

بررسی پارامترهای ماشین کاری تخلیه الکتریکی در حالت محلول دی الکتریک مخلوط شده با پودر آلومینیم

محمد اسدی^۱

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام حسین (ع)

مجید قریشی^۲

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده

از جدیدترین روش‌های بهبود راندمان ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM) افزودن پودر به دی الکتریک در این فرآیند است. در این مقاله، با افزودن پودر آلومینیم با اندازه کوچکتر از ۲۵ میکرون به دی الکتریک به بررسی تغییر پارامترهای ماشین کاری، مانند اندازه گپ، نرخ براده برداری و زبری سطح، پرداخته و پارامترهای ماشین کاری در شرایط پرداخت و نیمه پرداخت در دو حالت با پودر و بدون پودر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در اثر افزودن پودر به دی الکتریک بهبود قابل توجهی در کیفیت سطحی قطعات ماشین کاری شده حاصل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ماشین کاری تخلیه الکتریکی، نرخ براده برداری، زبری سطح، پودرهای افزودنی

Investigation of Electro Discharge Machining Parameters Using Aluminium Powder Suspended in Dielectric

M. Assadi

Mech. Eng. Group, Eng. Department, Imam Hossein Univ.

M. Ghoreishi

Mech. Eng. Department, Khajeh-Nasir Toosi Univ.

ABSTRACT

Powder suspended dielectric is one of the newest techniques for improving the efficiency of electro discharge machining. In this research, by adding Aluminium powder in less than 25µm size in dielectric, a variety of machining parameters, like Gap size, material removal rate, and surface roughness were investigated and compared in finishing and semi-finishing regimes in two states of with powder and without powder. The results show that, due to adding powder to dielectric, a considerable improvement in quality machined workpiece is achieved.

Key Words: Electro Discharge Machining, Material Removal Rate, Surface Roughness, Additive Powder

۱- مری و پژوهشگر: assadi3103@yahoo.com

۲- استادیار: ghoreishi@kntu.ac.ir

فهرست علائم

g/min	نرخ براده برداری	MRR
μm	زبری سطح	Ra
v	ولتاژ اعمالی	V
A	جریان اعمالی	I
μs	دوره تناوب پالس	τ

۱- مقدمه و پیشینه تحقیق

ماشین کاری به روش تخلیه الکتریکی^۱ جزء اولین فرآیندهای ماشین کاری غیر سنتی بوده و قدمتی ۵۰ ساله دارد. براده برداری به روش تخلیه الکتریکی را، اولین بار جوزف پریستلی در سال ۱۷۶۸ تجربه کرد [۱]. بعدها در طی جنگ‌های جهانی اول و دوم و در سال ۱۹۴۱، وقتی که کاربرد تنگستن در موتور خودروها و کلیدهای الکتریکی افزایش یافت، در حین کار با این ماده، پدیدگی یا کندگی^۲ روی آنها باعث روانه شدن کلیدها و خودروهای نظامی به تعمیرگاه می‌شد. به منظور حل این موضوع دولتمردان روس، دو پروفیسور دانشگاه مسکو، یعنی لازارنکوها را مأمور حل موضوع کردند. در آن زمان کاربرد این روش ماشین کاری به دلیل خوردگی زیاد الکترودها اندک بود، زیرا مکانیزم تغذیه دستی استفاده شده در آن زمان بیشتر باعث قوس الکتریکی به جای جرقه در گپ می‌شد. بالاخره، در سال ۱۹۴۳، لازارنکوها مدار RC را عرضه کردند که در آن یک کنترل کننده سرو ساده^۳، همواره فاصله کوتاه ابزار و قطعه کار را ثابت نگاه می‌داشت. این سیستم مانع ایجاد قوس الکتریکی و باعث دقیق تر شدن ماشین کاری تخلیه الکتریکی شد، و در نهایت لازارنکوها ماشین اسپارک را ارائه کردند. این اختراع نقطه عطفی در تاریخچه فرآیند EDM به حساب می‌آید [۲-۴].

