic abrasive deburring of stainless steel drilled parts, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 19-26, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

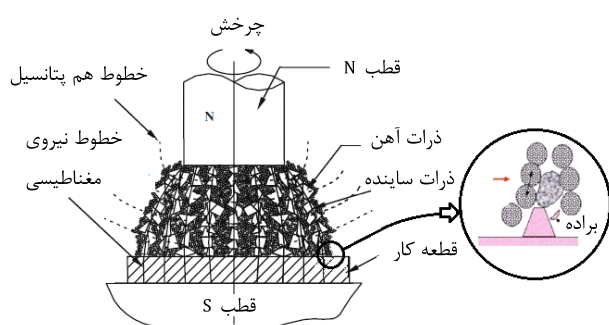
را در مدت زمان کمتری انجام داد.

در مطالعات انجام شده نحوه تأثیرگذاری خطوط میدان مغناطیسی و نیروی حاصل از میدان در بازده فرآیند پلیسه‌گیری با ذرات ساینده مغناطیسی بررسی نشده است. همچنین ساختارهای به کار رفته برای ایجاد میدان در پلیسه‌گیری از سوراخ، تنها برای سوراخ‌هایی با قطر مشخص کاربرد دارد و با تغییر قطر سوراخ، نیاز به تغییر ساختار مغناطیسی وجود دارد. در این مطالعه سعی شده تا با شبیه‌سازی میدان مغناطیسی و بررسی حالات ممکن ابزاری طراحی شود که نه تنها چگالی میدان مغناطیسی را روی ناحیه مورد نظر متمرکز می‌کند، بلکه برای بازه بزرگ‌تری از قطرهای قابل استفاده باشد. سپس تأثیر برخی پارامترهای این فرآیند مانند ارتفاع گپ، اندازه مش و سرعت چرخشی اسپیندل روی تغییرات ارتفاع پلیسه در ورق فولاد زنگ‌نزن بررسی شده است.

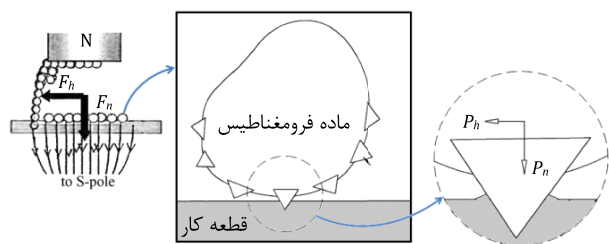
۲- اصول فرآیند پلیسه‌گیری با ذرات ساینده مغناطیسی

شکل ۱ شماتیکی از این فرآیند را نشان می‌دهد. در این فرآیند، ذرات ساینده در فضای بین آهن‌ربا و سطح قطعه کار قرار می‌گیرند. ذرات ساینده به دلیل نداشتن خاصیت فرومغناطیسی تحت نیروی مغناطیسی قرار نمی‌گیرند. به این دلیل با مقداری پودر آهن ترکیب می‌شوند تا در میدان مغناطیسی نگه داشته شوند. این ذرات در راستای خطوط میدان قرار می‌گیرند و ابزاری انعطاف‌پذیر را شکل می‌دهند که شکل آن با توجه به شکل قطعه کار متغیر است. چرخش آهن‌ربا و ذرات ساینده نیروی مماسی مورد نیاز برای براده برداری را تأمین می‌کند. به این دلیل که ذرات ساینده دارای چندین لبه برشی هستند، ابزار این فرآیند یک ابزار چند لبه‌ای است که لبه‌های کند شده در حین چرخش با لبه‌های تیز جایگزین می‌شوند. شکل ۲ شکل‌گیری ذرات ساینده را نشان می‌دهد.

فرآیند پلیسه‌گیری با ذرات ساینده مغناطیسی یکی از فرآیندهای نهایی پلیسه‌گیری و براده‌برداری در مقیاس میکرومتر است. به دلیل برخورد ذرات به سطح قطعه، آسیب جدی به سطح اصلی قطعه وارد نمی‌کند و تنها سبب پرداخت سطح می‌شود [۵].



شکل ۱ شماتیکی از پلیسه‌گیری با ذرات ساینده [۱۴]



شکل ۲ شکل‌گیری ذرات ساینده [۲]

بیش از اندازه ذرات ساینده به سطح و آسیب رساندن به آن جلوگیری می‌کند و جهت پلیسه‌گیری از مواد کاربردی در صنعت و آلیاژهایی که پرداخت آن‌ها سخت است قابل استفاده است و همچنین توانایی ایجاد لبه‌های گرد با شعاع قابل قبول را دارد [۴].

با وجود مطالعات وسیع صورت گرفته در زمینه استفاده از ذرات ساینده مغناطیسی جهت پرداخت کاری سطح، مطالعات زیادی برای بررسی این فرآیند در زمینه پلیسه‌گیری صورت نگرفته است. کیم و همکاران [۵] از فرآیند پرداخت کاری با ذرات ساینده برای پلیسه‌گیری آلیاژ منیزیم استفاده کردند و نشان دادند که این فرآیند بدون آسیب رساندن به سطح قطعه، قابلیت برداشت پلیسه را دارد. کو و همکاران [۶] تأثیر روش پرداخت کاری با ذرات ساینده در پلیسه‌گیری از لبه‌های سوراخ را با ساختاری متفاوتی از الکترومغناطیس بررسی کردند. بخش‌های اصلی تجهیزات یک القاگر مغناطیسی، ذرات ساینده مغناطیسی و میز مرتعش بود. قطب‌های الکترومغناطیس به صورت بخش‌هایی جدا از هم از یک حلقه طراحی شد تا با ایجاد لبه‌های مغناطیسی بیشتر، تمرکز میدان افزایش پیدا کند و ذرات ساینده با نیروی بیشتری در میدان نگه داشته شوند. نتایج نشان داد که الکترومغناطیس طراحی شده توانایی خوبی در برداشت پلیسه دارد. همچنین نشان داده شد که این فرآیند جهت پلیسه‌گیری قطعات دقیق مانند قطعات میکروالکترونیک مناسب است. در تحقیق دیگری، کو و همکاران [۷] حجم ذرات ساینده، ارتفاع گپ، سرعت چرخشی اسپیندل و سرعت پیش‌روی را به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفتند و نشان دادند که جریان پیوسته خنک کار و استفاده از پودر آهن بدون ذرات ساینده جهت پلیسه‌گیری و پرداخت سطح مناسب است. بین و شیمورا [۸] ویژگی‌های پلیسه‌گیری و پرداخت سطح آلیاژ منیزیم را بررسی کردند و نشان دادند که بازده پلیسه‌گیری با ایجاد ارتعاش به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. بارون و همکاران [۹] کارایی ذرات ساینده مختلف ایجاد شده در صنعت را با هم مقایسه کردند. زو و همکاران [۱۰] روش پلیسه‌گیری با ذرات ساینده سنتی را با روشی پیشنهادی که از فشار ثابت استفاده می‌شد مقایسه کردند و نتایج دو حالت را برای پلیسه‌گیری از سوراخ‌های ورق برنجی بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش پیشنهادی کارایی بهتری در پلیسه‌گیری و کیفیت شکل سوراخ نهایی دارد.

