



بررسی تاثیر هم‌زمان ارتعاشات آلتراسونیک ابزار و افزودن نانوذرات SiO_2 به دی‌الکتریک، بر روی مشخصه‌های ماشین‌کاری آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V در فرآیند EDM

بهنام خسروزاده^{۱*}، محمدرضا شباگرد^۲

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

*تبریز، صندوق پستی ۵۱۶۶۶۱۶۴۷۱، behnam_kh@tabrizu.ac.ir

چکیده

در این مطالعه تاثیر هم‌زمان افزودن نانوذرات SiO_2 به دی‌الکتریک پایه نفتی و اعمال ارتعاشات آلتراسونیک به ابزار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V بررسی شده است. تحلیل‌ها در حالات ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سنتی، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با افزودن نانوذرات پودری به دی‌الکتریک، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با اعمال ارتعاشات آلتراسونیک به ابزار و همچنین ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با افزودن نانوذرات پودری به دی‌الکتریک به همراه ارتعاشات آلتراسونیک اعمال شده به ابزار، صورت گرفته است. در هر کدام از شرایط مذکور نرخ براده‌برداری، فرسایش نسبی ابزار و صافی سطح مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با افزودن نانوذرات پودری به دی‌الکتریک به همراه ارتعاشات آلتراسونیک ابزار بهینه‌ترین شرایط برای نرخ براده‌برداری ایجاد می‌گردد. تاثیر نانوذرات افزوده شده به دی‌الکتریک و اعمال ارتعاشات به ابزار بر روی فرسایش نسبی ابزار بستگی به شرایط ماشین‌کاری (زمان روشنی و جریان پالس) دارد. نانوذرات افزوده شده به دی‌الکتریک باعث بهبود کیفیت سطح شده، و ارتعاشات آلتراسونیک ابزار باعث افزایش زبری سطح می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، تیتانیوم، ارتعاشات آلتراسونیک، نانوپودر

Investigating the effect of simultaneous ultrasonic vibration of tool and addition of SiO_2 nanoparticles into the dielectric on machining characteristics of titanium alloy Ti-6Al-4V in EDM process

Behnam Khosrozadeh*, Mohammadreza Shabgard

Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

* P.O.B. 5166616471, Tabriz, Iran, behnam_kh@tabrizu.ac.ir

ABSTRACT

In this study, the effect of simultaneous addition of SiO_2 nanoparticles into oil based dielectric and applying ultrasonic vibrations on tool is investigated in the electrical discharge machining process of titanium alloy Ti-6Al-4V. The analysis was conducted in 4 different machining conditions: the traditional Electrical Discharge Machining, Electrical Discharge Machining by adding nanoparticles powder to the dielectric, Electrical Discharge Machining by applying ultrasonic vibrations to the tool and also by adding nanoparticles powder to the dielectric with ultrasonic vibrations applied to the tool. The results show that electrical discharge machining by adding nanoparticles powder into dielectric together with ultrasonic vibrations of tool caused the most efficient condition for material removal rate. Effect of added nanoparticles to dielectric and applying vibrations to the tool on the tool wear ratio depends on machining conditions (pulse current and pulse duration). Added nanoparticles into dielectric improve surface quality and ultrasonic vibrations of tool increase surface roughness.

Keywords: Electrical Discharge Machining, Nano Powder, Titanium, Ultrasonic Vibration.

اکثر ابزارهای برشی وجود دارد، می‌باشد [۳،۲]. بنابراین روش‌های ماشین‌کاری سنتی کارایی مناسبی برای ماشین‌کاری این آلیاژ ندارد؛ از روش‌های ماشین‌کاری غیرسنتی مانند ماشین‌کاری آلتراسونیک، ماشین‌کاری با اشعه الکترونی، ماشین‌کاری با پلاسما، لیزر و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی می‌باشد [۴]. روش ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی برتری‌های زیادی نسبت به سایر روش‌های ماشین‌کاری غیرسنتی دارد [۵]. هر چند راندمان این روش ماشین‌کاری پایین و کیفیت سطح حاصله نامناسب به عنوان معایب اصلی این روش، استفاده از آن را با محدودیت‌هایی مواجه کرده است [۶]. یکی از روش‌های مورد استفاده برای افزایش راندمان فرآیند EDM سنتی اعمال

۱- مقدمه

آلیاژهای تیتانیوم به دلیل دارا بودن خواص برجسته ای مانند نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت بالا در مقابل خزش و خستگی، مقاومت مناسب خوردگی و زیست‌سازگاری، مورد توجه صنایع مختلف هستند. بنابراین استفاده از آلیاژهای تیتانیوم به‌ویژه Ti-6Al-4V در صنایعی مانند هوافضا، خودرو، زیست پزشکی، سازه‌های دریایی، صنایع شیمیایی، تولید انرژی و صنایع نفت و گاز و سایر صنایع مهم روند روبه رشدی دارد [۱]. با این حال تیتانیوم و آلیاژهای آن تحت عنوان موادی که قابلیت ماشین‌کاری پایینی دارند شناخته می‌شوند؛ که این به دلیل مستعد بودن آن به کارسختی در حین ماشین‌کاری، رسانایی حرارتی پایین و واکنش پذیری شیمیایی با چسب‌های کبالتی که در

1. Electrical Discharge Machining

Please cite this article using:

B. Khosrozadeh, M.R. Shabgard, Investigating the effect of simultaneous ultrasonic vibration of tool and addition of SiO_2 nanoparticles into the dielectric on machining characteristics of titanium alloy Ti-6Al-4V in EDM process, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 311-317, 2015 (in Persian فارسی)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ژئین و همکارانش^۷ فرآیندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و آلتراسونیک را با هم ادغام کرده و گزارش کرده‌اند که در این حالت کارایی ماشین‌کاری سه برابر ماشین‌کاری آلتراسونیک شده، سلامت سطح تغییر چندانی نداشته است [۱۵].

لین و همکارانش^۸ آلیاژ Ti-6Al-4V را با ترکیب فرآیندهای EDM و USM ماشین‌کاری کرده است. نرخ براده‌برداری با ترکیب این فرآیندها بیشتر از نرخ براده‌برداری EDM شده و بازده ماشین‌کاری افزایش پیدا کرده است. با توجه به افزایش اندازه حفره‌های ناشی از ماشین‌کاری، زبری سطح حاصل نسبت به زبری سطح هر کدام از روش‌های ماشین‌کاری بیشتر شده است [۱۶].

