



مطالعه تجربی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر (PMEDM) بر روی ترکیب بین فلزی γ -TiAl

بهزاد جباری‌پور^{۱*}، نوید ملارم‌زانی^۲، مهرداد مطلب‌پور‌الیشاهی^۳

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران

* تهران، صندوق پستی ۲۸۵۹۸، beh.jabbaripour@iauctb.ac.ir

چکیده

ترکیب بین‌فلزی γ -TiAl به علت مزیت‌هایی همچون چگالی پایین، مدول الاستیسیته بالا، مقاومت زیاد در برابر اکسیداسیون، خوردگی، احتراق و استحکام کششی و خزشی مناسب در دمای بالا، در صنایع نظیر هوافضا، توربین‌سازی، موتورهای جت و اتومبیل‌سازی، مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات بسیار اندک گزارش شده در زمینه ماشین‌کاری ترکیبات بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید نشان می‌دهد که ماشین‌کاری این دسته از مواد با روش‌های سنتی بسیار مشکل است. در این مورد، می‌توان از روش‌های غیرسنتی مانند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (EDM) استفاده نمود. در این تحقیق با در نظر گرفتن یک سطح جریان و زمان روشنی پالس به عنوان پارامترهای اصلی ثابت، آزمایشات ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر آلومینیوم (PMEDM) به ازای سطوح مختلف اندازه ذرات پودر و غلظت ذرات پودر در سیال دی‌الکتریک انجام می‌گردد تا مقدار غلظت و اندازه ذرات بهینه پودر با در نظر گرفتن مشخصات خروجی فرایند مانند نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح ماشین‌کاری شده تعیین گردد. نتایج نشان می‌دهد که ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر آلومینیوم، در شرایط آزمایش شده و بهینه، منجر به افزایش ۶۸٪ نرخ براده‌برداری، کاهش ۴۵٪ زبری سطح و کاهش ۶۷٪ نرخ سایش ابزار نسبت به حالت بدون پودر شده است.

کلید واژگان: ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، پودر، TiAl، نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار

Experimental investigation of powder mixed electrical discharge machining (PMEDM) on intermetallic compound γ -TiAl

Behzad Jabbaripour^{1*}, Navid Mollaramazani², Mehrdad Motallebpouralishahi³

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

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

ABSTRACT

The application of intermetallic compound of γ -TiAl has been considered in aerospace, automotive, jet and turbine manufacturing industries due to its low density, high modulus of elasticity, high resistance against oxidation, corrosion, ignition and suitable tensile and creep strength in high temperature environments. Researches on machining of titanium aluminide intermetallic compound indicate that these materials are difficult to cut in a traditional way. So, other non-traditional processes such as Electrical Discharge Machining (EDM) can be used for machining of these compounds. In this investigation, one level of pulse current and pulse on time was considered as the main constant parameters. The Powder Mixed Electrical Discharge Machining (PMEDM) tests were performed with respect to the different levels of aluminum powder particle sizes and concentrations in the dielectric fluid. The main aim of the study is to determine the optimum powder size and concentration while considering the output characteristics of the process such as material removal rate, tool wear ratio and roughness of the machined surface. The results showed that powder mixed electrical discharge machining at optimum conditions will lead to 68 % increase in material removal rate, 45% decrease in surface roughness and 67% decrease in tool wear ratio compared to the circumstances where no powder (EDM) was used.

Keywords: Electrical Discharge Machining (EDM), Material Removal Rate, Powder, TiAl, Tool Wear Ratio.

آلومیناید می‌باشد [۳،۲]. علی‌رغم انتشارات گسترده در زمینه توسعه

فرآیندهای ریخته‌گری، عملیات حرارتی، رفتار خستگی، ریزساختار، خواص مکانیکی، اکسیداسیون و مقاومت حرارتی این ترکیبات، اطلاعات و گزارش‌های اندکی در مورد فرآیندهای ماشین‌کاری این ترکیبات اعم از سنتی و غیر سنتی وجود دارد، تا حد زیادی این امر وضعیت خاص این ماده، قابلیت دسترسی و اهمیت تجاری آن را نشان می‌دهد [۴].

ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی (EDM) یک فرایند براده‌برداری غیرسنتی متداول می‌باشد. از مزایای این فرایند، قابلیت براده‌برداری مواد سخت

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر تلاش‌های قابل ملاحظه‌ای جهت توسعه آلیاژهای پایه γ -TiAl برای استفاده در کاربردهای سازه‌ای با دمای کاری بالا که دارای دانسیته پایین، مقاومت بالا و مدول ینگ مناسب هستند، انجام شده است. با توجه به این خواص، ترکیبات بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید جایگزین سوپر آلیاژهای پایه نیکل سنگین‌تر می‌گردند که باید در دماهای کاری نسبتاً بالا (حدود ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) ایفای نقش کنند [۱]. هرچند تردی و شکل‌پذیری ضعیف ذاتی آن در دمای محیط، از معایب اصلی ترکیبات بین فلزی تیتانیوم

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
B. Jabbaripour, N. Mollaramazani, M. Motallebpour alishahi, Experimental Investigation of Powder Mixed Electrical Discharge Machining (PMEDM) on Intermetallic Compound γ -TiAl, Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No. 13, pp. 354-359, 2015 (in Persian)

افزایش غلظت منجر به کاهش نرخ براده برداری می گردد و همچنین با افزایش غلظت پودر آلومینیوم تا یک حد خاص، نرخ سایش ابزار کاهش می یابد و بعد از آن با افزایش غلظت، نرخ سایش ابزار افزایش می یابد. وانگ و همکارانش [۸] جهت ماشین کاری تخلیه الکتریکی سطح قطعه کار فولادی SKH-54 از ۳ نوع پودر گرافیت، سیلیکون و سولفید مولیبدن استفاده نمودند و نشان دادند که با تغییر نوع پودر تحت شرایط ماشین کاری یکسان می توان سطوحی کاملاً متفاوت به دست آورد و انتخاب نوع مناسب پودر در بهبود کیفیت سطح، بسیار حائز اهمیت است. پیکاس و هنریکس [۹] اثر تغییرات غلظت پودر سیلیکون در سیال دی الکتریک و تغییرات دبی جریان سیال و همچنین تغییرات سطح الکتروود ابزار را بر روی کیفیت سطح فولاد AISI H13 در هنگام فرآیند ماشین کاری به کمک پودر بررسی نمودند. افزایش غلظت سیلیکون از صفر تا ۲ گرم بر لیتر سبب کاهش زبری سطح می شود، هرچند با افزایش بیشتر غلظت، مقدار زبری سطح افزایش می یابد.

براساس آخرین اطلاعات نویسندگان مقاله حاضر، تاکنون به غیر از انتشارات سابق محققان این مطالعه [۱۱،۱۰] هیچ گونه کار تحقیقاتی در مورد فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر و یا حتی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی غوطه وری در سیال در مورد آلیاژ γ -TiAl گزارش نشده است و هیچ گونه جداول و اطلاعات تکنولوژیکی برای فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی این ترکیب پر اهمیت و مدرن در صنعت وجود ندارد. بنابراین نیاز است تا اطلاعات تکنولوژیکی را برای ماشین کاری بهینه این ترکیب بین فلزی توسعه داد. در این تحقیق با در نظر گرفتن یک سطح جریان و زمان روشنی پالس به عنوان پارامترهای اصلی ثابت، آزمایشات ماشین کاری بدون پودر و 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 فرآیند مانند نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح تعیین گردد.

۲- مواد اولیه، تجهیزات و طراحی آزمایشات

برای نمونه های قطعه کار از ترکیب بین فلزی γ -TiAl (Ti-53Al (at. %)) استفاده گردید. (چگالی نمونه γ -TiAl مورد استفاده برابر با $3/78 \text{ g/cm}^3$ می باشد). با استفاده از وایرکات نمونه های مکعبی شکل به ابعاد $10 \times 10 \times 10$ میلی متر از شمش ریخته گری شده، بریده شدند. از الکترودهای مسی استوانه ای شکل به قطر ۱۸ میلی متر و طول ۴۰ میلی متر به عنوان ابزار استفاده شده است. (چگالی الکترودهای مس مورد استفاده برابر با $8/93 \text{ g/cm}^3$ می باشد).

در شکل ۲- الف و ۲- ب، به ترتیب تصاویر تعدادی از نمونه های قطعه کار γ -TiAl و همچنین الکترودهای ابزار مسی استفاده شده در طی آزمایش های ماشین کاری نشان داده است.

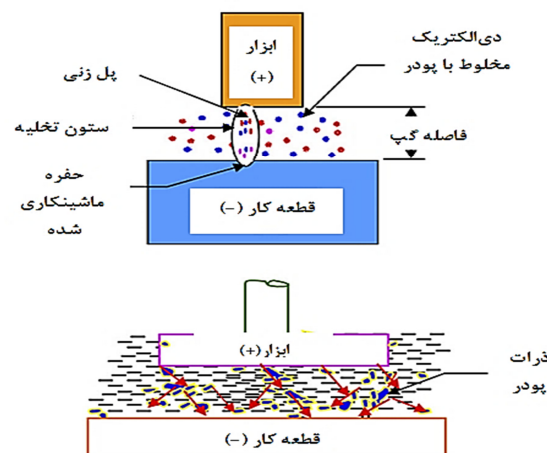
تمامی آزمایشات ماشین کاری بر روی ماشین اسپارک CNC مدل CHARMILLES ROBOFORM 200 که به یک ژنراتور آیزوپالس مجهز است، انجام گردیده است. تغییرات وزن الکترودهای ابزار و نمونه های قطعه کار، قبل و بعد از ماشین کاری بوسیله ترازوی دیجیتال (CP224S-Surtorius) با دقت $0/001$ گرم و زبری سطح به وسیله دستگاه زبری سنج (Mahr-Perthometer M2) با دقت $0/001$ میکرومتر اندازه گیری شده است.