مطالعاتی جهت بررسی تأثیر حالات مختلف میدان مغناطیسی بر عملکرد ذرات ساینده انجام شده است. کواک [۱۱] با استفاده از شبیه‌سازی نشان داد که قرار دادن آهن‌ربای دائمی زیر قطعه کار غیرآهنی سبب افزایش چگالی میدان در فرآیند پرداخت کاری با ذرات ساینده می‌شود. در این حالت تمرکز میدان افزایش می‌یابد و ذرات ساینده با نیروی بیشتری در راستای خطوط میدان قرار می‌گیرند. کواک و همکاران [۱۲] با استفاده از یک میز مغناطیسی حالات مختلف میدان را شبیه‌سازی کردند. این میز شامل ۳۲ الکترومغناطیس بود که همه قابلیت تغییر قطبیت داشتند. ساختارهای مختلفی از قطبیت الکترومغناطیس‌ها شبیه‌سازی شد و بهترین ساختار برای رسیدن به کمترین زبری سطح انتخاب شد و با آزمون صحت سنجی، نتایج تأیید شد. کانگ و یاماگوچی [۱۳] برای افزایش بازده فرآیند پرداخت کاری لوله‌های موئین با ذرات ساینده، ساختار آهن‌ربا را تغییر دادند و به جای استفاده از آهن‌ربای تک لبه از آهن‌ربای چند لبه‌ای همراه با یک میله جامد به عنوان ابزار استفاده کردند. ایشان نشان دادند که با ایجاد نواحی فرومغناطیس و غیرمغناطیسی در میله می‌توان پرداخت کاری از میله‌های بلند

۳- شبیه‌سازی میدان مغناطیسی

نیروی مغناطیسی اعمال شده به ذرات آهن به حجم ذرات، قابلیت مغناطیسی شدن آن‌ها در میدان مغناطیسی، قدرت میدان و گرادین آن در ناحیه مورد نظر بستگی دارد [۱۵]. اگر قدرت میدان مغناطیسی خیلی زیاد باشد، سبب صلیبیت توده ساینده شده، دمای قطعه کار را افزایش می‌دهد و سطوحی با کیفیت نامناسب ایجاد می‌کند. اگر قدرت میدان کم باشد ذرات ساینده توانایی براده‌برداری نخواهند داشت. بنابراین قدرت میدان عاملی تعیین‌کننده در کارایی این فرآیند است. همچنین جهت‌گیری خطوط میدان و محل تمرکز میدان در کارایی ذرات ساینده و برداشت براده موثر است. در این مطالعه سعی شده تا با استفاده از روش اجزای محدود (نرم‌افزار ماکسول) حالت‌های مختلف از قرارگیری قطب‌های N و S آهن‌رباهای دائم شبیه‌سازی شود تا ساختاری مناسب جهت انجام آزمایش‌های پلیسه‌گیری انتخاب شود.

۳-۱- ساختار اول: استفاده از دو آهن‌ربای استوانه‌ای

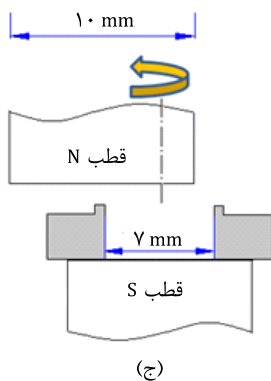
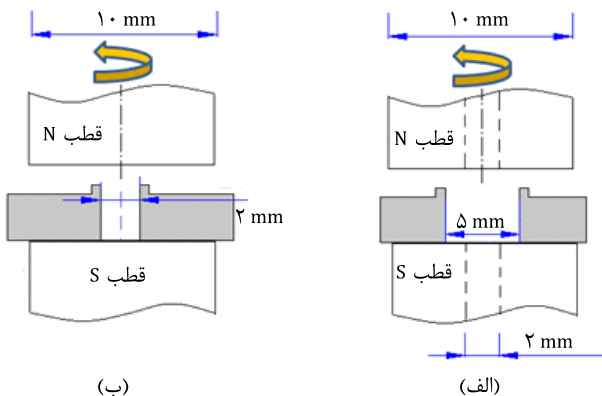
در ساختار اول از دو آهن‌ربای استوانه‌ای برای ایجاد میدان مغناطیسی استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۳-الف نشان داده شده است قطب N بالای ورق قرار دارد و قطب S برای تمرکز قدرت میدان مغناطیسی و افزایش آن در زیر ورق قرار داده شده است. استوانه‌ها به صورتی قرار گرفته‌اند که مراکز آن‌ها در راستای مرکز سوراخ قرار دارند. برای بررسی اندازه چگالی میدان و خطوط میدان مغناطیسی، شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار ماکسول انجام شده است. در انجام شبیه‌سازی از آهن‌ربای استوانه‌ای با قطر ۱۰ mm و قدرت ۰/۸T استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی برای چگالی میدان مغناطیسی در شکل ۳-ب نشان داده شده است. براساس این نتایج چگالی میدان مغناطیسی در مرکز آهن‌ربا بیشینه است و تا فاصله ۲mm از مرکز آهن‌ربا ثابت مانده و سپس کاهش می‌یابد.

