

براده برداری نانومتریک سطوح تخت با استفاده از میدان مغناطیسی و بررسی عوامل موثر بر آن

مهرداد وحدتی^۱

چکیده

یکی از روشهای جدید پرداخت کاری با استفاده از نیروی مغناطیسی، براده برداری در محدوده نانومتر، پرداخت کاری سایشی مغناطیسی^۱ (MAF) می باشد. انرژی حاصل از میدان مغناطیسی، برای حرکت ابزار ساینده استفاده می گردد. با حرکت نسبی میدان مغناطیسی و قطعه کار، ذرات ساینده نیز به دنبال میدان مغناطیسی حرکت می کنند.

در این پژوهش، فرآیند پرداخت کاری سایشی مغناطیسی معرفی و یک نمونه آزمایشگاهی از تجهیزات MAF برای کار روی سطوح مستوی طراحی و ساخته شده است. عوامل موثر بر صافی سطح تعیین و بهترین شرایط پرداخت کاری مشخص شده است. صافی سطح به عنوان هدف طراحی قرار گرفته و تلاش شده است تا کوچکترین مقادیر بدست آید. برخی عوامل تاثیر زیادی بر تغییرات صافی داشته و آن را به میزان چند ده نانومتر کاهش می دهد.

نتایج این تحقیق نشان می دهد که افزایش سرعت دورانی قطبها اثر قابل توجهی در بهبود صافی سطح دارد. نوع، شکل و ابعاد ذرات ساینده باعث تغییر در صافی سطح خواهد شد. با افزایش زمان پرداخت کاری، بهبود در صافی سطح قابل توجه است. صافی سطح بدست آمده تحت بهترین شرایط $0.41 \mu m$ اندازه گیری گردید.

کلمات کلیدی: میدان مغناطیسی، ذرات ساینده، پرداخت نانومتریک، صافی سطح، آهن ربا.

Nanometric Finishing of Flat Surfaces Using Magnetic Field

M. Vahdati

ABSTRACT

The need for mirror-finished surfaces has grown rapidly in recent years. This is due to improvements of new products application in high technology industries. New requirements urge new production methods. One of which, in the field of machining technology, is Magnetic Abrasive Finishing. This results in surface roughness of materials in the order of sub-micron and nano level. The technology is based on the magnetic field force, which is exerted on the abrasive powder and runs the powder tool on the surface of work piece.

The process was applied to flat planes. A special apparatus was designed and made for implementation of experiments. Many properties of different factors affecting this process were examined and their influence on the surface roughness was cleared.

KEYWORDS: Magnetic abrasive finishing, Nano Machining, Magnets, Surface Roughness, Abrasive Tool, Magnetic Field.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۶/۳/۲۱

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۸/۴/۲۴

^۱ استادیار گروه ساخت و تولید دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی تهران صندوق پستی

Email: vahdai@kntu.ac.ir ۱۹۹۹-۱۹۳۹۵

با بررسی‌های انجام شده توسط این محققان مشخص گردید که قدرت میدان مغناطیسی و گرادیان آن در مرکز قطب‌های مغناطیسی در کمترین مقدار خود و در لبه‌های کناری قطب‌ها بیشترین مقدار را دارا می‌باشد.

شینمورا در سال ۱۹۹۶ به همراه دو همکارش کانکو و هیتومی در ادامه تحقیقات مرتبط در رابطه با پرداخت‌کاری داخلی لوله‌ها، به جای دوران لوله، قطب‌های مغناطیسی را به دور لوله به دوران درآوردند [۶]. در واقع تفاوت اصلی با تحقیقات قبلی استفاده از همین میدان دوار بود.

در مقاله دیگری که در سال ۱۹۹۹ منتشر شد به بررسی فرآیند MAF از دیدگاه دیگری پرداخته شد. بیشتر تحقیقات قبلی خصوصیات فرآیند را از دیدگاه ماکروسکوپی مورد بررسی و تحلیل قرار داده بودند ولی در این تحقیق دانشمندان رفتار فرآیند را از دیدگاه میکروسکوپی بررسی و در این زمینه از روش‌های تصویربرداری AFM^f و SEM^o استفاده نمودند [۷].

چهار محقق از کشور هند در سال ۲۰۰۱ میلادی در مقاله‌ای که منتشر نمودند اثرات فاصله هوایی^۶ و سرعت دورانی را بر روی عملکرد فرآیند پرداخت‌کاری توسط ذرات ساینده بررسی نمودند [۸].

در سال ۲۰۰۱ میلادی در مقاله‌ای توسط پژوهشگران تایلندی، اثرات میدان مغناطیسی و نوع نیروهای وارده بر ذرات ساینده بررسی گردید [۹]. در این پژوهش که پرداخت‌کاری سطح خارجی یک پروفیل استوانه‌ای مدنظر قرار گرفته بود، از پودر SiC به عنوان ابزار ساینده استفاده گردید که به صورت مکانیکی با پودر فرومغناطیس مخلوط شده بود.

در مقاله‌ای با نام "توضیح مکانیزم پرداخت‌کاری سایشی" که در سال ۲۰۰۳ توسط ۳ محقق ژاپنی به چاپ رسید [۱۰]، اصول کلی عملکرد فرآیند MAF و به صورت دقیق‌تر، بررسی نیروهای اعمال شده به منظور پرداخت سطح قطعه کار مورد بررسی قرار گرفت.

۳- تئوری

ابزار ساینده مغناطیسی که به شکل پودر است، روی سطحی از قطعه کار که باید مورد پرداخت واقع شود قرار می‌گیرد. نیروی حاصل از میدان مغناطیسی بر ابزار ساینده اعمال می‌شود. با حرکت نسبی میدان مغناطیسی و قطعه کار، پودر ساینده نیز شروع به حرکت کرده و عملیات پرداخت کاری انجام می‌پذیرد.