کریم و همکارانش^۹ تأثیر ارتعاشات آلتراسونیک را در فرآیند EDM بررسی کرده‌اند و متوجه شدند که اعمال ارتعاشات به الکترود موجب گردش بهتر سیال دی الکتریک شده و براده‌های ماشین‌کاری را از محل گپ ماشین‌کاری دور می‌کند و با مکش دی الکتریک تازه به گپ، تخلیه‌های موثرتری انجام شده و نرخ براده‌برداری افزایش می‌یابد. ثانیاً حرکات آلتراسونیک ابزار مانند پمپ عمل کرده و با توربولانس و کلوئیداسیون ایجاد شده ماده مذاب بیشتری از چاله‌های مذاب به بیرون پرت می‌شود، بنابراین مجدداً نرخ براده‌برداری بیشتر شده و ضخامت لایه منجمد شده در سطح نازکتر می‌شود، از مقدار میکروتورک‌ها کاسته شده و عمر خستگی بیشتر می‌گردد [۱۷].

چایا و همکارانش^{۱۰} فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به کمک ارتعاشات آلتراسونیک^{۱۱} (USEDM) را بر روی ماده Si₃N₄ انجام داده‌اند و نتایج را با فرآیند EDM سنتی مقایسه کرده‌اند. در فرآیند USEDM نرخ براده‌برداری تقریباً دو برابر فرآیند EDM سنتی بوده و زبری سطح افزایش یافته است. در شرایط پرداخت‌کاری با افزودن ذرات ساینده به دی الکتریک در فرآیند USEDM صافی سطح خیلی بهتر شده و چاله‌های ناشی از ماشین‌کاری عم حذف شدند [۱۸].

عبدالله و همکارانش تأثیر ارتعاشات آلتراسونیک ابزار را بر روی نرخ براده‌برداری قطعه‌کار از جنس کاربید تنگستن را مطالعه کرده‌اند و گزارش داده‌اند که فشار و مکش حاصل از ارتعاشات در گپ بین ابزار و قطعه‌کار موجب جریان بهتر دی الکتریک شده و جرقه‌هایی از نوع آرک را کاهش می‌دهد [۱۹].

قریشی و همکارانش تأثیر ارتعاشات ابزار در فرکانس بالا و پایین را بر روی نرخ براده‌برداری فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بررسی کرده‌اند. طبق نتایج کار آن‌ها بیشترین تأثیر ارتعاشات در شرایط پرداخت‌کاری اتفاق می‌افتد و مشکلاتی مانند پالس‌های آرک، اتصال کوتاه، مدار باز و ناپایداری فرآیند به حداقل می‌رسد. نرخ براده‌برداری در شرایط پرداخت‌کاری تا ۱۱ برابر، و در شرایط خشن‌کاری تا ۱/۸ برابر افزایش یافته است [۲۰].

با توجه به پیشینه تحقیقات انجام شده تأثیر اعمال ارتعاشات آلتراسونیک، افزایش بازدهی و بالا بردن نرخ براده‌برداری می‌باشد؛ با افزودن پودر به دی الکتریک می‌توان سلامت سطح ماشین‌کاری شده را بهبود داد. با توجه به این‌که تأثیر همزمان هر دو فاکتور مذکور بر ماشین‌کاری مواد، علی‌الخصوص موادی که قابلیت ماشین‌کاری پایینی دارند مورد بررسی قرار نگرفته است؛ در این پژوهش تأثیر توأم افزودن پودر در دی الکتریک و اعمال

ارتعاشات آلتراسونیک به الکترودها است؛ در این فرآیند ترکیبی بازدهی ماشین‌کاری با مکانیزم‌هایی مانند بهبود شستشوی گپ تخلیه الکتریکی و افزایش افت فشار بین الکترودها افزایش می‌یابد [۷]. از جمله تکنیک‌های جدید که به منظور افزایش کارایی و بویژه بهبود کیفیت سطح ماشین‌کاری شده استفاده می‌گردد افزودن پودر به سیال دی الکتریک در فرآیند EDM می‌باشد. تأثیر عمده اعمال پودرها کاهش استحکام شکست دی الکتریک (برای پودرهای رسانا) و افزایش کارایی فرآیند، کاهش زمان انجام و بهبود کیفیت سطح می‌باشد [۴].

یاسار و اکمکچی^۱ تأثیر افزودن ذرات پودری کاربرد سیلسیم را در سطح حاصله از فرآیند EDM آلیاژ Ti-6Al-4V مطالعه کرده‌اند. آن‌ها گزارش داده‌اند که با افزودن پودر به دی الکتریک و انتقال پودرها به سطح ماشین‌کاری شده در اثر تخلیه‌های ثانویه، امکان آلیاژ سازی سطحی وجود دارد [۸].

هو و همکارانش^۲ خواص سطحی آلیاژ Ta-W با دمای ذوب بالا را در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با ذرات پودری آلومینوم^۳ (PMEDM) بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در فرآیند PMEDM نسبت به فرآیند EDM صافی سطح افزایش یافته، مقاومت سایشی سطح بهبود یافته و سختی سطح بیشتر شده است [۹].

پراجاپاتی و پاتل^۴ ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی فولاد EN 8 را به کمک پودر SiO₂ در دی الکتریک انجام داده‌اند و نشان داده‌اند که استفاده از این ذرات در صافی سطح حاصله از ماشین‌کاری مواد سخت تأثیر بسزایی داشته و همچنین بهینه‌ترین شرایط ماشین‌کاری اعم از جریان و زمان روشنی پالس را در فرآیند PMEDM به دست آورده‌اند [۱۰].

جهان و رحمان میکرو ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی WC-Co را با افزودن نانوپودر گرافیت در دی الکتریک انجام داده‌اند. براساس نتایج تجربی صافی سطح و نرخ براده‌برداری افزایش یافته و سایش نسبی ابزار کاهش یافته است. به علت یکنواختی تخلیه‌ها توپوگرافی سطح و توزیع چاله‌های سطح، بهتر شده است؛ همچنین در فرآیند PMEDM نسبت به فرآیند EDM سطح دارای عیوب کمتری می‌باشد [۱۱].

سبک تکی و همکارانش آلیاژ Ti-6Al-4V با فرآیند EDM به همراه پودر SiC در دی الکتریک ماشین‌کاری کرده‌اند؛ و به این نتیجه رسیده‌اند که افزودن این پودر انرژی تخلیه‌ها و زبری سطح را کاهش داده، با افزایش نرخ براده‌برداری و کاهش سایش نسبی ابزار راندمان ماشین‌کاری افزایش داده است [۱۲].