نتایج شبیه‌سازی برای خطوط میدان (شکل ۳-الف) نیز نشان می‌دهد که با فاصله گرفتن از مرکز استوانه و کاهش چگالی میدان، خطوط میدان منحرف می‌شوند. در ناحیه مرکزی آهن‌ربا، خطوط میدان تنها به صورت عمودی هستند و تنها نیروی عمودی روی سطح ایجاد می‌کنند. با منحرف شدن خطوط میدان علاوه بر نیروی عمودی، نیروهای افقی نیز ایجاد می‌شود که با چرخش ذرات ساینده بر سوراخ، به دیواره داخلی سوراخ آسیب وارد می‌کند و همچنین می‌تواند سبب افزایش قطر داخلی سوراخ شود. بنابراین این ساختار تنها برای پلیسه‌گیری سوراخ‌هایی با قطر کمتر از ۴mm کاربرد دارد و برای سوراخ‌هایی با قطر بیشتر باید از آهن‌رباهایی با قطر بیشتر استفاده کرد به طوری که لبه‌های سوراخ در ناحیه متمرکز میدان مغناطیسی قرار گیرد. نکته قابل توجه دیگر در این ساختار، تمرکز میدان در ناحیه‌ای است که کمترین سرعت برشی را دارد. براساس فرمول $V=\pi Dn$ سرعت برشی با قطر رابطه مستقیم دارد و چون ناحیه مورد نظر نزدیک به مرکز آهن‌ربا است، سرعت برشی ذرات ساینده کم است. بنابراین ذرات در این ناحیه با نیروی زیادی بر سطح فشرده می‌شوند در حالی که با سرعت کمی می‌چرخند و نمی‌توانند بازده بالایی در برداشت براده داشته باشند.

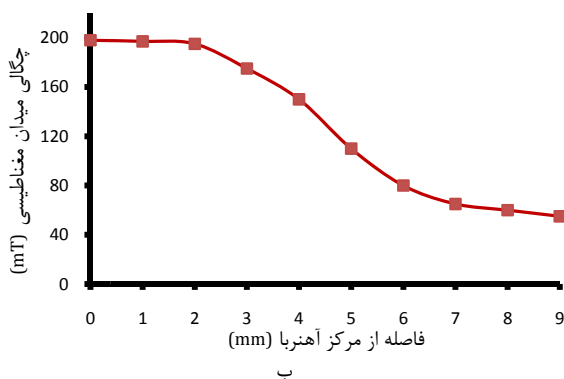
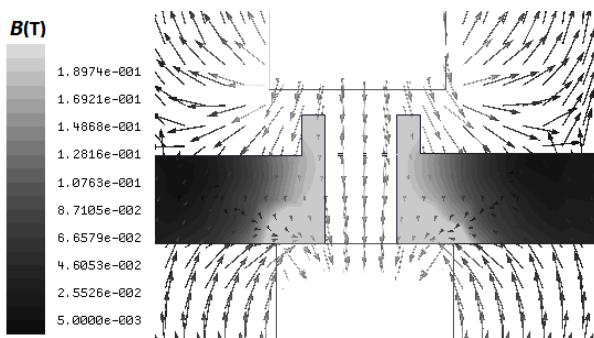
۳-۲- ساختار دوم: استفاده از دو آهن‌ربای حلقه‌ای

در ساختار دوم ارائه شده از آهن‌رباهای استوانه‌ای توخالی به جای استوانه‌های توپر در ساختار اول استفاده شده است. شکل ۳-ب شماتیکی از این ترکیب را نشان می‌دهد. شکل ۳-ب نتایج شبیه‌سازی میدان مغناطیسی را در این ساختار نشان می‌دهد. براساس این نتایج، تمرکز میدان مغناطیسی در ناحیه میانی سطح مقطع آهن‌ربا قرار دارد. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان (شکل

۳-الف) می‌دهد که خطوط میدان در این ناحیه عمودی هستند و با دور شدن از این ناحیه خطوط نیز منحرف می‌شوند و مانند حالت اول، نیروهای افقی ایجاد شده می‌توانند به دیواره سوراخ آسیب وارد کنند.



شکل ۳ (الف) استفاده از دو آهن‌ربای استوانه‌ای هم‌مرکز (ب) استفاده از دو آهن‌ربای حلقه‌ای (ج) استفاده از آهن‌ربای استوانه‌ای خارج از مرکز



شکل ۴ (الف) توزیع خطوط میدان مغناطیسی و (ب) نمودار چگالی میدان مغناطیسی برای ساختار اول

اندازه‌های متفاوت به کار گرفته شود.

۳-۳- ساختار سوم: استفاده از آهن‌ربای خارج مرکز

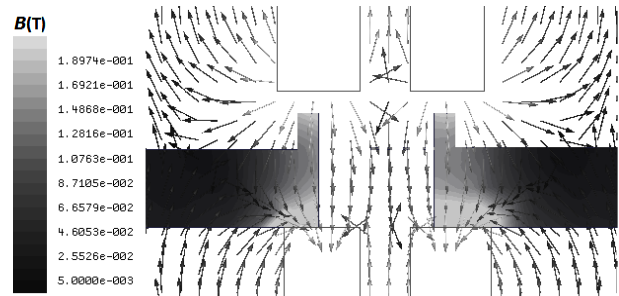
ساختار سوم با توجه به مزایا و معایب ساختارهای پیشین طراحی شده است. در این حالت قطب S در زیر سوراخ قرار گرفته است و در سطح پایینی نگهدارنده آهن‌ربای بالایی (قطب N) شیار ایجاد شده به طوری که آهن‌ربا در راستای شیار ایجاد شده قابلیت جابه‌جایی دارد (شکل ۳-ج). در واقع با توجه به قطر سوراخ مورد نظر، آهن‌ربا باید در محلی قرار گیرد که محل تمرکز میدان روی لبه‌های پلیسه باشد. جهت بررسی چگالی میدان مغناطیسی و خطوط میدان در نواحی مختلف، شبیه‌سازی‌های مورد نظر صورت گرفته است. با توجه به نتایج (شکل ۶-الف) خطوط میدان مغناطیسی در این ساختار علاوه بر مولفه‌های عمودی، مولفه‌های افقی هم دارند اما انحراف خطوط میدان در ناحیه‌ای است که میدان مغناطیسی چگالی زیادی ندارد و جهت آن به سمتی است که مشکلی برای سوراخ ایجاد نمی‌کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که محل تمرکز میدان در موقعیت‌های مختلف از قرارگیری قطب N آهن‌ربا متفاوت است. در شکل ۶-ب محور افقی فاصله از مرکز سوراخ را نشان می‌دهد و محور عمودی بیان‌گر چگالی میدان مغناطیسی در این ساختار است و هر یک از منحنی‌ها مربوط به یک فاصله مشخص مرکز آهن‌ربا از مرکز نگهدارنده است.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی محل تمرکز میدان در نصف فاصله دو مرکز، بیشینه است. برای نمونه سوراخی با قطر ۴ mm، آهن‌ربای بالایی باید طوری تنظیم شود که مرکز آن در فاصله ۴ mm از مرکز نگهدارنده باشد تا لبه‌های پلیسه در ناحیه‌ای قرار گیرند که بیشترین چگالی میدان مغناطیسی وجود دارد. با این طراحی معایب ساختارهای پیشین رفع می‌شود. این ساختار علاوه بر این که برای سوراخ‌هایی با قطرهای مختلف کاربرد دارد، ناحیه متمرکز آن هم دارای سرعت برشی بالاتری است. ولی نکته قابل توجه در این ساختار این است که با فاصله گرفتن آهن‌ربا از مرکز، بیشترین چگالی میدان ایجاد شده، نخست افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد در نتیجه این ساختار اگرچه برای قطرهای زیاد نیز قابل استفاده است ولی برای قطرهای کمتر از ۱۰ mm کارایی بهتری دارد.