استفاده از نیروی مغناطیس برای عملیات پرداخت کاری به عنوان فرآیند پرداخت کاری سایشی مغناطیسی^۲ (MAF) معروف است. اصول کلی این فرآیند در شکل (۱) نشان داده شده است. ابزار شامل توده ای از ذرات ساینده و بسیار سخت است که بیشتر از مواد غیر فلزی تشکیل شده اند. برای آنکه بتوان این مواد را تحت یک میدان مغناطیسی به حرکت درآورد باید از مواد مغناطیسی ساینده استفاده نمود، و یا آنکه باید آن را با پودرهای مغناطیسی مخلوط نمود. با حرکت مواد مغناطیسی در میدان جاذبه آهن رباها، می‌توان آنها را روی انواع مختلف قطعات حرکت داده و سطوح را تحت براده برداری قرار داد. برای تغییر مسیر ذرات ساینده و هدایت آنها در تمامی جهات دلخواه می‌توان محل و جهت اعمال میدانهای مغناطیسی را تغییر داد. این کار با حرکت آهن رباها انجام می‌شود. عوامل زیاد دیگری نیز در راندمان و عملکرد این فرآیند موثرند که می‌توان با تغییر آنها به بررسی فرآیند پرداخت.

یکی از کاربردهای این فرآیند در صنعت نفت و گاز می‌باشد. معمول ترین روش پرداخت کاری لوله های بلند در صنایع نفت و گاز و پتروشیمی، پرداخت کاری الکترولیزی^۳ می‌باشد. این روش نیاز به هزینه زیاد برای کنترل پرداخت کاری دارد. مشکلات زیست محیطی مربوط به پساب های الکترولیتی نیز جدی است. استفاده از فرآیند پرداخت کاری سایشی مغناطیسی می‌تواند جایگزین مناسبی برای پرداخت سطوح داخلی لوله ها باشد. تجهیزات لازم برای انجام فرآیند ساده بوده و هزینه آن به مراتب کمتر می‌باشد [۱].

۲- تحقیقات انجام شده

شینمورا و همکارانش تاکازاوا، هاتانو و ماتسونوگا در سال ۱۹۹۰ در مقاله‌ای به بررسی فرآیند پرداخت‌کاری سطح خارجی یک استوانه اشاره نمودند [۲].

در سال ۱۹۹۴ میلادی شینمورا به همراه همکارش یاماگوچی در مقاله‌ای به معرفی یک شیوه جدید در پرداخت سطوح داخلی لوله‌های بلند و انحنادار پرداختند [۳].

فاکس و اگروال از دانشگاه اوکلاهما در سال ۱۹۹۴ میلادی در مقاله‌ای به بررسی پرداخت غلطک‌هایی از جنس فولاد ضدزنگ توسط روش MAF پرداختند [۴].

در سال ۱۹۹۵ میلادی شینمورا و یاماگوچی در ادامه تحقیقات خود به بررسی چگونگی توزیع میدان مغناطیسی با استفاده از روش MAF در پرداخت داخلی لوله‌ها پرداختند [۵].

$$f_n = nF_z \quad (2)$$

$$f_n = \frac{B^2}{2\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_m}\right) S \quad (3)$$

رابطه (۳) مقدار همین نیرو را از طریق روابط تئوری نشان می‌دهد. در رابطه (۳) پارامترها عبارتند از:

n : تعداد لبه های برنده یا تعداد ذرات ساینده است.

μ_0 : ضریب نفوذ پذیری مغناطیس در خلاء

μ_m : ضریب نفوذ پذیری مخصوص

B : دانسیته شار مغناطیسی

k : حساسیت ذرات ساینده نسبت به میدان مغناطیسی (حساسیت ضریب ثابتی است که بیانگر واکنش ذرات نسبت به میدان مغناطیسی می‌باشد)

در پایان اگر یک ذره ساینده در میدان مغناطیسی قرار گیرد، بزرگی نیروی برآیند وارد بر آن از (۴) بدست می‌آید:

$$F = \mu \left(\frac{dB}{dX} \right)_{\max} \quad (4)$$

μ : گشتاور دوقطبی مغناطیسی

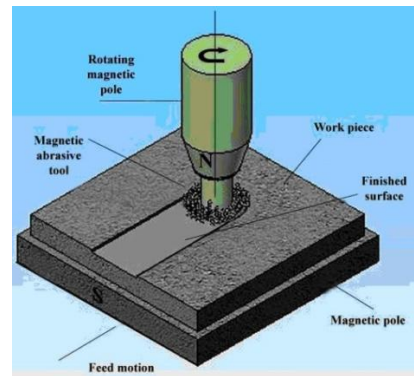
۳-۱- پودرهای ساینده

پودر ساینده ترکیبی از دو پودر ساینده و پودر مغناطیسی می‌باشد که توسط روشهای مختلفی با یکدیگر، با درصد وزنی مختلف مخلوط شده اند. انواع گوناگونی از پودرهای ساینده از قبیل، کاربید سیلیسیم، اکسید آلومینیوم، ایلمنیت، کاربید بور، الماس، و همچنین پودر آهن به عنوان ماده فرومغناطیس، در این روش بکار گرفته می‌شوند.

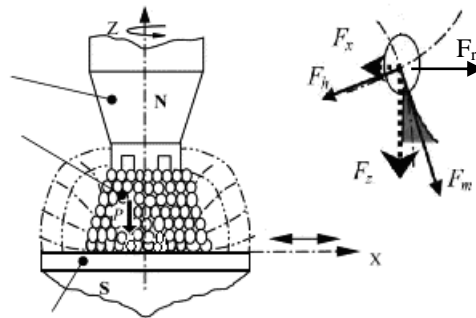
با توجه به شکل (۲) نیروی F_r گریز از مرکز است که ناشی از دوران آهن رباها می‌باشد. نیروی افقی کل برآیند نیروی F_x و F_r می‌باشد. فشار پرداخت کاری لازم برای انجام فرایند براده برداری نتیجه نیروی جاذبه مغناطیسی و نیروی گریز از مرکز ابزار می‌باشد. نیروی جاذبه مغناطیسی تابعی از دانسیته شار مغناطیسی و نیروی گریز از مرکز ابزار تابعی از جرم و مربع سرعت ابزار می‌باشد. بنابراین برای داشتن شرایط مناسب لازم است که ابزار با سرعت بالا دوران کند و بیشتر از یک کوپل N-S برای ایجاد گشتاور داشته باشد.