علی‌رغم اینکه امروزه ماشین کاری تخلیه الکتریکی در صنعت کاربردهای فراوانی پیدا کرده است، اما زبری و کدری سطوح قطعاتی که با این روش در حالت پرداخت ماشین کاری می‌شوند و همچنین نرخ براده برداری کم آن

نسبت به سایر روشهای ماشین کاری نوین مانند ECM مشکلاتی را در سر راه استفاده کنندگان از این فرآیند قرار داده است. افزایش زبری سطح همزمان با افزایش جریان، طولانی بودن زمان ماشین کاری مخصوصاً در حالت پرداخت کاری و مشکلات دیگر مانع توسعه سریع این روش شده است. امروزه تحقیقات و تلاش‌های وسیعی در دنیا به منظور رفع این مشکلات در جریان است. از جدیدترین روشها، استفاده از دی الکتریک‌های مخلوط شده با پودرهای خاص در فرآیند EDM است، که طبق مقالات و گزارشهای منتشر شده، افزایش چشمگیری در راندمان این نوع ماشین کاری و رفع معایب آن دارد [۵،۶].

اولین بار در سال ۱۹۸۱، جسوانی^۴ اثرات پودرهای گرافیتی اضافه شده به دی الکتریک را بررسی کرد. او مشاهده کرد، که افزودن پودر گرافیت باعث کاهش ولتاژ تخلیه^۵ و افزایش فاصله گپ می‌شود. همچنین، معلوم شد که پایداری فرآیند ماشین کاری در قالب افزایش نرخ براده برداری بهبود پیدا می‌کند [۷]. بعدها افراد مختلفی شروع به آزمایش‌های هدفمند با استفاده از انواع پودرهای بسیار ریز در EDM روی مواد با استحکام و سختی بالا حتی سرامیک‌های شکننده کردند. موری^۶ اثرات افزودنی‌های پودری به محلول دی الکتریک را بررسی کرد [۸،۹].

یان و چن^۷ اثرات چند پودر افزوده شده به محلول دی الکتریک در ماشین کاری روی Ti6Al-4V، SKD11 را بررسی کرد [۱۰،۱۱]. یو^۸ افزودن پودر آلومینیم به دی الکتریک در ماشین کاری کاربرد تنگستن را آزمایش کرد [۱۲]. هر یک از محققان بالا، نتایج مشابه بدست آمده از فرد قبلی را تجربه کرد.

در مقاله حاضر، دو سری آزمایش، یکی با افزودن پودر آلومینیم به دی الکتریک دستگاه ماشین کاری تخلیه الکتریکی و دیگری بدون پودر انجام شده است. هدف از این تحقیق، بررسی اثرات افزودن پودر آلومینیم به دی الکتریک دستگاه EDM و مشاهده این اثر می‌باشد. در

4- Jeswani
5- Breakdown
6- Mori
7- Yan & chen
8- Yu

1- Electro - discharge machining
2- Pitting
3- Simple servo controller

شرایط آزمایش و تنظیم پارامترهای دستگاه EDM در جدول (۱) نشان داده شده است.

۳- مکانیزم تأثیر گذاری پودر

در EDM معمولی خواص ثابت و یکسان دی الکتریک؛ مانند عایق بودن آن، باعث ایجاد چگالی میدان الکتریکی یکنواخت و توانایی یا میل اندک به شروع جرقه و گپ کوچک می شود [۱۳]. در این حالت با اعمال ولتاژ، میدان الکتریکی در دی الکتریک بین الکترود و قطعه کار در کمترین فاصله بین آن دو ایجاد شده و در اثر وجود ذرات و آلودگی های هادی معلق، پل هادی تشکیل می شود.

جدول ۱- شرایط و وضعیت اعمالی به دستگاه EDM .

