



مقایسه مشخصات خروجی فرایندهای ماشین کاری تخلیه الکتریکی و تخلیه الکتریکی به کمک پودر آلومینیوم بر روی ترکیب بین فلزی تیتانیوم آلومیناید

بهزاد جباری پور^{1*}، مهرداد مطلب پورعلیشاهی²

1- استادیار گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
2- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی 28598، beh.jabbaripour@iauctb.ac.ir

کلیدواژگان

چکیده

ترکیب بین فلزی تیتانیوم آلومیناید ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر نرخ براده برداری نرخ سایش ابزار زبری سطح

در این تحقیق سه سری آزمایش های ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر روی ترکیب بین فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما انجام می شود. در سری اول با تغییر جریان پالس و زمان روشنی پالس در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی و در سری دوم آزمایش های ماشین کاری با تغییر اندازه و غلظت ذرات پودر آلومینیوم مخلوط شده در سیال دی الکتریک، مشخصات خروجی نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح ارزیابی می شوند. در سری سوم آزمایش ها، بعد از تعیین غلظت و اندازه ذرات بهینه پودر آلومینیوم، جریان و زمان روشنی پالس، دقیقاً در همان سطوحی که آزمایش های ماشین کاری بدون پودر انجام شده بودند، تغییر داده می شوند و نرخ براده برداری ارزیابی می گردد. در نهایت نرخ براده برداری در هر دو فرایندهای بدون پودر و همراه با پودر بهینه مقایسه می شوند. با افزایش غلظت ذرات پودر آلومینیوم، نرخ سایش ابزار و زبری سطح تا حد بهینه کاهش و سپس افزایش می یابند. برای پودر با اندازه ذرات $2\ \mu\text{m}$ و $20\ \mu\text{m}$ ، با افزایش غلظت پودر آلومینیوم در سیال، نرخ براده برداری ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد، در حالی که برای اندازه ذرات $63\ \mu\text{m}$ ، با افزایش غلظت پودر آلومینیوم، نرخ براده برداری کاهش می یابد. حداقل و حداکثر افزایش نرخ براده برداری در شرایط بهینه فرایند همراه با پودر در مقایسه با فرایند بدون پودر به ترتیب 32% و 88% می باشد. با افزایش انرژی تخلیه الکتریکی، افزودن پودر آلومینیوم تاثیر کمتری بر افزایش فرکانس جرقه زنی و به تبع آن افزایش نرخ براده برداری دارد.

The comparison of output characteristics in electrical discharge machining and aluminum powder mixed EDM processes on titanium aluminide intermetallic compound

Behzad Jabbaripour^{1*}, Mehrdad Motallebpouralishahi²

1- Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 28598, Tehran, Iran, beh.jabbaripour@iauctb.ac.ir

Keywords

Titanium aluminide intermetallic compound
Powder mixed electrical discharge machining
Material removal rate
Tool wear rate
Surface roughness

Abstract

In this study, three series of electrical discharge machining experiments were carried out on γ -TiAl intermetallic. In the first series, by changing pulse current and pulse on time in EDM process and in the second series by changing the size and concentration of aluminum powder particles mixed in dielectric fluid, output characteristics including material removal rate (MRR), tool wear rate (TWR) and surface roughness (SR) are evaluated. In the third series of machining experiments, after determination of the optimum size and concentration of aluminum particles, current and pulse on time, are changed at levels as exactly the same levels in powder-free tests and MRR is evaluated. Finally, MRR of the EDM and optimum PMEDM processes, are compared. By increasing the aluminum particles concentration, TWR and SR will be decreased to an optimal level and then will be increased. For particle size of $2\ \mu\text{m}$ and $20\ \mu\text{m}$, by increasing the aluminum powder concentration, MRR increases at first and then decreases, while for particle size of $63\ \mu\text{m}$, by increasing powder concentration, MRR decreases. The minimum and maximum increment of MRR in optimum PMEDM condition compared with EDM mode was 32% and 88%, respectively. With increase of electrical discharge energy, the addition of aluminum powder has less effect on increase of sparking frequency and consequently the MRR.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

B. Jabbaripour, M. Motallebpouralishahi, The comparison of output characteristics in electrical discharge machining and aluminum powder mixed EDM processes on titanium aluminide intermetallic compound, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 25-37, 2017 (in Persian)

1- مقدمه

ماشین کاری به کمک تخلیه الکتریکی¹ که به فرسایش جرقه‌ای نیز موسوم است، یک روش براده‌برداری غیر سنتی است که در آن بین دو الکترود به نام ابزار و قطعه کار که در فاصله معین و کنترل شده‌ای از یکدیگر قرار دارند و فضای بین آن‌ها را سیالی به نام دی‌الکتریک پر کرده است. در نزدیکترین فاصله بین ابزار و قطعه کار، جرقه الکتریکی تولید و باربرداری صورت می‌گیرد. با این روش می‌توان مواد هادی و نیمه هادی را ماشین کاری نمود. از مشکلات موجود در ماشین کاری تخلیه الکتریکی، افزایش زبری سطح² ماشین کاری شده با افزایش جریان، پایین بودن نرخ براده‌برداری³، ناپایداری فرایند ماشین کاری تحت حالاتی خاص، مات شدن سطح ماشین کاری شده و ایجاد انواع عیوب سطحی و زیرسطحی در قطعه ماشین کاری شده می‌باشد [1].

یکی از روش‌های افزایش نرخ براده‌برداری، کاهش نرخ سایش ابزار⁴ و بهبود کیفیت سطح در ماشین کاری تخلیه الکتریکی که از معرفی و استفاده آن دو دهه بیشتر نمی‌گذرد و هنوز جای کار بسیار دارد تا بتواند از فاز تحقیقاتی وارد فاز صنعتی گردد، روش افزودن پودر رسانا و یا نیمه‌رسانا به سیال دی‌الکتریک و انجام ماشین کاری تخلیه الکتریکی⁵ می‌باشد.

مکانیزم براده‌برداری در ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر به ازای یک تک‌جرقه، ترکیب اثراتی است از نیروی اعمال شده مکانیکی که در اثر انفجار گاز حاصل از تبخیر سیال دی‌الکتریک به وجود می‌آید که این نیرو نقش عمده‌ای دارد و نیروی دیگری که در مکانیزم براده‌برداری این فرایند ایفای نقش می‌کند، اثرات ضربه‌ای ناشی از برخورد ذرات پودر مخلوط در سیال دی‌الکتریک به سطح قطعه کار است [1].

ترکیبات بین‌فلزی، مخصوصاً آن‌هایی که از عناصر سبک مانند تیتانیوم و آلومینیوم تشکیل شده‌اند، به دلیل چگالی کم و استحکام زیاد در دمای بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند [2]. اساساً خواص برجسته این مواد از جمله چگالی پایین، مدول الاستیسیته بالا، پایداری ساختاری مناسب، مقاومت بالا در برابر اکسیداسیون، خوردگی و احتراق و همچنین استحکام کششی و خزشی در دمای بالا، زمانی که با آلیاژهای مرسوم تیتانیوم مقایسه شوند، به دلیل ماهیت شدیداً منظم و پیوندهای جهت‌دار ترکیبات آن‌ها است [3]. بر اساس این خواص، ترکیبات بین‌فلزی

تیتانیوم آلومیناید⁶ می‌توانند در محدوده وسیعی از قطعات در صنایع هوافضا، ساخت توربین و خودروسازی به کار گرفته شوند [3].

در حوزه ماشین کاری این نوع ترکیبات بین‌فلزی، تحقیقات بسیار کمی انجام گرفته است. وینرت و همکاران [4] با هدف تولید شاتون از جنس ترکیب بین فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما⁷ مطالعه‌ای در زمینه قابلیت ماشین کاری این ماده انجام داده‌اند. آن‌ها گزارش کرده‌اند که به دلیل سختی، تردی و استحکام بالای این ترکیب بین‌فلزی تنها می‌توان از ابزارهایی با جنس کارباید‌های سمانته پوشش‌دار و یا مواد برشی سخت‌تر مانند ابزارهای سی‌بی‌ان⁸ و الماس چندکریستالی⁹ برای ماشین کاری این ماده استفاده نمود. علاوه بر این، هندسه لبه برشی نیز باید مناسب باشد تا عمر ابزار طولانی‌تر گردد.

یائو و همکاران [5] به تراشکاری سنتی تیتانیوم آلومیناید به کمک اینسرت‌های کاربیدی که توسط روش رسوب فیزیکی بخار¹⁰ پوشش داده شده بودند به بررسی رفتار خستگی و یکپارچگی سطح پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که با افزایش عمق برش و سرعت برشی، عمق لایه حاصل از تنش فشاری باقی‌مانده، لایه سخت شده و لایه تغییر پلاستیک داده شده افزایش می‌یابد. همچنین عمر خستگی با افزایش زبری سطح افزایش چشمگیری دارد.