پارامترهای مورد استفاده در آزمایشات ماشین کاری بدون پودر و ماشین کاری به کمک پودر، در جدول ۱ ارائه شده اند. جهت انجام آزمایشات اشاره شده، نیاز است تا از پودر با غلظت ها و اندازه دانه های مختلف استفاده شود. در صورتی که لازم باشد دائماً سیال دی الکتریک در مخزن اصلی دستگاه

ماشین کاری شونده می باشد [۵]. از مشکلات موجود در ماشین کاری تخلیه الکتریکی، افزایش زبری سطح ماشین کاری شده با افزایش جریان، پایین بودن نرخ براده برداری، ناپایداری فرآیند ماشین کاری تحت حالاتی خاص و ایجاد انواع عیوب سطحی و زیرسطحی در قطعه ماشین کاری شده می باشد. یکی از روش های بهبود مشخصه های خروجی فرآیند EDM، روش افزودن پودر رسانا و یا نیمه رسانا به سیال دی الکتریک و انجام ماشین کاری تخلیه الکتریکی می باشد که این فرآیند به اختصار PMEDM نامیده شده است [۶]. هنگامی که ولتاژ $220-80$ ولت بین الکترودها برقرار می شود، میدان الکتریکی 10^7-10^5 ولت بر متر ایجاد می شود. در اثر افزودن پودر در حد فاصل دو الکتروود ابزار و قطعه کار، فاصله گپ افزایش می یابد [۷،۶]. به دلیل وجود اختلاف پتانسیل و ایجاد میدان الکتریکی بین دو الکتروود، ذرات پودر دارای انرژی جنبشی می شوند و حرکت زیگزاگی می کنند، ذرات پودر به هم نزدیک می شوند و گاهی حالت خوشه ای می گیرند. تحت تاثیر نیروهای الکتریکی، بعضی از ذرات پودر باردار شده، به یکدیگر می چسبند و حالت زنجیره ای می گیرند و پلهایی بین الکترودها برقرار می سازند که در شکل ۱ به صورت شماتیک نشان داده شده است.

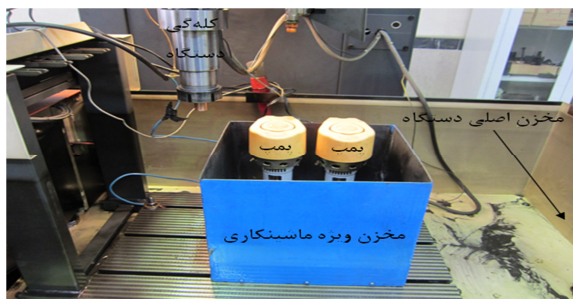
به دنبال آن ولتاژ گپ و مقاومت شکست سیال دی الکتریک کاهش می یابد، در نتیجه سبب تخلیه الکتریکی زود هنگام در گپ می شود و باعث می شود تخلیه الکتریکی سلسله واری بر روی سطح الکتروود انجام شود و چون نسبت به حالت ماشین کاری تخلیه الکتریکی متداول، فرکانس جرقه زنی افزایش یافته است، سبب گسترش بیشتر کانال پلاسما می گردد و دانسیته انرژی الکتریکی هر جرقه نیز کاهش می یابد، در نتیجه سطح حاصل یکنواخت تر و حفره های ماشین کاری شده کم عمق تر هستند [۶].

تنگ و چن [۶] جهت بهبود کیفیت سطح ماشین کاری شده قطعه کار SKD-11 از چهار نوع پودر سیلیکون کارباید، مس، کروم و آلومینیوم استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که افزودن پودر آلومینیوم به دی الکتریک، ضخامت لایه انجماد مجدد حاصل از ماشین کاری را به طور محسوسی کاهش می دهد. کانگ و همکارانش [۷] اثر چهار پارامتر اندازه ذرات پودر، غلظت ذرات پودر، جریان و زمان روشنی پالس را بر روی نرخ براده برداری و نرخ سایش ابزار در حین ماشین کاری قطعه کار تنگستن کارباید، به کمک پودر آلومینیوم بررسی نمودند. آن ها با بررسی نتایج تجربی بیان داشتند که با افزایش غلظت پودر، نرخ براده برداری افزایش می یابد و بعد از حد معینی،



شکل ۱ نمایش شماتیک مکانیزم ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر [۶]