جسوانی^۵ با بررسی تأثیر پودر میکرونی گرافیت در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی گزارش کرده است که با اضافه کردن ۴ گرم بر لیتر پودر گرافیت در دی الکتریک (میانگین اندازه ذرات ۱۰ میکرومتر)، پایداری ماشین‌کاری با افزایش ۶۰٪ نرخ براده‌برداری و کاهش ۲۸٪ سایش ابزار، افزایش یافته است [۱۳].

اکمکچی و ارسوز^۶ در خصوص نحوه تأثیر ذرات پودری در مورفولوژی سطوح حاصله از فرآیند EDM به این نتیجه رسیده‌اند که: انرژی و سرعت ذرات معلق در دی الکتریک در اطراف ستون پلاسما در اثر نیروی الکتروفلورز و فشار منفی بعد از اتمام تخلیه الکتریکی، به اندازه‌ای افزایش پیدا می‌کند که به داخل سطح ماشین‌کاری شده نفوذ می‌کنند و از عمق نفوذ ترک‌های ناشی از ماشین‌کاری کاهش می‌دهد [۱۴].

7. Zhixin et al.

8. Lin et al.

9. Kremer et al.

10. Chaiya et al.

11. Ultrasonic Assisted Electrical Discharge Machining

1. Yasar and Ekmekci

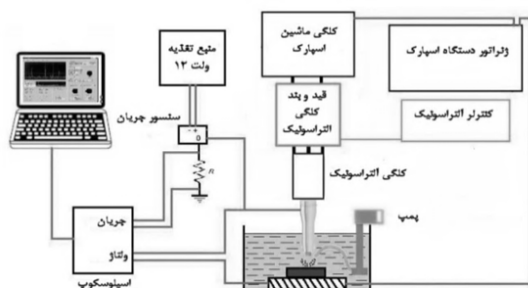
2. Hu et al.

3. Powder Mixed Electrical Discharge Machining

4. Prajapati and Patel

5. Jeswani

6. Ekmekci and Ersoz



شکل ۱ تجهیزات و تنظیمات مربوط به انجام آزمایش‌ها



شکل ۲ نحوه انجام آزمایش‌ها با استفاده از مخزن و پمپ های مجزا

جدول ۳ متغیرهای ورودی و پارامترهای تنظیمی دستگاه اسپارک		
متغیر	سطح آزمایش	
زمان روشنی پالس (μs)	۴۰۰، ۱۰۰، ۲۵، ۶/۴	
شدت جریان (A)	۴۸، ۲۴، ۱۲، ۶	
دامنه ارتعاش (μm)	۱۵	
زمان خاموشی پالس (μs)	۶/۴	
ولتاژ مدار باز (V)	۲۰۰	
فاصله گپ (μm)	۵۰	
نوع دی الکتریک	Oil Flux ELF	

فرسایش نسبی ابزار TWR^* شاخصی است که درصد حجم جدا شده از ابزار را نسبت به حجم جدا شده از قطعه کار را در هر آزمایش نشان می‌دهد، با توزین جرم ابزار قبل و بعد از هر آزمایش میزان فرسایش حجمی ابزار برحسب میلی متر مکعب مشخص شده و از تقسیم این مقدار بر حجم مواد برداشته شده از قطعه کار، میزان فرسایش نسبی ابزار از روی رابطه (۲) به دست می‌آید. در این رابطه TRR^* نرخ سایش حجمی ابزار و MRR نرخ براده برداری از قطعه کار است.

$$TWR\% = \frac{TRR}{MRR} \times 100 \quad (2)$$

برای اندازه‌گیری صافی سطح نمونه‌های ماشین‌کاری شده از دستگاه اندازه‌گیری صافی سطح استفاده شد؛ عدد اندازه‌گیری شده میانگین ۳ داده اندازه گرفته شده از سطح نمونه‌ها بود که در راستاهای مختلف از سطح اندازه‌گیری شده بود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی تأثیر حالت‌های مختلف فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی نرخ براده‌برداری
شکل‌های ۳ و ۴ تأثیر افزودن نانو پودر SiO₂ و اعمال ارتعاشات آلتراسونیک

ارتعاش آلتراسونیک به ابزار در ماشین‌کاری آلیاژ Ti-6Al-4V بررسی شده است، تا بهترین شرایط ماشین‌کاری با بیشترین بازدهی و بهترین کیفیت سطح، تعیین گردد.

۲- مواد و روش‌ها

به منظور انجام آزمایش‌های ماشین‌کاری از آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V استفاده شد. نمونه‌ها به ارتفاع ۱۰ mm از میلگردهای تیتانیوم به قطر ۲۰ mm به وسیله دستگاه برش سیمی^۱ بریده شدند. در آخرین مرحله آماده‌سازی سطح قطعات سنگ‌زنی شدند. ابزار استفاده شده از جنس فلز مس بود که از میلگردهای مسی به قطر ۱۰ mm با عملیات تراش‌کاری تهیه شدند. برای اتصال ابزار مسی به کنگی مخصوص آلتراسونیک برای انجام آزمایش‌های USED، عملیات رزوه‌کاری روی آن‌ها انجام گردید. ترکیب درصد عناصر آلیاژی قطعه کار و مشخصات فیزیکی و مکانیکی قطعه کار و ابزار به ترتیب در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است.

جهت انجام آزمایش‌های ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی از دستگاه اسپارک (CHARMILLES ROBOFORM 200) با مولد ایزوپالس استفاده شد. برای اعمال ارتعاشات آلتراسونیک به ابزار از کله گی آلتراسونیک با توان 200W و فرکانس ارتعاش 20 kHz استفاده گردید. به منظور کنترل فرآیند و مقایسه شکل پالس‌ها با و بدون ارتعاشات آلتراسونیک قطعه کار مدار الکترونیکی به کار گرفته شد تا ولتاژ گپ و تغییرات جریان در مقابل زمان، در یک رایانه ضبط و ذخیره گردد. تصاویر شماتیک و واقعی از انجام تست‌ها در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده است.

آزمایش‌های ماشین‌کاری طبق اصول طراحی آزمایشات و براساس مدل فول فاکتوریل^۲، ۴ سطح جریان پالس، ۴ سطح زمان روشنی پالس، ۲ سطح سیال دی الکتریک (با و بدون پودر) و ۲ سطح برای ابزار (با و بدون اعمال ارتعاشات آلتراسونیک) انجام شدند. سایر متغیرهای ورودی و پارامترهای تنظیمی آزمایش‌ها و دستگاه اسپارک در جدول ۳ آورده شده است.