۳-۲- طراحی فرایند

این تحقیق به منظور پرداخت کاری سطوح تخت توسط روش MAF و بررسی پارامترهای مؤثر بر آن انجام شده است. طراحی براساس حرکت قطعه کار و منبع میدان مغناطیسی انجام شد. حرکت دورانی قطب مغناطیسی، و حرکت



شکل (۱): فرایند پرداخت کاری سایشی مغناطیسی (MAF)



شکل (۲): نیروهای مغناطیسی اعمال شده بر ذره ساینده

خطوطی از میدان مغناطیسی که دانسیته شار مغناطیسی در تمام نقاط آن برابر باشد خطوط هم پتانسیل مغناطیسی نامیده می‌شوند. خطوط عمود بر خطوط هم پتانسیل، که در واقع جهت اعمال نیروی مغناطیسی را تعیین می‌کنند، خطوط نیروی مغناطیسی نامیده می‌شوند، [۱۱]. در شکل (۲) نیروهای اعمالی از طرف میدان بر یک ذره ساینده دیده می‌شود.

نیروی حاصل از میدان مغناطیسی در راستای خطوط تعریف شده بر ابزار ساینده اعمال می‌شود. نیروی F_h در راستای خطوط هم پتانسیل مغناطیسی و نیروی F_m در راستای خطوط نیروی مغناطیسی بر ذره ساینده اعمال می‌گردد. نیروی کلی اعمال شده بر ذره ساینده با F_t بیان می‌شود. رابطه (۱).

$$F_t = F_m + F_h \quad (1)$$

با تجزیه نیروی F_t دو مولفه آن در شکل (۲) بصورت F_x و F_z ظاهر می‌شود. F_x به عنوان مؤلفه افقی F_t و تحت عنوان نیروی مماسی میدان مغناطیسی، و F_z در راستای محور Z به عنوان نیروی عمودی میدان مغناطیسی نامیده می‌شوند. این دو نیرو به ترتیب سبب دوران پودر ساینده به همراه قطب دوار و تولید نیروی لازم بر روی لبه برنده ابزار ساینده برای انجام عملیات براده برداری، می‌شوند. با توجه به بحث یاد شده، نیروی عمودی وارد بر تمام ذرات ساینده بصورت (۲) است.

آهنرباها و همچنین ابعاد قطعه کار انتخاب گردید. از آنجا که بایستی برای جلوگیری از انحراف خطوط میدان مغناطیسی در موضع پرداخت کاری از مواد دیامغناطیس برای ساخت فیکسچر استفاده نمود، بدین منظور از قطعات تفلون به عنوان ماده اولیه برای ساخت آن استفاده گردید. برای اتصالات نیز از پیچهای آلومینیوم آلیاژی استفاده شد. به منظور جلوگیری از خورده شدن تفلون در باز و بسته کردنهای متوالی از بوشهای برنجی که به صورت فشاری داخل تفلون جاگذاری شدند کمک گرفته شد.

در ساخت فیکسچر برای ایجاد موقعیت مناسب قطب S نسبت به قطب N از حرکت کشویی قطعه تفلونی که قطب S روی آن قرار گرفته است، استفاده شد. شکل (۳).

۳-۴- نگهدارنده

به منظور دوران پودر ساینده مغناطیسی که بر روی سطح قطعه کار قرار دارد، از حرکت دورانی قطب N استفاده می‌شود. قطب N در واقع یک آهنربای دائمی از نوع Nd-Fe-B به ابعاد $10 \times 30 \phi$ می‌باشد. برای دوران این آهنربا بایستی آنرا در یک نگهدارنده که قابلیت حرکت توسط دستگاه را دارد قرار داد. در شکل (۴) این نگهدارنده و آهن ربای مربوطه مشاهده می‌شود.

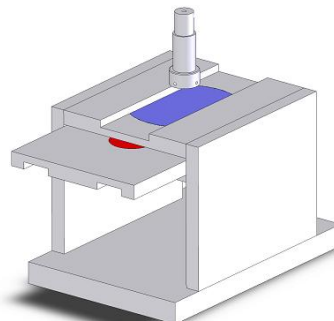


شکل (۴): نگهدارنده قطب N برای ایجاد حرکت دورانی

۳-۵- ماشین ابزار

از ماشین فرز به منظور انجام آزمایشات استفاده گردید. حرکت دورانی توسط کله گی فرز ایجاد گردید. حرکت های خطی به منظور موقعیت دهی مناسب قطعه کار و ایجاد فضای مناسب^۱ بین قطب مغناطیسی و قطعه کار توسط میز افقی تامین گردید. نگهدارنده قطب N به کولت دستگاه بسته شده و فیکسچر نیز توسط روبند روی میز ماشین قرار گرفت. در شکل (۵) دستگاه فرز به کار رفته برای انجام آزمایشات همراه با دیگر تجهیزات مربوطه نشان داده شده است.

طولی قطعه کار توسط یک دستگاه فرز تولید گردید. به منظور موقعیت دهی صحیح قطعه کار در حوزه مغناطیسی تولید شده، فیکسچری طراحی و ساخته شد. شکل (۳) این فیکسچر را نشان می‌دهد.



شکل (۳): فیکسچر برای انجام آزمایشات روی سطح صاف

مناسب ترین گزینه برای آهن رباهای دائمی^۲ از نوع Nd-Fe-B می‌باشد. آزمایشات با استفاده از آهنرباهای با شدت T ۱/۲ انجام پذیرفت. آهنرباهای به کار رفته دارای ابعاد $10 \times 30 \phi$ و $10 \times 60 \phi$ می‌باشند که از یکی به عنوان قطب N و از دیگری به عنوان قطب S استفاده گردید.