ته نشین شدن ذرات پودر در کف مخزن کاهش یابد. در شکل ۳، تجهیزات ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر شامل نحوه قرارگیری مخزن ماشین کاری درون مخزن اصلی دستگاه اسپارک و نحوه قرارگیری پمپها، اتصالات، گیره و کله گی درون این مخزن نشان داده شده است. در این تحقیق برای آزمایشات ماشین کاری (PMEDM) با توجه به سطوح در نظر گرفته شده در جدول ۱ برای اندازه ذرات و غلظت ذرات پودر آلومینیوم، به روش عاملی کامل طراحی آزمایشات انجام شده است. به دلیل در نظر گرفتن ۳ سطح برای اندازه ذرات و ۳ سطح برای غلظت ذرات، تعداد آزمایشات ۹ عدد می باشد. در جدول ۲ پارامترهای ورودی و نتایج حاصل از آزمایشهای ماشین کاری PMEDM و همچنین مقادیر خروجی برای حالت ماشین کاری بدون پودر (مجموعاً ۱۰ حالت آزمایش) ارائه گردیده اند.



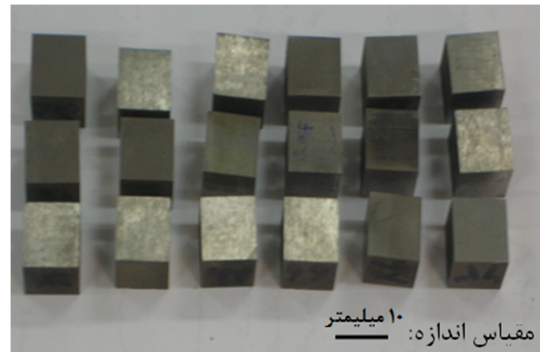
الف) نحوه قرارگیری مخزن ویژه ماشین کاری درون مخزن اصلی دستگاه



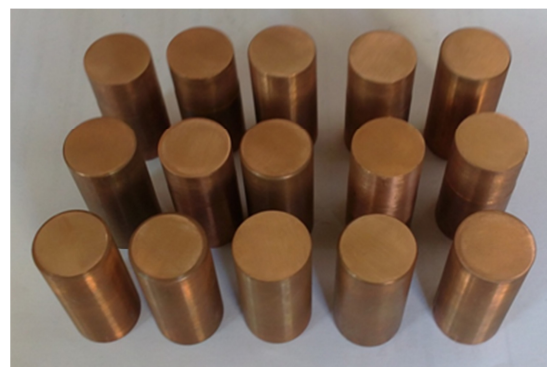
ب) نحوه قرارگیری پمپها، اتصالات، گیره و کله گی درون مخزن
 شکل ۳ تجهیزات مورد استفاده در آزمایشات ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر

جدول ۲ شرایط ورودی فرآیند و نتایج حاصل از آزمایشهای ماشین کاری EDM و PMEDM

ردیف	حالت	غلظت پودر (g/l)	اندازه ذرات (μm)	نرخ براده برداری (mm ³ /min)	نرخ سایش ابزار (mm ³ /min)	سطح Ra (μm)	آزمایش
۱	PMEDM	۲	۲	۱۱/۵۵۷۴	۰/۱۹۷۴	۳/۴۶۳	۱
۲	PMEDM	۲	۲۰	۹/۹۲۵۳	۰/۱۵۶۸	۴/۲۴۱	۲
۳	PMEDM	۲	۶۳	۶/۴۸۶۹	۰/۰۷۹۵	۳/۷۵۹	۳
۴	PMEDM	۴	۲	۱۳/۲۶۸۳	۰/۱۷۰۱	۳/۰۵۱	۴
۵	PMEDM	۴	۲۰	۱۰/۳۷۹۶	۰/۱۳۰۴	۳/۶۸۲	۵
۶	PMEDM	۴	۶۳	۵/۴۷۶۲	۰/۱۱۸۳	۴/۰۴۹	۶
۷	PMEDM	۸	۲	۱۱/۹۳۰۲	۰/۲۹۱۳	۳/۷۳۷	۷
۸	PMEDM	۸	۲۰	۶/۳۲۴۳	۰/۲۷۰۵	۴/۵۷۸	۸
۹	PMEDM	۸	۶۳	۴/۱۳۶۶	۰/۱۹۳۲	۴/۹۴۳	۹
۱۰	EDM	---	---	۷/۸۷۷۵	۰/۲۴۷۵	۵/۵۷۶	۱۰



الف) برخی از نمونه های قطعه کار از جنس γ-TiAl



ب) الکترودهای ابزار از جنس مس

شکل ۲ تصاویر تعدادی از نمونه های قطعه کار و الکترودهای ابزار به کار رفته در آزمایشات ماشین کاری