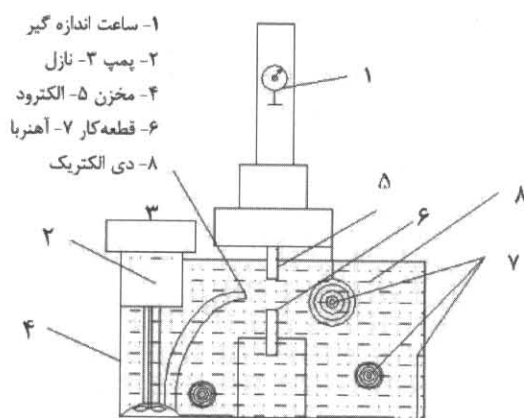
پارامترها	حالت بدون پودر	حالت با پودر
قطعه کار (-)	فولاد با قطر ۱۲	فولاد با قطر ۱۲
الکترود (+)	مس با قطر ۱۲	مس با قطر ۱۲
زمان ماشین کاری (min)	۴۰	۴۰
مابع دی الکتریک	دی الکتریک خالص	دی الکتریک + پودر آلومینیم
نرخ (l/min)	۵	۵
اندازه پودر (μm)	-	زیر ۲۵
ولتاژ تخلیه (V)	۵۰،۶۰،۷۰	۵۰،۶۰،۷۰
جریان تخلیه I(A)	۲،۵،۸،۱۱	۲،۵،۸،۱۱
دوره تناوب پالس (μs)	۵۰،۱۰۰،۲۰۰،۵۰۰	۵۰،۱۰۰،۲۰۰،۵۰۰

سپس دی الکتریک یونیزه شده و ذرات با بار منفی (الکترون ها) به سمت آند، و ذرات و یون های مثبت به سمت کاتدخ گسیل می شوند. پس از آن جریان برقرار شده و عمل براده برداری صورت می گیرد [۴،۱۴]. اما در دی الکتریک مخلوط شده با پودر^۱ انبوه پودرهای ریز هادی معلق در دی الکتریک در حد فاصل دو الکترود میزان عایق بودن و نارسا بودن دی الکتریک را کاهش می دهد و لذا با کاهش مقاومت معادل مسیر، سروو موتور برای جلوگیری از ایجاد پدیده آرک الکترود را بالاتر می کشد تا با افزایش

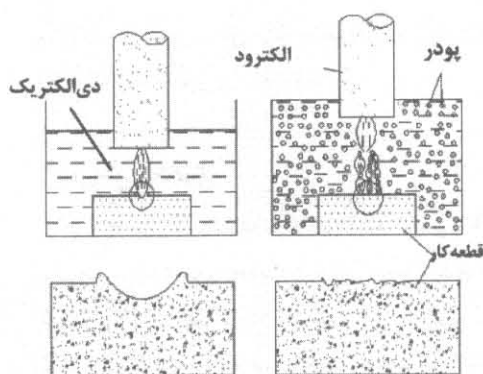
واقع بدنبال عملی بودن یک ماشین کاری دقیق، با سرعت بالا و کیفیت سطح بهتر هستیم.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق از یک دستگاه EDM از نوع Die-sink استفاده شده است. قطعه کارها از فولاد spk (پرکربن کرم دار D3) با قطر ۱۲ mm که تا ۶۰ راکول C سخت شده و الکترودها از نوع مس تجاری با قطر برابر با قطعه کار به کار گرفته شده است. ابتدا، قطعه کارها و الکترودها در اندازه های مناسب آماده، پیشانی تراشی و توسط آستون کاملاً تمیز کاری و چربی زدایی شده اند. نمونه ها قبل و بعد از هر آزمایش توسط ترازوی دقیق الکتریکی وزن شدند. بدین ترتیب، با در نظر گرفتن زمان ماشین کاری نرخ براده برداری تعیین می شود. در نهایت الکترودها به سه نظام نگهدارنده الکترود (قطب مثبت) بسته شده و قطعه کارها در مخزن مخصوص ساخته شده به سه نظام متحرکی (قطب منفی) بسته شدند. برای سهولت در تعویض نمونه ها از سه نظام متحرک و برای اندازه گیری دقیق فاصله الکترودها (گپ) از ساعت اندازه گیر استفاده شده است. پودر آلومینیم نیز با درجه خلوص ۸۷ درصد با فیلتر مخصوص تا ۲۵ μm دانه بندی و سپس در بسته های ۲۵ گرمی آماده می شود تا در هر مرحله از آزمایش به دی الکتریک افزوده شود. در شکل (۱) شمای دستگاه و تجهیزات استفاده شده، نشان داده شده است.