حساسیت ذرات ساینده پایین می‌باشد. لذا نیروی مغناطیس اعمالی در مقایسه با ذرات آهن بسیار پایین است. به همین دلیل ترکیبی از ذرات ساینده و ذرات مغناطیسی به عنوان ابزار در نظر گرفته می‌شود. که در آن نیروهای مغناطیسی اعمال شده بر روی ذرات آهن، سبب اعمال فشار روی ذرات ساینده شده و از آنجا عمل پرداخت کاری صورت می‌پذیرد. به منظور کسب عملکرد درست بایستی همواره از نسبت مناسب در انتخاب ذرات پیروی نمود. انتخاب صحیح این مقادیر سبب به وجود آمدن تعادل در نیروی اعمالی و تعداد لبه های برنده (میزان براده برداری) خواهد شد. در فرایند MAF از انواع ذرات ساینده به همراه ذرات آهن می‌توان استفاده نمود که از جمله می‌توان به اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)، کاربید سیلیسیم (SiC) کاربید بور (B_4C) اشاره نمود. در این تحقیق از دو نوع پودر ساینده مغناطیسی ایلمنیت (اکسید تیتانیوم - آهن) ($FeTiO_3$) و کاربید سیلیسیم (SiC) استفاده گردید. از روغن ۴۰ معمولی به عنوان روانکاری و خمیری نمودن پودرها استفاده گردید.

۳-۳- فیکسچر

به منظور نگه داشتن قطعه کار با ابعاد مشخص و همچنین موقعیت دهی صحیح قطب ها نسبت به قطعه کار، فیکسچری طراحی و ساخته شد. ابعاد این فیکسچر باتوجه به ابعاد

۴-۱- آزمایشات سرعت دورانی قطب مغناطیسی (N)

با ثابت بودن دیگر ویژگی های فرایند در سری اول آزمایشات تنها به بررسی تأثیرات سرعت دورانی بر صافی سطح پرداخته شد. با استفاده از دستگاه فرز، دوره های مختلف برای دوران قطب مغناطیسی (N) بکار رفت. این سری از آزمایشات برای دو نوع پودر ساینده ایلمنیت و SiC انجام پذیرفت. مدت انجام فرایند ۱۰ min در نظر گرفته شد. فاصله هوایی بین قطب مغناطیسی دوار و سطح قطعه کار برابر ۵ mm و توسط بلوک سنجه^۱ معین گردید. جدول (۲) شرایط مربوط به آزمایشات و مشخصات آنها را به صورت دقیق تر نشان می دهند.

۴-۲- آزمایشات نوع پودر ساینده

یکی دیگر از عوامل موثر در میزان براده برداری و ایجاد صافی سطح، نوع پودر ساینده می باشد. به منظور بررسی اثر نوع پودر ساینده، استفاده از مخلوط کاربید سیلیسیم (SiC) و پودر آهن به عنوان ابزار پرداخت کاری مدنظر قرار گرفت. ۸۰ درصد وزنی مخلوط شامل ذرات آهن و ۲۰ درصد وزنی شامل پودر ساینده کاربید سیلیسیم بوده که توسط روغن ۴۰ معمولی با یکدیگر مخلوط شدند. در این دور آزمایشات زمان ثابت و برابر ۱۰ min انتخاب گردید.

۴-۳- آزمایشات مدت انجام فرایند

از دیگر مواردی که بر میزان براده برداری و پرداخت سطوح تأثیر گذار است، مدت انجام فرایند می باشد. این امر به خاطر افزایش میزان برخورد لبه های برنده ابزار ساینده با سطح مورد نظر می باشد. برای بررسی تأثیر زمان بر صافی سطح، آزمایشاتی انجام شد که در برخی از پودر ایلمنیت به عنوان ابزار ساینده و در برخی دیگر از پودر ساینده SiC به همراه ذرات آهن استفاده گردید. در هر دو سری آزمایشات سرعت دورانی قطب مغناطیسی ثابت و برابر ۱۰۰۰ rpm در نظر گرفته شد. دیگر پارامترهای مربوط به این قسمت از آزمایشات شبیه به موارد قبلی انتخاب گردید. در جدول (۳) مشخصات هر یک از آزمایشات دیده می شود.

۴-۴- آزمایشات فاصله قطب دوار و سطح قطعه کار

یکی از مواردی که برای پرداختکاری سطوح تخت، بر صافی سطح تأثیر گذار است، فاصله بین قطب مغناطیسی دوار (N) و سطح قطعه کار می باشد. همانطور که پیشتر نیز یادآوری شد این فاصله توسط بلوک سنجه تنظیم می شود. این فاصله بیانگر میزان نیروهای وارد بر ابزار ساینده در حوزه میدان



شکل (۵): دستگاه فرز همراه با دیگر تجهیزات MAF

۳-۶- قطعه کار

از صفحات آلومینیومی AA-6۰۶۱ به عنوان قطعه کار استفاده شد. خواص مکانیکی این آلیاژ در جدول (۱) آورده شده است [۱۲].

قطعات تهیه شده برای پرداخت کاری، دارای ابعاد ۱۰*۱۴۰* ϕ می باشند.

۴- آزمایشات

از مهم ترین پارامترهای موثر در فرایند MAF می توان به خصوصیات اشاره نمود که عبارتند از:

- خصوصیات مربوط به ذرات ساینده از قبیل نوع ذرات، مقدار و شکل دانه ها
- خصوصیات مربوط به میدان مغناطیسی از قبیل شدت میدان و چگونگی توزیع خطوط میدان
- خصوصیات مربوط به چگونگی حرکت نسبی بین قطعه کار و میدان مغناطیسی از قبیل؛ چگونگی حرکت (خطی یا دورانی) و سرعت حرکت.
- فاصله بین قطبهای مغناطیسی و قطعه کار
- مدت زمان انجام فرایند پرداخت کاری
- نوع و میزان روانکار یا مایع خنک کننده
- خصوصیات مربوط به قطعه کار از قبیل جنس، شکل هندسی

تعدادی از این پارامترها انتخاب گردیده و آزمایشات برای بررسی تأثیر آنها در صافی سطح قطعه کار به عمل آمد.

