http://mechanics.journals.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک مدرس
دوره ۱۲ شماره ۵ دی ۱۳۹۱ ص‌ص ۷۴-۸۶

تاریخچه مقاله:
دریافت ۹۰/۱۱/۱۹
پذیرش ۹۱/۴/۱۲
ارائه در سایت ۹۱/۸/۳۰

بررسی مشخصات خروجی در فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر (PMEDM) ترکیب بین‌فلزی γ-TiAl

بهزاد جباری‌پور[۱]، محمد حسین صادقی[۲*]، محمدرضا شبگرد[۳]، حسین فرجی[۴]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز
۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز
* تهران، صندوق پستی ۱۴۳- ۱۴۱۱۵، sadeghim@modares.ac.ir

چکیده- ترکیب بین‌فلزی γ-TiAl دارای خواص برجسته‌ای مانند مقاومت بالا و مناسب در برابر خستگی، اکسیداسیون، خوردگی، خزش، ارتعاشات دینامیکی و دمای کاری بالا می‌باشد. این ترکیبات بین‌فلزی در صنعت هوافضا، خودروسازی، موتورهای توربوجت و ساخت و تولید پره کاربرد دارند. در این تحقیق فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر با استفاده از پودرهای مختلف آلومینیوم، گرافیت، سیلیکون‌کارباید، کروم و آهن بر روی این ترکیب بین‌فلزی مطالعه می‌شود تا مشخصات خروجی فرایند مانند زبری سطح، نرخ سایش ابزار، نرخ براده‌برداری و توپوگرافی سطح با یکدیگر مقایسه شود. تحقیق موجود به روش تجربی و به کمک دستگاه اسپارک و مخزنی ویژه انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که پودر آلومینیوم به عنوان مناسب‌ترین نوع پودر در غلظت بهینه ۲ گرم بر لیتر، مقدار صافی سطح را نسبت به حالت ماشینکاری بدون پودر ۳۲٪ افزایش، نرخ سایش ابزار را ۱۹٪ کاهش و البته نرخ براده‌برداری را ۷/۵٪ کاهش می‌دهد و همچنین منجر به بهبود توپوگرافی سطح ماشینکاری شده و کاهش عیوب و ترکهای سطحی می‌گردد.

کلیدواژگان: ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر، ترکیب بین‌فلزی γ-TiAl، زبری سطح، نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار.

Investigating output characteristics in powder mixed electrical discharge machining of γ-tial intermetallic

B. Jabbaripour[1], M.H. Sadeghi[2*], M.R. Shabgard[3], H. Faraji[4]

1- PhD Student of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
2- Prof. of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
3- Assoc. Prof. of Mech. Eng., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran
4- MSc Student of Mech. Eng., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran
* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran. sadeghim@modares.ac.ir

Abstract- γ–TiAl intermetallic has outstanding properties such as high resistance against fatigue, oxidation, corrosion, creep, dynamic vibration and high working temperature. These intermetallics are applied in aerospace and automotive industry, turbojet engines and blade manufacturing. In this paper, powder mixed electrical discharge machining (PMEDM) of γ–TiAl intermetallic by means of different kinds of powders including Al, SiC, Gr, Cr and Fe is investigated to compare the output characteristics of the process such as surface roughness, tool wear rate, material removal rate and surface topography with each other. This is an experimental investigation, by means of die sinking EDM machine and a special tank for machining. The results indicate that, aluminum powder as the most appropriate kind of powder in the optimum particle concentration of 2 g/l, improves the surface roughness about 32% comparing with conventional EDM, decreases the tool wear rate about 19%, but decreases the material removal rate about 7.5% and also the Al powder leads to improving the machined surface topography and decreasing the surface defects and micro cracks.

Keywords: Powder Mixed Electrical Discharge Machining, γ–TiAl Intermetallic, Surface Roughness, Material Removal Rate, Tool Wear Rate.

۱- مقدمه

توسعه سیستمهای تبدیل انرژی پیشرفته و بهبود راندمان در این سیستمها همواره مورد تقاضا بوده است و طراحی این سیستمها بر اساس دماهای سرویس‌دهی بالاتر، وزنهای سبکتر و سرعتهای عملیاتی بیشتر انجام می‌شود تا نیازهای مورد تقاضا را بر طرف نماید. سیستمهای فلزی مرسوم فعلی بیش از ۵۰ سال است که توسعه یافته‌اند و برای دست یافتن به پیشرفتهای بیشتر در این زمینه به کلاسهای جدیدی از مواد که نیازهای طراحی را براورده کنند نیاز است. در میان آلیاژهای مختلف فلزی، ترکیب مدرن بین‌فلزی[1] آلومیناید تیتانیوم-گاما (γ-TiAl) از پتانسیل بالایی برای برآورده کردن الزامات طراحی اشاره شده، برخوردار است. ترکیبات بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید دارای مجموعه‌ای از خواص مطلوب مانند دانسیته پایین و مقاومت بالا در برابر اکسیداسیون و احتراق می‌باشند. علاوه بر آن خواص مکانیکی مناسبی مانند استحکام و مدول الاستیسیته بالا در دمای کاری زیاد را دارا می‌باشند [۱].

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 یانگ مناسب هستند، انجام شده است. با توجه به این خواص، ترکیبات بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید قابلیت به کارگیری بسیار مطلوب در کاربردهای نو مانند سیستمهای تبدیل انرژی پیشرفته را دارا هستند و جایگزین سوپر آلیاژهای پایه نیکل سنگین‌تر می‌گردند که باید در دماهای کاری نسبتا بالا، حدود ۷۰۰ درجه سانتیگراد ایفای نقش کنند [۱]. هرچند تردی و شکل‌پذیری ضعیف ذاتی آن در دمای محیط، از معایب اصلی ترکیبات بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید می‌باشند [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 بسیار کمی 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 می دهد [۴]. ماشینکاری تخلیه الکتریکی[2] یک فرآیند براده‌برداری غیر سنتی متداول می‌باشد. این تکنیک و روش به صورت گسترده در صنعت مدرن شکل‌دهی فلزات جهت تولید حفره‌ها و اشکال پیچیده در قالبها و دیگر قطعات صنعتی که تولیدشان با سایر روشهای ماشینکاری سنتی مشکل می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفته است. از مزایای این فرآیند، قابلیت براده‌برداری مواد سخت ماشینکاری شونده می‌باشد [۵].

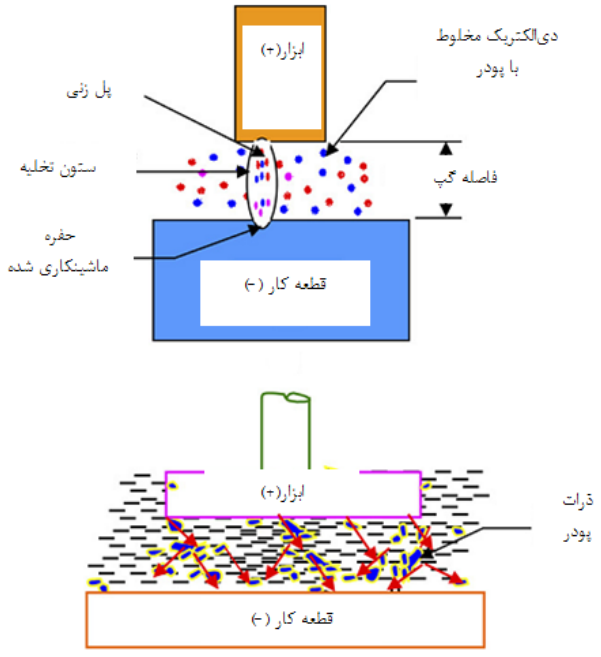
از مشکلات موجود در ماشینکاری تخلیه الکتریکی، افزایش زبری سطح[3] ماشینکاری شده با افزایش جریان، پایین بودن نرخ براده‌برداری[4]، ناپایداری فرایند ماشینکاری تحت حالاتی خاص، مات شدن سطح ماشینکاری شده و ایجاد انواع عیوب سطحی و زیر سطحی در قطعه ماشینکاری شده می‌باشد. یکی از روشها و تکنیکهای جدید بهبود مشخصات خروجی فرایند به منظور کاهش زبری سطح، کاهش نرخ سایش ابزار[5]، افزایش نرخ براده‌برداری، کاهش عیوب سطحی و زیر سطحی قطعه‌کار و تغییرات متالوژیکی ناخواسته حاصل از فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی، روش افزودن پودر رسانا و یا نیمه‌رسانا به سیال دی‌الکتریک و انجام ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر[6] می‌باشد که این فرایند به اختصار PMEDM نامیده شده است [۶].