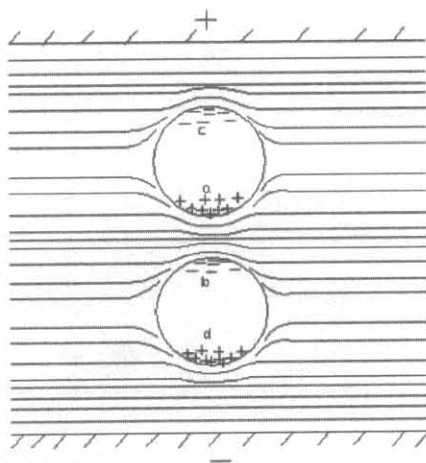
شکل ۱- شمای تجهیزات به کار گرفته شده در آزمایش ها.



شکل ۳- چگونگی توزیع جرقه.

۳-۱- تشکیل جرقه

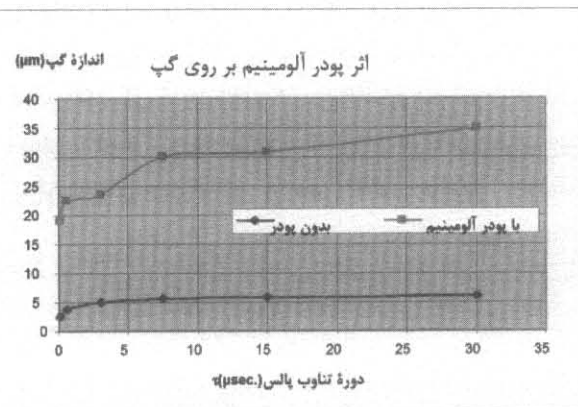
در شکل (۴) یک مسیر جرقه و فرآیند آن نشان داده شده است. در اثر اعمال ولتاژ انبوه بارهای مثبت و منفی در بالا و پایین پودرها مطابق شکل تجمع می‌کنند. نزدیکترین فاصله بین دو پودر بیشترین چگالی بارهای الکتریکی را دارد. سپس در نقاط a و b بین دو پودر مجاور جایی که چگالی میدان الکتریکی بیشترین است، تخلیه برای اولین بار اتفاق می‌افتد و این درست زمانی است که چگالی میدان الکتریکی به مقاومت معادل اولیه دی‌الکتریک بین دو پودر غلبه کرده باشد. سپس تخلیه باعث اتصال کوتاه بین دو ذره پودر و توزیع و چیدمان مجدد بارهای الکتریکی می‌شود.



شکل ۴- نحوه تشکیل جرقه با وجود پودرها.

فاصله، مقاومت معادل مسیر به مقدار قبلی بازگردد، سپس فرآیند جرقه آغاز می‌شود. پس اولین اتفاق مهم همان افزایش فاصله الکترودها یا بزرگتر شدن گپ است [۵،۱۰].

در شکل (۲) اثر افزودن پودر بر روی اندازه گپ در فرکانسهای مختلف نشان داده شده است.



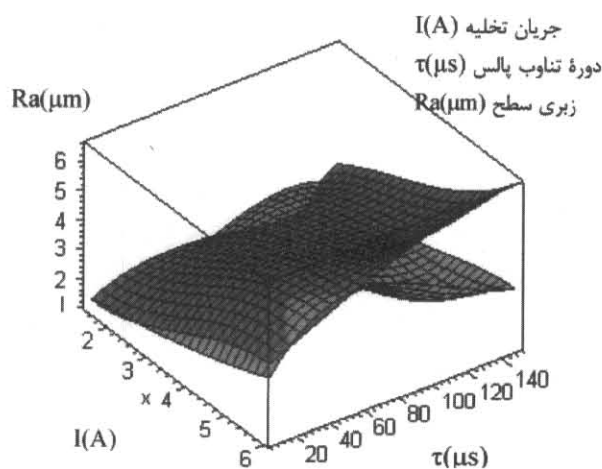
شکل ۲- اثر پودر بر روی گپ.