۱- سرعت دورانی قطب مغناطیسی (N)

۲- نوع پودر ساینده

۳- مدت زمان انجام فرایند

۴- میزان فاصله بین قطب دوار (N) و سطح قطعه کار

۵- مقدار مایع روانکار

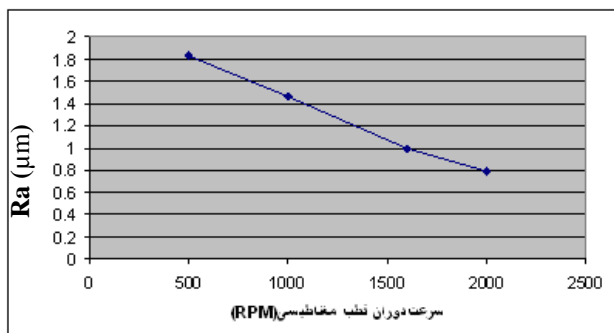
مغناطیسی خواهد بود، شکل (۶).

برای بررسی این عامل آزمایشاتی طراحی گردید. از پودر ساینده ایلمنیت به عنوان ابزارساینده استفاده شده است. سرعت دورانی برابر با ۱۶۰۰ rpm و مدت زمان انجام فرایند ۱۵ دقیقه انتخاب گردید.



شکل (۶): فاصله بین قطب دوار و سطح قطعه کار

منحنی بدست آمده از آزمون زبری سنجی (آزمایش شماره ۴) دیده می‌شود. با توجه به اینکه فرایند انجام شده در پی اعمال نظم خاصی به سطح قطعه کار نیست، و آن را به صورت یکنواخت آرایش می‌دهد، لذا استفاده از معیار صافی سطح متوسط عاقلانه خواهد بود.



شکل (۷): تاثیر سرعت دورانی قطب مغناطیسی بر صافی سطح

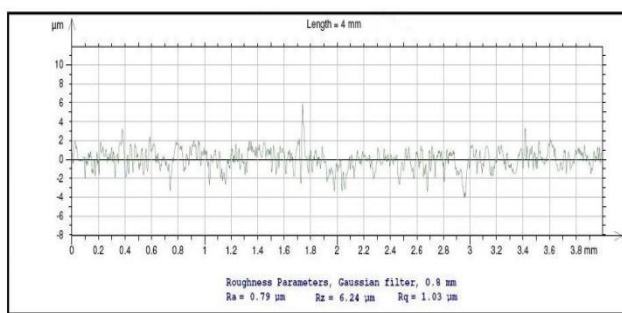
۴-۵- آزمایشات مقدار روانکار

یکی از مواردی که ممکن است در میزان پرداخت سطوح تاثیرگذار باشد، مقدار روانکار می‌باشد. بدین منظور از مقادیر مختلف روغن ۴۰ معمولی برای پرداخت کاری استفاده گردید. فاصله بین ابزار دوار و سطح قطعه کار برابر ۵ mm در نظر گرفته شد.

۵- بررسی و تحلیل نتایج آزمایشات

۱-۵- سرعت دورانی قطب مغناطیسی

سرعت دورانی قطب مغناطیسی همان سرعت دورانی توده ساینده می‌باشد. همانگونه که در شکل (۷) دیده می‌شود، افزایش سرعت دورانی باعث پرداخت سطح خواهد شد. دلیل این امر افزایش پیوسته در تعویض لبه های برنده ابزار ساینده می‌باشد. به هر حال سرعت دورانی قطب مغناطیسی همان سرعت برش می‌باشد. البته در سازوکار طراحی شده به دلیل باز بودن فضای اطراف توده تا حد مشخصی می‌توان سرعت دورانی را افزایش داد. اگر این سرعت از مقدار مشخصی تجاوز نماید، سبب پراکندگی توده شده و در عمل، کارایی فرآیند را تحت شعاع قرار خواهد داد. در پایان، بهترین صافی سطح حاصل شده ۷۹۰ نانومتر بود. بر اساس آنچه در منحنی مزبور نشان داده شده است، با افزایش سرعت دورانی می‌توان صافی سطح را افزایش داد. نکته دیگر رابطه خطی بین صافی سطح و سرعت دورانی قطب مغناطیسی است. تخمین زده می‌شود که با افزایش سرعت برش، کاهش زبری به صورت خطی ادامه نمی‌یابد. زیرا افزایش سرعت برش باعث خواهد شد تا ذرات ساینده به جای برش سطح تنها بر روی آن بغلتند و روند تغییر صافی سطح کاهش یابد. در شکل (۸) نمونه ای از



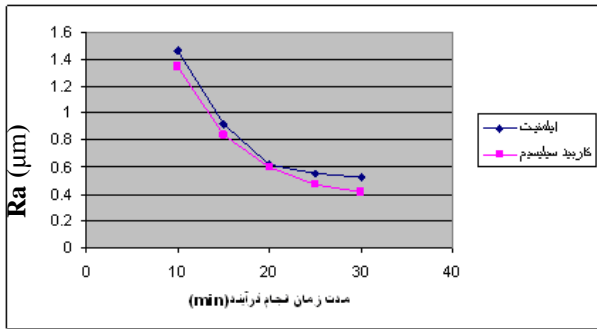
شکل (۸): منحنی آزمون زبری سنجی آزمایش شماره ۴