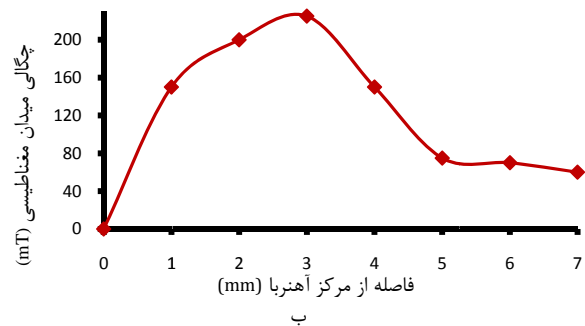
۴- تجهیزات آزمایشگاهی

در این مطالعه از ساختار سوم شبیه‌سازی شده برای پلیسه‌گیری از سوراخ‌هایی با قطرهای مختلف استفاده شده است. همان‌طور که در توضیحات ساختار مورد نظر بیان شد، این ساختار برای پلیسه‌گیری از سوراخ‌های با قطر کمتر از ۱۰ mm نتیجه بهتری خواهد داشت. بنابراین قطرهای ۳.۶ و ۹ میلی‌متر برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شده‌اند. ورق از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با ضخامت ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد و ذرات ساینده SiC برای پلیسه‌گیری انتخاب شد. همچنین دو آهن‌ربای دائمی (قطر ۱۰ mm و طول ۱۵ mm) در دو طرف ورق قرار داده شدند. مشخصات فولاد مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

شکل ۷ نحوه قرارگیری ورق و آهن‌رباها را نشان می‌دهد. آزمایشات با استفاده از ماشین فرز انجام شد. قطب N همراه با اسپندل دستگاه می‌چرخد و ورق و قطب S حرکتی ندارند. برای اندازه‌گیری ارتفاع پلیسه پیش و پس از پلیسه‌گیری از یک ساعت اندازه‌گیری دیجیتال استفاده شده است. برای افزایش دقت، هر آزمایش سه بار تکرار شد و ارتفاع پلیسه هر سوراخ در چهار نقطه اندازه‌گیری شد و میانگین آن‌ها برای تحلیل به کار گرفته شد.

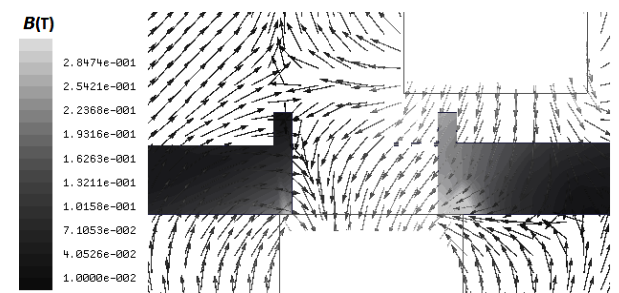


الف

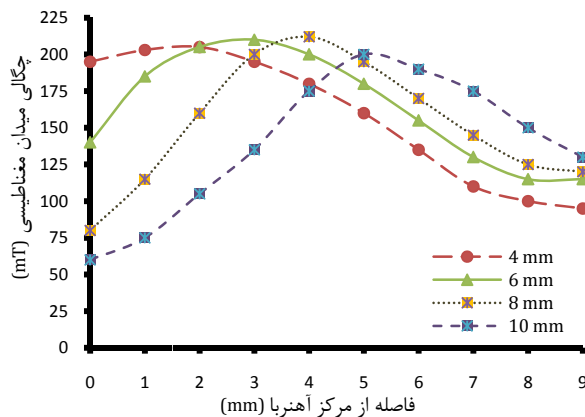


ب

شکل ۵ الف) توزیع خطوط میدان مغناطیسی و ب) نمودار چگالی میدان مغناطیسی برای ساختار دوم



الف



ب

شکل ۶ الف) توزیع خطوط میدان مغناطیسی و ب) نمودار چگالی میدان مغناطیسی برای ساختار سوم

در مقایسه با ساختار اول، در این ساختار تمرکز میدان در ناحیه‌ای قرار گرفته که سرعت برشی بیشتری دارد و ذرات ساینده با نیروی مماسی بیشتری براده‌برداری می‌کنند. قطر داخلی و خارجی آهن‌ربای حلقه‌ای باید طوری انتخاب شوند که لبه‌های سوراخ در ناحیه متمرکز قرار گیرند تا پلیسه‌گیری به درستی انجام شود. با توجه به این نکته این ساختار برای سوراخ‌هایی با قطر خیلی کم کاربرد ندارد و برای قطرهای مختلف باید حلقه‌هایی با

جدول ۱ ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فولاد زنگ نزن ۳۰۴

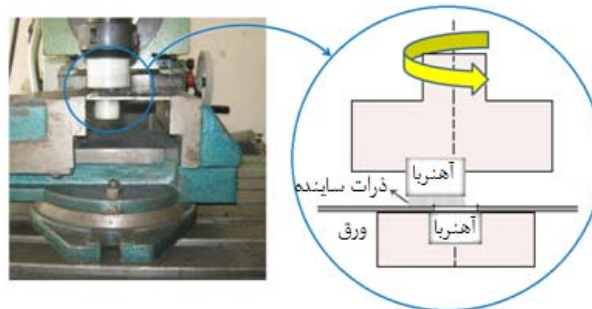
ترکیب شیمیایی						
C	Cr	Ni	Mn	Si	P	Fe
۰/۰۶	۱۸/۰۵	۹/۸	۱/۳۴	۰/۳۷	۰/۰۴	۷۰/۳۴
خواص مکانیکی						
سختی (Hv)	ازدیاد طول (%)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)			
۲۲۷	۵۵	۲۶۵	۶۲۸			

جدول ۲ پارامترهای فرآیند

مقادیر	پارامتر
۸۰۰ ، ۱۲۵۰ ، ۱۶۰۰	A: سرعت چرخش اسپیندل (rpm)
۹۰ ، ۲۲۰ ، ۳۰۰	SiC: مش ذرات B:
۰/۵ ، ۱ ، ۱/۵	C: گپ (mm)