هنگامی که ولتاژ ۳۲۰-۸۰ ولت بین الکترودها برقرار می‌شود، میدان الکتریکی 10^{5}-10^{7} ولت بر متر ایجاد می‌شود. در اثر افزودن پودر در گپ بین دو الکترود ابزار و قطعه‌کار، فاصله گپ افزایش می‌یابد [۶،۷]. به دلیل وجود اختلاف پتانسیل و ایجاد میدان الکتریکی بین دو الکترود، ذرات پودر دارای انرژی جنبشی می‌شوند و حرکت زیگزاگی می‌کنند، ذرات پودر به هم نزدیک می‌شوند و گاهاً حالت خوشه‌ای[7] می‌گیرند. تحت تأثیر نیروهای الکتریکی، بعضی از ذرات پودر باردار شده، به یکدیگر می‌چسبند و حالت زنجیره‌ای می‌گیرند و پلهایی[8] بین الکترودها برقرار می‌سازند (شکل ۱). به دنبال آن ولتاژ گپ و مقاومت شکست سیال دی‌الکتریک کاهش می‌یابد، در نتیجه سبب تخلیه الکتریکی زود هنگام در گپ می‌شود و باعث می‌شود تخلیه الکتریکی سلسله‌واری بر روی سطح الکترود انجام شود و چون نسبت به حالت ماشینکاری تخلیه الکتریکی

1. Intermetallic
2. Electrical Discharge Machining (EDM)
3. Surface Roughness
4. Material Removal Rate (MRR)
5. Tool Wear Rate (TWR)
6. Powder Mixed Electrical Discharge Machining (PMEDM)
7. Cluster
8. Bridging Effect

متداول، فرکانس جرقه‌زنی افزایش یافته است، سبب گسترش بیشتر کانال پلاسما می‌گردد و دانسیته انرژی الکتریکی هر جرقه نیز کاهش می‌یابد، در نتیجه سطح حاصل یکنواخت‌تر و حفره‌های[1] ماشینکاری شده کم عمق‌تر هستند [۶]. تزنگ و چن [۷] جهت بهبود کیفیت سطح ماشینکاری شده قطعه‌کار SKD-11 از چهار نوع پودر سیلیکون‌کارباید، مس، کروم و آلومینیوم استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که افزودن پودر آلومینیوم به دی‌الکتریک، ضخامت لایه انجماد مجدد[2] حاصل از ماشینکاری را به طور محسوسی کاهش می‌دهد.

ناروميا و همکارانش [۷] تأثیر پودر سیلیکون مخلوط شده با سیال دی‌الکتریک در فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی را بررسی نمودند، آنها متوجه شدند که ذرات پودر قادر به کاهش ضخامت لایه انجماد مجدد، کاهش ترکهای ریز روی سطح قطعه‌کار و افزایش صافی سطح ماشینکاری شده هستند. یان [۷] به تحقیق بر روی سیالهای دی‌الکتریکی پرداخت که پودر آلومینا، آلومینیوم و سیلیکون‌کارباید در آنها مخلوط شده بود، وی نیز افزایش صافی سطح بسیار بالایی را برروی قطعه‌کار گزارش نمود.



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

1. Carter
2. Recast Layer

وانگ و همکارانش [۸] جهت ماشینکاری تخلیه الکتریکی سطح قطعه‌کار فولادی SKH-54 از ۳ نوع پودر گرافیت، سیلیکون و سولفید مولیبدن استفاده نمودند و نشان دادند که با تغییر نوع پودر تحت شرایط ماشینکاری یکسان می‌توان سطوحی کاملا متفاوت بدست 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 دی‌الکتریک و تغییرات دبی جریان سیال و همچنین تغییرات سطح الکترود ابزار را بر روی کیفیت سطح فولاد AISI H13 در هنگام فرایند ماشینکاری به کمک پودر بررسی نمودند. افزایش غلظت سیلیکون از صفر تا ۲ گرم بر لیتر سبب کاهش زبری سطح می‌شود، هرچند با افزایش بیشتر غلظت، مقدار زبری سطح افزایش می‌یابد.

کانگ و چیانگ [۱۰] اثر چهار پارامتر اندازه ذرات پودر، غلظت ذرات پودر، جریان و زمان روشنی پالس را با استفاده از تکنیک پاسخ سطح[3] بر روی نرخ براده‌برداری و نرخ سایش ابزار ابزار در حین ماشینکاری قطعه‌کار تنگستن‌کارباید، به کمک پودر آلومینیوم بررسی نمودند. آنها با بررسی نتایج تجربی بیان داشتند که با افزایش غلظت پودر، نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد و بعد از حد معینی، افزایش غلظت منجر به کاهش نرخ براده‌برداری می‌گردد و همچنین با افزایش غلظت پودر آلومینیوم تا یک حد خاص، نرخ سایش ابزار کاهش می‌یابد و بعد از آن با افزایش غلظت، نرخ سایش ابزار افزایش می‌یابد.

تا کنون هیچ‌گونه کار تحقیقاتی در مورد فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر و یا حتی فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی غوطه‌وری در سیال[4] در مورد آلیاژ γ-TiAl گزارش نشده است و هیچ‌گونه جداول و اطلاعات تکنولوژیکی برای فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی این ترکیب پر اهمیت و مدرن در صنعت وجود ندارد، بنابراین نیاز است تا اطلاعات تکنولوژیکی را برای ماشینکاری بهینه این ترکیب بین‌فلزی توسعه داد. در این تحقیق فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر بر روی ترکیب بین فلزی γ-TiAl با استفاده از چند نوع پودر مختلف اعم از آلومینیوم[5]، گرافیت[6]،

3. Response Surface Modeling (RSM)
4. Die Sinking EDM
5. Aluminum (Al)
6. Graphite (Gr)

سیلیکون‌کارباید[1]، آهن[2] و کروم[3] انجام می‌شود تا مشخصات خروجی فرایند مانند زبری سطح، نرخ سایش ابزار، نرخ براده‌برداری و توپوگرافی سطح با یکدیگر مقایسه شوند. غلظت پودر در سیال دی‌الکتریک از مقدار ۱ گرم بر لیتر تا مقدار ۱۶ گرم بر لیتر برای این پنج نوع پودر تغییر داده می‌شود و مشخصات خروجی فرایند با یکدیگر و همچنین با حالت ماشینکاری بدون پودر مقایسه می‌شوند، تا بتوان بهترین نوع پودر و غلظت بهینه در سیال دی‌الکتریک را تعیین نمود.

۲- تجهیزات و مواد اولیه

جهت آزمایشهای ماشینکاری از شمشهای ترکیب بین‌فلزی γ-TiAl (Ti-53Al (at. %)) که با روش VAR تولید شده بودند، استفاده شد. این شمشها با استفاده از شمشهای تیتانیومی با درصد خلوص ۹۹/۸٪ و شمشهای آلومینیمی با درصد خلوص ۹۹/۵٪ که با درصدهای وزنی معین در داخل قالب قرار گرفته بودند، ریخته‌گری شده و سپس به منظور اصلاح جدایش‌های میکروسکوپی، عملیات همگن‌سازی در زیر دمای ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۴۸ ساعت بر روی آنها انجام شد. خواص مکانیکی و فیزیکی ترکیب بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید در جدول ۱، آورده شده است. برای اینکه بتوان از شمش مورد نظر که با هزینه و عملیات زیادی بدست آمده است، حداکثر استفاده را کرد، با استفاده از فرآیند وایرکات نمونه‌هایی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ میلیمتر از هر شمش ریخته‌گری شده، بریده شدند.