۲-۵- نوع پودر ساینده

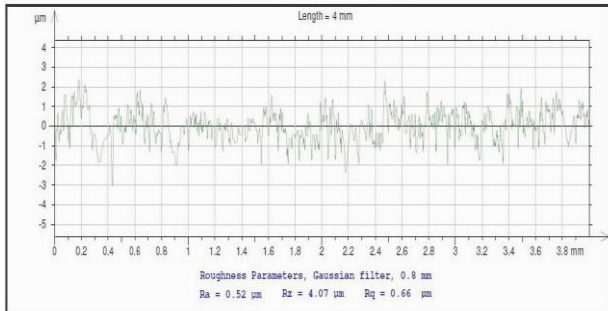
همانطور که در شکل (۹) دیده می‌شود، صافی سطح حاصل از دو پودر کاربید سیلیسیم و ایلمنیت تا اندازه ای با هم متفاوت هستند. در مقایسه این دو ماده ساینده مشخص می‌شود که کاربید سیلیسیم صافی بهتری می‌دهد. اختلاف مقادیر حاصل از کاربید سیلیسیم با ایلمنیت تقریباً در تمام طول منحنی یکسان است. هر دو منحنی همانند آزمایش قبل از روند خطی پیروی می‌کنند. دلیل تفاوت در نتایج دو نوع ساینده تفاوت در شکل ذرات، اندازه، و سختی آنها می‌باشد. که نتیجه آن تغییر در نیروی مغناطیسی اعمالی بر ذرات و از آنجا تفاوت در فشار پرداخت کاری خواهد بود. شکل (۱۰) نمونه منحنی حاصل از دستگاه اندازه گیری صافی سطح را که در آزمایش شماره ۸ بدست آمده نشان می‌دهد. در این آزمایش از پودر کاربید سیلیسیم استفاده شده است. و سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه است. صافی سطح متوسط در بهترین حالت ۶۱۰ نانومتر می‌باشد.

۵-۳- مدت زمان انجام فرآیند

یکی از عوامل موثر در نرخ براده برداری^{۱۱} و زبری سطوح در فرآیند MAF، مدت زمان انجام فرآیند می‌باشد. در شکل (۱۱) تاثیر زمان انجام فرآیند برای دو نوع ابزار ساینده دیده می‌شود. در مدت ۳۰ دقیقه بهترین میزان پرداخت برابر با ۴۱۰ نانومتر و با استفاده از پودر SiC بدست آمد. این منحنی بر خلاف شکلهای (۷) و (۹) بصورت خطی نبوده و به تدریج با افزایش زمان، روند کاستن صافی سطح کم می‌گردد. رابطه منحنیهای کاربرد سیلیسیم و ایلمنیت در این شکل هم حفظ شده است. در شکل (۱۲) منحنی حاصل از آزمون زبری سنجی این آزمایش دیده می‌شود. بعد از زمان ۲۰ دقیقه درصد پرداخت سطوح کاهش یافته است. این امر به دلیل ایجاد شیارهای ثانویه در سطح قطعه کار می‌باشد. همچنین با ادامه فرآیند و افزایش زمان پرداختکاری براده های جدا شده از قطعه کار داخل توده ساینده محبوس شده و در عمل به جای پودر ساینده این براده ها هستند که روی سطح ساییده می‌شوند. ولی نمی‌توانند عمل برش را انجام دهند. با توجه به این نتایج باید زمان بهینه ای برای عملیات پرداخت کاری وجود داشته باشد.



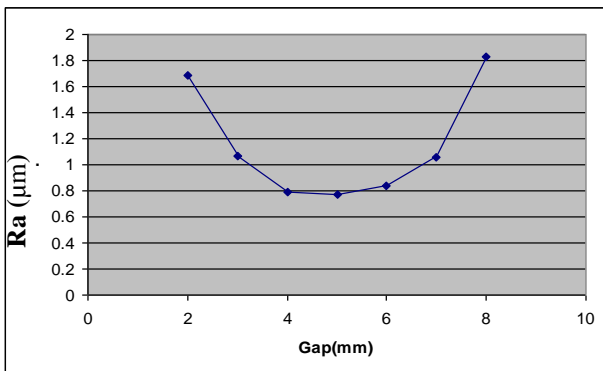
شکل (۱۱): تاثیر زمان انجام فرآیند بر صافی سطح



شکل (۱۲) نمودار آزمون زبری سنجی آزمایش شماره ۱۳

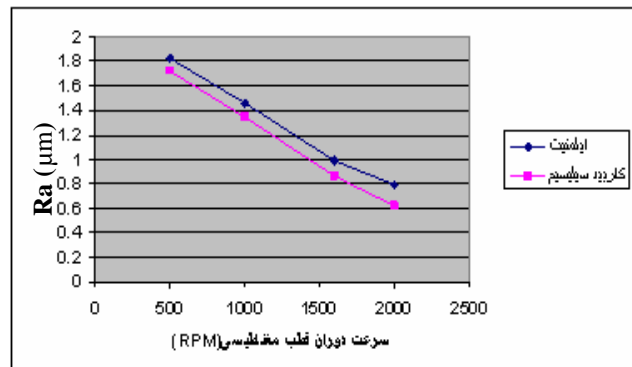
۵-۴- فاصله هوایی (Gap)

در فرآیند MAF فاصله بین قطب مغناطیسی دوار (N) و سطح قطعه کار بر روی صافی سطح تاثیرگذار است. دلیل این امر، تفاوت در گرادیان شدت میدان مغناطیسی با تغییر این فاصله می‌باشد. در شکل (۱۳) ارتباط بین زبری سطح و فاصله بین قطب دوار و قطعه کار دیده می‌شود.

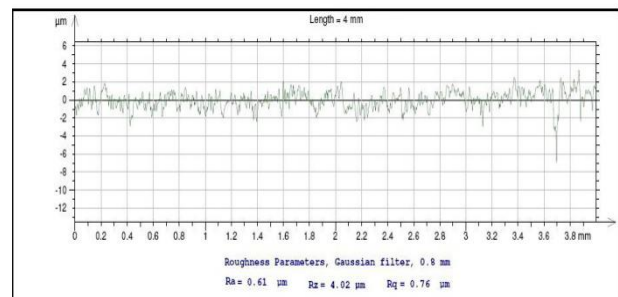


شکل (۱۳): تاثیر فاصله هوایی (Gap) بر میزان صافی سطح

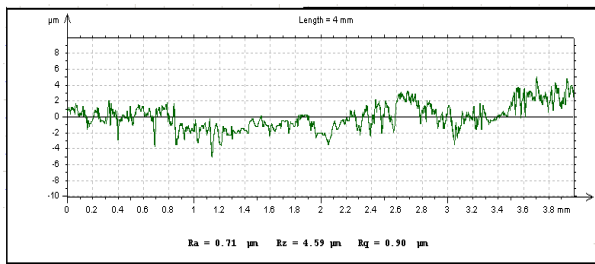
همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود، بهترین مقدار صافی سطح با انتخاب Gap=۵mm بدست می‌آید. با وجود اینکه در مقادیر کمتر از ۵mm گرادیان شدت میدان بیشتر است، اما دلیل فاصله کم بین آهنربا و قطعه کار، توده ساینده به صورت یکنواخت و مناسب تشکیل نشده و سرعت دورانی آهنربا سبب