وزن قطعات قبل و بعد از هر آزمایش توسط ترازوی دیجیتالی (با دقت ۰/۰۰۰۱g) اندازه‌گیری شده و با استفاده از رابطه (۱) نرخ براده‌برداری محاسبه گردید.

$$MRR = \frac{M_1 - M_2}{\rho t} \times 10^6 \quad (1)$$

در این رابطه MRR^* مقدار نرخ براده‌برداری (mm³/min)، M_1 جرم قطعه کار قبل از ماشین‌کاری (g)، M_2 جرم قطعه بعد از ماشین‌کاری (g)، t مدت زمان ماشین‌کاری (min) و ρ چگالی قطعه کار (gr/cm³) است.

جدول ۱ ترکیب درصد عناصر تشکیل دهنده آلیاژ Ti-6Al-4V

Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
۸۹/۴۶۴	۶/۰۸	۴/۰۲	۰/۲۲	۰/۱۸	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۵۳

جدول ۲ خواص فیزیکی و مکانیکی قطعه کار و ابزار

Cu	Ti-6Al-4V	خواص مکانیکی
W/MK ۴۰۱	W/MK ۶/۷	هدایت حرارتی
۱۱۰ GPa	۱۱۳ GPa	مدول الاستیک
۱۰۸۴°C	۱۶۶۰°C	نقطه ذوب
۱۶/۷۸ μΩ.cm	۱۷۸ μΩ.cm	مقاومت الکتریکی
g/cm ³ ۸/۹	g/cm ³ ۴/۴۳	چگالی

1. Wire Cut
2. Full Factorial
3. Material Removal Rate

4. Tool Wear Ratio
5. Tool Removal Rate

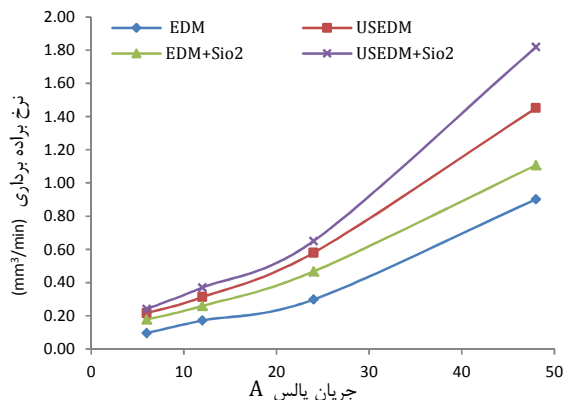
یونیزاسیون کانال پلاسما سریع‌تر رخ می‌دهد. همچنین در هنگام استفاده از نانو پودر در دی الکتریک، یون‌ها و الکترون‌ها که به سمت الکترودها (قطعه کار و ابزار) حرکت می‌کنند، با وجود ارتعاشات شتاب بیشتری گرفته و با ذرات معلق نانو پودر برخورد می‌کنند؛ این ذرات با جذب انرژی، یون‌ها و الکترون‌های زیادی را تولید می‌کنند. این اتفاق موجب افزایش تعداد جرقه‌ها در واحد زمان (فرکانس جرقه‌ها) می‌شود [۲۳، ۲۲].

با افزایش جریان ماشین‌کاری از ۱۲ به ۴۸ آمپر تأثیر افزودن نانوپودر و اعمال ارتعاشات آلتراسونیک بر روی نرخ براده‌برداری بیشتر می‌گردد، این به علت افزایش انرژی ستون پلاسما و یونیزه شدن دی الکتریک در فاصله گپ بیشتر است که موجب ادامه بیشتر جرقه‌های مفید شده و ماشین‌کاری به علت پالس‌های مزاحم ناشی از آلودگی گپ در زمان‌های روشنی طولانی‌تر دچار وقفه نمی‌گردد. با ادامه ماشین‌کاری پایدار تأثیر نانوپودرها و ارتعاشات بیشتر می‌گردد؛ البته این موضوع به وضوح در شکل‌های ۵ و ۶ قابل مشاهده است که با افزایش جریان پالس تأثیر پودرها و ارتعاشات و همچنین اثر توام آن‌ها افزایش یافته است.

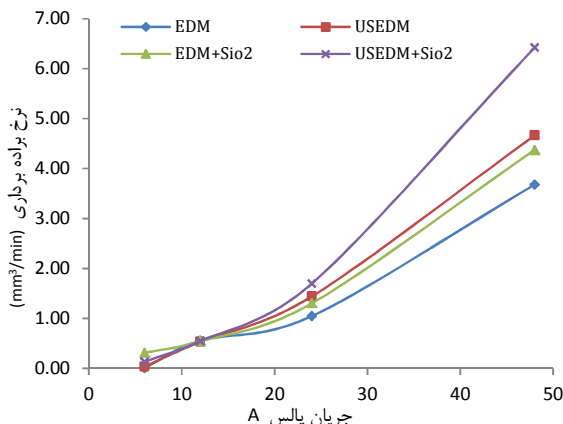
بیشترین تأثیر افزودن نانوپودر و اعمال ارتعاشات آلتراسونیک بر روی نرخ براده‌برداری در زمان روشنی پالس ۱۰۰ μs می‌باشد (شکل ۴) که این تأثیر در شکل ۶ نیز آورده شده است؛ در این شرایط (جریان ۴۸ آمپر و زمان روشنی پالس ۱۰۰ μs) بین انرژی پایین پالس در زمان‌های روشنی کوتاه و آلودگی

ابزار، بر روی نرخ براده‌برداری در مقابل زمان روشنی پالس متفاوت در جریان‌های ۱۲ و ۴۸ آمپر را به ترتیب نشان می‌دهند. همان‌طوری‌که ملاحظه می‌گردد در هر دو شکل با افزایش زمان روشنی پالس ابتدا نرخ براده‌برداری افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. افزایش نرخ براده‌برداری به دلیل افزایش انرژی جرقه‌ها در اثر افزایش زمان روشنی پالس می‌باشد ولی کاهش آن در زمان‌های روشنی پالس طولانی‌تر، به علت تجمع محصولات ماشین‌کاری در گپ بوده که باعث ایجاد پالس‌های آرک و اتصال کوتاه شده و نرخ براده‌برداری را کاهش می‌دهد.