جدول ۱ خواص مکانیکی و فیزیکی ترکیب بین‌فلزی γ-TiAl [۴، ۱۱]

خواص	مقدار
دانسیته (g/cm^3)	۳/۷۶-۳/۸
مقاومت تسلیم (MPa)	۴۶۳
استحکام کششی نهایی (MPa)	۴۹۹
مدول الاستیسیته (GPa)	۱۴۴
افزایش طول (%)	۰/۵۵
ضریب پواسون	۰/۲۴
رسانش حرارتی (W/mk)	۲۲

در آزمایشهای ماشینکاری از الکترودهای مسی استوانه‌ای شکل به قطر ۱۸ میلیمتر و طول ۴۰ میلیمتر به عنوان ابزار استفاده شده است. چگالی الکترودهای مس مورد استفاده برابر با ۸/۹۳ گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد. تمامی آزمایشات ماشینکاری بر روی ماشین اسپارک CNC مدل شارمیلز-روبوفرم-۲۰۰ که به یک ژنراتور آیزوپالس مجهز است، انجام شده است. تغییرات وزن الکترود ابزار و نمونه قطعه‌کار، قبل و بعد از ماشینکاری بوسیله ترازوی دیجیتال[4] با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم و زبری سطح به وسیله دستگاه زبری‌سنج[5] با دقت ۰/۰۰۱ میکرومتر اندازه‌گیری شده است. به منظور بررسی توپوگرافی سطح از میکروسکوپ الکترونی روبشی[6] استفاده شده است. در در تمام آزمایشات، سیال دی‌الکتریک مورد استفاده نفت سفید است. پارامترهای مورد استفاده در آزمایشات ماشینکاری بدون پودر و ماشینکاری به کمک پودر، در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

در این آزمایشات هدف اصلی، بررسی تغییرات توع پودر و غلظت ذرات پودر بر روی مشخصات خروجی فرایند مانند نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار، زبری سطح و توپوگرافی سطح می‌باشد. به همین دلیل مطابق جدول ۲، پنج نوع پودر استفاده گردیده است و غلظت ذرات پودر در پنج سطح مختلف تغییر داده شده‌اند.

جدول ۲ پارامترهای ورودی ماشینکاری در آزمایشات تجربی

پارامترهای ورودی	ماشینکاری تخلیه الکتریکی	ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر
جریان پالس (A)	۴۸	۴۸
زمان روشنی پالس (µs)	۲۵	۲۵
ولتاژ مدار باز (V)	۱۲۰	۱۲۰
ولتاژ ماشینکاری (V)	۷۰	۷۰
زمان خاموشی پالس (µs)	۱۰۰	۱۰۰
قطعه کار (-)	γ-TiAl	γ-TiAl
الکترود ابزار (+)	مس	مس
زمان ماشینکاری (min)	۱۵	۱۵
سیال دی‌الکتریک	نفت سفید	نفت سفید + پودر آلومینیوم، سیلیکون‌کارباید، گرافیت، کروم و آهن
انواع پودر	------	
اندازه ذرات پودر (µm)	------	< ۶۳
غلظت ذرات پودر (g/l)	------	۱ و ۲ و ۴ و ۸ و ۱۶

1. Silicon Carbide (SiC)
2. Iron (Fe)
3. Chrome (Cr)

4. CP224S-Surtorius
5. Mahr-Perthomether M2
6. SEM-Tescan Vega

روش انجام آزمایشات عاملی کامل بوده است و سایر پارامترهای ماشینکاری مانند جریان، ولتاژ، زمان، قطبیت و اندازه ذرات پودر در حین آزمایشات ثابت نگه داشته شدند، با توجه به تغییر دو پارامتر غلظت و نوع پودر در ۵ سطح مختلف، تعداد کل آزمایشات ماشینکاری به کمک پودر ۲۵ عدد می‌باشد و ۱ آزمایش هم که مربوط به حالت ماشینکاری بدون پودر است، به این ترتیب تعداد کل آزمایشات ۲۶ عدد می‌باشد.

جهت انجام آزمایشات اشاره شده، نیاز است تا از پودرهای متنوع و با غلظتهای مختلف استفاده شود. در صورتی که لازم باشد دائماً سیال دی‌الکتریک در مخزن اصلی دستگاه اسپارک (با حجم حدود ۳۰۰ لیتر) تعویض شود و دور ریخته شود، از لحاظ اقتصادی هزینه‌های زیادی را به بار می‌آورد. برای حل این مشکل، در این تحقیق مخزن ماشینکاری ساده و کوچکی طراحی و ساخته شده است، به گونه‌ای که این سیستم و تجهیزات باید بتواند سیال دی‌الکتریک را به محل گپ بین دو الکترود با فشار مناسب پمپ کند و سبب گردش منظم سیال دی‌الکتریک به همراه پودر معلق در آن، به موضع ماشینکاری شود و همچنین به صورت خودکار و ملایم سیال دی‌الکتریک در مخزن ویژه هم زده شود تا اطمینان بیشتر از همگن بودن غلظت پودر در سیال حاصل شود و احتمال ته‌نشین شدن ذرات پودر در کف مخزن کاهش یابد.

در شکل ۲، تجهیزات ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر اعم از نحوه قرارگیری مخزن ماشینکاری درون مخزن اصلی دستگاه اسپارک و نحوه قرارگیری پمپها، اتصالات، گیره و کله‌گی درون این مخزن نشان داده شده است. این سیستم برای گنجایش ۱۲ لیتر سیال دی‌الکتریک در آزمایشات ماشینکاری طراحی شده است و شامل یک مخزن ماشینکاری می‌باشد که در داخل مخزن اصلی دستگاه اسپارک قرار می‌گیرد و عملیات ماشینکاری به جای مخزن اصلی دستگاه، در داخل مخزن کوچکتر انجام می‌شود. برای نگهداری قطعه‌کار، یک گیره دقیق در داخل مخزن قرار داده می‌شود. سطح زیرین مخزن، یک صفحه فولادی سنگ خورده می‌باشد که نشست کامل مخزن بر روی میز دستگاه اسپارک و نشست کامل سطح زیرین گیره درون مخزن ماشینکاری را تضمین می‌کند و در نتیجه دقت مورد نظر در هنگام ساعت کردن قطعه‌کار و الکترود ابزار قبل از شروع هر آزمایش ماشینکاری تأمین می‌شود. مخزن با سیال دی‌الکتریک پر می‌شود و پودر با وزن معین به ازای غلظتهای مورد نظر به درون مخزن ریخته می‌شود و زمان داده می‌شود تا به طور کامل درون آن توزیع شود.

برای جلوگیری از ته‌نشین شدن ذرات پودر در حین فرایند ماشینکاری، از یک پمپ به عنوان همزن[1] استفاده می‌شود. در خروجی این پمپ اتصالاتی قرار داده شده است، که سبب ایجاد یک جریان پر فشار سیال در ته مخزن ماشینکاری می‌شود و تا حد زیادی اجازهٔ رسوب و ته‌نشین شدن ذرات پودر در مدت زمان ماشینکاری را نمی‌دهد.

الف) نحوه قرار گیری مخزن ماشینکاری درون مخزن اصلی دستگاه

ب) نحوه قرارگیری پمپها، اتصالات، گیره و کله‌گی درون مخزن

شکل ۲ تجهیزات مورد استفاده در آزمایشات ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر

1. Stirrer

همچنین برای به گردش در آوردن[1] سیال دی‌الکتریک مخلوط با پودر، پمپ دیگری درون مخزن نصب می‌شود و از طریق یک نازل مجهز به شیر کنترل فشار، سیال دی‌الکتریک مخلوط با پودر به فاصله گپ بین الکترود ابزار و قطعه‌کار، پمپ و پاشش می‌شود. پمپهای پاشش و همزن در مخزن مورد نظر به گونه‌ای تنظیم شده‌اند، تا اولاً امکان ته‌نشین شدن ذرات پودر تا حد ممکن کاهش یابد و ثانیاً فاصله از سر نازل پاشش سیال تا گپ بین الکترود ابزار و قطعه‌کار در تمام آزمایشهای ماشینکاری مقدار ثابتی باشد. نحوه شستشوی سیال دی‌الکتریک در هر دو حالت ماشینکاری بدون پودر و به کمک پودر، غوطه‌وری کامل قطعه‌کار در سیال[2] به همراه شستشوی جانبی سیال[3] با فشار ثابت است. برخی از خواص مهم فیزیکی و ترموفیزیکی پودرهای مورد استفاده در این مطالعه، در جدول ۳ ارائه شده است.