نمودار نشان می‌دهد با افزودن پودر آلومینیم با مشخصات ذکر شده، اندازه گپ در دوره تناوب پالس‌های مختلف ۵ تا ۱۰ برابر می‌شود.

در EDM معمولی و در حال پرداخت کاری به دلیل جریان و قدرت کم عملی، اندازه گپ بسیار کوچک بوده، طوری که براده‌ها به راحتی قادر به خروج از گپ نیستند. این حالت خصوصاً در حالتی که مساحت سطح ماشین کاری شده زیاد باشد، منجر به پدیده آرک و در کل باعث ناپایداری ماشین کاری می‌شود. اما در روش PMEDM با افزایش گپ براده‌ها کمتر در گپ محبوس شده و به راحتی خارج می‌شوند. لذا پایداری ماشین کاری افزایش می‌یابد. این موضوع دومین اثر محسوس در کاربرد این روش است. اما سومین اثر، انبوه پودرهای ریز هادی مابین الکترودهاست، که مانع تمرکز میدان الکتریکی در یک ناحیه و انحراف و توزیع انرژی تخلیه شده می‌شود. در شکل (۳) چگونگی این عمل به طور شماتیک نشان داده شده است.

۴-۱- زبری سطح

در نمودار شکل (۵) زبری سطح قطعه کار در دو حالت با پودر آلومینیم (کم رنگ) و بدون پودر (پررنگ) با هم مقایسه شده است. همانطور که از شکل پیداست، بدون توجه به نوع دی الکتریک (با پودر یا بدون پودر) با افزایش شدت جریان زبری سطح زیاد می شود. در حالت بدون پودر، با افزایش دوره تناوب پالس زبری سطح کار افزایش می یابد، ولی در حالت دی الکتریک با پودر آلومینیم، زبری سطح با افزایش دوره تناوب پالس ابتدا افزایش می یابد و سپس در مقدار معینی از آن شروع به کاهش می کند. همچنین، مشاهده می شود که با افزایش جریان، زبری سطح حالت دی الکتریک با پودر، کمتر از حالت بدون پودر است. البته در جریان و دوره تناوب پالس پایین تفاوت ناچیزی وجود دارد. اما توجه فیزیکی این اتفاق آنست که در این روش پودرها نه تنها باعث توزیع و کاهش دانسیته جرقه می شوند، بلکه ضربه ناشی از اصابت پودرها به سطح قطعه کار نیز، باعث بهبودی شرایط سطحی می شود. همچنین، در این روش رفتار خروجی ها به پارامترهای مختلف ورودی بستگی دارد. پارامترهایی چون سرعت عبور مخلوط از میان گپ، چگالی پودر در دی الکتریک، اندازه پودر، نوع پودر و غیره اثر عمیقی در رفتار خروجی ها دارد. با تغییر یکی از این پارامترها در دوره تناوب پالس متفاوت از آنچه در شکل (۵) مشاهده شد (یعنی $60 \mu\text{s}$)، مقدار زبری سطح شروع به کم شدن می کند.



شکل ۵- زبری سطح.

بدین ترتیب، بارهای الکتریکی بیشتری در نقاط c و d تجمع کرده که منجر به تخلیه بین این دو پودر و سایر پودرها می شود و در نهایت تخلیه های پایایی و پشت سرهم در کل باعث تخلیه بین الکتروود و قطعه کار می شود. هر دو ذره پودری که نزدیکتر و بارهای الکتریکی بیشتری داشته باشند، زودتر عمل تخلیه را تجربه می کند و هر چه فاصله پودرها کمتر از گپ شود (در هر جهت) و بارهای الکتریکی بیشتری در قله ها نسبت به سایر نقاط جمع شود، تخلیه های پایایی راحت تر اتفاق می افتد و این تخلیه ها در نهایت، باعث تخلیه سراسری در تمام گپ می شوند [۱۳].