لیو و همکاران [6] ماشین کاری الکتروشیمیایی تیتانیوم آلومیناید را با اندازه‌گیری زبری سطح، نرخ براده‌برداری و گپ ماشین کاری بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد نرخ پیشروی اصلی‌ترین و موثرترین پارامتر بر روی پارامترهای خروجی می‌باشد، همچنین ماشین کاری بهینه این ماده نیز انجام گرفت.

براساس آخرین اطلاعات نویسندگان مقاله حاضر، تاکنون به غیر از انتشارات سابق محققان مطالعه جاری [7-9] هیچ‌گونه کار تحقیقاتی در مورد فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر و یا حتی فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی غوطه‌وری در سیال در مورد ترکیب بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما گزارش نشده است و هیچ‌گونه جداول و اطلاعات صنعتی برای فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی این ترکیب پراهمیت و جدید وجود ندارد. بنابراین نیاز است تا اطلاعات صنعتی را برای ماشین کاری بهینه این ترکیب بین‌فلزی توسعه داد.

در این تحقیق، سه سری آزمایش‌های ماشین کاری با شرایط

⁶ Titanium aluminide intermetallic compound

⁷ Gamma titanium aluminide intermetallic compound (γ -TiAl)

⁸ Cubic Boron Nitride (CBN)

⁹ Poly Crystalline Diamond (PCD)

¹⁰ PVD

¹ Electrical Discharge Machining (EDM)

² Surface Roughness (SR)

³ Material Removal Rate (MRR)

⁴ Tool Wear Rate (TWR)

⁵ Powder Mixed Electrical Discharge Machining (PMEDM)

زبری سنج³ با دقت 0/001 میکرومتر اندازه گیری شده است.



Fig. 1 The used CNC-EDM machine and the special powder mixing tank in the main tank of EDM machine

شکل 1 ماشین اسپارک کنترل عددی استفاده شده و مخزن ویژه ماشین کاری با پودر داخل مخزن اصلی دستگاه اسپارک

در این تحقیق به منظور اندازه گیری نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار، جرم نمونه های قطعه کار و الکترودهای ابزار، قبل و بعد از هر تست بدون پودر و همراه پودر با استفاده از ترازوی دقیق دیجیتال با دقت 0/0001 گرم اندازه گیری می شود و اختلاف جرم (Δm) هر نمونه قطعه کار و یا هر الکتروود ابزار محاسبه می شود. همچنین برای محاسبات، مقدار چگالی نمونه های قطعه کار (ρ_{TiAl}) و الکترودهای ابزار (ρ_{Cu}) و زمان ماشین کاری در هر آزمایش (t_{mach}) نیز استفاده می شوند. برای محاسبه نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار، به ترتیب روابط (1) و (2) استفاده می شوند:

$$MRR \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{min}} \right) = \frac{\Delta m}{t_{mach}} = \frac{\rho_{TiAl}}{t_{mach}} \quad (1)$$

$$TWR \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{min}} \right) = \frac{\Delta m}{t_{mach}} = \frac{\rho_{Cu}}{t_{mach}} \quad (2)$$

برای اینکه بتوان آزمایش های ماشین کاری به کمک پودر را انجام داد از مخزن ویژه ای استفاده شد، ولی برای مقایسه دقیق، آزمایشات ماشین کاری بدون کمک پودر نیز در همان مخزن انجام شد تا تمامی شرایط به غیر از پودر یکسان باشد. تجهیزات مذکور در شکل های 2 و 3 نشان داده شده اند.

در سری اول آزمایش ها (ماشین کاری بدون کمک پودر)، به روش عاملی کامل طراحی آزمایش ها انجام شده است. به دلیل در نظر گرفتن 5 سطح برای جریان و 5 سطح برای زمان روشنی

مختلف صورت گرفته است که در سری اول با در نظر گرفتن سطوح مختلف جریان و زمان روشنی پالس، آزمایش های ماشین کاری بدون پودر انجام می شود و مشخصات خروجی همچون نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح برای این حالات ماشین کاری ارائه می شوند. در سری دوم آزمایش های ماشین کاری، با در نظر گرفتن یک سطح جریان و زمان روشنی پالس به عنوان مقادیر ثابت، آزمایش های ماشین کاری به کمک پودر آلومینیوم به ازای سطوح مختلف اندازه ذرات و غلظت ذرات پودر انجام می گردد، تا مقدار غلظت و اندازه ذرات بهینه پودر با در نظر گرفتن مشخصات خروجی فرایند مانند نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح تعیین گردد. در سری سوم آزمایش های ماشین کاری، با تعیین مقادیر غلظت و اندازه ذرات بهینه پودر، آزمایش های ماشین کاری همراه با پودر به ازای سطوح مختلف جریان و زمان روشنی پالس انجام می گردد. این سطوح دقیقاً همان سطوحی است که آزمایش های ماشین کاری بدون کمک پودر انجام شده بود و برای این آزمایشات همراه با پودر، مقدار مشخصه خروجی نرخ براده برداری اندازه گیری می شود و با شرایط مشابه بدون کمک پودر مورد مقایسه و ارزیابی قرار می گیرد.

2- تجهیزات، تنظیمات و شرایط تجربی آزمایش های ماشین کاری

برای آزمایش های ماشین کاری از الکترودهای مسی استوانه ای شکل با قطر 18 mm و طول 40 mm به عنوان ابزار استفاده شده است. چگالی الکترودهای مورد استفاده برابر با $8/93 \text{ gr/cm}^3$ می باشد و قبل از انجام آزمایش های ماشین کاری، دو طرف الکترودهای ابزار تا شماره 600 سمباده زنی شده بودند. برای نمونه های قطعه کار از ترکیب بین فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما استفاده گردید. چگالی نمونه مورد استفاده برابر با $3/78 \text{ gr/cm}^3$ می باشد. با استفاده از وایرکات نمونه هایی به ابعاد $10 \times 10 \times 10$ میلی متر از شمش ریخته گری شده، بریده شدند.

تمامی آزمایش های ماشین کاری بر روی ماشین اسپارک با کنترلر عددی مدل شارمیلز روبوفرم¹ که به یک ژنراتور آیزوپالس آیزوپالس مجهز است انجام گردیده است که در شکل 1 نشان داده شده است. تغییرات جرم ابزار و قطعه کار، قبل و بعد از هر تست ماشین کاری بوسیله ترازوی دقیق دیجیتال² با دقت 0/0001 گرم و زبری سطح میانگین به وسیله دستگاه

¹ Charmilles Roboform 200-CNC EDM machine

² CP224S-Surtorius

³ Mahr-Perthometer M2

پالس، تعداد آزمایش‌ها 25 عدد می‌باشد.

براده‌برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح با یکدیگر مقایسه می‌شوند، تا در نهایت بتوان اندازه و غلظت بهینه ذرات پودر آلومینیوم را در فرایند ماشین کاری به کمک پودر تعیین نمود.

جدول 1 پارامترهای ورودی و فرایند و نتایج حاصل از آزمایش‌های ماشین کاری بدون کمک پودر (سری اول آزمایش‌ها)

Table 1 The process input parameters and results in machining tests without powder (EDM)- (First series)

ردیف آزمایش	شدت جریان (A)	زمان روشنی (μs)	نرخ براده‌برداری (mm ³ /min)	زبری سطح (μm)	نرخ سایش ابزار (mm ³ /min)
1	8	6/4	0/5204	2/549	0/1978
2	8	12/8	1/2363	3/135	0/1969
3	8	25	1/8210	4/273	0/1939
4	8	50	1/5092	5/155	0/1730
5	8	100	3/9531	6/652	0/1502
6	12	6/4	1/2166	3/325	0/2425
7	12	12/8	1/8212	4/037	0/2265
8	12	25	3/9714	4/939	0/2113
9	12	50	6/9453	5/9793	0/2053
10	12	100	13/6044	7/309	0/2024
11	16	6/4	2/2043	4/025	0/2623
12	16	12/8	3/8075	4/722	0/2527
13	16	25	7/8775	5/576	0/2475
14	16	50	13/7760	6/522	0/2446
15	16	100	22/5824	7/695	0/2429
16	24	6/4	4/8226	4/138	0/3793
17	24	12/8	6/2105	5/092	0/3524
18	24	25	13/6225	6/186	0/3324
19	24	50	26/1572	7/623	0/3165
20	24	100	41/6505	9/360	0/3043
21	32	6/4	6/6710	3/771	0/5278
22	32	12/8	6/9422	4/938	0/4792
23	32	25	19/2490	5/974	0/4342
24	32	50	37/7352	7/928	0/4245
25	32	100	53/6940	10/079	0/4127