جدول ۳ تنظیمات ثابت فرآیند

مقدار/ نوع	پارامتر
فولاد زنگ نزن ۳۰۴	قطعه کار
سیلیسیوم کارباید	ذرات ساینده
نئودیمیوم-آهن-بور: ۱۵×۱۰	آهن ربا
۱۲۰	مش ذرات آهن
۰/۸ تسلا	چگالی میدان مغناطیسی
۱۰ دقیقه	زمان



شکل ۷ نحوه قرارگیری ورق و آهن رباها

۵- انتخاب پارامترهای فرآیند

عوامل زیادی در فرآیند پلیسه گیری با ذرات ساینده مغناطیسی موثر است. ولی در نظر گرفتن هم زمان تمامی پارامترها سبب پیچیدگی فرآیند می شود و نیازمند هزینه و زمان بسیار است. با توجه به تحقیقات گذشته [۵،۷،۱۱] سه پارامتر سرعت چرخشی اسپیندل، گپ کاری (فاصله آهن ربا از سطح پلیسه) و مش ذرات ساینده تأثیر زیادی در کارایی فرآیند دارد که در این مطالعه به عنوان فاکتورهای ورودی در نظر گرفته شده اند.

انتخاب پارامترهای فرآیند و سطوح آن ها پایه و اساس طراحی آزمایش است. تعداد سطوح در نظر گرفته شده برای هر فاکتور باید به اندازه ای کافی باشد که بتواند تغییرات را نشان دهد. ولی انتخاب بیش از اندازه تعداد سطوح سبب افزایش تعداد آزمایشات و صرف هزینه و زمان زیاد می شود. بنابراین آزمایشات نخستین کمک می کند تا سطوح مناسبی برای پارامترها انتخاب شود و باقی فاکتورها ثابت در نظر گرفته شده اند. آزمایشات نخستین نشان می دهد که در شرایط ثابت، در گپ کاری کمتر از ۰/۵ و بیشتر از ۱/۵ میلی متر براده برداری بسیار کمی انجام می گیرد که این فرآیند را غیر کاربردی می کند. بنابراین بازه ۰/۵ تا ۱/۵ میلی متر جهت بررسی انتخاب شده است و به دلیل کوتاه بودن این بازه، سه سطح ۰/۵ - ۱ - ۱/۵ برای این پارامتر در نظر گرفته شده است.

همچنین با توجه به مکانیزم این فرآیند، به نظر می رسد برای نگه داشتن ذرات ساینده در فضای کاری اندازه ذرات آهن باید بزرگتر از اندازه ذرات ساینده باشد تا توانایی نگه داشتن آن ها را داشته باشد. در این آزمایش از پودر آهن با مش ۱۲۰ استفاده شده است. جهت بررسی این نکته یکی از سطوح انتخابی برای مش ذرات ۹۰ در نظر گرفته شده است و برای سطوح بعدی اندازه مش بزرگتر انتخاب شده است. با توجه به این که ذرات ساینده خیلی ریز توانایی بالایی در برداشت براده ندارند، بالاترین سطح مش ذرات ۳۰۰ در نظر گرفته شده و مش ۲۲۰ به عنوان سطح میانی در انجام آزمایشات به کار رفته است.

بازه سرعت ۸۰۰ تا ۱۶۰۰ rpm نیز جهت بررسی این پارامتر انتخاب شده است و سرعت ۱۲۵۰ rpm سطح میانی جهت بررسی است. پارامترهای انتخابی و سطوح هر کدام در جدول ۲ و همچنین پارامترهای ثابت و تنظیمات صورت گرفته در جدول ۳ نشان داده شده است.

۶- طراحی آزمایشات

معمولاً انجام کامل آزمایشات سبب افزایش زمان مورد نیاز و هزینه می شود. به این دلیل برای کاهش تعداد آزمایشات از روش تاگوچی استفاده شده است. روش تاگوچی روشی علمی برای طراحی آزمایش است که توانایی تحلیل داده ها و تعیین پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند را دارد.

آرایه ارتوگونال تاگوچی بر حسب تعداد پارامترها و سطوح آن ها انتخاب می شود. در این مطالعه از آرایه L_8 استفاده شده است. در این روش نسبت سیگنال به نویز فاکتور مهمی جهت تحلیل داده ها است و برای تعیین تغییرات استفاده می شود. در فرآیند پلیسه گیری با ذرات ساینده مغناطیسی، براده برداری بیشتر، نشان دهنده کارایی بهتر فرآیند است. بنابراین نوع «بزرگ تر - بهتر» برای تحلیل داده ها انتخاب شده است.

۷- نتایج و بحث

۷-۱- آنالیز سیگنال به نویز

ارتفاع پلیسه برداشته شده در هر آزمایش در شکل ۸ نشان داده شده است. همان طور که نمودارها نشان می دهد، تغییرات برداشت پلیسه در شرایط تست شده برای سوراخ های ۶ و ۹ میلی متری یکسان است و در پلیسه گیری از قطر ۳ میلی متر فرآیند رفتار متفاوتی نشان می دهد. ولی در کل با افزایش قطر سوراخ بازده فرآیند افزایش می یابد و تنها در برخی شرایط که در ادامه توضیح داده خواهد شد، پلیسه برداشته شده برای قطر کمتر بیشتر از سوراخ های بزرگ تر است.

بر اساس ساختار ارائه شده در پلیسه گیری از قطرهای بزرگ تر، مرکز آهن ربا در فاصله دورتری از مرکز نگهدارنده قرار دارد و طبق رابطه $v=\pi Dn$ ذرات ساینده با سرعت بیشتری همراه با آهن ربا می چرخند و نیروی مماسی بیشتری ایجاد می کنند. بنابراین قابلیت براده برداری بیشتری نسبت به پلیسه گیری از قطرهای کمتر ایجاد می کنند. به این دلیل براده برداری از قطر ۹ بیشتر از سوراخ های ۳ و ۶ میلی متری است.