۴-۲- بحث و تحلیل نتایج آزمایش ها

ورودی های فرآیند، جریان x_1 ، دوره تناوب پالس x_2 ، ولتاژ x_3 و خروجی های فرآیند نرخ براده برداری و زبری سطح است. بین ورودی ها به عنوان متغیرهای مستقل و خروجی ها به عنوان متغیر وابسته توسط نرم افزار Maple یک معادله چند جمله ای از درجه سوم (Cubic) ارائه و ضرایب محاسبه می شود. در فرمول (۱) چند جمله ای مذکور نشان داده شده است:

$$F = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^3 \beta_{iii} x_i^3 \quad (1)$$

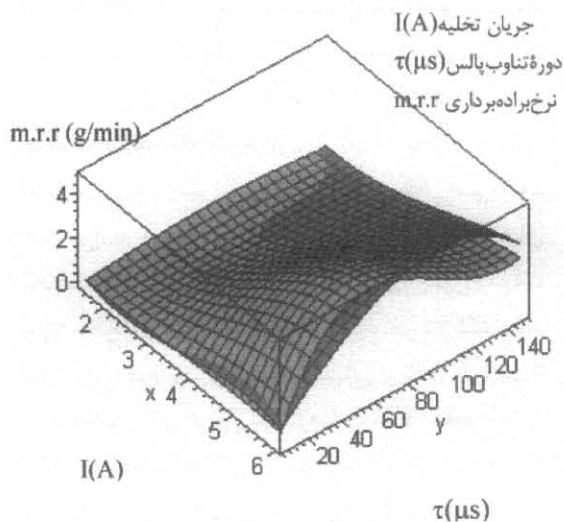
که در آن، β ها ضرایب معادله و F یک بار نرخ براده برداری و یک بار زبری سطح است.

اطلاعات ثبت شده توسط نرم افزار به صورت معادله درآمده و سپس ترسیم می شوند. به منظور درک اثرات ترکیبی ورودی ها بر روی خروجی، در اثر افزودن پودر به دی الکتریک، نمودارها به صورت سه بعدی درآمده اند. در این نمودارها محور عمودی، متغیر وابسته مثل MRR یا Ra است و دو محور دیگر متغیر مستقل هستند. متغیر سوم (ولتاژ یا x_3) به دلیل اینکه کمترین اثر را نسبت به سایر متغیرهای ورودی روی نرخ براده برداری و زبری سطح دارد، با مقدار ثابت 60 V در معادله قرار داده شده است.

۴-۲- نرخ براده‌برداری

در نمودار شکل (۶) نرخ براده‌برداری در دو حالت با پودر آلومینیم (کم‌رنگ) و بدون پودر (پررنگ) با هم مقایسه شده است.

از شکل چنین برمی‌آید که از جریان ۲/۵ آمپر به بالا و از دوره تناوب پالس ۵ تا ۷۵ μs ، نرخ براده‌برداری حالت با پودر بیشتر از حالت بدون پودر است. در جریان‌های کمتر از ۲ آمپر تقریباً در همه دوره تناوبها، حالت پودری بهتر از حالت بدون پودر است، ولی میزان تفاوت آن به جریان‌های بالا نمی‌رسد. دلیل این موضوع کم‌بودن جریان و انرژی در جریان‌های پایین است. در این حالت نیز با تغییر ورودی‌های خاص بازه اعداد ذکر شده جایجا می‌شود.



شکل ۶- نرخ براده‌برداری.

نتیجه‌گیری

۱- با افزایش جریان، مخصوصاً در فاصله ۵ تا ۷۵ میکروثانیه از دوره تناوب پالس، که باعث افزایش نرخ براده‌برداری در حالت با پودر می‌شود، زبری سطح حالت با پودر نسبت به حالت بدون پودر بهتر می‌شود که این همان ماشین‌کاری سریع‌تر و دقیق‌تر است.