شکل (۹): تفاوت زبری سطح با توجه به نوع پودر ساینده



شکل (۱۰): گراف تست زبری سنجی آزمایش شماره ۸



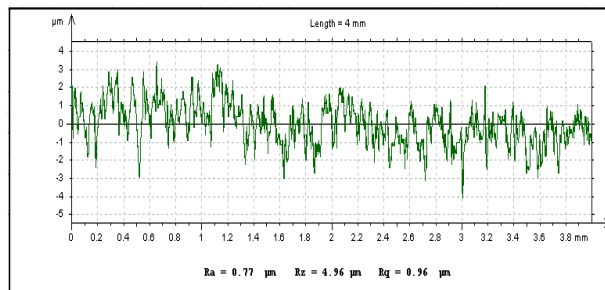
شکل (۱۶) نمودار آزمایش زبری سنجی آزمایش شماره ۲۷

۶- نتیجه

سازوکاری به منظور پرداخت آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-AA توسط دو نوع پودر ساینده ایلمنیت ($FeTiO_3$) و کاربید سیلیسیم (SiC) طراحی و ساخته شد. نکات مهمی به عنوان شاخص ترین نتایج مورد توجه واقع شده است که عبارتند از:

- افزایش سرعت دورانی قطبها اثر قابل توجهی در بهبود صافی سطح دارد. افزایش در مقدار این پارامتر تا زمانیکه سبب ایجاد برشهای ثانویه بر روی سطوح نگردد، قابل توجیه است. در محدوده آزمایشات انجام شده بهترین سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه بوده است.
- نوع، شکل و ابعاد ذرات ساینده باعث تغییر در صافی سطح خواهد شد. در این تحقیق استفاده از مخلوط مکانیکی SiC و پودر آهن بصورت گل ساینده نرخ براده برداری بیشتری را سبب شده است.
- با افزایش زمان پرداخت کاری، بهبود در صافی سطح قابل توجه است. نسبت براده برداری در زمانهای اولیه بیشتر از زمانهای پایانی انجام فرآیند می باشد. پس از ۲۰ دقیقه از شروع فرایند سازوکار براده برداری شروع به تغییر می کند. دلیل این امر کندی و کاهش در برخورد لبه های برنده ابزار ساینده است.
- در پرداخت سطوح توسط فرآیند MAF به دلیل تفاوت در گرادیان شدت میدان مغناطیسی، فاصله بین آهنربا و سطح مورد نظر برای پرداخت کاری باید به صورت درست انتخاب گردد تا توزیع مناسب خطوط میدان مغناطیسی برای ایجاد فشار پرداخت کاری لازم فراهم شود. بهترین مقدار برای این فاصله ۵ میلیمتر است.
- میزان صافی سطح بدست آمده تحت شرایط یاد شده؛ سرعت دوران قطب ساینده برابر ۱۰۰۰rpm، فاصله هوایی (Gap) برابر ۵ mm و استفاده از ابزار ساینده SiC به میزان $0.41 \mu m$ اندازه گیری گردید.

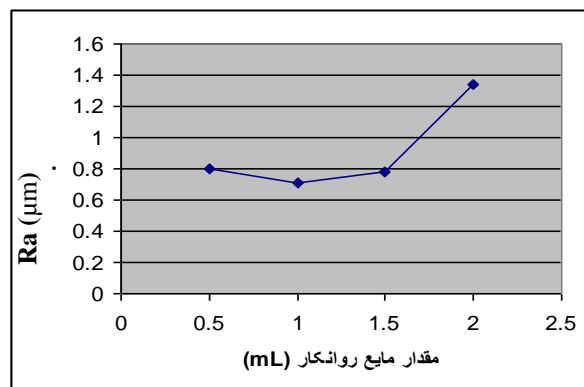
پراکنندگی توده و برخورد نامناسب لبه های ساینده ابزار با قطعه کار خواهد شد. در شکل (۱۴) نمودار حاصل از آزمایش ۲۲ مربوط به همین امر دیده می شود. بهترین مقدار صافی بدست آمده ۷۷۰ نانومتر می باشد.



شکل (۱۴): نمودار آزمون زبری سنجی آزمایش شماره ۲۲

۵-۵- مقدار مایع روانکار

به منظور ایجاد توده ساینده ای که به صورت یک مخلوط مکانیکی باشد، از روانکار استفاده گردید. روانکار علاوه بر چسباندن ذرات به هم سبب کاهش نیروهای اصطکاک و خنک شدن سطح می شود. در شکل (۱۵) دیده می شود که با انتخاب ۱ml روانکار بهترین میزان صافی سطح بدست می آید. شکل (۱۶) نشان دهنده منحنی حاصل از اندازه گیری صافی سطح نمونه آزمایش مربوطه است. در مقادیر کمتر از این میزان بدلیل ناپیوستگی لازم بین ذرات ساینده و ذرات فرومغناطیسی، کارایی فرآیند کاهش یافته است. در مقادیر بیشتر از ۱ml نیز بدلیل جاری شدن ابزار ساینده و قرارگیری نامناسب در میدان مغناطیسی، صافی سطح کاهش یافته است. و لذا همواره بایستی یک مقدار مشخص و صحیح را لحاظ نمود تا راندمان افزایش یابد.