جدول 2 شرایط ثابت در حین آزمایش‌های ماشین کاری بدون کمک پودر (سری اول آزمایش‌ها)

Table 2 The constant conditions during machining tests without powder (EDM) - (First series)

نوع پارامتر ماشین کاری	مقدار یا حالت
ولتاژ مدار باز (V)	120
ولتاژ ماشین کاری (V)	35
زمان خاموشی پالس (μs)	100
مدت زمان ماشین کاری (min)	15
قطبیت ابزار	مثبت
سیال دی‌الکتریک	نفت سفید
نحوه شستشوی دی‌الکتریک	غوطه‌وری در سیال به همراه



Fig. 2 Inside view of the special powder mixing tank

شکل 2 نمای داخل مخزن ویژه ماشین کاری با پودر

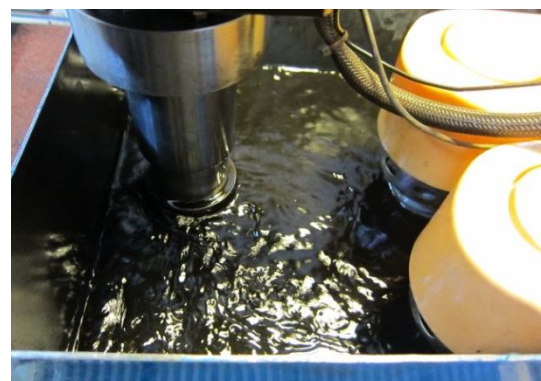


Fig. 3 Performing EDM tests in the special powder mixing tank

شکل 3 انجام آزمایش‌های بدون پودر درون مخزن ویژه ماشین کاری با پودر

در جدول 1 پارامترهای ورودی و فرایند و نتایج حاصل از آزمایش‌های ماشین کاری برای حالت بدون پودر ارائه گردیده‌اند. ولی سایر پارامترها و شرایط ماشین کاری در آزمایش‌های ماشین کاری بدون پودر ثابت نگه داشته شدند، که در جدول 2 آورده شده‌اند.

در سری دوم آزمایش‌ها (ماشین کاری به کمک پودر برای تعیین غلظت و اندازه ذرات بهینه پودر)، جهت انجام آزمایش‌های ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر از ذرات آلومینیوم استفاده شده است که در جدول 3 خواص فیزیکی و ترموفیزیکی آن نشان داده شده است.

پالس مطابق جدول 1، سطح میانی جریان پالس (سطح سوم جریان پالس) یعنی 16 آمپر و سطح میانی زمان روشنی پالس (سطح سوم زمان روشنی پالس) یعنی 25 میکروثانیه به عنوان پارامترهای ثابت ماشین کاری در نظر گرفته می‌شوند.

با در نظر گرفتن سطوح آزمایش شده جریان و زمان روشنی در این مرحله از آزمایش‌های ماشین کاری، پودر آلومینیوم در سطوح مختلف اندازه و غلظت ذرات پودر در سیال دی‌الکتریک مورد استفاده قرار می‌گیرد و مقادیر خروجی مانند نرخ

شستشوی جانبی با فشار ثابت

جدول 3 خواص فیزیکی و ترموفیزیکی پودر آلومینیوم [10]

Table 3 The Physical and thermo-physical properties of aluminum powder [10]

خواص	دانسیته (gr/cm^3)	رسانش حرارتی رسانش الکتریکی ($\text{W/cm} \cdot ^\circ\text{K}$)	نقطه ذوب ($^\circ\text{C}$)
مقدار	2/73	2/37	660

برای انجام آزمایش‌های ماشین کاری به کمک پودر با توجه به سطوح در نظر گرفته شده برای اندازه ذرات و غلظت ذرات پودر آلومینیوم، به روش عاملی کامل طراحی آزمایشات انجام شده است. به دلیل در نظر گرفتن 3 سطح برای اندازه ذرات و 3 سطح برای غلظت ذرات، تعداد آزمایش‌ها 9 عدد می‌باشد. در جدول 4 پارامترهای ورودی و نتایج حاصل از این مجموعه آزمایش‌های ماشین کاری به کمک پودر ارائه گردیده‌اند. پارامترها و شرایط ثابت در حین این آزمایش‌ها، در جدول 5 آورده شده‌اند.

جدول 4 پارامترهای ورودی فرایند و نتایج حاصل از آزمایش‌های ماشین کاری به کمک پودر آلومینیوم (سری دوم آزمایش‌ها)

Table 4 The process input parameters and results in machining tests with aluminum powder (PMEDM)-(Second series)

ردیف آزمایش	غلظت پودر (gr/l)	اندازه ذرات (μm)	نرخ براده‌برداری (mm^3/min)	نرخ سایش ابزار (μm)	زبری سطح (μm)
1	2	2	11/5574	0/1974	3/463
2	2	20	9/9253	0/1568	4/241
3	2	63	6/4869	0/0795	3/795
4	4	2	13/2683	0/1701	3/051
5	4	20	10/3796	0/1304	3/682
6	4	63	5/4762	0/1183	4/049
7	8	2	11/9302	0/2913	3/737
8	8	20	6/3243	0/2705	4/578
9	8	63	4/1366	0/1932	4/943

جدول 5 شرایط ثابت در حین آزمایش‌های ماشین کاری به کمک پودر آلومینیوم (سری دوم آزمایش‌ها)

Table 5 The constant conditions during machining tests with aluminum powder (PMEDM)-(Second series)

نوع پارامتر ماشین کاری	مقدار یا حالت
جریان پالس (A)	16
زمان روشن پالس (μs)	25
زمان خاموشی پالس (μs)	100
ولتاژ مدار باز (V)	120
ولتاژ ماشین کاری (V)	35
مدت زمان ماشین کاری (min)	15
قطبیت ابزار	مثبت
سیال دی‌الکتریک	نفت سفید
نحوه شستشوی دی‌الکتریک	غوطه‌وری در سیال به همراه

شستشوی جانبی با فشار ثابت

در مرحله قبل پس از انجام یک سری آزمایش‌های ماشین کاری به کمک پودر آلومینیوم که در آن، اندازه ذرات و غلظت ذرات پودر تغییر داده شدند، نتیجه گرفته شد که به ازای غلظت 4 گرم بر لیتر پودر آلومینیوم در سیال دی‌الکتریک با اندازه ذرات 2 میکرومتر، حالت بهینه‌ای نسبت به سایر غلظت‌ها و اندازه ذرات پودر به وجود می‌آید که در این شرایط و پارامترهای بهینه، نرخ براده‌برداری نسبت به حالت ماشین کاری مشابه بدون پودر حدود 68% افزایش، نرخ سایش ابزار 31% کاهش و زبری سطح 45% کاهش یافته است. به همین دلیل در سری سوم آزمایش‌ها (ماشین کاری به کمک پودر به ازای غلظت و اندازه ذرات بهینه پودر) اندازه ذرات 2 میکرومتر و غلظت ذرات 4 گرم بر لیتر پودر آلومینیوم به عنوان شرایط ثابت در حین آزمایش‌های به کمک پودر در نظر گرفته می‌شوند و جریان پالس و زمان روشنی پالس در سطوح مختلف تغییر داده می‌شوند که در نهایت مقدار مشخصه خروجی نرخ براده‌برداری اندازه‌گیری و با مقادیر نرخ براده‌برداری در حالت مشابه ماشین کاری بدون کمک پودر مقایسه می‌گردند. لازم به ذکر است که سطوح تغییرات جریان و زمان روشن پالس مشابه حالت بدون پودر یعنی مطابق جدول 1 در نظر گرفته می‌شوند تا بتوان مقایسه کاملی بین حالت بدون پودر و به کمک پودر به ازای غلظت و اندازه ذرات بهینه پودر آلومینیوم انجام داد.

به دلیل در نظر گرفتن 5 سطح برای جریان و 5 سطح برای زمان روشن پالس، تعداد آزمایشات 25 عدد می‌باشد. در جدول 6 پارامترهای ورودی ماشین کاری و مقادیر نرخ براده‌برداری حاصل از آزمایش‌های ماشین کاری به کمک پودر آلومینیوم (شرایط بهینه پودر) ارائه گردیده‌اند، ولی سایر پارامترها و شرایط ماشین کاری در این آزمایش‌ها ثابت نگاه داشته شدند که در جدول 7 آورده شده‌اند.