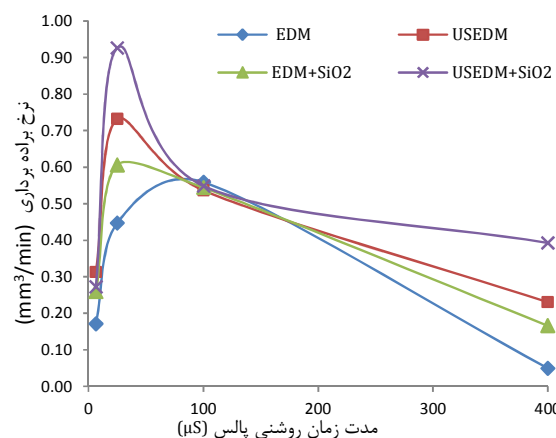
در هر دو شکل افزودن نانوپودر و اعمال ارتعاشات آلتراسونیک نرخ براده‌برداری را افزایش می‌دهد. وجود ذرات نانو از طریق کاهش استحکام شکست دی الکتریک و کاهش زمان تأخیر جرقه باعث افزایش MRR می‌شود و ارتعاشات آلتراسونیک با مکانیسم‌هایی مانند شستشوی بهتر گپ، زدودن آلودگی‌ها، کمک به پدیده جوشش حجمی و افزایش افت فشار گپ، MRR را بیشتر می‌کند [۲۱]. با افزودن پودر و اعمال همزمان ارتعاشات آلتراسونیک، مخصوصاً در شدت جریان ۴۸ آمپر نرخ براده‌برداری بیشتر از حالتی است که این شرایط به تنهایی اعمال می‌گردند. به عبارت دیگر وجود همزمان پودر و ارتعاشات آلتراسونیک اثر یکدیگر را تقویت می‌کنند. که این موضوع می‌تواند به دلیل پخش شدن بهتر ذرات نانو در اثر وجود ارتعاش و افزایش انرژی آنها در اثر وجود امواج آکوستیکی در داخل سیال باشد که در هر دو حالت



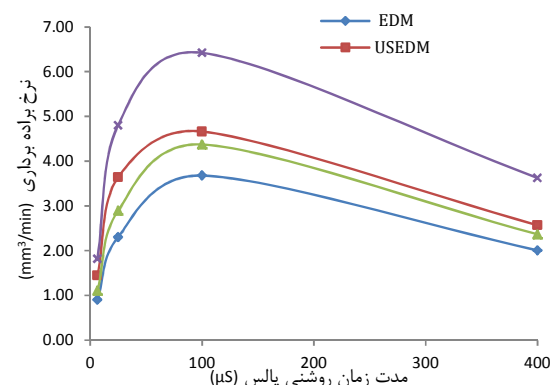
شکل ۵ تأثیر حالت‌های مختلف فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی نرخ براده‌برداری در شدت جریان‌های متفاوت (زمان روشنی پالس ۶/۴ میکروثانیه)



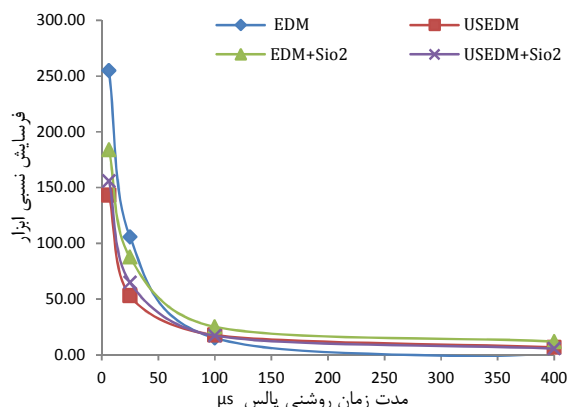
شکل ۶ تأثیر حالت‌های مختلف فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی نرخ براده‌برداری در شدت جریان‌های متفاوت (زمان روشنی پالس ۱۰۰ میکروثانیه)



شکل ۳ تأثیر حالت‌های مختلف فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی نرخ براده‌برداری در زمان‌های روشنی پالس مختلف (شدت جریان ۱۲ آمپر)



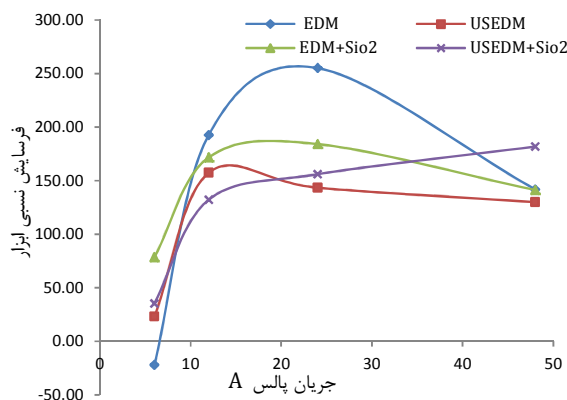
شکل ۴ تأثیر حالت‌های مختلف فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی نرخ براده‌برداری در زمان‌های روشنی پالس مختلف (شدت جریان ۴۸ آمپر)



شکل ۸ تأثیر حالت‌های مختلف فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی فرسایش نسبی ابزار در زمان‌های روشنی پالس مختلف (شدت جریان ۲۴ آمپر)

تصاویر ۹ و ۱۰ سایش نسبی ابزار را در مقابل شدت جریان پالس در حالات مختلف ماشین‌کاری نشان می‌دهد. در شکل ۹ که در مدت زمان روشنی پالس ۶۰۴ میکروثانیه انجام شده است، بیشترین نرخ سایش ابزار را فرآیند EDM معمولی دارد؛ دلیل این امر انرژی پایین پالس‌ها و تأخیر در زمان شروع جرقه‌ها است که منجر به نرخ براده‌برداری بسیار پایین شده و طبق رابطه (۲) سایش نسبی ابزار افزایش می‌یابد. ولی در سایر فرایندها با افزایش کارایی فرآیند به دلیلی وجود نانو ذرات و یا ارتعاشات ابزار با مکانیسم‌هایی که قبلاً توضیح داده شده است نرخ براده‌برداری بیشتر و در نتیجه سایش نسبی ابزار کمتر شده است.