جدول ۱ پارامترهای ورودی ماشین کاری در آزمایشات تجربی

پارامترهای ورودی	ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM)	ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر (PMEDM)
جریان پالس (A)	۱۶	۱۶
زمان روشن پالس (μs)	۲۵	۲۵
ولتاژ مدار باز (V)	۱۲۰	۱۲۰
ولتاژ ماشین کاری (V)	۳۵	۳۵
زمان خاموشی پالس (μs)	۱۰۰	۱۰۰
قطعه کار (-)	γ-TiAl	γ-TiAl
الکتروود ابزار (+)	مس	مس
زمان ماشین کاری (min)	۱۵	۱۵
سیال دی الکتریک	نفت سفید	نفت سفید + پودر
انواع پودر	-----	آلومینیوم
اندازه ذرات پودر (μm)	-----	۲، ۲۰، ۶۳
غلظت ذرات پودر (g/l)	-----	۲، ۴، ۸

اسپارک (با حجم حدود ۳۰۰ لیتر) تعویض شود و دور ریخته شود، از لحاظ اقتصادی هزینه های زیادی را به بار می آورد. برای حل این مشکل، در این تحقیق مخزن ماشین کاری ساده و کوچکی طراحی و ساخته شده است، به گونه ای که این سیستم و تجهیزات باید بتواند سیال دی الکتریک را به محل گپ بین دو الکتروود با فشار مناسب پمپ کند و سبب گردش منظم سیال دی الکتریک به همراه پودر معلق در آن، به موضع ماشین کاری شود و همچنین به صورت خودکار و ملایم سیال دی الکتریک در مخزن ویژه هم زده شود تا اطمینان بیشتر از همگن بودن غلظت پودر در سیال حاصل شود و احتمال

۳- بحث و بررسی

۳-۱- بررسی نرخ براده برداری

در این جا به بررسی و تحلیل نتایج تجربی مقادیر نرخ براده برداری پرداخته می شود. همان طور که در شکل ۴ مشخص است، مقادیر نرخ براده برداری به ازای تغییرات اندازه ذرات پودر و غلظت ذرات پودر آلومینیوم در سیال دی الکتریک ارائه شده است. برخی از خواص مهم فیزیکی و ترموفیزیکی پودر آلومینیوم، در جدول ۳ ارائه شده است. به ازای پودر آلومینیوم با اندازه ذرات ۲ میکرومتر و ۲۰ میکرومتر، با افزایش غلظت ذرات پودر در سیال دی الکتریک، در ابتدا نرخ براده برداری افزایش و سپس کاهش می یابد، در حالی که برای پودر آلومینیوم با اندازه ذرات ۶۳ میکرومتر، با افزایش غلظت ذرات پودر در سیال دی الکتریک، نرخ براده برداری کاهش می یابد.

در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر، چون نسبت به حالت EDM متداول، فرکانس جرقه زنی افزایش یافته است، نرخ براده برداری می تواند 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 الکترود می تواند منجر به ناپایداری شرایط تخلیه الکتریکی گردد و درصد پالس های منجر به آرک و اتصال کوتاه در میان کل پالس های ماشین کاری افزایش می یابد به همین دلیل نرخ براده برداری در غلظت های بالاتر می تواند کاهش یابد [۷].

با توجه به شکل ۴ دیده می شود که پودر آلومینیوم با اندازه ذرات ۲ میکرومتر و در غلظت ۴ گرم بر لیتر، منجر به افزایش ۶۸٪ نرخ براده برداری نسبت به حالت بدون پودر (غلظت ۰ گرم بر لیتر) شده است و همچنین پودر آلومینیوم با اندازه ذرات ۲۰ میکرومتر و در غلظت ۴ گرم بر لیتر، منجر به افزایش ۳۲٪ نرخ براده برداری نسبت به حالت بدون پودر شده است. ذرات پودر رسانا که در فاصله گپ به دلیل میدان الکتریکی بین دو الکترود، حرکت جنبشی دارند، سبب توزیع تخلیه الکتریکی در محدوده گسترده تری می شوند، ذرات پودر با اندازه ۲ میکرون به دلیل سبک تر بودن نسبت به ذرات پودر با اندازه ۲۰ و ۶۳ 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

جدول ۳ خواص فیزیکی و ترموفیزیکی پودر آلومینیوم [۱۲]

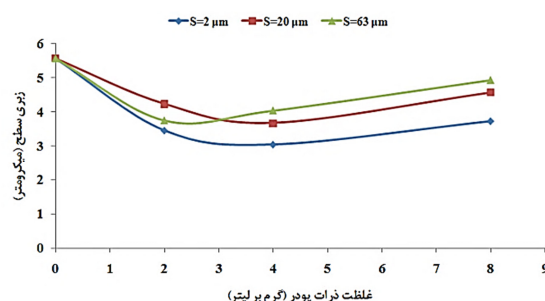
خواص	دانسیته (g/cm ³)	رسانش حرارتی (W/cm.K)	رسانش الکتریکی (μΩcm ⁻¹)	نقطه ذوب (°C)
مقدار	۲/۷۳	۲/۳۷	۰/۳۷۷	۶۶۰

افزایش چشمگیری داشته است. در حالی که قابلیت توزیع و پخش جرقه توسط ذرات بزرگ تر و سنگین تر پودر کمتر است و همین امر منجر به کاهش نرخ براده برداری به ازای اندازه ذرات ۶۳ میکرومتر برای تمام غلظت ها شده است.