شکل (۱۵): تاثیر میزان مایع روانکار مورد استفاده بر صافی سطح

جدول (۱): خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-AA

حد دوام (Mpa)	مدول کششی (Gpa)	سختی ویکرز (HV)	سختی برنیل (HB)	درصد ازدیاد طول	استحکام برشی (Mpa)	استحکام تسلیم (Mpa)	استحکام کششی (Mpa)
۷۶	۶۸/۹	۷۴	۶۵	۲۲	۱۶۵	۱۴۵	۲۴۰

جدول (۲): شرایط ماشینکاری

مشخصات قطعه کار	جنس: آلومینیوم AA۶۰۶۱ ابعاد: $\phi 10 \times 140$
مشخصات منع تولید میدان مغناطیسی	نوع: آهنربای دائمی (Nd - Fe - B) Rare Earth ابعاد: $\phi 30 \times 10$ قطب N و $\phi 60 \times 10$ قطب S دانسیته شار مغناطیسی: ۱/۲ T
مشخصات ابزار ساینده مغناطیسی	نوع: ایلمنیت، مقدار: ۶-۴g، اندازه: ۱۰۵-۸۸mm، عدد مش: ۱۵۰، نوع: مخلوط کاربید سیلیسیم (SiC) و پودر آهن، مقدار: ۶-۳g، ذرات آهن (۸۰ wt %) ذرات ساینده (۲۰ wt%)
مشخصات روانکار	نوع: روغن ۴۰ معمولی
سرعت دورانی قطب مغناطیسی	۵۰۰ , ۱۰۰۰ , ۱۶۰۰ , ۲۰۰۰ rpm
مدت زمان فرآیند	۱۰ min

جدول (۳): مشخصات آزمایشی نمونه های انجام شده برای اندازه گیری تاثیر مدت انجام فرایند

شرایط آزمایش							شماره آزمایش
مدت زمان انجام فرآیند (دقیقه)	مقدار روانکار	میزان فاصله قطب مغناطیسی و قطعه کار (Gap)	پودر ساینده	دانسیته شار مغناطیسی	سرعت دورانی قطب مغناطیسی	قطعه کار	
۱۰	۱ g	۵mm	ایلمنیت	۱/۲T	۱۰۰۰ rpm	AA-۶۰۶۱	۹
۱۵	۱ g	۵mm	ایلمنیت	۱/۲T	۱۰۰۰ rpm	AA-۶۰۶۱	۱۰
۲۰	۱ g	۵mm	ایلمنیت	۱/۲T	۱۰۰۰ rpm	AA-۶۰۶۱	۱۱
۲۵	۱ g	۵mm	ایلمنیت	۱/۲T	۱۰۰۰ rpm	AA-۶۰۶۱	۱۲
۳۰	۱ g	۵mm	ایلمنیت	۱/۲T	۱۰۰۰ rpm	AA-۶۰۶۱	۱۳
۱۰	۱ g	۵mm	SiC	۱/۲T	۱۰۰۰ rpm	AA-۶۰۶۱	۱۴
۱۵	۱ g	۵mm	SiC	۱/۲T	۱۰۰۰ rpm	AA-۶۰۶۱	۱۵
۲۰	۱ g	۵mm	SiC	۱/۲T	۱۰۰۰ rpm	AA-۶۰۶۱	۱۶
۲۵	۱ g	۵mm	SiC	۱/۲T	۱۰۰۰ rpm	AA-۶۰۶۱	۱۷
۳۰	۱ g	۵mm	SiC	۱/۲T	۱۰۰۰ rpm	AA-۶۰۶۱	۱۸

- H. Yamaguchi, T. Shinmura, "Study of an internal magnetic abrasive finishing using a pole rotation system Discussion of the characteristic abrasive behavior", Journal of the International Societies for Precision Engineering, 24, pp. 237-244, 2000
- V.K. Jain, Prashant Kumar, P.K. Behera, S.C. Jayswal, "Effect of working gap and circumferential speed on the performance of magnetic abrasive finishing process", Wear, 250, pp. 384-390, 2001
- Geeng-Wei Chang, Biing-Hwa Yan, "Study on cylindrical magnetic abrasive finishing using unbounded magnetic abrasives", International Journal of Machine Tools & Manufacturing, 42, pp. 575-583, 2002
- T. Mori, K. Hirota and Y. Kawashima, "Clarification of magnetic abrasive finishing mechanism", Journal of Materials Processing Technology, Volumes 143-144, pp. 682-686, 2003
- Edward P.Furlani, "Permanent Magnet and Electromechanical Devices", Academic Press, ISBN 0-12-269951-3, 2001.
- حامد توکلی، جدول اطلاعات فنی مهندسی آلیاژهای کاربردی صنعت آلومینیوم، گروه مهندسی عصر تحقیق و توسعه، ۱۳۸۳.
- [۷] T. Shinmura; H. Yamaguchi; "A new process for internal finishing of tube by the application of a new magnetic field", JSPE Journal, Vol. 38, No. 01, pp.15-18, 1994.
- [۸] T. Shinmura; K. Takazawa; E. Hatano; "Study on magnetic abrasive finishing", Ann CIRP 39, pp. 325-328, 1990
- [۹] H. Yamaguchi, T. Shinmura, "Development of a new type of magnetic finishing tool for internal finishing of tubes using rotating magnetic field", Transactions of NAMRI/SME, Vol XXII, 1994.
- [۱۰] M. Fox, K. Agrawal, T. Shinmura and R. Komanduri, "Magnetic abrasive finishing of rollers", Ann. CIRP 43(1), pp. 181-184., 1994
- [۱۱] H. Yamaguchi, T. Shinmura and K. Kuga, "New internal finishing process applying magnetic abrasive machining". Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C, 62, 600, pp. 3313-3319, 1995-6
- [۱۲] H. Yamaguchi, T. Kaneko, T. Shinmura, "Development of a new internal finishing process applying magnetic abrasive finishing by use of pole rotating system", International Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 30, No.4, 316-322, 1996-11.

- ∩ Magnetic Abrasive Finishing
- ∪ Magnetic Abrasive Finishing
- ∩ Electrolysis Finishing
- € Atomic Force Microscope
- ° Scanning Electron Microscope
- ∩ Gap
- ∪ Rare Earth
- ^ Gap
- ° Gage Block
- ∩ Material Removal Rate