همچنین نمودارهای شکل ۸ نشان می دهند که در آزمایش شماره ۶ (۱۶۰۰ rpm، اندازه مش ۲۲۰ و گپ ۰/۵ mm) این فرآیند بهترین کارایی را نسبت به شرایط آزمایش دیگر داشته است. ولی با توجه به طراحی آزمایش صورت گرفته، شرایط دیگری از ترکیب ورودی ها نیز وجود دارد که تست نشده است. بنابراین برای تعیین بهینه ترین حالت با در نظر گرفتن همه شرایط ممکن، نسبت سیگنال به نویز برای هر آزمایش محاسبه شده است. نتایج حاصل در

همچنین نمودار نشان می دهد در ماشین کاری با گپ 0.5mm نتیجه بهتری حاصل می شود. اگرچه در فاصله کمتر بین آهن ربا و لبه پلیسه، حجم کمتری از ذرات در فضای کاری قرار می گیرند، ولی چگالی میدان مغناطیسی در این حالت بیشتر است و ذرات با نیروی بیشتری روی سطح قطعه فشرده می شوند و قابلیت براده برداری بیشتری خواهند داشت.

شرایط تعیین شده در این تحلیل در آزمایشات انجام شده وجود ندارد، بنابراین برای تأیید تحلیل، آزمایش صحت سنجی انجام شده که در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد ترکیب بهینه تعیین شده نتیجه بهتری دارد. اندازه مش کمتر به معنای اندازه ذره بزرگتر است و ذرات بزرگ تر قابلیت نفوذ بیشتری در قطعه دارند و در هر بار تماس با پلیسه حجم بیشتری از ماده جدا می کنند. بنابراین ذراتی با شماره مش کمتر کارایی بهتری در این فرآیند برای سوراخ 3mm میلی متری داشتند.

جدول ۵ آزمایش صحت سنجی

شرایط	نسبت سیگنال به نویز
بهترین نتیجه به دست آمده از آزمایش $(A_3B_1C_1)$	۳۳/۳۳۶۵
بهترین نتیجه به دست آمده از مدل $(A_3B_1C_1)$	۳۳/۱۱۴۲

تغییرات سیگنال به نویز برای قطرهای 6mm و 9mm میلی متری یکسان است. شکل ۹ نشان می دهد که ترکیب بهینه ورودی برای قطرهای بزرگتر $A_3B_2C_1$ است. بنابراین بهترین ترکیب سرعت 1600rpm ، اندازه مش 220 و گپ 0.5mm است. طبق این تحلیل بهترین نتیجه تعیین شده بر بهترین نتیجه به دست آمده از آزمایش منطبق است.

تأثیر اندازه مش در مقایسه با قطر 3mm متفاوت است. سطح میانی از اندازه مش پلیسه بیشتری در پلیسه گیری از سوراخ هایی با قطر بزرگتر برمی دارد. برای توضیح این مسئله می توان این گونه بیان کرد که ذرات ساینده به دلیل نداشتن خاصیت فرومغناطیسی در میدان مغناطیسی نگه داشته نمی شوند و آن ها را پودر آهن نگه می دارد. پودر آهن توانایی نگه داشتن ذراتی را دارد که از نظر اندازه کوچکتر از آن باشند. در این مطالعه از پودر آهن با اندازه مش 120 استفاده شد. در پلیسه گیری قطرهای بزرگتر، به دلیل چرخش ذرات در فاصله دورتری از مرکز و نیروی خروج از مرکز بالاتر، در استفاده از ذرات ساینده با مش 90 ، توانایی پودر آهن برای نگه داشتن ذرات کاهش می یابد و با چرخش آهن ربا، ذرات ساینده از فضای کاری جدا شده و در فضا پخش می شوند و تنها پودر آهن (که توانایی براده برداری ندارد) همراه با مقدار کمی ذرات ساینده در فضای کاری باقی می ماند که نمی توانند به خوبی فرآیند پلیسه گیری را انجام دهند.

همچنین در پلیسه گیری با ذرات مش 300 به دلیل اندازه کوچک، ذرات قابلیت پلیسه گیری خوبی ندارند و نمی توانند به خوبی براده برداری کنند. بنابراین ذرات مش 220 کارایی بهتری دارند. ولی در پلیسه گیری از قطر 3mm میلی متر، چون ذرات نزدیک به مرکز نگهدارنده قرار دارند و سرعت چرخشی بالایی ندارند، ذرات SiC در فضای کاری نگه داشته می شوند و مش 90 نتیجه بهتری خواهد داشت.

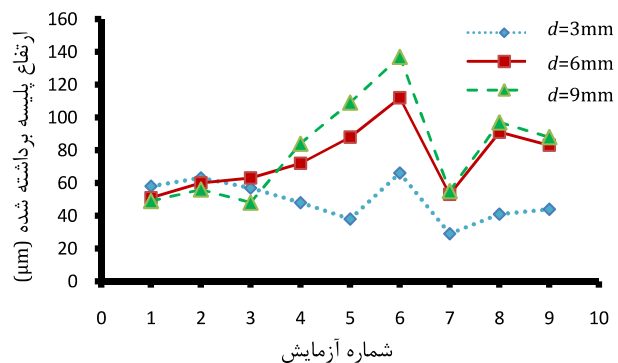
۷-۲- آنالیز واریانس

برای تعیین تأثیر هر یک از پارامترها، برای هر قطر آنالیز واریانس انجام شده است. درصد مشارکت هر پارامتر جهت تعیین اهمیت تغییرات هر فاکتور روی بازده فرآیند محاسبه شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده، اندازه ذرات و گپ پارامترهایی هستند که بیشترین تأثیر را در پلیسه گیری از سوراخ 3mm میلی متری داشتند و سرعت

جدول ۴ نشان داده شده است. شکل ۹ نیز تأثیر پارامترهای ورودی را روی تغییر ارتفاع پلیسه بوده که محور افقی آن سطوح تعیین شده برای هر ورودی و محور عمودی نسبت سیگنال به نویز برای هر سطح را بیان می کند.

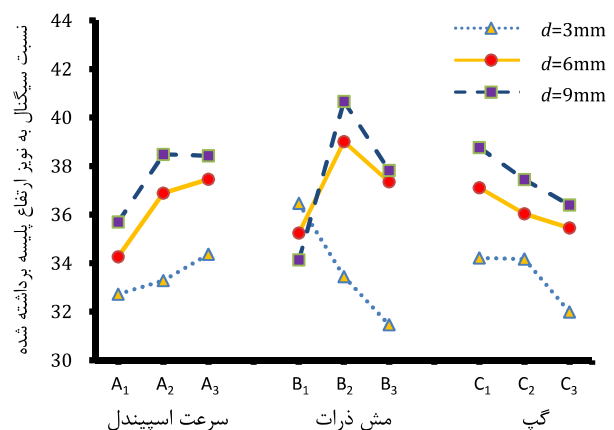
برای محاسبه نسبت سیگنال به نویز نوع بزرگتر- بهتر انتخاب شده است. همان طور که شکل ۹ نشان می دهد، شرایط بهینه برای پلیسه گیری قطر 3mm میلی متری $A_3B_1C_1$ است. بنابراین در تنظیمات سرعت 1600rpm ، اندازه مش 90 و گپ 0.5mm بیشترین پلیسه گیری انجام می شود. همان طور که این نمودار نشان می دهد با افزایش سرعت چرخشی، میزان برداشت براده افزایش می یابد. با افزایش سرعت، ذرات ساینده با سرعت بیشتری می چرخند و نیروی مماسی بزرگتری به سطح پلیسه وارد می کنند، در نتیجه حجم بیشتری از پلیسه برداشته می شود.