در شکل ۱۰ تأثیر فرایندهای مختلف ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر سایش نسبی ابزار در مدت زمان روشنی پالس ۴۰۰ میکروثانیه ارائه شده است. کمترین سایش نسبی ابزار در این تصویر مربوط به فرآیند EDM معمولی است؛ حتی در برخی از شدت جریان‌های پالس این کمیت صفر یا مقداری منفی می‌باشد؛ که به علت انباشت محصولات ماشین‌کاری در گپ و ناپایداری فرآیند است که پالس‌های ناسالم بیشتر شده و با افزایش مدت زمان روشنی پالس تجزیه کربن و سایر ذرات موجود در گپ بیشتر شده این موضوع باعث نشست کربن حاصل از دی الکتریک پایه نفتی در الکترود مسی شده و بر جرم آن می‌افزاید [۲۵].



شکل ۹ تأثیر حالت‌های مختلف فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی فرسایش نسبی ابزار در شدت جریان‌های متفاوت (زمان روشنی پالس ۶/۴ میکروثانیه)

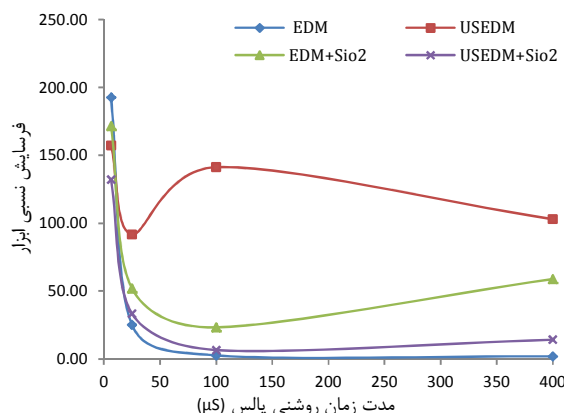
ناشی از زمان‌های روشنی پالس طولانی تعادلی ایجاد می‌گردد و شرایط بهینه برای اعمال ارتعاشات و افزودن نانو پودر ایجاد می‌گردد، تا بیشترین نرخ براده برداری اتفاق بیفتد.

داده‌های مربوط به نمودارهای شکل ۶ در شدت جریان ۶ آمپر با روند حاکم بر سایر نقاط متفاوت است که علت این موضوع ناپایداری شرایط ماشین‌کاری در انرژی پایین پالس‌ها می‌باشد.

۳-۱- بررسی تأثیر حالت‌های مختلف فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی سایش نسبی ابزار

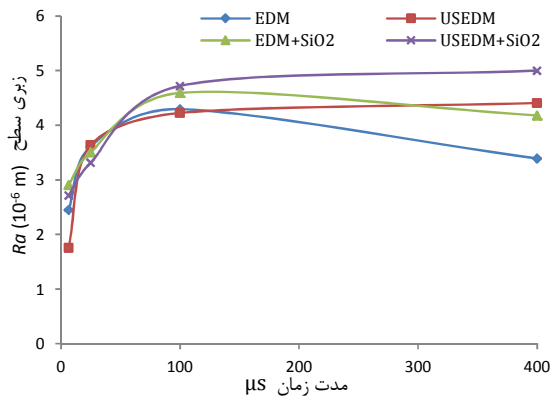
سایش نسبی ابزار در مقابل مدت زمان روشنی پالس در فرایندهای متفاوت ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی در تصاویر ۷ و ۸ ارائه شده است. در شکل ۷ بیشترین سایش نسبی ابزار در فرآیند USEDMD و کمترین مقدار در فرآیند EDM مشاهده می‌گردد. در فرآیند EDM در شدت جریان ۱۲ آمپر با افزایش زمان روشنی پالس با تجمع محصولات ماشین‌کاری در فاصله بین الکترودها، فرآیند ناپایدار می‌شود که با اعمال ارتعاشات در این شرایط فاصله گپ بیشتر شده و فرآیند پایدار شده و بر تعداد جرقه‌های سالم افزوده می‌شود از این رو سایش نسبی ابزار هم بیشتر می‌گردد. افزایش سایش نسبی ابزار در فرایندهای EDM و USEDMD به همراه ذرات افزوده شده در دی الکتریک ناشی از افزایش پایداری فرآیند است که در نتیجه کاهش استحکام شکست دی الکتریک و افزایش فاصله گپ به علت حضور نانو پودرها رخ می‌دهد؛ و با افزایش پالس‌های سالم سایش ابزار هم بیشتر می‌گردد.

در شکل ۸ سایش نسبی ابزار در شدت جریان ۲۴ آمپر نشان داده شده است کاهش TWR در زمان‌های روشنی زیاد به این دلیل است که پدیده غالب مکانیسم جدایش مواد در این شرایط طبق نظریه یوبانک^۱، هجوم یون‌ها است که در زمان‌های روشنی پالس بیشتر یون‌ها به سمت کاتد (قطعه کار) رفته و باعث افزایش MRR و کاهش TWR می‌گردد [۲۴]. با افزایش شدت جریان سایش نسبی ابزار در فرایندهای مختلف ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، بویژه در مدت زمان‌های روشنی پالس طولانی تفاوت چندانی با هم ندارند. این موضوع به دلیل افزایش فاصله گپ در اثر افزایش جریان پالس است؛ در نتیجه در پالس‌هایی با مدت زمان زیاد آلودگی‌ها پایداری فرایند را کاهش نداده و با افزایش نرخ براده‌برداری، سایش نسبی ابزار طبق رابطه (۲) کاهش می‌یابد.



شکل ۷ تأثیر حالت‌های مختلف فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی فرسایش نسبی ابزار در زمان‌های روشنی پالس مختلف (شدت جریان ۱۲ آمپر)

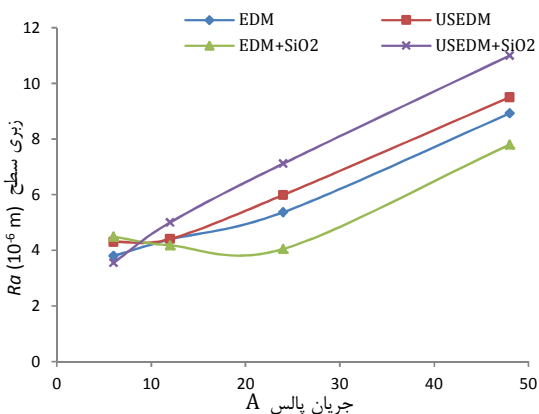
1. Eubank



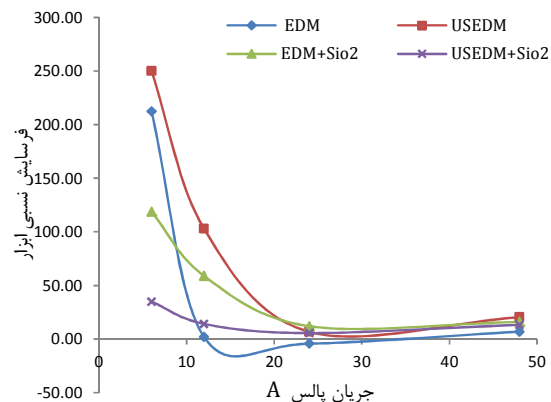
شکل ۱۱ تأثیر حالت‌های مختلف فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی زبری سطح در شدت جریان‌های متفاوت (شدت جریان ۱۲ آمپر)