برای ارزیابی راندمان فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی، دو پارامتر نرخ براده‌برداری و نرخ سایش ابزار تعریف می‌شوند [۱۰]:

$$MRR = \frac{\frac{\Delta m}{\rho_{TiAl}}}{t_{mach}} \times 1000 \quad (۱)$$

$$TWR = \frac{\frac{\Delta m}{\rho_{Copper}}}{t_{mach}} \times 1000 \quad (۲)$$

جدول ۳ خواص فیزیکی و ترموفیزیکی پودرها [۱۲]

خواص	آلومینیوم	سیلیکون کارباید	گرافیت	کروم	آهن
دانسیته (g/cm^3)	۲/۷۳	۳/۱۶	۱/۸ تا ۲/۱	۷/۱۸	۷/۸
رسانش حرارتی (W/cm K)	۲/۳۷	۲/۷۱	۱/۵	۰/۹۳۷	۰/۸۰۲
رسانش الکتریکی ($\mu\Omega cm^{-1}$)	۰/۳۷۷	10^{-2} تا 10^{-12}	۰/۰۰۳	۰/۰۷۷۴	۰/۰۹۹۳۰
نقطه ذوب ($^{\circ}C$)	۶۶۰	۲۹۸۷	۴۴۸۹	۱۹۰۷	۱۵۳۸

در روابط (۱) و (۲)، MRR نرخ براده‌برداری (میلیمتر مکعب بر دقیقه) و TWR نرخ سایش ابزار (میلیمتر مکعب بر دقیقه) می‌باشد. Δm اختلاف جرم نمونه قطعه‌کار و یا الکترود ابزار (گرم) قبل و بعد از فرآیند ماشینکاری است. ρ_{TiAl} دانسیته ماده قطعه‌کار (گرم بر سانتیمتر مکعب)، $\rho_{Copp.er}$ دانسیته الکترود ابزار (گرم بر سانتیمتر مکعب) و t_{mach} زمان (دقیقه) هر آزمایش ماشینکاری می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- زبری سطح

زبری سطح یک قطعه اسپارک شده می‌تواند مشابه زبری سطح حاصل از یک فرآیند براده‌برداری سنتی در نظر گرفته شود، ولی با این تفاوت که براده‌ها به صورت تقریبا کروی هستند که در اثر جرقه‌زنی در حین تخلیه الکتریکی از سطح قطعه‌کار جدا می‌گردند [۱۳]. شکل ۳ بیانگر وابستگی زبری سطح ماشینکاری شده TiAl به غلظت ذرات پودر در سیال دی‌الکتریک و نوع پودر مورد استفاده در آزمایشات ماشینکاری است. همان‌طور که دیده می‌شود، ذرات پودر قادر به کاهش زبری سطح هستند. بهترین نوع پودرها با توجه به نمودار زبری سطح، به ترتیب عبارتند از آلومینیوم، سیلیکون‌کارباید، گرافیت، کروم و آهن.

پودر آلومینیوم به ازای تمام غلظتهای آزمایش شده، بالاترین صافی سطح را تولید می‌کند. با توجه به اطلاعات موجود در جدول ۳، این امر به دلیل مقاومت الکتریکی پایین، رسانش حرارتی بالا و دانسیته کم آلومینیوم می‌باشد. مقاومت الکتریکی کم منجر به افزایش گپ اسپارک نسبت به حالت ماشینکاری بدون ذرات پودر می‌گردد و رسانش حرارتی بالا نیز سبب انتقال حرارت بیشتری به خارج از موضع تخلیه الکتریکی مابین ابزار و قطعه‌کار می‌شود. هر دو عامل ذکر شده منجر به کاهش دانسیته توان الکتریکی و کاهش نیروی ضربه‌ای[4] حاصل از تخلیه الکتریکی روی سطح قطعه‌کار می‌شود، در نتیجه حفره‌های حاصل از ماشینکاری روی سطح قطعه‌کار کم عمق‌تر می‌شوند. پودر سیلیکون‌کارباید بعد از آلومینیوم بهترین صافی سطح را بدست می‌دهد و دلیل آن ترکیب مناسبی از عواملی مانند دانسیته پایین، رسانش حرارتی بالا و مقاومت الکتریکی پایین در قیاس با گرافیت، کروم و آهن است، ولی به دلیل دانسیته بالاتر نسبت به پودر آلومینیوم، قابلیت معلق شدن[5] و

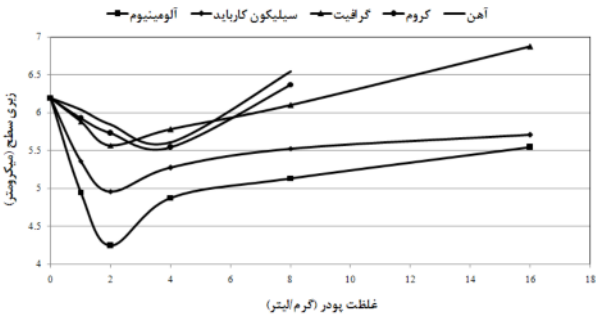
1. Circulation
2. Submerged in Fluid
3. Side Flushing
4. Impulsive force
5. Suspension

توزیع یکنواخت کمتری در فاصله گپ بین الکترودها دارد، که به تبع آن حرارت کمتری را به خارج از گپ ماشینکاری هدایت می‌کند، به همین دلیل دانسیته توان تخلیه الکتریکی روی سطح قطعه‌کار به ازای پودر سیلیکون کارباید بیشتر است و ابعاد و عمق حفره‌های حاصل از ماشینکاری نیز بیشتر می‌شود که نتیجه آن زبری سطح بیشتر در نمونه ماشینکاری شده است.

با افزوده شدن ذرات پودر رسانا و یا نیمه‌رسانا به درون کانال پلاسما، مقاومت شکست سیال دی‌الکتریک کاهش می‌یابد، بنابراین سیستم سروکنترل دستگاه اسپارک به منظور ایجاد شرایط پایدارتر تخلیه الکتریکی، نسبت به حالت ماشینکاری متداول تخلیه الکتریکی، فاصله گپ بین دو الکترود را افزایش می‌دهد. کانال تخلیه الکتریکی بزرگتر و پهن‌تر منجر به کاهش دانسیته توان الکتریکی در موضع تخلیه الکتریکی می‌شود و در نتیجه حفره‌های کم عمق‌تری روی سطح ماشینکاری شده ایجاد می‌گردد یا به عبارت دیگر زبری سطح کاهش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش قابلیت رسانش حرارتی ذرات پودر مورد استفاده، انرژی حرارتی بیشتری به خارج از فاصله گپ ماشینکاری دفع می‌شود، که این امر منجر به کاهش مقدار انرژی حرارتی در موضع تخلیه الکتریکی می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، برای تمام انواع پودرها بعد از حد بهینه‌ای از غلظت ذرات پودر، مجدداً زبری سطح افزایش یافته است. دلیل این است که با افزایش بیش از حد بهینه مقدار غلظت پودر در سیال، حجم ذرات معلق در فاصله گپ بین دو الکترود ابزار و قطعه‌کار افزایش می‌یابد و به دنبال آن احتمال ایجاد ناپایداری‌هایی در فرایند تخلیه الکتریکی به صورت اتصال کوتاه و یا آرک افزایش می‌یابد و به همین دلیل بعد از غلظت بهینه، با افزایش مقدار غلظت ذرات پودر، سطح ماشینکاری شده مجدداً ناهموارتر و غیر یکنواخت‌تر یا به عبارتی زبرتر می‌شود، چرا که به دلیل بروز ناپایداری در فرایند تخلیه الکتریکی، توزیع غیر یکنواخت‌تری در دانسیته توان الکتریکی روی سطح ماشینکاری شده به وجود می‌آید و به تبع آن نیروی ضربه‌ای حاصل از تخلیه الکتریکی روی سطح قطعه‌کار نیز غیر همگون‌تر می‌شود.

نتایج تجربی در شکل ۳ نشان می‌دهد که برای انواع پودرهای آلومینیوم، سیلیکون کارباید و گرافیت، غلظت پودر ۲ گرم بر لیتر نسبت به سایر غلظتها، منجر به بیشترین افزایش در صافی سطح نمونه های ماشینکاری شده TiAl می‌شود، در حالی که برای پودرهای کروم و آهن، غلظت ۴ گرم بر لیتر نسبت به دیگر غلظتها منجر به تولید بهترین صافی سطح در نمونه‌های ماشینکاری شده می‌شود.