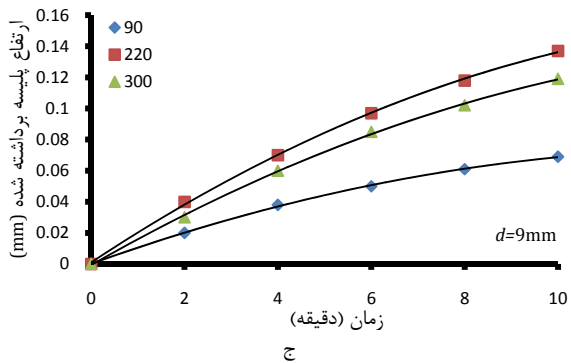
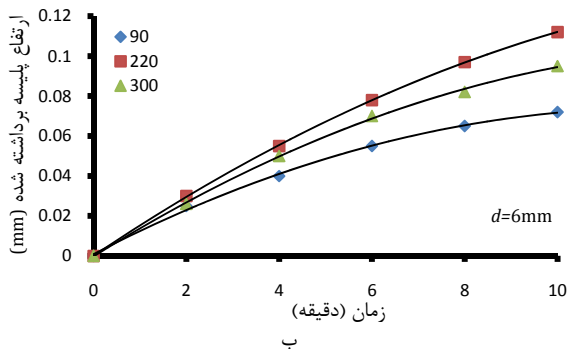
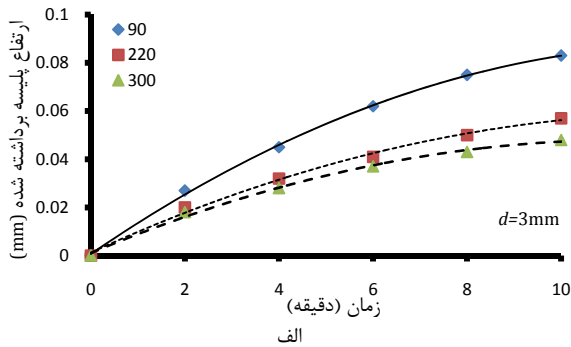
شکل ۸ ارتفاع پلیسه برداشته شده در آزمایش های مختلف

جدول ۴ آزمایش های انجام شده و نسبت سیگنال به نویز هر آزمایش

شماره آزمایش	سرعت چرخشی (rpm)	شماره مش	گپ (mm)	پارامترهای فرآیند		
				$3D=$ mm	$6D=$ mm	$9D=$ mm
۱	۸۰۰	۹۰	۰/۵	۲۶/۲۵۵	۲۶/۸۴۸	۲۶/۰۲۰
۲	۱۲۵۰	۹۰	۱	۳۱/۵۹۵	۳۰/۶۲۹	۲۹/۵۴۲
۳	۱۶۰۰	۹۰	۱/۵	۲۸/۶۲۷	۳۰/۲۳۴	۳۰/۳۷۰
۴	۸۰۰	۲۲۰	۱	۳۰/۱۰۳	۳۲/۶۶۹	۳۳/۶۲۴
۵	۱۲۵۰	۲۲۰	۱/۵	۲۶/۴۴۴	۳۶/۲۵۸	۳۸/۳۸۱
۶	۱۶۰۰	۲۲۰	۰/۵	۳۲/۶۶۹	۳۸/۳۱۷	۴۰/۰۸۶
۷	۸۰۰	۳۰۰	۱/۵	۲۰/۸۲۷	۲۵/۵۷۵	۳۰/۱۰۲
۸	۱۲۵۰	۳۰۰	۰/۵	۲۷/۲۳۴	۳۵/۱۱۷	۳۶/۹۰۱
۹	۱۶۰۰	۳۰۰	۱	۲۶/۸۴۸	۳۳/۹۵۸	۳۵/۴۱۷



شکل ۹ نسبت سیگنال به نویز



شکل ۱۰ نمودار ارتفاع پلیسه برداشته‌شده بر حسب زمان برای (الف) قطر مته ۳ mm (ب) قطر مته ۶ mm (ج) قطر مته ۹ mm



شکل ۱۱ لبه ذرات ساینده پیش و پس از فرآیند

- شرایط بهینه پلیسه‌گیری در این مطالعه برای قطر ۳ میلی‌متر سرعت ۱۶۰۰ rpm، اندازه مش ۹۰ و گپ ۰/۵mm و برای قطرهای ۶ و ۹ میلی‌متر سرعت ۱۶۰۰ rpm، اندازه مش ۲۲۰ و گپ ۰/۵mm به‌دست آمد.
- نتایج آنالیز واریانس انجام شده نشان می‌دهد اندازه ذرات ساینده تأثیر

برشی تأثیر زیادی در نتیجه فرآیند نداشته است. ولی در پلیسه‌گیری از سوراخ‌های بزرگ‌تر، سرعت چرخشی اسپیندل و اندازه مش ذرات پارامترهای تأثیرگذار بودند و فاصله بین آهن‌ربا و سطح پلیسه تأثیر زیادی در ارتفاع پلیسه برداشته‌شده ندارد. جدول ۶ نتایج آنالیز واریانس را نشان می‌دهد.

۷-۳- رفتار فرآیند با گذشت زمان

جهت بررسی رفتار فرآیند با گذشت زمان، تغییرات ارتفاع پلیسه در فاصله زمانی ۱۰ دقیقه با فواصل ۲ دقیقه اندازه‌گیری شده است. شکل ۱۰ نمودارهای مربوطه را برای سه قطر و مش‌های بررسی شده نشان می‌دهد.

همان‌طور که نمودارها نشان می‌دهد، با گذشت زمان، شیب نمودارها که بیان‌گر نرخ براده‌برداری است، در حال کاهش است. با انجام فرآیند و براده‌برداری از سطح پلیسه، گپ‌کاری افزایش می‌یابد و براساس مطالب بیان شده در بخش پیشین، با افزایش گپ، تغییرات ارتفاع برداشته شده در این فرآیند نیز کاهش می‌یابد.