کمترین زبری سطح در بین فرآیندهای مختلف در شکل ۱۱ مربوط به فرآیند EDM به همراه ذرات SiO_2 افزوده شده به دی‌الکتریک است، بهبود صافی سطح از مهمترین خصوصیات افزودن پودر به سیال دی‌الکتریک است؛ وجود ذرات بین گپ ماشین‌کاری باعث بازتر شدن و عریض‌تر شدن فاصله گپ است و همراه با این موضوع فرکانس جرقه‌ها هم بیشتر می‌گردد، که در این حالت انرژی جرقه‌ها و شدت میدان الکتریکی توزیع یکنواخت‌تری خواهد داشت. با این شرایط جرقه‌هایی با انرژی‌های زیاد کاهش یافته و با کاهش ظرفیت الکترواستاتیکی و با افزایش فاصله گپ جریان‌های خیلی کم با هر پتانسیلی منجر به ایجاد جرقه شده و حفره‌هایی کوچک‌تر و کم عمق‌تر ایجاد می‌شود. نتیجه این‌که با افزایش نرخ ماشین‌کاری سطوح صاف‌تری ایجاد می‌گردد [۲۷].

روند مشاهده شده در شکل ۱۱ با شکل ۱۲ متفاوت است، در شکل ۱۱ کمترین زبری سطح برای فرآیند EDM معمولی است، این موضوع به خاطر انرژی پایین جرقه‌ها در شدت جریان ۱۲ آمپر است که باعث شده فرکانس جرقه‌های سالم کمتر شده و با کمتر شدن جدایش ماده از سطح قطعه‌کار منجر به صافی سطح بهتری می‌گردد. بارزترین تأثیر ذرات اضافه شده به دی‌الکتریک را می‌توان بالابردن صافی سطح همزمان با افزایش نرخ براده‌برداری است در حالی‌که اکثر روش‌هایی که برای بالابردن نرخ براده‌برداری در فرآیند EDM استفاده می‌گردد منجر به ایجاد سطوحی با زبری سطح بالا می‌گردد.



شکل ۱۲ تأثیر حالت‌های مختلف فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی زبری سطح در شدت جریان‌های متفاوت (زمان روشنی پالس ۴۰۰ میکروثانیه)



شکل ۱۰ تأثیر حالت‌های مختلف فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی فرسایش نسبی ابزار در شدت جریان‌های متفاوت (زمان روشنی پالس ۴۰۰ میکروثانیه)

بیشتر شدن سایش نسبی ابزار در سایر فرآیندها در شکل ۱۰ مربوط به تأثیری است که هر کدام از آن‌ها بر روی افزایش MRR داشته و در نتیجه طبق رابطه (۲) باعث کاهش TWR می‌گردد.

۳-۲- بررسی تأثیر حالت‌های مختلف فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی صافی سطح

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نتایج مربوط به زبری سطح را نشان می‌دهد. همان‌طوری که از هر دو شکل ملاحظه می‌گردد اعمال ارتعاشات آلتراسونیک به ابزار باعث افزایش زبری سطح شده است، از جمله دلایل آن را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

در حین اعمال ارتعاشات آلتراسونیک، به واسطه شستشوی بهتر گپ و افزایش انرژی ذرات پلاسما، انرژی هر جرقه بیشتر می‌گردد و در نتیجه حجم مذاب به ازای هر پالس جرقه بیشتر شده و در اثر جوشش حجمی مقدار بیشتری از مذاب به بیرون چاله پرتاب می‌گردد این امر باعث می‌گردد عمق چاله‌ها بعد از انجماد بیشتر شده و در نتیجه زبری سطح قطعات ماشین‌کاری شده در USEDMM نسبت به EDM بیشتر می‌گردد [۲۶]؛ و این برای فرآیندهای که در آن‌ها ذرات نانو پودر در دی الکتریک وجود دارد صادق بوده و حتی مقدار تأثیر ارتعاشات با وجود این ذرات بیشتر هم می‌گردد؛ چرا که با اعمال ارتعاشات آلتراسونیک ذرات موجود در دی الکتریک سرعت و شتاب بیشتری گرفته و به سمت قطعه‌کار پرتاب شده و تکانه ناشی از این حرکات ماده مذاب بیشتری از چاله مذاب به بیرون می‌اندازد و بر عمق آن‌ها افزوده و زبری را بیشتر می‌کند [۲۳].

با توجه به سرعت و شتاب حرکت ابزار در اثر ارتعاش آلتراسونیک بسیار زیاد است، این حرکات به‌عنوان یک پمپ عمل کرده و سبب افزایش حرکت سیال در گپ می‌شود، و در کوتاه‌ترین زمان دی‌الکتریک تازه جایگزین دی الکتریک آلوده در گپ می‌گردد این عوامل سبب می‌شوند شرایط لازم برای تولید جرقه‌های آرک و اتصال کوتاه در گپ ماشین‌کاری از بین می‌رود، و بر تعداد پالس‌های نرمال افزوده می‌شود، بنابراین پالس‌های سالم و با انرژی بالا منجر به ایجاد چاله‌های عمیق در سطح شده و زبری آن را بیشتر می‌کند.

در هر دو فرآیند USEDMM (با پودر و بدون پودر) ابزار با فرکانس معادل ۲۰ kHz نوسان می‌کند در این فرآیندها در هر سیکل که ابزار به سمت بالا می‌رود، موجب می‌شود نرخ افت فشار در مقایسه با EDM بدون ارتعاشات بیشتر شود و مقدار مذاب بیشتری به بیرون از چاله پرتاب گردد در نتیجه باعث افزایش عمق چاله‌ها و در نتیجه افزایش صافی سطح گردد [۲۶].