3- نتایج و بحث

3-1- نتایج و بحث مربوط به سری اول آزمایش‌ها (آزمایش‌های ماشین کاری بدون کمک پودر)

به کمک نرم افزار مینی‌تب¹ به بررسی و تحلیل نتایج تجربی مقادیر نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح پرداخته می‌شود. مقادیر این مشخصات خروجی فرایند ماشین کاری در جدول 1 ارائه شده بود. در شکل‌های 4 تا 6 نمودارهای اثرات اصلی² پارامترهای ورودی بر روی مقادیر نرخ براده‌برداری، نرخ

¹ Minitab

² Main Effects Plot

سایش ابزار و زبری سطح نشان داده است.

جدول 7 پارامترهای ثابت در حین آزمایشهای ماشین کاری به کمک پودر در شرایط بهینه (اندازه ذرات $2 \mu\text{m}$ و غلظت 4 gr/l) - (سری سوم آزمایشها)

مقدار یا حالت	نوع پارامتر ماشین کاری
120	ولتاژ مدار باز (V)
35	ولتاژ ماشین کاری (V)
100	زمان خاموشی پالس (μs)
15	مدت زمان ماشین کاری (min)
آلومینیوم	نوع پودر
4	غلظت ذرات پودر (gr/l)
2	اندازه ذرات پودر (μm)
مثبت	قطبیت ابزار
نفت سفید	سیال دی الکتریک
غوطه‌وری در سیال به همراه شستشوی جانبی با فشار ثابت	نحوه شستشوی دی الکتریک

جدول 6 پارامترهای ورودی فرایند و نتایج حاصل از آزمایشهای ماشین کاری به کمک پودر در شرایط بهینه (اندازه ذرات $2 \mu\text{m}$ و غلظت 4 gr/l) - (سری سوم آزمایشها)

Table 6 The process input parameters and results in machining tests with optimum powder conditions (PMEDM: Concentration= 4 gr/l , Size= $2 \mu\text{m}$) - (Third series)

ردیف آزمایش	شدت جریان (A)	زمان روشنی پالس (μs)	نرخ براده برداری در حالت PMEDM (mm^3/min)
1	8	6/4	0/817
2	8	12/8	1/8668
3	8	25	2/5858
4	8	50	2/0827
5	8	100	5/2118
6	12	6/4	2/2872
7	12	12/8	3/2053
8	12	25	6/7911
9	12	50	10/7119
10	12	100	21/3589
11	16	6/4	3/9897
12	16	12/8	6/5489
13	16	25	13/2683
14	16	50	22/1794
15	16	100	35/0027
16	24	6/4	8/3913
17	24	12/8	10/4957
18	24	25	22/0684
19	24	50	41/0668
20	24	100	62/0592
21	32	6/4	10/8071
22	32	12/8	11/5364
23	32	25	28/4785
24	32	50	53/2066
25	32	100	73/0235

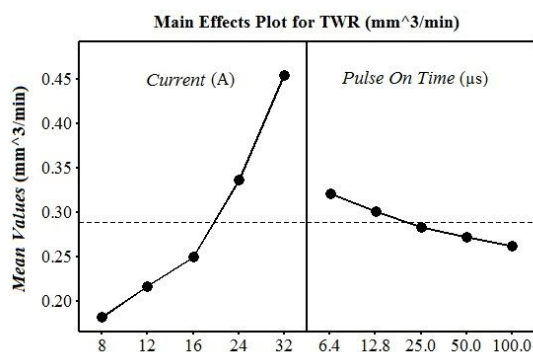


Fig. 5 The main effects plot of input parameters versus TWR

شکل 5 نمودار اثرات اصلی پارامترهای ورودی بر روی نرخ سایش ابزار

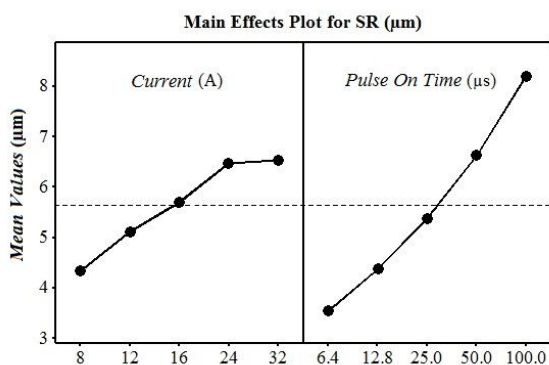


Fig. 6 The main effects plot of input parameters versus SR

شکل 6 نمودار اثرات اصلی پارامترهای ورودی بر روی زبری سطح

همان طور که در شکل 4 مشاهده می شود، تغییرات نرخ براده برداری وابسته به جریان و زمان روشنی پالس است، از طرفی انرژی حرارتی حاصل از تخلیه الکتریکی متناسب با

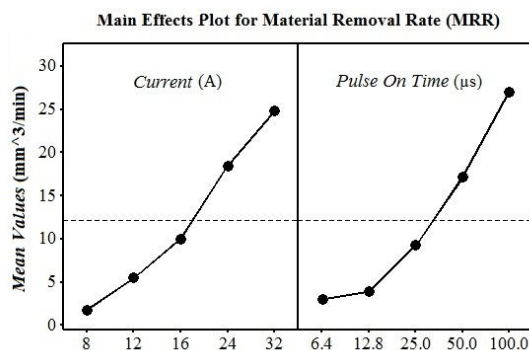


Fig. 4 The main effects plot of input parameters versus MRR

شکل 4 نمودار اثرات اصلی پارامترهای ورودی بر روی نرخ براده برداری

نیروی ضربه‌ای روی سطح ماشین کاری شده بیشتر می‌گردد و سبب می‌شود که مواد مذاب بیشتری خارج گردد که منجر به تولید حفره‌های عمیق‌تر و بزرگتر می‌شود. بعد از فوران مواد مذاب از درون حفره‌ها، در حین سرد شدن در اثر جریان سیال دی‌الکتریک، باقیمانده مواد مذاب پیرامون حفره‌ها، منجمد می‌شود و سطح زبر و ناهمواری تولید می‌کند. در جریان و زمان روشنی پایین که انرژی تخلیه الکتریکی نیز کمتر است، عمق حفره‌ها کمتر می‌باشد و در نتیجه زبری سطح کمتر می‌گردد.

3-2- نتایج و بحث مربوط به سری دوم آزمایش‌ها (آزمایش‌های ماشین کاری به کمک پودر برای تعیین غلظت و اندازه ذرات بهینه پودر)

3-2-1- بررسی نرخ براده‌برداری در آزمایش‌های ماشین کاری به کمک پودر

همان‌طور که در شکل 7 مشخص است، مقادیر نرخ براده‌برداری به ازای تغییرات اندازه ذرات پودر و غلظت ذرات پودر آلومینیوم در سیال دی‌الکتریک ارائه شده است. لازم به ذکر است که مقادیر نرخ براده‌برداری در آزمایشات ماشین کاری به کمک پودر، در جدول 4 قید شده بودند.

همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌گردد، به ازای پودر آلومینیوم با اندازه ذرات 2 میکرومتر و 20 میکرومتر، با افزایش غلظت ذرات پودر در سیال، در ابتدا نرخ براده‌برداری افزایش و سپس کاهش می‌یابد، در حالی که برای پودر آلومینیوم با اندازه ذرات 63 میکرومتر، با افزایش غلظت ذرات پودر در سیال دی‌الکتریک، نرخ براده‌برداری کاهش می‌یابد. در اثر افزودن ذرات پودر به دی‌الکتریک، مقاومت شکست سیال کاهش می‌یابد و فاصله گپ بین دو الکتروود افزایش می‌یابد.

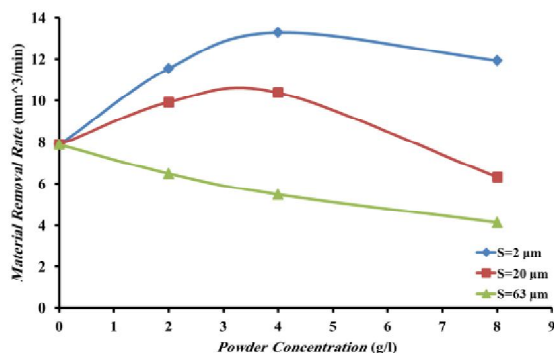


Fig. 7 The material removal rate versus powder size and concentration variations

شکل 7 مقادیر نرخ براده‌برداری به ازای تغییرات غلظت و اندازه ذرات پودر

در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر، به

تغییرات جریان و زمان روشنی پالس است. در نتیجه نیروی محرکه ضربه‌ای حاصل از تبخیر سیال دی‌الکتریک، وابسته به انرژی تخلیه الکتریکی است. هر چه انرژی جرقه بیشتر شود، نیروی محرکه برای خارج کردن براده‌ها از مرکز حفره‌های حاصل از ماشین کاری تخلیه الکتریکی بیشتر می‌شود و در نتیجه اندازه حفره‌های حاصل از اسپارک در سطح نمونه بزرگتر می‌شود و به ازای هر تخلیه الکتریکی مقادیر بیشتری از ماده قطعه‌کار جدا می‌شود و به عبارتی با افزایش جریان و زمان روشنی پالس، نرخ براده‌برداری از قطعه‌کار بیشتر می‌گردد.