از سوی دیگر با ادامه یافتن فرآیند و چرخش آهن‌ربا و ذرات ساینده متصل به آن، علاوه بر این که لبه تیز ذرات کند می‌شوند و قابلیت براده‌برداری آن‌ها کاهش می‌یابد، حجمی از ذرات نیز از آهن‌ربا جدا شده و در فضا پراکنده می‌شوند. تصاویر گرفته شده از ذرات ساینده پیش و پس از فرآیند که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، این مطلب را تأیید می‌کند.

۸- نتیجه‌گیری

- تأثیر پارامترهای ورودی بر ارتفاع پلیسه برداشته‌شده برای سوراخ‌های ۶ و ۹ میلی‌متر یکسان بود، ولی با توجه به ساختار به کار رفته، براده‌برداری از قطر ۹ بیشتر از سوراخ‌های ۳ و ۶ میلی‌متری بود.
- تأثیر سرعت چرخشی اسپیندل و گپ‌کاری برای هر سه قطر یکسان بود، ولی تأثیر اندازه مش در پلیسه‌گیری از سوراخ ۳ میلی‌متری با قطرهای بزرگ‌تر تفاوت داشت.
- با افزایش سرعت چرخشی و کاهش گپ، براده‌برداری افزایش می‌یابد و بهترین اندازه مش برای قطر ۳ میلی‌متر، ۹۰ و برای قطرهای ۶ و ۹ میلی‌متر ۲۲۰ به‌دست آمد.

جدول ۶ نتایج آنالیز واریانس

قطر	پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت F	درصد مشارکت
۳ mm	سرعت	۲	۴/۱۲۱	۲/۰۶۵	۳۲/۵۰۶	۳/۶۰۵
	مش ذرات	۲	۵۸/۲۱۳	۲۹/۱۰۶	۵۸/۰۸۶	۵۲/۲۹۵
	گپ‌کاری	۲	۴۸/۶	۲۴/۳	۴۸/۴۷۳	۴۳/۶۴۱
	خطا	۲	۰/۱۲۶	۰/۰۶۳		۰/۴۵۹
	مجموع	۸	۱۱۱/۰۷۲			۱۰۰
۶ mm	سرعت	۲	۶۵/۸۱۶	۳۲/۹۰۸	۸۸۳/۲۹	۴۳/۸۱
	مش ذرات	۲	۶۷/۱۲۲	۳۳/۵۶۱	۳۰/۴۷۶	۴۳/۷۰۲
	گپ‌کاری	۲	۱۰/۱۳۹	۵/۰۶۹	۴/۶۰۳	۵/۴۶۳
	خطا	۲	۲/۲۰۲			۶/۰۶۵
	مجموع	۸	۱۴۵/۲۸			۱۰۰
۹ mm	سرعت	۲	۵۴/۲۷۲	۲۷/۱۳۶	۱۹۲/۵۰	۳۰/۸
	مش ذرات	۲	۱۱۶/۶۳۵	۵۸/۳۱۷	۴۱۳/۷۰	۶۶/۳۷۷
	گپ‌کاری	۲	۴/۱	۲/۰۵	۱۴/۵۴۵	۲/۱۷۸
	خطا	۲	۰/۲۸۱	۰/۱۴		۰/۶۴۵
	مجموع	۸	۱۷۵/۲۹			۱۰۰

- [8] S. Yin, T. Shinmura, Vertical Vibration-assisted Magnetic Abrasive Finishing and Deburring for Magnesium Alloy, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 12-13, pp. 1297-1303, 2004.
- [9] Y.M. Baron, S.L. Ko, J.I. Park, Characterization of the Magnetic Abrasive Finishing Method and Its Application to Deburring, *Key Engineering Materials*. Vols. 291-292, pp. 291-296, 2005.
- [10] Y. Zou, T. Shinmura, F. Wang, Study on a Magnetic Deburring Method by the Application of the Plane Magnetic Abrasive Machining Process, *Journal Advanced Materials Research*, Vol. 76-78, pp. 276-281.
- [11] J.Kwak, Enhanced magnetic abrasive polishing of non-ferrous metals utilizing a permanent magnet, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, pp.613-618, 2009.
- [12] J.S.Kwak, H.S.Kang, 2011, 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, March 16-18, 2011.
- [13] J.Kang, H.Yamaguchi, Internal finishing of capillary tubes by magnetic abrasive finishing using a multiple pole-tip system, *Precision Engineering*, Vol. 36, pp. 510- 516, 2012.
- [14] G.Kumar, V.Yadav, Temperature distribution in the workpiece due to plane magnetic abrasive finishing using FEM, *International Journal of Manufacturing Technology*, Vol.41, pp. 1051-1058, 2009.
- [15] M. Fox, K. Agrawal, T. Shinmura, R. Komanduri, Magnetic abrasive finishing of rollers. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol43, pp. 181-184, 1994.

زیادی در کارایی فرآیند پلیسه‌گیری با ذرات ساینده دارد.
- نتایج نشان می‌دهد با گذشت زمان نرخ براده‌برداری کاهش می‌یابد.

۹- مراجع

- [1] K. Jinsoo, D.A. Dornfeld, Development of an analytical model for drilling burr formation in ductile materials, Transactions of the ASME. *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 124, No. 2, pp. 192-8, 2002.
- [2] T. Mori, K. Hirota, Y. Kawashima, Clarification of magnetic abrasive finishing mechanism, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 143-144, , No. 2, pp. 682-686, 2003.
- [3] Y. Zou, T. Shinmura, Development of a new magnetic field assisted deburring technology for inside surface using permanent magnets and magnetic particles (Machining principle and a few deburring characteristics) *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology (JSAT)*, Vol. 51, No.2, pp. 94-99, 2007.
- [4] J.D. Mattingly, W.H. Heiser, D.T. Pratt, *Aircraft Engine Design*, 2nd Edition, AIAA education series, Reston, Virginia, 2002.
- [5] T.W. Kim, J.S. Kwak, A Study on Deburring of Magnesium Alloy Plate by Magnetic Abrasive Polishing, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 11, No. 2, pp. 189-194, 2010.
- [6] S.L.Ko, Y.M. Baron, J.W.Chae, Development of Deburring Technology for Micro Drilling Burrs using Magnetic Abrasive Finishing Method.
- [7] S.L. Ko, Y.M. Baron, J.I. Park, Micro deburring for precision parts using magnetic abrasive finishing method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187-188 , pp. 19-25, 2007.