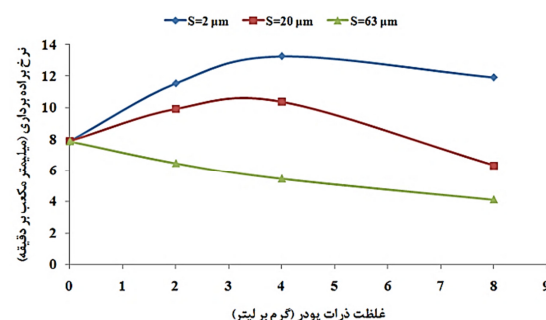
از طرف دیگر مطابق شکل ۴ می توان به این نتیجه کلی رسید که با افزایش اندازه ذرات پودر و با افزایش غلظت ذرات پودر بعد از یک حد بهینه، حرارت بیشتری از درون کانال پلاسما توسط ذرات پودر به بیرون از ناحیه گپ انتقال پیدا کند. انتقال حرارت کانال پلاسما، سبب کمتر شدن دانسیته تخلیه الکتریکی روی سطح قطعه کار می شود. سیستم سرو کنترل دستگاه در غلظت ها و اندازه ذرات بالا برای جلوگیری از ناپایداری های تخلیه الکتریکی بیشتر، فاصله گپ بین دو الکترود را افزایش می دهد. اگرچه با افزایش فاصله گپ، شستشوی براده های حاصل از ماشین کاری در فاصله گپ بین ابزار و قطعه کار به طور موثرتری انجام می شود و احتمال بروز اتصال کوتاه کاهش می یابد ولی منجر به کاهش توان موثر پالس های تخلیه الکتریکی می شود و در نتیجه نرخ براده برداری از سطح قطعه کار نیز کاسته می شود.

۳-۲- بررسی زبری سطح

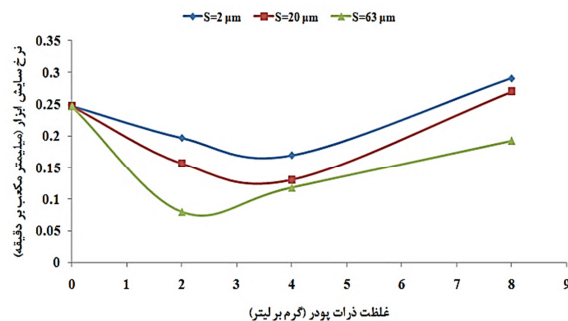
همان طور که در شکل ۵ مشخص است، مقادیر زبری سطح به ازای تغییرات اندازه ذرات پودر و غلظت ذرات پودر آلومینیوم در سیال دی الکتریک ارائه شده است. مشاهده می شود که به ازای تمام اندازه ذرات پودر آلومینیوم آزمایش شده، با افزایش غلظت ذرات پودر، زبری سطح در ابتدا کاهش می یابد و بعد از یک حد بهینه ای مجدداً زبری سطح افزایش می یابد. مقدار غلظت بهینه پودر برای کاهش زبری سطح، به ازای اندازه ذرات ۲ و ۲۰ میکرونی مقدار ۴ گرم بر لیتر می باشد، در حالی که مقدار غلظت بهینه پودر برای کاهش زبری سطح، به ازای اندازه ذرات ۶۳ میکرونی مقدار ۲ گرم بر لیتر می باشد. با افزوده شدن ذرات پودر آلومینیوم به درون کانال پلاسما، مقاومت شکست سیال دی الکتریک کاهش می یابد، بنابراین سیستم سرو کنترل دستگاه به منظور ایجاد شرایط پایدارتر تخلیه الکتریکی، نسبت به حالت ماشین کاری متداول EDM، فاصله گپ بین دو الکترود را افزایش می دهد. کانال تخلیه الکتریکی بزرگ تر و پهن تر منجر به کاهش دانسیته توان الکتریکی در موضع تخلیه الکتریکی می شود و در نتیجه حفره های کم عمق تری روی سطح ماشین کاری شده ایجاد می گردد یا به عبارت دیگر زبری سطح کاهش می یابد. با توجه به شکل ۵ دیده می شود که پودر آلومینیوم با اندازه ذرات ۲ میکرومتر و در غلظت ۴ گرم بر لیتر، منجر به کاهش ۴۵٪ زبری سطح نسبت به حالت بدون پودر (غلظت ۰ گرم بر لیتر) شده است و همچنین پودر آلومینیوم با اندازه ذرات ۲۰ میکرومتر و در غلظت ۴ گرم بر لیتر، منجر به کاهش ۳۴٪ زبری سطح نسبت به حالت بدون پودر شده است و پودر با اندازه