شکل ۳ زبری سطح ماشینکاری شده برای انواع پودرها در غلظتهای مختلف

به دلیل دانسیته بالاتر کروم و آهن نسبت به سایر پودرها، در غلظت معین ۲ گرم بر لیتر، حجم کمتری از این دو نوع پودر در فاصله گپ ماشینکاری به حالت تعلیق در می‌آید و در نتیجه نمی‌توانند مقدار قابل توجهی از انرژی حرارتی تولید شده در اثر تخلیه الکتریکی را به خارج از گپ هدایت کنند. از طرف دیگر، دانسیته بالای آهن و کروم مانعی دیگر برای تعلیق و توزیع یکنواخت این ذرات در سیال دی‌الکتریک است و سبب ته‌نشینی سریعتر این نوع پودرها در ته مخزن ماشینکاری می‌شود، در نتیجه ذرات پودر آهن و کروم سهم کمتری در افزایش صافی سطح ماشینکاری شده خواهند داشت.

در هنگام ماشینکاری با ذرات آهن و کروم، چون این نوع پودرها رسانش حرارتی کمتری نسبت به سایر پودرها دارند، مقاومت شکست سیال دی‌الکتریک کاهش کمتری دارد و فاصله گپ بین الکترودها نیز نسبت به سایر پودرها افزایش کمتری پیدا می‌کند، از طرفی آهن و کروم نسبت به سایر پودرهای استفاده شده در این تحقیق، دانسیته بالاتری دارند و به همین خاطر قابلیت تعلیق و زدوده شدن (شستشوی) کمتری در اثر فشار جانبی سیال دی‌الکتریک از ناحیه گپ بین دو الکترود دارند، در نتیجه در غلظت بالایی همچون ۱۶ گرم بر لیتر، این ذرات راحت‌تر بر روی سطح قطعه‌کار می‌نشینند و ناپایداری تخلیه الکتریکی به شکل آرک روی سطح ماشینکاری شده قطعه‌کار و همچنین الکترود ابزار اتفاق می‌افتد، به همین

دلیل در شکل ۳، برای پودرهای آهن و کروم به ازای غلظت ۱۶ گرم بر لیتر نمودار ادامه پیدا نکرده است.

۳-۲- نرخ سایش ابزار

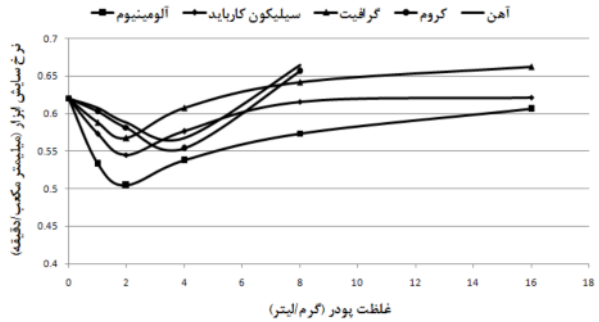
الکترود ابزار باید دارای هدایت الکتریکی بالا و نرخ سایش پایین باشد. اصولاً، بهترین جنس برای الکترودهای ابزار دارای نقطه ذوب بالا و مقاومت کم در برابر جریان الکتریکی است [۱۳]. بعد از انجام آزمایشهای ماشینکاری بدون پودر و ماشینکاری به کمک پودر، با اندازه‌گیری اختلاف جرم الکترودهای ابزار قبل و بعد از آزمایشات و با استفاده از رابطه ۲، مقدار نرخ سایش الکترودهای مسی بدست می‌آید. در شکل ۴ وابستگی نرخ سایش الکترود ابزار به غلظت ذرات پودر در سیال دی‌الکتریک و نوع پودر مورد استفاده در آزمایشات ماشینکاری نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، ذرات پودر قادر به کاهش نرخ سایش ابزار هستند. بهترین نوع پودرها با توجه به نمودار نرخ سایش ابزار، به ترتیب عبارتند از آلومینیوم، سیلیکون کارباید، گرافیت، کروم و آهن.

همان‌طور که در بخش قبلی نیز اشاره شد، 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 فرایند 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.

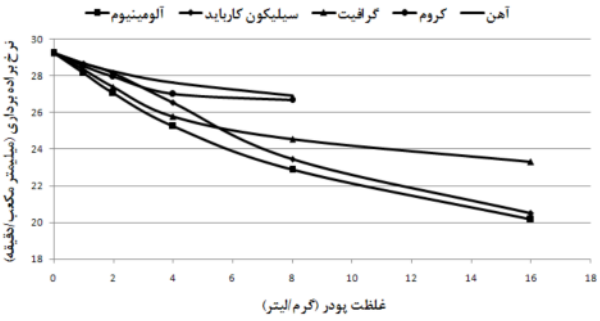
از طرف دیگر با افزودن ذرات پودر به سیال دی‌الکتریک، ذرات رسانای افزوده شده حرارت بیشتری را به بیرون از فاصله گپ بین ابزار و قطعه‌کار منتقل می‌کنند، که این امر نیز منجر به کاهش توان تخلیه الکتریکی روی سطح الکترود ابزار می‌شود و نرخ سایش ابزار را کاهش می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود، در مورد پودرهای آلومینیوم، گرافیت و سیلیکون‌کارباید بهترین مقدار غلظت جهت کاهش نرخ سایش ابزار مقدار ۲ گرم بر لیتر و در مورد پودرهای کروم و آهن، مقدار غلظت بهینه ۴ گرم بر لیتر است و دلیل این تفاوت غلظت بهینه، اختلاف مقدار دانسیته این نوع پودرها با یکدیگر است. چون کروم و آهن دانسیته بالاتری دارند، در مقدار غلظت ۲ گرم بر لیتر حجم ذرات پودر جهت افزایش مؤثر فاصله گپ و کاهش دانسیته تخلیه الکتریکی و انتقال حرارت به بیرون از ناحیه گپ به مقدار کافی و مؤثر نمی‌باشد و غلظت بهینه در مورد این دو نوع پودر سنگین‌تر، ۴ گرم بر لیتر می‌باشد. همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد برای پودرهای آهن و کروم در غلظت ۱۶ گرم بر لیتر نمودار رسم نشده است و دلیل آن ایجاد آرک روی سطح ماشینکاری شده قطعه‌کار و ابزار می باشد.

۳-۳- نرخ براده‌برداری

بعد از انجام آزمایشهای ماشینکاری تخلیه الکتریکی بدون پودر و ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر، با اندازه‌گیری اختلاف جرم نمونه‌های TiAl قبل و بعد از آزمایشات و با استفاده از رابطه ۱، مقدار نرخ براده‌برداری بدست می‌آید. در شکل ۵ وابستگی نرخ براده‌برداری از نمونه‌های TiAl به غلظت ذرات پودر در سیال دی‌الکتریک و نوع پودر مورد استفاده در آزمایشات ماشینکاری نشان داده شده است.



شکل ۴ نرخ سایش الکترود ابزار برای انواع پودرها در غلظتهای مختلف



شکل ۵ نرخ براده‌برداری از قطعه‌کار برای انواع پودرها در غلظتهای مختلف

همان‌طور که دیده می‌شود با افزوده شدن تمام انواع پودرها به سیال دی‌الکتریک مقدار نرخ براده‌برداری نسبت به حالت بدون پودر (غلظت ۰ گرم بر لیتر) کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش مقدار غلظت ذرات پودر، نرخ براده‌برداری از سطح قطعه‌کار نیز کاهش پیدا می‌کند.

در فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر، ذرات رسانا یا نیمه‌رسانا به درون کانال پلاسما وارد می‌شوند و مقاومت شکست سیال دی‌الکتریک کاهش می‌یابد، در نتیجه برای حفظ پایداری تخلیه‌های الکتریکی فاصله گپ بین دو الکترود افزایش پیدا می‌کند. کانال تخلیه الکتریکی بزرگتر و پهن‌تر منجر به کاهش دانسیته توان الکتریکی در موضع تخلیه الکتریکی می‌شود و از مقدار نیروهای ضربه‌ای روی سطح قطعه‌کار کاسته می‌شود، در نتیجه حفره‌های کوچکتری روی سطح ماشینکاری شده نمونه‌های TiAl ایجاد می‌گردد که منجر به کاهش نرخ براده‌برداری می‌شود. از طرف دیگر با افزایش قابلیت رسانش حرارتی ذرات پودر مورد استفاده، انرژی حرارتی بیشتری به خارج از فاصله گپ ماشینکاری دفع می‌شود، که این امر سبب کاهش مقدار انرژی حرارتی در موضع تخلیه الکتریکی می‌شود و منجر به کاهش نرخ براده‌برداری از سطح قطعه‌کار می‌گردد. همان‌گونه که در شکل ۵ دیده می‌شود، کمترین مقدار نرخ براده‌برداری از نمونه‌های قطعه‌کار به ازای غلظتهای متفاوت، پس از افزودن پودر آلومینیوم اتفاق می‌افتد و بیشترین مقدار نرخ براده‌برداری پس از افزودن پودر آهن اتفاق افتاده است و این امر عمدتا به دلیل رسانش حرارتی و دانسیته ذرات پودر است. ذرات آلومینیوم به دلیل سبک‌تر بودن، قابلیت تعلیق بیشتری در فاصله گپ دارند و چون رسانش حرارتی بالاتری نیز دارند، مقدار انرژی حرارتی بیشتری را نسبت به پودر آهن به بیرون فاصله گپ هدایت می‌کنند، که به تبع آن مقدار انرژی حرارتی در کانال تخلیه الکتریکی کاسته می‌شود و نرخ براده‌برداری از قطعه‌کار نیز کاهش می‌یابد، به عبارت دیگر می‌توان گفت پودر آلومینیوم به دلیل رسانش حرارتی بالاتر و دانسیته کمتر، افت بیشتری در مقدار نرخ براده‌برداری در مقایسه با حالت بدون پودر (غلظت ۰ گرم بر لیتر) ایجاد می‌کند و به همین خاطر در شکل ۵ پایین‌ترین منحنی است و پودر آهن به دلیل رسانش حرارتی کمتر و دانسیته بیشتر، افت کمتری در مقدار نرخ براده‌برداری در مقایسه با حالت بدون پودر (غلظت ۰ گرم بر لیتر) ایجاد می‌کند و به همین خاطر در شکل ۵ بالاترین منحنی است. پس از آهن، پودر کروم کمترین افت در مقدار نرخ براده‌برداری در مقایسه با حالت بدون پودر را ایجاد می‌کند و دلیل آن نیز دانسیته بالا و رسانش حرارتی پایین است. همان‌گونه که قبلا نیز اشاره شد برای پودرهای آهن و کروم در غلظت ۱۶ گرم بر لیتر نمودار رسم نشده است و دلیل آن ایجاد آرک روی سطح ماشینکاری شده قطعه‌کار و ابزار می‌باشد.

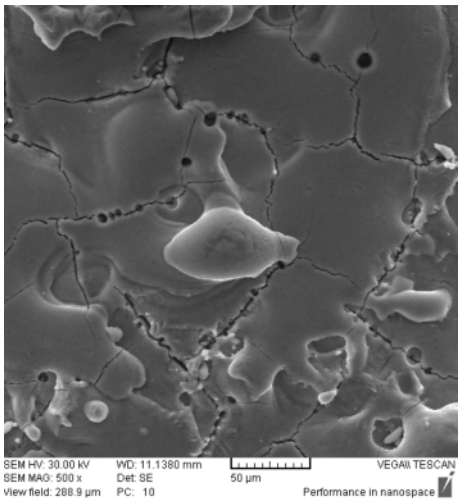
۳-۴- توپوگرافی سطح

کیفیت سطح اسپارک شده در قالب سلامت سطح[1] ارزیابی می‌شود که شاخص‌های مهم آن عبارتند از: توپوگرافی سطح، زبری سطح، لایه سفید، شکل‌گیری ترکهای سطحی، توزیع سختی و همچنین تغییرات متالوژیکی در سطح و زیر سطح [۱۴]. به دلیل ذوب بسیار سریع سطح قطعه‌کار در حین فرایند تخلیه الکتریکی و سپس انجماد بسیار سریع سطح قطعه‌کار در حین شستشو به کمک سیال دی‌الکتریک، عیوب سطحی و زیرسطحی همچون ترکها، حفره‌های سطحی، خلل و فرج[2]، تنشهای پسماند، استحاله‌های فازی و مناطق متاثر از حرارت[3] روی نمونه‌های قطعه‌کار به وجود می‌آید. این عیوب سطحی و زیرسطحی منجر به کاهش سختی، مقاومت به سایش و مقاومت به خوردگی سطح قطعه‌کار می‌گردد. جهت حفظ خواص سطح ماشینکاری شده و یا حتی ارتقاء این خواص و همچنین کاهش عیوب سطحی و زیرسطحی، در این مطالعه از روش ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر استفاده شده است.

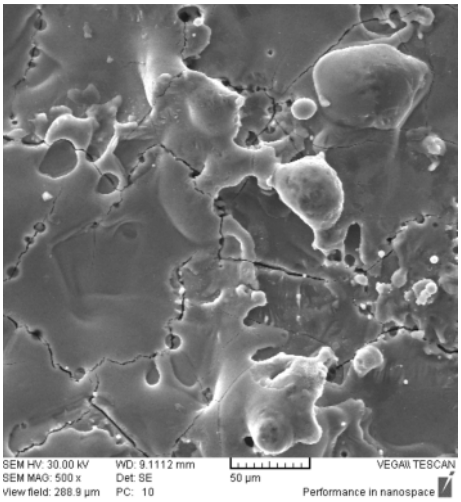
با توجه به شکلهای ۳، ۴ و ۵ جهت مقایسه تأثیر ذرات پودر مختلف بر روی سطح قطعه‌کار، غلظت ۲ گرم بر لیتر به عنوان یک غلظت معین انتخاب گردیده است. در شکل ۶ توپوگرافی سطح نمونه ماشینکاری شده در حالت بدون پودر (غلظت ۰ گرم بر لیتر) و نمونه‌های ماشینکاری شده به کمک انواع مختلف پودرها در غلظت ۲ گرم بر لیتر نشان داده شده‌اند. در مورد هر سطح ماشینکاری شده، زبری مربوط به آن نیز ارائه شده است.

1. Surface Integrity
2. Pits and Holes
3. Heat Affected Zone (HAZ)

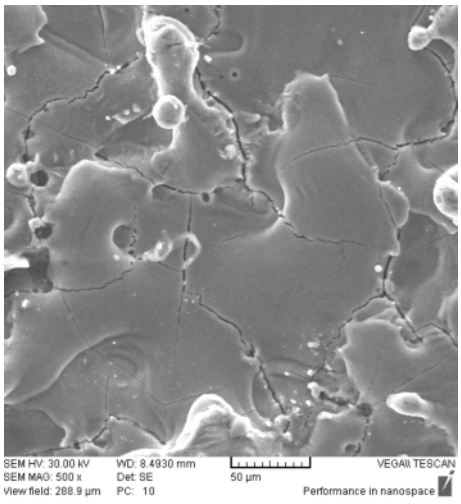
الف) ۶/۱۹۶ µm - ماشینکاری بدون پودر



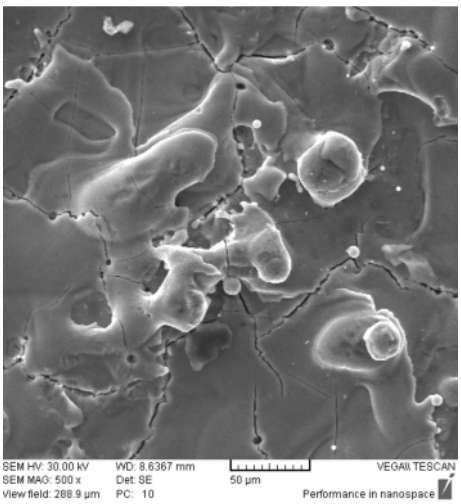
د) ۵/۵۷۰ µm -g/l ۲-گرافیت - ماشینکاری به کمک پودر



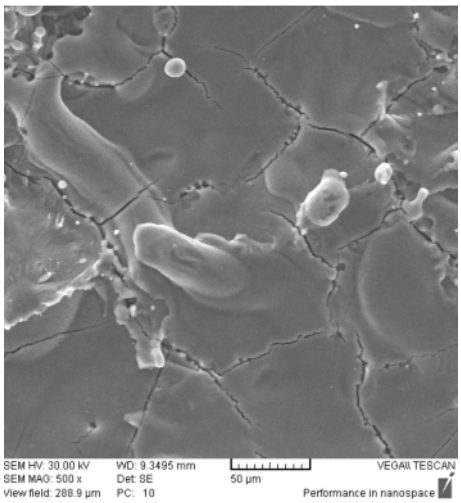
ب) ۵/۸۴۲ µm -g/l ۲-آهن - ماشینکاری به کمک پودر



ه) ۴/۹۶۲ µm -g/l ۲-سیلیکون‌کارباید - ماشینکاری به کمک پودر



ج) ۵/۷۲۶ µm -g/l ۲-کروم - ماشینکاری به کمک پودر



و) ۴/۲۴۶ µm -g/l ۲-آلومینیوم - ماشینکاری به کمک پودر

شکل ۶ توپوگرافی سطح نمونه‌های ماشینکاری شده در حالت بدون پودر و ماشینکاری شده به کمک پودر

همان‌طور که در شکل ۶- الف مشاهده می‌شود، در حالت ماشینکاری بدون پودر بیشترین مقدار ترکها و خلل و فرج سطحی وجود دارد و همچنین سطح غیر یکنواخت‌تر و ناهموارتر می‌باشد و زبری سطح اندازه‌گیری شده نیز این امر را تأیید می‌کند و بعد از آن به ازای پودرهای آهن و کروم سطح ناهموارتر و غیر یکنواخت‌تری وجود دارد، که البته مقدار زبری سطح نسبت به حالت ماشینکاری بدون پودر کاسته شده است.