در شکل 5 مشاهده می‌شود که با افزایش جریان، نرخ سایش ابزار افزایش پیدا می‌کند ولی با افزایش زمان روشنی پالس، نرخ سایش ابزار کاهش پیدا می‌کند. شکل 5 نشان می‌دهد که مقدار تغییرات نرخ سایش ابزار با توجه به جریان بیشتر از مقدار تغییرات نرخ سایش ابزار با توجه به زمان روشنی پالس است و همچنین در این شکل نرخ تغییرات با توجه به جریان بیشتر از نرخ تغییرات با توجه به زمان است، چرا که شیب کلی نمودار جریان بیشتر از شیب کلی نمودار زمان است و این بیانگر این است که جریان پالس موثرتر از زمان روشنی پالس، منجر به تغییرات نرخ سایش از سطح الکتروود ابزار می‌گردد.

با افزایش جریان، انرژی تخلیه الکتریکی بیشتر می‌شود و این سبب براده‌برداری بیشتر از ابزار یا به مفهوم دیگر سایش بیشتر ابزار می‌گردد. در شکل 5 مشاهده می‌شود که با افزایش زمان، نرخ سایش ابزار کاهش یافته است. دلیل این است که در ابتدای تخلیه الکتریکی، الکترون‌های سبک به دلیل لختی کمتر، در اثر میدان الکتریکی شروع به حرکت به سمت آند (قطب مثبت) می‌نمایند و الکتروود را بمباران می‌کنند، که این باعث ذوب شدن بخش کوچکی از سطح الکتروود می‌شود، با گذر زمان نیروی میدان الکتریکی به لختی بیشتر یون‌های مثبت که سنگین‌تر می‌باشند، غلبه می‌کنند و با حرکت آن‌ها به سمت کاتد (قطب منفی) و بمباران آن، براده‌برداری از قطعه‌کار آغاز می‌شود [11]. از آنجا که در آزمایشات انجام شده قطعه‌کار دارای قطبیت منفی (کاتد) و الکتروود دارای قطبیت مثبت (آند) می‌باشد، در نتیجه با افزایش زمان روشنی پالس، نسبت براده‌برداری از الکتروود ابزار به نسبت براده‌برداری از قطعه‌کار کمتر می‌شود، که این امر به صورت کاهش نرخ سایش ابزار با توجه به افزایش زمان روشنی پالس قابل مشاهده است.

همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود با افزایش جریان و زمان روشنی، مقدار زبری سطح افزایش می‌یابد. با افزایش جریان و زمان روشنی، انرژی تخلیه الکتریکی بیشتر می‌شود و

بهینه‌ای چون سبب می‌شود که حرارت بیشتری از درون کانال پلاسما توسط ذرات پودر به بیرون از ناحیه گپ انتقال پیدا کند، سبب کمتر شدن دانسیته تخلیه الکتریکی روی سطح قطعه کار می‌شود و چون سیستم سرو کنترل دستگاه در غلظت‌ها و اندازه ذرات بالا برای جلوگیری از ناپایداری‌های تخلیه الکتریکی بیشتر، فاصله گپ بین دو الکتروود را افزایش می‌دهد، توان موثر پالس‌های تخلیه الکتریکی کاهش می‌یابد و از همین روی نرخ براده‌برداری از سطح قطعه کار نیز کاسته می‌شود.

3-2-2- بررسی زبری سطح در آزمایش‌های ماشین کاری به کمک پودر

همان‌طور که در شکل 8 مشخص است، مقادیر زبری سطح به ازای تغییرات اندازه ذرات پودر و غلظت ذرات پودر آلومینیوم در سیال دی‌الکتریک ارائه شده است. لازم به ذکر است که این مقادیر زبری سطح در آزمایش‌های ماشین کاری به کمک پودر، در جدول 4 قید شده بودند.

همان‌طور که در شکل 8 مشاهده می‌گردد، به ازای تمام اندازه ذرات پودر آلومینیوم آزمایش شده، با افزایش غلظت ذرات، زبری سطح در ابتدا کاهش و بعد از یک حد بهینه مجدداً زبری افزایش می‌یابد. مقدار غلظت بهینه برای کاهش زبری سطح، به ازای اندازه ذرات 2 و 20 میکرونی مقدار 4 گرم بر لیتر می‌باشد، در حالی که مقدار غلظت بهینه پودر برای کاهش زبری سطح، به ازای اندازه ذرات 63 میکرونی مقدار 2 گرم بر لیتر می‌باشد.

با افزایش پودر آلومینیوم به درون کانال پلاسما، مقاومت شکست دی‌الکتریک کاهش می‌یابد، بنابراین سیستم سروکنترل دستگاه اسپارک به منظور ایجاد شرایط پایدارتر تخلیه الکتریکی، نسبت به ماشین کاری بدون پودر، فاصله گپ بین دو الکتروود را افزایش می‌دهد.

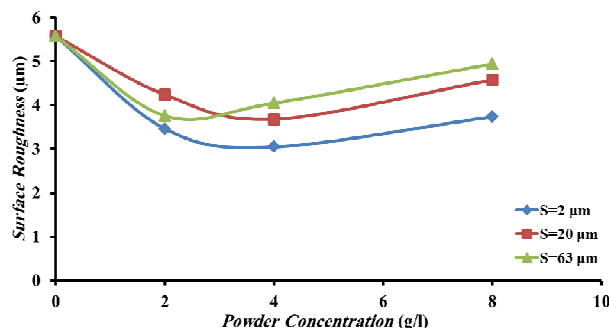


Fig. 8 The surface roughness versus powder size and concentration variations

شکل 8 مقادیر زبری سطح به ازای تغییرات غلظت و اندازه ذرات پودر

کانال تخلیه الکتریکی بزرگتر و پهن‌تر منجر به کاهش

دلیل وجود اختلاف پتانسیل و ایجاد میدان الکتریکی بین دو الکتروود، ذرات پودر دارای انرژی جنبشی می‌شوند و حرکت زیگزاگی می‌کنند. تحت تاثیر نیروهای الکتریکی، بعضی از ذرات پودر باردار شده، به یکدیگر می‌چسبند و حالت زنجیره‌ای می‌گیرند و پل‌هایی بین الکتروودها برقرار می‌سازند. به دنبال آن ولتاژ گپ و مقاومت شکست دی‌الکتریک کاهش می‌یابد، در نتیجه سبب تخلیه الکتریکی زود هنگام در گپ می‌شود و باعث می‌شود، تخلیه الکتریکی سلسله‌واری بر روی سطح الکتروود انجام شود و چون نسبت به حالت بدون پودر متداول، فرکانس جرقه‌زنی افزایش یافته است، نرخ براده‌برداری می‌تواند افزایش یابد. در حالی که عدم حضور ذرات پودر نقشی در افزایش فرکانس جرقه زنی ندارد. تجمع و غلظت بیش از حد ذرات پودر در فاصله گپ بین دو الکتروود می‌تواند منجر به ناپایداری شرایط تخلیه الکتریکی گردد و پالس‌های منجر به آرک و اتصال کوتاه افزایش می‌یابد، به همین دلیل نرخ براده‌برداری در غلظت‌های بالاتر می‌تواند کاهش یابد [16-11].

با مشاهده شکل 7 می‌توان دید که برای پودر با اندازه ذرات 20 میکرومتر در غلظت 8 گرم بر لیتر و برای پودر با اندازه ذرات 63 میکرومتر به ازای تمام غلظت‌ها، نرخ براده‌برداری حتی نسبت به حالت ماشین کاری بدون پودر (غلظت 0 گرم بر لیتر) نیز کمتر شده است. با توجه به شکل 7 دیده می‌شود که پودر با اندازه ذرات 2 میکرومتر و غلظت 4 گرم بر لیتر، منجر به افزایش 68% نرخ براده‌برداری نسبت به حالت بدون پودر شده است و همچنین پودر آلومینیوم با اندازه ذرات 20 میکرومتر و غلظت 4 گرم بر لیتر، منجر به افزایش 32% نرخ براده‌برداری نسبت به حالت بدون پودر شده است.