در ماشین‌کاری با دی‌الکتریک خالص شیار و خراش‌های نامنظم و عمیق‌تری روی سطح قطعه کار ایجاد می‌شود، که باعث زبری آن می‌شود. ولی با

افزودن پودر به دی‌الکتریک، پودرها باعث توزیع انرژی تخلیه الکتریکی و اصابت به سطح قطعه‌کار و کم‌عمق‌شدن شیارها و منظم‌شدن حفره‌ها می‌شود و لذا صافی سطح بهبود می‌یابد.

۲- در حالت استفاده از پودر، به دلیل افزایش گپ، براده‌ها به راحتی خارج شده و در نتیجه این روش پایداری بیشتری نسبت به حالت معمولی و بدون پودر دارد که این موضوع نقش مؤثری در افزایش نرخ براده‌برداری دارد.

۳- در جریان‌های کم در حالت پرداخت مقدار نرخ براده‌برداری حالت استفاده از پودر از حالت دی‌الکتریک بدون پودر بیشتر و صافی سطح بهتری نیز دارد.

۴- به طور کلی افزودن پودر آلومینیم به دی‌الکتریک دستگاه EDM باعث بهبود پارامترهای ماشین‌کاری می‌شود.

منابع و ماخذ

- [1] McGeough, J.A. "Advanced Methods of Machining", Chapman and Hall, London, 1988.
- [2] Jameson, E.C. "Electrical Discharge Machining", Society of Manufacturing Engineers (SME), USA, 2001.
- [3] <http://www.mmsonline.com/articles/029503.html>
- [4] <http://www.unl.edu/nmrc>

[۵] اسدی، محمد "بررسی اثر پودرهای افزوده شده به دی‌الکتریک بر روی پارامترهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، جمهوری اسلامی ایران، ۱۳۸۲.

[۶] قریشی، مجید و اسدی، محمد "بررسی اثر پودرهای مختلف افزوده شده به دی‌الکتریک بر روی پارامترهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (EDM)"، ششمین کنفرانس بین‌المللی سالانه ساخت و تولید، تهران، جمهوری اسلامی ایران، زمستان ۱۳۸۲.

- [7] Jeswani, M.L. "Effect of the Addition of Graphite Powder to Kerosene Used as the Dielectric Fluid in Electrical Discharge Machining", *Wear J.*, Vol. 70, pp. 133-139, 1981.
- [8] Mohri, N., Saito, N., and Higashi, M. "A New Process of Finish Machining on Free Surface by EDM Methods", *Annals CIRP*, Vol. 40, No. 1, pp. 207-210, 1991.
- [9] Narumiya, H., Mohri, N., Saito, N., Otake, H., Tsnekawa, Y., Takawashi, T., and Kobayashi, K. "EDM by Powder Suspended Working Fluid", *The 9th Int. Symp. for Electrode Machining*, pp. 5-8, 1981.
- [10] Yan, B.H. and Chen, S.L. "Effects of Dielectric with Suspended Aluminum Powder on EDM", *J. Chinese Society of Mech. Eng.*, Vol. 14, No. 3, pp. 307-312, 1993.
- [11] Yan, B.Y., and Chen, S.L. "Characteristics of SKD11 by Complex Process of Electric Discharge Machining Using Liquid Suspended with Aluminum Powder", *J. Japan Institute of Light Metals*, Vol. 59, No. 9, pp. 1067-1072, 1994.
- [12] Yu, C.P., Chen, W.C., Chang, S.W., and Chang, C.C. "Effects of the Concentration of Suspended Aluminum Powder in Dielectric Fluid on EDM of Tungsten Carbide", *The 13th Conf. of Chinese Society of Mech. Eng.*, Taiwan, pp. 445-450, 1996.
- [13] Zhao, W.S., Meng, Q.G., and Wang, Z.L. "The Application of Research on Powder Mixed EDM in Rough Machining", *J. Materials Processing Tech.*, Vol. 129, pp. 30-33, 2002.
- [14] Heuvelman, C.J., Horsten, H.L., and Veenstra, P.C., "An Introductory Investigation of the Breakdown Mechanism in Electro-discharge Machining", *Annals of the CIRP*, pp. 43-44, 1971.