همان‌طور که در شکل ۶- و دیده می‌شود سطح ماشینکاری شده به کمک پودر آلومینیوم، هموارتر و یکنواخت‌تر است، خلل و فرج سطحی کاهش یافته است و دانسیته سطحی ترکها نیز کمتر است. از لحاظ زبری و توپوگرافی سطح مربوطه مشاهده می‌شود که ذرات پودر آلومینیوم، منجر به تولید با کیفیت‌ترین سطح در مقایسه با حالت ماشینکاری بدون پودر و ماشینکاری به کمک سایر پودرها گردیده است.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شد، به ازای تمام انواع پودرها با افزایش غلظت ذرات در سیال دی‌الکتریک، زبری سطح در ابتدا کاهش می‌یابد و مجدداً با افزایش غلظت انواع پودرها، زبری سطح ماشینکاری شده نیز افزایش می‌یابد و به عبارتی با توجه به نمودارهای شکل ۳، می‌توان بیان کرد که برای هر نوع پودر غلظت بهینه‌ای در سیال دی‌الکتریک وجود دارد که در آن غلظت بهترین کیفیت سطح قابل حصول است. در شکل ۷ تأثیر افزایش غلظت ذرات پودر آلومینیوم بر روی توپوگرافی سطح ماشینکاری شده نشان داده شده و جهت مقایسه، توپوگرافی سطح ماشینکاری شده بدون کمک پودر نیز آورده شده است. لازم به ذکر است در مورد هر سطح ماشینکاری شده، زبری مربوط به آن سطح نیز ارائه شده است.

با افزایش بیش از حد بهینه مقدار غلظت پودر آلومینیوم در سیال دی‌الکتریک، حجم ذرات معلق در فاصله گپ بین دو الکترود ابزار و قطعه‌کار افزایش می‌یابد و به دنبال آن احتمال ایجاد ناپایداریهایی در فرایند تخلیه الکتریکی به صورت اتصال کوتاه و یا آرک افزایش می‌یابد و به همین دلیل بعد از غلظت بهینه ۲ گرم بر لیتر، با افزایش مقدار غلظت ذرات پودر در سیال دی‌الکتریک، سطح ماشینکاری شده مجددا ناهموارتر و غیر یکنواخت‌تر می‌شود، چرا که به دلیل بروز ناپایداری در فرایند تخلیه الکتریکی، توزیع غیر یکنواخت‌تری در دانسیته توان الکتریکی روی سطح ماشینکاری شده به وجود می‌آید و به تبع آن نیروی ضربه‌ای حاصل از تخلیه الکتریکی روی سطح قطعه‌کار نیز، غیر همگون‌تر می‌شود.

با توجه به توپوگرافی و زبری سطح مربوط به نمونه‌های ماشینکاری شده و ارائه شده در شکل ۷، مشاهده می‌شود که روند تغییرات توپوگرافی سطح ماشینکاری شده به ازای غلظتهای مختلف کاملا مشابه با روند تغییرات زبری سطح ماشینکاری شده به ازای غلظتهای متفاوت است.

۴- نتیجه‌گیری

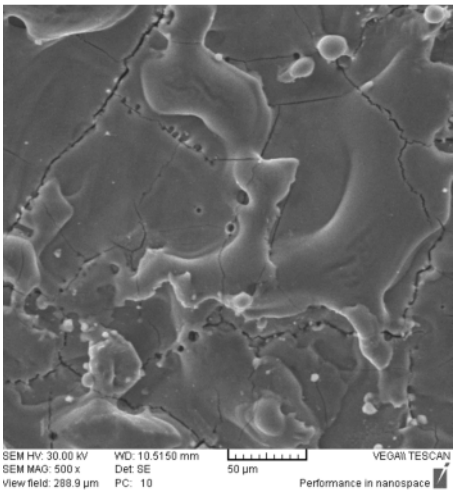
در تحقیق موجود، بعد از مراحل آماده‌سازی نمونه‌های قطعه‌کار از شمشهای ریخته‌گری شده ترکیب بین‌فلزی γ-TiAl و همچنین آماده‌سازی الکترودهای ابزار مس و مخزن ویژه ماشینکاری، فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک چند نوع پودر مختلف اعم از آلومینیوم، گرافیت، سیلیکون‌کارباید، آهن و کروم انجام گردید و مشخصات خروجی فرایند مانند زبری سطح، نرخ سایش ابزار، نرخ براده‌برداری و توپوگرافی سطح با یکدیگر مقایسه شدند. غلظت پودر در سیال دی‌الکتریک از مقدار ۱ گرم بر لیتر تا مقدار ۱۶ گرم بر لیتر برای این پنج نوع پودر تغییر داده شد و مشخصات خروجی فرایند برای انواع پودرها و همچنین برای حالت ماشینکاری بدون پودر مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت، نتایج بدست آمده در زیر ارائه می‌شوند:

۱) در فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر، اصلی‌ترین خواص فیزیکی و ترموفیزیکی پودرها که تأثیر بسیار زیادی بر روی مشخصات خروجی فرایند داشتند، عبارتند از: دانسیته پودر، رسانش حرارتی و رسانش الکتریکی.

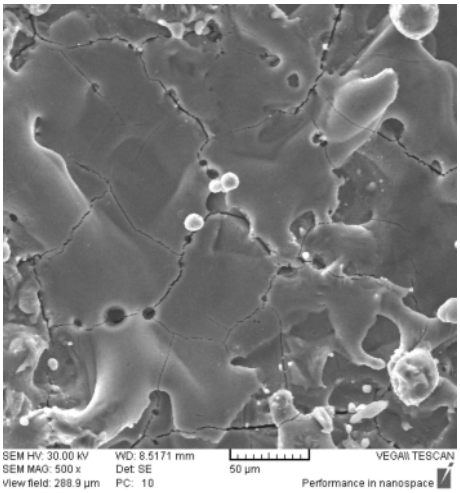
۲) پودر آلومینیوم کمترین زبری سطح را ایجاد می‌کند و بعد از آن به ترتیب پودرهای سیلیکون‌کارباید، گرافیت، کروم و آهن بهترین صافی سطح را ایجاد می‌کنند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که پودر آلومینیوم با اندازه ذرات کمتر از ۶۳ میکرومتر و با غلظت ۲ گرم بر لیتر در سیال نفت سفید، می‌تواند صافی سطح ماشینکاری شده TiAl را نسبت به حالت ماشینکاری تخلیه الکتریکی بدون پودر، حدود ۳۲٪ افزایش دهد.

۳) پودر آلومینیوم کمترین نرخ سایش ابزار را ایجاد می‌کند و بعد از آن به ترتیب پودرهای سیلیکون‌کارباید، گرافیت، کروم و آهن کمترین نرخ سایش ابزار را ایجاد می‌کنند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که پودر آلومینیوم با اندازه ذرات کمتر از ۶۳ میکرومتر و با غلظت ۲ گرم بر لیتر در سیال نفت سفید، می‌تواند نرخ سایش الکترود مسی را نسبت به حالت ماشینکاری تخلیه الکتریکی بدون پودر، حدود ۱۹٪ کاهش دهد.