ذرات پودر رسانا که در فاصله گپ به دلیل میدان الکتریکی بین دو الکتروود حرکت جنبشی دارند، سبب توزیع تخلیه الکتریکی در محدوده گسترده‌تری می‌شوند، ذرات پودر با اندازه 2 میکرومتر به دلیل سبک‌تر بودن نسبت به ذرات پودر با اندازه 20 و 63 میکرومتر راحت‌تر می‌توانند در فضای گپ بین دو الکتروود حرکت کنند و سبب توزیع بیشتر تخلیه الکتریکی یا به عبارتی افزایش فرکانس جرقه‌زنی می‌گردند و به همین دلیل نرخ براده‌برداری افزایش چشمگیری داشته است. در حالی که قابلیت توزیع و پخش جرقه توسط ذرات بزرگتر و سنگین‌تر پودر کمتر است و همین امر منجر به کاهش نرخ براده‌برداری به ازای اندازه ذرات 63 میکرومتر برای تمام غلظت‌ها شده است.

از طرف دیگر مطابق شکل 7 می‌توان به این نتیجه کلی رسید که افزایش غلظت پودر و اندازه ذرات پودر بعد از یک حد

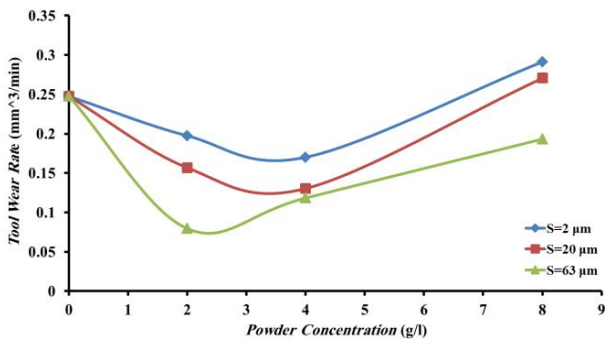


Fig. 9 The tool wear rate versus powder size and concentration variations

شکل 9 مقادیر نرخ سایش ابزار به ازای تغییرات غلظت و اندازه ذرات پودر

غلظت بهینه برای کاهش نرخ سایش ابزار، به ازای اندازه ذرات 2 و 20 میکرونی، مقدار 4 گرم بر لیتر، در حالی که غلظت بهینه پودر برای کاهش نرخ سایش ابزار، به ازای اندازه ذرات 63 میکرونی مقدار 2 گرم بر لیتر می‌باشد.

با توجه به شکل 9 دیده می‌شود که پودر آلومینیوم با اندازه ذرات 2 میکرومتر و غلظت 4 گرم بر لیتر، منجر به کاهش 31% نرخ سایش ابزار نسبت به حالت بدون پودر شده است و همچنین پودر آلومینیوم با اندازه ذرات 20 میکرومتر و غلظت 4 گرم بر لیتر، منجر به کاهش 47% نرخ سایش ابزار نسبت به حالت بدون پودر شده است و پودر با اندازه ذرات 63 میکرومتر و غلظت 2 گرم بر لیتر، منجر به کاهش 67% نرخ سایش ابزار نسبت به حالت بدون پودر شده است.

با افزودن ذرات پودر به سیال دی‌الکتریک، به دلیل کاهش مقاومت شکست دی‌الکتریک سیال، فاصله گپ بین الکترودها افزایش می‌یابد و در نتیجه کانال پلاسما بزرگتر می‌شود و انرژی حرارتی حاصل از فرایند تخلیه الکتریکی در فضای گسترده‌تری توزیع می‌شود که منجر به کاهش دانسیته توان الکتریکی می‌گردد و براده‌برداری را از سطح الکترود ابزار کاهش می‌دهد و منجر به کاهش نرخ سایش ابزار می‌شود. از طرف دیگر با افزودن ذرات پودر به دی‌الکتریک، ذرات رسانای افزوده شده حرارت بیشتری را به بیرون از فاصله گپ بین ابزار و قطعه کار منتقل می‌کنند که این امر نیز منجر به کاهش توان تخلیه الکتریکی روی سطح الکترود ابزار می‌شود و سایش ابزار را کاهش می‌دهد.

همان‌طور که در شکل 9 دیده می‌شود، به ازای تمام غلظت-های پودر آلومینیوم در دی‌الکتریک، کمترین مقدار نرخ سایش ابزار به ازای اندازه ذرات 63 میکرون و بیشترین مقدار نرخ سایش به ازای اندازه ذرات 2 میکرون حاصل می‌گردد. این امر به نوعی متناظر با شکل 7 است، زیرا که ذرات پودر با اندازه 2 میکرون به دلیل سبک‌تر بودن نسبت به ذرات پودر با اندازه 20

دانسیته توان الکتریکی در موضع تخلیه الکتریکی می‌شود و لذا حفره‌های کم عمق‌تری روی سطح ماشین کاری شده ایجاد می‌گردد و به عبارتی زبری سطح کاهش می‌یابد.

با توجه به شکل 8 دیده می‌شود که پودر آلومینیوم با اندازه ذرات 2 میکرومتر و غلظت 4 گرم بر لیتر، منجر به کاهش 45% زبری سطح نسبت به حالت بدون پودر (غلظت 0 گرم بر لیتر) شده است و همچنین پودر آلومینیوم با اندازه ذرات 20 میکرومتر و در غلظت 4 گرم بر لیتر، منجر به کاهش 34% زبری سطح نسبت به حالت بدون پودر شده است و پودر با اندازه ذرات 63 میکرومتر و در غلظت 2 گرم بر لیتر، منجر به کاهش 32% زبری سطح نسبت به حالت بدون پودر شده است.

نتایج تجربی در شکل 8 نشان می‌دهد که برای انواع پودرهای آلومینیوم با اندازه ذرات 2 و 20 میکرون، غلظت پودر 4 گرم بر لیتر نسبت به سایر غلظت‌ها، منجر به بیشترین افزایش در صافی سطح نمونه‌های ماشین کاری شده می‌شود، در حالی که برای پودر آلومینیوم با اندازه ذرات 63 میکرون، غلظت 2 گرم بر لیتر نسبت به دیگر غلظت‌ها منجر به تولید بهترین صافی سطح در نمونه‌های ماشین کاری شده می‌گردد.

طبیعتاً افزایش اندازه ذرات پودر منجر به افزایش جرم ذرات پودر می‌گردد، در نتیجه تعداد کمتری از ذرات پودر در یک غلظت معین، در فاصله گپ ماشین کاری به حالت تعلیق در می‌آید و نمی‌تواند بخش قابل توجهی از انرژی حرارتی حاصل از تخلیه الکتریکی را به خارج از گپ هدایت کند. از طرف دیگر، جرم بیشتر ذرات پودر بزرگتر (به طور مثال ذرات پودر 63 میکرونی) مانعی دیگر برای تعلیق و توزیع یکنواخت این ذرات در اثر فشار جانبی سیال دی‌الکتریک در فاصله گپ است و سبب ته‌نشینی سریعتر این نوع پودرها در ته مخزن ماشین کاری می‌شود، در نتیجه ذرات پودر بزرگتر به طور نسبی، سهم کمتری در افزایش صافی سطح ماشین کاری شده خواهند داشت.

3-2-3- بررسی نرخ سایش ابزار در آزمایش‌های ماشین کاری به کمک پودر

مقادیر نرخ سایش ابزار به ازای تغییرات اندازه ذرات و غلظت ذرات پودر آلومینیوم در سیال دی‌الکتریک در شکل 9 ارائه شده است. مقادیر نرخ سایش ابزار، در جدول 4 قید شده بودند. همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌گردد، به ازای تمام اندازه ذرات پودر آزمایش شده، با افزایش غلظت ذرات، نرخ سایش ابزار در ابتدا کاهش می‌یابد و بعد از یک حد بهینه مجدداً نرخ سایش افزایش می‌یابد.