شکل ۵ زبری سطح به ازای تغییرات غلظت و اندازه پودر در آزمایشات PMEDM



شکل ۶ نرخ براده برداری به ازای تغییرات غلظت و اندازه ذرات پودر در آزمایشات PMEDM



شکل ۶ نرخ سایش ابزار به ازای تغییرات غلظت و اندازه پودر در آزمایشات PMEDM

میکرون حاصل می‌گردد. این امر به نوعی متناظر و مطابق با شکل ۴ است، زیرا که ذرات پودر با اندازه ۲ میکرون به دلیل سبک‌تر بودن نسبت به ذرات پودر با اندازه ۲۰ و ۶۳ میکرون راحت‌تر می‌توانند در فضای گپ بین دو الکترود 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 ۶۳ میکرومتر برای تمام غلظت‌ها شده است.

۴- نتیجه‌گیری

به ازای پودر آلومینیوم با اندازه ذرات ۲ و ۲۰ میکرون، با افزایش غلظت پودر در سیال دی‌الکتریک، در ابتدا نرخ براده‌برداری افزایش و سپس کاهش می‌یابد، ولی برای پودر آلومینیوم با اندازه ذرات ۶۳ میکرون، با افزایش غلظت پودر، نرخ براده‌برداری کاهش می‌یابد. ذرات پودر با اندازه ۲ میکرون به دلیل سبک‌تر بودن نسبت به ذرات پودر با اندازه ۲۰ و ۶۳ میکرون و توزیع راحت‌تر در فاصله بین الکترودها، فرکانس جرقه‌زنی را بیشتر افزایش می‌دهند و به همین دلیل نرخ براده‌برداری افزایش چشمگیری دارد. به ازای تمام اندازه‌های پودر، با افزایش غلظت، زبری سطح و نرخ سایش ابزار در ابتدا کاهش می‌یابد و بعد از یک حد بهینه مجدداً افزایش می‌یابد. پودر آلومینیوم در شرایط آزمایش شده و بهینه، منجر به افزایش ۶۸٪ نرخ براده‌برداری، کاهش ۴۵٪ زبری سطح و کاهش ۴۷٪ نرخ سایش ابزار نسبت به حالت بدون پودر (EDM) شده است.

۵- مراجع

- [1] F. Appel, U. Brossmann, U. Christoph, S. Eggert, P. Janschek, U. Lorenz, Recent Progress in the Development of Gamma Titanium Aluminide Alloys, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 2, No. 11, pp. 699-720, 2000.
- [2] T. Tetsui, Application of TiAl in a Turbocharger for Passenger Vehicles, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 3, No. 5, pp. 307-310, 2001.
- [3] D. Aspinwall, R.C. Dewes, A.L. Mantle, The Machining of γ -TiAl Intermetallic Alloys, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 54, pp. 99-104, 2005.
- [4] H.K. Kansal, S. Singh, P. Kumar, Parametric Optimization of Powder Mixed Electrical Discharge Machining by Response Surface Methodology, *Materials Processing Technology Journal*, Vol. 169, pp. 427-436, 2005.
- [5] 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.
- [6] Y. Tzeng, F. Chen, Investigation Into Some Surface Characteristics of Electrical Discharge Machined SKD-11 Using Powder-Suspension dielectric oil, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 170, pp. 385-391, 2005.
- [7] K. Kung, J. Horng, K. Chiang, Material Removal Rate and Electrode Wear Ratio Study on the Powder Mixed Electrical Discharge Machining of Cobalt-Bonded Tungsten Carbide, *International Journal of Manufacturing Technology*, Vol. 40, pp. 95-104, 2007.
- [8] Y. Wong, L.C. Lim, I. Rahuman, W.M. Tee, Near-Mirror Finish

ذرات ۶۳ میکرومتر و در غلظت ۲ گرم بر لیتر، منجر به کاهش ۳۲٪ زبری سطح نسبت به حالت بدون پودر شده است.