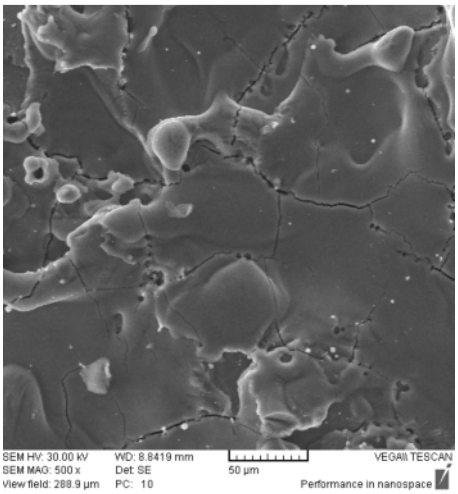
الف) ۶/۱۹۶ µm - ماشینکاری بدون پودر



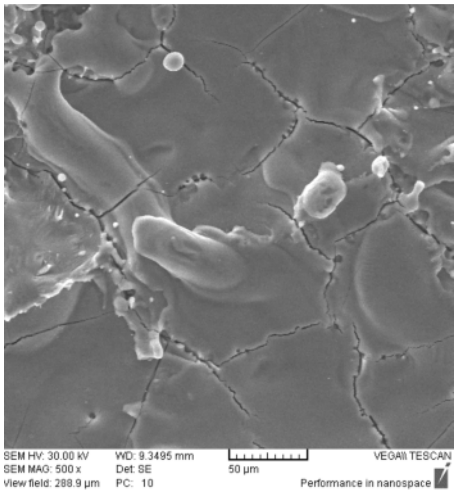
د) ۴/۸۷۷ µm -۴ g/l- آلومینیوم - ماشینکاری به کمک پودر



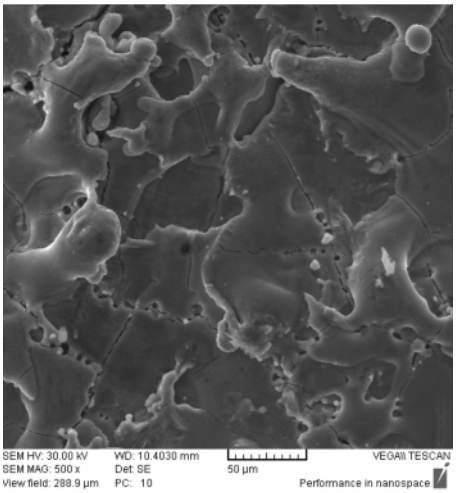
ب) ۴/۹۵۱ µm -۱ g/l-آلومینیوم - ماشینکاری به کمک پودر



ه) ۵/۱۳۵ µm -۸ g/l- آلومینیوم - ماشینکاری به کمک پودر



ج) ۴/۲۴۶ µm -۲ g/l- آلومینیوم - ماشینکاری به کمک پودر



و) ۵/۵۴۳ µm -۱۶ g/l- آلومینیوم - ماشینکاری به کمک پودر

شکل ۷ توپوگرافی سطح نمونه‌های ماشینکاری شده در حالت بدون پودر و ماشینکاری شده به کمک پودر

۴) با افزوده شدن تمام انواع پودرها به سیال دی‌الکتریک مقدار نرخ براده‌برداری نسبت به حالت بدون پودر (غلظت صفر گرم بر لیتر)، کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش مقدار غلظت ذرات پودر، نرخ براده‌برداری از سطح قطعه‌کار نیز کاهش

می‌یابد، برای پودر آلومینیوم به عنوان مناسب‌ترین نوع پودر در میان پودرهای استفاده شده در غلظت بهینه ۲ گرم بر لیتر، مقدار نرخ براده‌برداری نسبت به حالت بدون پودر حدود ۷/۵٪ کاهش یافته است.

۵) در مورد پودرهای آلومینیوم، گرافیت و سیلیکون‌کارباید بهترین مقدار غلظت جهت کاهش نرخ سایش ابزار و افزایش صافی سطح قطعه‌کار، مقدار ۲ گرم بر لیتر و در مورد پودرهای کروم و آهن، مقدار غلظت بهینه ۴ گرم بر لیتر است و دلیل اصلی این اختلاف غلظت بهینه، تفاوت زیاد مقدار دانسیته این دو دسته پودر با یکدیگر است.

۶) با توجه به توپوگرافی سطوح ماشینکاری شده، در حالت ماشینکاری بدون پودر، بیشترین مقدار ترکها و خلل و فرج سطحی وجود دارد و همچنین سطح غیر یکنواخت‌تر و ناهموارتر می‌باشد و بعد از آن به ازای پودرهای آهن و کروم سطح ناهموارتر و غیر یکنواخت‌تری وجود دارد، در حالی که سطح ماشینکاری شده به کمک پودر آلومینیوم، هموارتر و یکنواخت‌تر است. خلل و فرج و حفره‌های سطحی آن کاهش یافته است و دانسیته سطحی ترکها نیز کمتر است.

۷) با افزایش بیش از حد مقدار غلظت پودر آلومینیوم، حجم ذرات معلق در فاصله گپ بین دو الکترود ابزار و قطعه‌کار افزایش می‌یابد و به دنبال آن احتمال ایجاد ناپایداریهایی در فرایند تخلیه الکتریکی به صورت اتصال کوتاه و یا آرک افزایش می‌یابد و به همین دلیل بعد از غلظت بهینه ۲ گرم بر لیتر، با افزایش مقدار غلظت ذرات پودر، سطح ماشینکاری شده مجددا ناهموارتر و غیر یکنواخت‌تر می‌شود.

۸) در هنگام استفاده از پودرهای سنگین‌تر همچون آهن و کروم در فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر، به ازای غلظتهای بالا، وقوع علائم آرک روی سطح ماشینکاری شده قطعه‌کار و الکترود ابزار بسیار محتمل است.

۵- مراجع

[1] App.el F., Brossmann U., Christoph U., Eggert S., Janschek P., Lorenz U., "Recent Progress in the Development of Gamma Titanium Aluminide Alloys", *Advanced Engineering Materials*, Vol. 2, No. 11, 2000, pp. 699-720.

[2] Hsiung L.M., Nieh T.G., "Microstructures and Properties of Powder Metallurgy TiAl Alloys", *Materials Science and Engineering*, Vol. 364, 2004, pp. 1-10.

[3] Tetsui T., "App.lication of TiAl in a Turbocharger for Passenger Vehicles", *Advanced Engineering Materials*, Vol. 3, No. 5, 2001, pp. 307-310.

[4] Aspinwall D., Dewes R.C., Mantle A.L., "The Machining of γ-TiAl Intermetallic Alloys", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 54, 2005, pp. 99-104.

[5] Kansal H.K.,Singh S., Kumar P., "Parametric Optimization of Powder Mixed Electrical Discharge Machining by Response Surface Methodology", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 169, 2005, pp. 427-436.

[6] Kansal H.K., Singh S., Kumar P., "Numerical Simulation of Powder Mixed Electrical Discharge Machining (PMEDM) Using Finite Element Method", *Mathematical and Computer Modeling*, Vol. 47, 2008, 1217-1237.

[7] Tzeng Y., Chen F., "Investigation Into Some Surface Characteristics of Electrical Discharge Machined SKD-11 Using Powder-Suspension dielectric oil", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 170, 2005, pp. 385-391.

[8] Wong Y., Lim L.C., Rahuman I., Tee W.M., "Near- Mirror Finish Phenomenon in EDM Using Powder Mixed Dielectric", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 79, 1998, pp. 30-40.

[9] Pecas P., Henriques E., "Effect of The Powder Concentration and Dielectric Flow in the Surface Morphology in Electrical Discharge Machining with Powder-Mixed Dielectric", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 37, 2008, pp. 1120-1132.

[10] Kung K., Horng J., Chiang K., "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*, 40:95, 2007, 104.

[11] Sarkar S., Mitra S., Bhattacharyya B., "Parametric Analysis and Optimization of Wire Electrical Discharge Machining of γ-TiAl", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 159, 2005, pp. 286-294.

[12] Lide D.R., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 90th Edition, Springer London Publication, CD-Rom Version 2010, pp. 1147-1169.

[13] Hasclik A., Caydas U., "Electrical Discharge Machining of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V)", *Journal of App.lied Surface Science*, Vol. 253, 2007, pp. 9007-9016.

[14] Davim J.P., *Surface Integrity in Machining*, Springer London Publication, 2010, pp. 127-140.