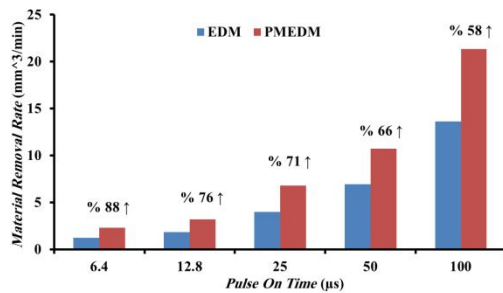


Fig. 11 The material removal rates for EDM and optimum PMEDM conditions for the current of 12 A

شکل 11 مقادیر نرخ براده برداری برای حالات بدون پودر و به کمک پودر بهینه به ازای جریان 12 آمپر

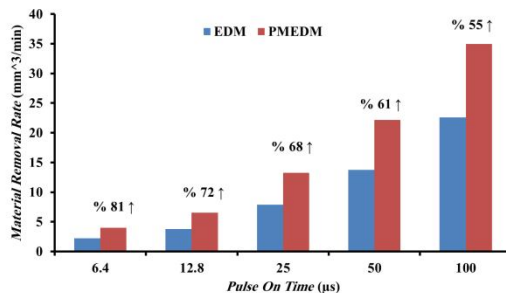


Fig. 12 The material removal rates for EDM and optimum PMEDM conditions for the current of 16 A

شکل 12 مقادیر نرخ براده برداری برای حالات بدون پودر و به کمک پودر بهینه به ازای جریان 16 آمپر

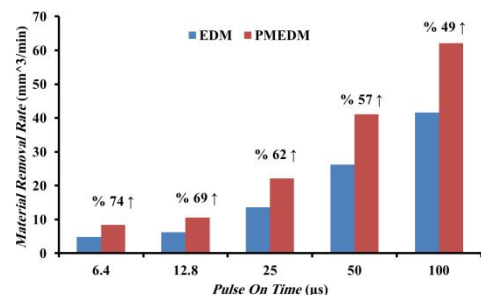


Fig. 13 The material removal rates for EDM and optimum PMEDM conditions for the current of 24 A

شکل 13 مقادیر نرخ براده برداری برای حالات بدون پودر و به کمک پودر بهینه به ازای جریان 24 آمپر

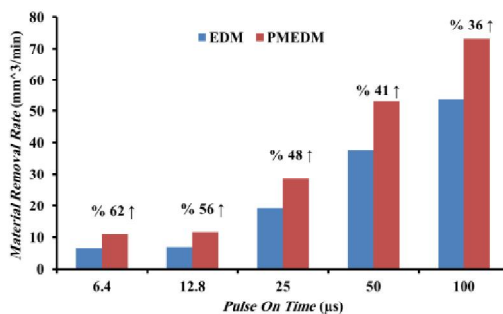


Fig. 14 The material removal rates for EDM and optimum PMEDM conditions for the current of 32 A

شکل 14 مقادیر نرخ براده برداری برای حالات بدون پودر و به کمک پودر بهینه به ازای جریان 32 آمپر

و 63 میکرون راحت تر می توانند در فضای گپ بین دو الکترود حرکت کنند و سبب توزیع بیشتر تخلیه الکتریکی یا به عبارتی افزایش فرکانس جرقه زنی می گردند و به همین دلیل نرخ براده برداری افزایش چشمگیری داشته است. در حالی که قابلیت توزیع و پخش جرقه توسط ذرات بزرگتر و سنگین تر پودر کمتر است و همین امر منجر به کاهش نرخ براده برداری به ازای اندازه ذرات 63 میکرومتر برای تمام غلظت ها شده است. در این محدوده آزمایش های طراحی شده و پارامترهای ورودی ماشین کاری اعم از جریان، زمان روشنی، زمان خاموشی، ولتاژ و غیره، افزایش فرکانس جرقه زنی به ازای ذرات پودر کوچکتر نه فقط برداشت فلز از سطح قطعه کار را در قالب نرخ براده برداری افزایش داده است، بلکه برداشت فلز از سطح الکترود ابزار مسی را در قالب نرخ سایش ابزار افزایش داده است، به همین دلیل در شکل 9 مشاهده می گردد به ازای هر غلظت معینی، بیشترین مقدار نرخ سایش ابزار برای ذرات پودر 2 میکرونی و کمترین مقدار نرخ سایش ابزار برای پودر 63 میکرونی اتفاق افتاده است.

3-3- مقایسه نرخ براده برداری در آزمایش های ماشین کاری به کمک پودر به ازای غلظت و اندازه ذرات بهینه پودر (سری سوم آزمایش ها) با آزمایش های ماشین کاری بدون پودر (سری اول آزمایش ها)

در شکل های 10 تا 14، مقادیر نرخ براده برداری برای آزمایش های ماشین کاری به کمک پودر به ازای غلظت و اندازه ذرات بهینه پودر (اندازه ذرات 2 µm و غلظت 4 gr/l) نسبت به تغییرات جریان و زمان روشنی پالس نشان داده شده اند. همچنین در این شکل ها برای این که بتوان یک مقایسه بین نتایج در حالات بدون پودر و به کمک پودر بهینه انجام داد، مقادیر نرخ براده برداری برای آزمایش های ماشین کاری بدون پودر نیز ارائه شده اند.

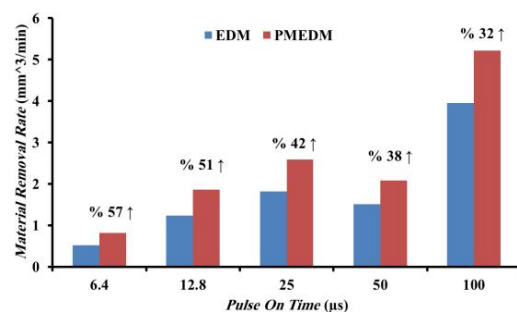


Fig. 10 The material removal rates for EDM and optimum PMEDM conditions for the current of 8 A

شکل 10 مقادیر نرخ براده برداری برای حالات بدون پودر و به کمک پودر بهینه به ازای جریان 8 آمپر

پرداخت کاری یا نیمه خشن کاری نامید، فرایند افزودن پودر به طور چشمگیری منجر به افزایش نرخ براده برداری از سطح کار می‌گردد. در حالی که در شدت جریان‌ها و زمان‌های روشنی پالس بالا، یا به عبارتی به ازای مقادیر بیشتر انرژی تخلیه الکتریکی، افزودن پودر به درون سیال دی‌الکتریک اثر کمتری در بالا بردن فرکانس جرقه زنی دارد که از لحاظ عملیاتی می‌توان آن را مرحله خشن کاری نامید. می‌توان بیان داشت که به ازای انرژی تخلیه الکتریکی بیشتر، فرایند توزیع جرقه‌های الکتریکی در فاصله گپ بین دو الکترود توسط ذرات پودری که به سیال دی‌الکتریک افزوده و تحت میدان الکتریکی بین الکترودها باردار شده‌اند به طور کم اثرتری انجام می‌پذیرد و به طور نسبی کمتر می‌تواند منجر به افزایش تعداد جرقه‌ها در واحد سطح قطعه کار گردد که به مفهوم دیگر با افزایش انرژی تخلیه الکتریکی، نرخ (آهنگ) افزایش براده برداری از سطح قطعه کار، در حالت به کمک پودر نسبت به حالت بدون پودر، کاهش می‌یابد.

4- نتیجه‌گیری

- با افزایش جریان یا زمان روشنی پالس نرخ براده برداری افزایش پیدا می‌کند. با افزایش جریان، نرخ سایش ابزار افزایش پیدا می‌کند ولی با افزایش زمان روشنی، نرخ سایش ابزار کاهش پیدا می‌کند. زبری سطح در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی با افزایش زمان روشنی پالس یا جریان پالس افزایش پیدا می‌کند اما نرخ افزایش زبری با افزایش جریان بیشتر از 24 آمپر کاهش می‌یابد. دلیل این اتفاق، افزایش احتمال رخ دادن ناپایداری‌های تخلیه الکتریکی به صورت آرک می‌باشد.

- در ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر آلومینیوم با اندازه ذرات 2 و 20 میکرومتر، با افزایش غلظت ذرات پودر در دی‌الکتریک، در ابتدا نرخ براده برداری افزایش و سپس کاهش می‌یابد، در حالی که برای پودر آلومینیوم با اندازه ذرات 63 میکرومتر، با افزایش غلظت ذرات پودر در دی‌الکتریک، نرخ براده برداری کاهش می‌یابد.

- در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر، به ازای تمام اندازه ذرات پودر آلومینیوم آزمایش شده، با افزایش غلظت ذرات پودر، زبری سطح در ابتدا کاهش می‌یابد و بعد از یک حد بهینه مجدداً زبری سطح افزایش می‌یابد. مقدار غلظت بهینه پودر آلومینیوم برای کاهش زبری سطح، به ازای اندازه ذرات 2 و 20 میکرونی مقدار 4 گرم بر لیتر می‌باشد، در حالی که مقدار غلظت بهینه پودر برای کاهش زبری سطح، به ازای اندازه ذرات 63 میکرونی مقدار 2 گرم بر لیتر می‌باشد.

در مورد هر شرایط ماشین کاری معین، مقدار درصد افزایش نرخ براده برداری در حالت به کمک پودر بهینه نسبت به حالت بدون پودر نیز ذکر شده است.

با ملاحظه شکل‌های 10 تا 14 می‌توان دید که برای حالت ماشین کاری بهینه به کمک پودر نیز مشابه حالت ماشین کاری بدون پودر، با افزایش جریان و زمان روشنی، مقادیر نرخ براده برداری افزایش می‌یابند. با افزایش جریان، انرژی تخلیه الکتریکی افزایش می‌یابد و نیروی محرکه برای خارج کردن براده‌ها از مرکز حفره‌های حاصل از ماشین کاری بیشتر و در نتیجه اندازه حفره‌ها در سطح نمونه بزرگتر می‌شود و به ازای هر تخلیه الکتریکی مقادیر بیشتری از ماده قطعه کار جدا می‌شود که به مفهوم دیگر نرخ براده برداری از قطعه کار بیشتر می‌گردد. از طرف دیگر با افزایش زمان پالس، مقدار انرژی حرارتی بیشتری به سطح قطعه کار منتقل می‌گردد و مواد بیشتری ذوب می‌گردند و نرخ براده برداری بیشتر می‌شود.