نتایج تجربی در شکل ۵ نشان می‌دهد که برای انواع پودرهای آلومینیوم با اندازه ذرات ۲ و ۲۰ میکرون، غلظت پودر ۴ گرم بر لیتر نسبت به سایر غلظت‌ها، منجر به بیشترین افزایش در صافی سطح نمونه‌های ماشین‌کاری شده TiAl می‌شود، در حالی که برای پودر آلومینیوم با اندازه ذرات ۶۳ میکرون، غلظت ۲ گرم بر لیتر نسبت به دیگر غلظت‌ها منجر به تولید بهترین صافی سطح در نمونه‌های ماشین‌کاری شده می‌گردد. افزایش اندازه ذرات پودر منجر به افزایش جرم ذرات در یک غلظت معین می‌گردد، در نتیجه حجم کمتری از این پودر در فاصله گپ ماشین‌کاری به حالت تعلیق در می‌آید و در نتیجه نمی‌تواند مقدار قابل توجهی از انرژی حرارتی تولید شده در اثر تخلیه الکتریکی را به خارج از گپ هدایت کند. از طرف دیگر، جرم بیشتر ذرات پودر بزرگ‌تر (به‌طور مثال ذرات پودر ۶۳ میکرونی) مانعی دیگر برای تعلیق و توزیع یکنواخت این ذرات در اثر فشار جانبی سیال دی‌الکتریک در ناحیه گپ بین دو الکترود است و سبب ته‌نشینی سریع‌تر این نوع پودرها در ته مخزن ماشین‌کاری می‌شود، در نتیجه ذرات پودر بزرگ‌تر به طور نسبی، سهم کمتری در افزایش صافی سطح ماشین‌کاری شده خواهند داشت.

۳-۳- بررسی نرخ سایش ابزار

در شکل ۶ مقادیر نرخ سایش ابزار به ازای تغییرات اندازه ذرات و غلظت پودر آلومینیوم در سیال دی‌الکتریک نشان داده شده است. به ازای تمام اندازه ذرات پودر آلومینیوم آزمایش شده، با افزایش غلظت ذرات پودر، نرخ سایش ابزار در ابتدا کاهش می‌یابد و بعد از یک حد بهینه‌ای مجدداً نرخ سایش ابزار افزایش می‌یابد. غلظت بهینه پودر برای کاهش نرخ سایش ابزار، به ازای اندازه ذرات ۲ و ۲۰ میکرونی، مقدار ۴ گرم بر لیتر می‌باشد، در حالی که غلظت بهینه پودر برای کاهش نرخ سایش ابزار، به ازای اندازه ذرات ۶۳ میکرونی مقدار ۲ گرم بر لیتر می‌باشد.

با توجه به شکل ۶ دیده می‌شود که پودر آلومینیوم با اندازه ذرات ۲ میکرومتر و در غلظت ۴ گرم بر لیتر، منجر به کاهش ۳۱٪ نرخ سایش ابزار نسبت به حالت بدون پودر (غلظت ۰ گرم بر لیتر) شده است و همچنین پودر آلومینیوم با اندازه ذرات ۲۰ میکرومتر و در غلظت ۴ گرم بر لیتر، منجر به کاهش ۴۷٪ نرخ سایش ابزار نسبت به حالت بدون پودر شده است و پودر با اندازه ذرات ۶۳ میکرومتر و در غلظت ۲ گرم بر لیتر، منجر به کاهش ۶۷٪ 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 الکترود ابزار و قطعه‌کار افزایش می‌یابد و در نتیجه کانال پلاسما گسترده‌تر و بزرگ‌تر می‌شود و در نتیجه انرژی حرارتی حاصل از فرآیند تخلیه الکتریکی در فضای گسترده‌تری توزیع می‌شود که این امر منجر به کاهش دانسیته توان الکتریکی می‌گردد و براده‌برداری را از سطح الکترود ابزار کاهش می‌دهد و منجر به کاهش نرخ سایش ابزار می‌شود. با افزودن ذرات پودر به سیال دی‌الکتریک، ذرات رسانای افزوده شده حرارت بیشتری را به بیرون از فاصله گپ بین ابزار و قطعه‌کار منتقل می‌کنند، که این امر نیز منجر به کاهش توان تخلیه الکتریکی روی سطح الکترود ابزار می‌شود و نرخ سایش ابزار را کاهش می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، به ازای تمام غلظت‌های پودر آلومینیوم در سیال دی‌الکتریک، کمترین مقدار نرخ سایش ابزار به ازای اندازه ذرات ۶۳ میکرون و بیشترین مقدار نرخ سایش ابزار به ازای اندازه ذرات ۲

- PMEDM of γ -TiAl Intermetallic, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 15, pp. 56-68, 2013.
- [11] 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.
- [12] Lide D.R., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 90 th Edition, Springer London Publication, CR-Rom Version 2010, pp. 1147-1169.
- Phenomenon in EDM Using Powder Mixed Dielectric, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 79, pp. 30-40, 1998.
- [9] P. Pecas, E. Henriques, Effect of The Powder Concentration and Dielectric Flow in the Surface Morphology in Electrical Discharge Machining with Powder-Mixed Dielectric, *International Journal of Manufacturing Technology*, Vol. 37, pp. 1120-1132, 2008.
- [10] B. Jabbaripour, M.H. Sadeghi, M.R. Shabgard, H. Faraji, Investigating Surface Roughness, Material Removal Rate and Corrosion Resistance in