با مشاهده شکل‌های 10 تا 14 می‌توان دید که به طور کلی با افزایش جریان و زمان روشنی پالس یا به عبارت دیگر با افزایش انرژی الکتریکی، درصد افزایش نرخ براده برداری در حالت به کمک پودر نسبت به حالت بدون پودر کاهش می‌یابد. البته در مورد جریان 8 آمپر نسبت به سایر جریان‌ها، این امر نقض شده است، در جریان 8 آمپر به ازای زمان‌های روشنی مختلف، مقادیر نرخ براده برداری نسبت به سایر جریان‌های پالس، درصد افزایش کمتری در حالت به کمک پودر نسبت به حالت بدون پودر داشته است. احتمالاً در جریان 8 آمپر به ازای تمام زمان‌های روشنی پالس، مقدار انرژی الکتریکی به دلیل کمتر بودن، به طور موثری نمی‌تواند منجر به توزیع ذرات پودر باردار در فاصله گپ بین دو الکترود ابزار و قطعه کار گردد و توزیع جرقه یا به عبارتی فرکانس جرقه زنی نسبت به دیگر حالات افزایش چشمگیری نداشته است، به همین دلیل درصد افزایش نرخ براده برداری در حالت به کمک پودر نسبت به حالت بدون پودر برای جریان 8 آمپر و به ازای تمام زمان‌های روشنی، کمترین است. با مشاهده شکل‌های 10 تا 14 می‌توان دریافت که کمترین مقدار افزایش نرخ براده برداری در حالت به کمک پودر نسبت به حالت بدون پودر برابر با 32% و بیشترین مقدار افزایش در حالت به کمک پودر نسبت به حالت بدون پودر برابر با 88% بوده است.

در شدت جریان‌ها و زمان‌های روشنی پالس پایین، افزودن پودر به سیال دی‌الکتریک اثر بیشتری در افزایش فرکانس جرقه زنی دارد یا به عبارت دیگر در مقادیر کم و یا متوسط انرژی تخلیه الکتریکی که از لحاظ عملیاتی می‌توان آن را مرحله

- Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 170, pp. 385-39, 2005.
- [2] G. Lütjering, J.C. Williams, *Titanium, Engineering Materials and Processes*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [3] C. Leyens, M. Peters, *Titanium and Titanium Alloys, Fundamentals and Applications*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003.
- [4] K. Weinert, S. Bergmann, C. Kempmann, Machining Sequence to Manufacture a γ -TiAl-Conrod for Application in Combustion Engines, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 1, pp. 1-8, 2006.
- [5] C. Yao, J. Lin, D. Wu, and J. Ren, Surface integrity and fatigue behavior when turning γ -TiAl alloy with optimized PVD-coated carbide inserts, *Chinese J. Aeronaut.*, (In press).
- [6] J. Liu, D. Zhu, L. Zhao, and Z. Xu, Experimental Investigation on Electrochemical Machining of γ -TiAl Intermetallic, *Procedia CIRP*, Vol. 35, no. Supplement C, pp. 20-24, 2015.
- [7] B. Jabbaripour, M. Motallebpour alishahi, M. Payandehzad, Investigating the Electrical Discharge Machinability of γ -TiAl Intermetallic Compound, Modares Mechanical Engineering, *Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 349-353, 2015 (in Persian)
- [8] B. Jabbaripour, M.H. Sadeghi, M.R. Shabgard, H. Faraji, Investigating Surface Roughness, Material Removal Rate and Corrosion Resistance in PMEDM of γ -TiAl Intermetallic, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 15, pp. 56-68, 2013.
- [9] B. Jabbaripour, M.H. Sadeghi, M.R. Shabgard, Sh. Shajari, H. Hassanpour, Investigating the Effects of Powder Mixed Electrical Discharge Machining on the Surface Quality of γ -TiAl Intermetallic, *Journal of Advanced Materials Research*, Vol. 488, pp. 396-401, 2012.
- [10] D.R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, New York, Francis and Taylor group, 90th Edition, CD-Rom Version: pp. 1178-1181, 2010.
- [11] H.K. Kansal, S. Singh, P. Kumar, Numerical simulation of powder mixed electrical discharge machining (PMEDM) using finite element method, *Mathematical and computer modeling*, Vol. 47, pp. 1217-1237, 2008.
- [12] Y.S. Wong, L.C. Lim, I. Rahuman, W.M. Tee, Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed Dielectric, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 79, pp. 30-40, 1998.
- [13] H.M. Chow, B.H. Yan, F.Y. Huang, J.C. Hung, Study of added powder in kerosene for the micro-slit machining of titanium alloy using electro-discharge machining, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 79, pp. 30-40, 1998.
- در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر به ازای تمام اندازه ذرات پودر آلومینیوم آزمایش شده، با افزایش غلظت ذرات، نرخ سایش ابزار در ابتدا کاهش می‌یابد و بعد از یک حد بهینه مجدداً نرخ سایش ابزار افزایش می‌یابد. غلظت بهینه پودر آلومینیوم برای کاهش نرخ سایش ابزار، به ازای اندازه ذرات 2 و 20 میکرونی، مقدار 4 گرم بر لیتر می‌باشد، در حالی که غلظت بهینه پودر برای کاهش نرخ سایش ابزار، به ازای اندازه ذرات 63 میکرونی مقدار 2 گرم بر لیتر می‌باشد.
- به طور کلی با افزایش جریان و زمان روشنی پالس یا به عبارت دیگر با افزایش انرژی الکتریکی، درصد افزایش نرخ براده‌برداری در حالت ماشین کاری به کمک پودر نسبت به حالت بدون پودر کاهش می‌یابد. البته در مورد جریان 8 آمپر نسبت به سایر جریان‌ها، این امر نقض شده است، یعنی اینکه در جریان 8 آمپر به ازای زمان‌های روشنی پالس مختلف، مقادیر نرخ براده‌برداری نسبت به سایر جریان‌های پالس، درصد افزایش کمتری در حالت به کمک پودر نسبت به حالت بدون پودر داشته است.
- در سطوح آزمایش شده جریان و زمان روشنی پالس و به ازای غلظت و اندازه ذرات بهینه پودر آلومینیوم در سیال دی‌الکتریک، کمترین مقدار افزایش نرخ براده‌برداری در حالت ماشین کاری به کمک پودر نسبت به حالت بدون پودر برابر با 32% و بیشترین مقدار افزایش نرخ براده‌برداری برابر با 88% بوده است.
- به‌طور کلی افزودن پودر به سیال دی‌الکتریک سبب افزایش فرکانس جرقه‌زنی و در نتیجه افزایش نرخ براده‌برداری می‌شود. در شدت جریان‌ها و زمان‌های روشنی پالس پایین، افزودن پودر آلومینیوم به درون سیال دی‌الکتریک اثر بیشتری در افزایش فرکانس جرقه‌زنی دارد یا به عبارت دیگر در مقادیر کم و متوسط انرژی تخلیه الکتریکی (مراحل پرداخت کاری و نیمه خشن کاری)، افزودن پودر به طور چشمگیری منجر به افزایش نرخ براده‌برداری می‌گردد. در حالی که در شدت جریان‌ها و زمان‌های روشنی پالس بالا یا به عبارتی به ازای مقادیر بیشتر انرژی تخلیه الکتریکی (مرحله خشن کاری)، افزودن پودر اثر کمتری در افزایش مقدار فرکانس جرقه‌زنی و به عبارتی افزایش نرخ براده‌برداری دارد.

5- مراجع

- [1] Y. Tzeng, F. Chen, Investigation into some surface characteristics of electrical discharge machined SKD-11 using powder-suspension dielectric oil,

- The effects of powder suspended dielectrics on the thermal influenced zone by electrodischarge machining with small discharge energies, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 149, pp. 191-197, 2004.
- [16] H.K. Kansal, S. Singh, P. Kumar, Effect of Silicon Powder Mixed EDM on Machining Rate of AISI D2 Die Steel, *Journal of manufacturing processes*, Vol. 9, pp. 13-22, 2007.
- Technology*, Vol. 101, pp. 95-103, 2000.
- [14] H. Kansal, S. Singh, P. Kumar, Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining by response surface methodology, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 169, pp. 427-436, 2005.
- [15] F. Klocke, D. Lung, G. Antonoglou, D. Thomaidis,