۴- نتیجه‌گیری

- ۱- افزودن نانوذرات و اعمال ارتعاشات آلتراسونیک ابزار در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی باعث، افزایش نرخ براده‌برداری می‌گردد، بیشترین نرخ براده‌برداری در شرایط ماشین‌کاری جریان ۴۸ آمپر و زمان روشنی پالس ۱۰۰ μ s اتفاق می‌افتد.
- ۲- افزودن همزمان پودر و اعمال ارتعاشات آلتراسونیک اثر یکدیگر را تقویت کرده، در این شرایط افزایش نرخ براده‌برداری بیشتر از مجموع شرایطی است، که هر دو پارامتر بصورت جداگانه باعث افزایش آن می‌گردد.
- ۳- تاثیر اعمال ارتعاشات آلتراسونیک ابزار و افزودن نانوذرات SiO₂ به دی الکتریک بر روی سایش نسبی ابزار و همچنین اثرات ناشی از اعمال همزمان آن‌ها بر TWR بستگی به شرایط ماشین‌کاری (شدت جریان تخلیه و زمان روشنی پالس) دارد.
- ۴- ارتعاش ابزار با فرکانس بالا در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی باعث افزایش زبری سطح می‌گردد، همچنین اعمال همزمان ارتعاشات به ابزار و افزودن نانوپودر به دی الکتریک موجب افزایش بیشتر زبری سطح می‌گردد.
- ۵- بارزترین تاثیر ذرات اضافه شده به دی الکتریک بالا بردن صافی سطح همزمان با افزایش نرخ براده‌برداری است.

۵- مراجع

- [17] D. Kremer, J.L. Lebrun, B. Hosari, A. Moisan, Effects of Ultrasonic Vibrations on the Performances in EDM, *Annals of the CIRP*, Vol. 38, No. 1, pp. 199-202, 1989.
- [18] C. Praneetpong, Y. Fukuzawa, S. Nagasawa, K. Yamashita, Effects of the Edm Combined Ultrasonic Vibration on the Machining Properties of Si₃N₄, *Materials Transactions*, Vol. 51, No. 11, pp. 2113-2120, 2010.
- [19] A. Abdullah, M.R. Shabgard, Effect of ultrasonic vibration of tool on electrical discharge machining of cemented tungsten carbide (WC-Co), *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 38, pp. 1137-1147, 2008.
- [20] M. Ghoreishi, J. Atkinson, A comparative experimental study of machining characteristics in vibratory, rotary and vibro-rotary electro-discharge machining, *Journal of material processing technology*, Vol. 120, pp. 374-384, 2002.
- [21] M.R. SHABGARD, H. KAKOLVAND, M.S. SEYEDZAVVAR, R.M. SHOTORBANI, Ultrasonic assisted EDM: Effect of the workpiece vibration in the machining characteristics of FW4 Welded Metal, *Frontiers of Mechanical Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 419-428, 2011.
- [22] G.S. Prihandana, M. Mahardika, M.Hamdi, Y.S. Wong, K. Mitsui, Effect of micro-powdersuspension and ultrasonic vibration of dielectric fluid in micro-EDM processes-Taguchi approach, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, pp. 1035-1041, 2009.
- [23] G.S. Prihandana, M. Mahardika, M.Hamdi, Y.S. Wong, K. Mitsui, Accuracy improvement in nanographite powder-suspended dielectric fluid for micro-electrical discharge machining processes, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 56, pp. 143-149, 2011.
- [24] D.D. Dibitonto, P.T. Eubank, M.R. Patel, M.A. Barrufet, Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple cathode erosion model, *Journal of Applied Physics*, Vol. 66, pp. 4095-4103, 1989.
- [25] J. Marafona, Black layer characterisation and electrode wear ratio in electrical discharge machining (EDM), *Journal of material processing technology*, Vol. 184, pp. 27-31, 2007.
- [26] M. Shabgard, B. Khosrozadeh, B. Sadizadeh, H. Kakoulvand, Comparative Study of the effect of ultrasonic vibration of workpiece in the electrical discharge machining (EDM), *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 12, pp. 48-55, 2013. (In Persian)
- [27] H. Kumar, Development of mirror like surface characteristics using nanopowder mixed electric discharge machining (NPMEDM), *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 76, No. 1-4, pp. 105-113, 2015.
- [1] L. Gu, L. Li, W. Zhao, K.P. Rajurkar, Electrical discharge machining of Ti6Al4V with a bundled electrode, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 53, pp. 100-106, 2012.
- [2] G. Kibria, B.R. Sarkar, B.B. Pradhan, Comparative study of different dielectrics for micro-EDM performance during micro hole machining of Ti-6Al-4V alloy, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 48, pp. 557-570, 2010.
- [3] M. Rahman, Y.S. Wong, A.R. Zareena, Machinability of titanium alloys, *JSME International Journal, Series C*, Vol. 46, No. 1, pp. 107-115, 2010.
- [4] A.V.S Ram Prasad, K. Ramji, G.L. Datta, An Experimental Study of Wire EDM on Ti-6Al-4V Alloy, *Procedia Materials Science*, Vol. 5, pp. 2567-2576, 2014.
- [5] A. Hascalik, U. Caydas, Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V), *Applied Surface Science*, Vol. 253, pp. 9007-9016, 2007.
- [6] H.K. Kansal, S. Singh, P. Kumara, Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining by response surface methodology, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 169, pp. 427-436, 2005.
- [7] Z.N. Guo, T.C. Lee, T.M. Yue, W. S. Lau, A Study of Ultrasonic-aided Wire Electrical Discharge Machining, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 63, pp. 823-828, 1997.
- [8] H. Yasar, B. Ekmekci, Ti-6Al-4V Surfaces in SiC Powder Mixed Electrical Discharge Machining, *Advanced Materials Research*, Vol. 865, pp. 226-230, 2014.
- [9] F. Hu, H. Zhang, W. Zhao, Z. Wang, D. Hu, Y. Yu, Surface Properties of 3000°C High Melting Point Material by Powder Mixed EDM, *Key Engineering Materials*, Vol. 375-376, pp. 143-147, 2008.
- [10] R.A. Prajapati, H. Patel, Experimental Investigation of Powder mix EDM using Silicon Dioxide as a Powder additive for Surface Roughness, *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, Vol. 2, No. 1, pp. 28-34, 2025.
- [11] M.P. Jahan, M. Rahman, Y.S. Wong, Study on the nano-powder-mixed sinking and milling micro-EDM of WC-Co, *International Journal of advanced Manufacturing Technology*, Vol. 53, pp. 167-180, 2011.
- [12] M. Saboktakin, G. R. Razavi, M. Ostadmohamadi, A.R. Havaie, Optimization Electro Discharge Machining of Ti-6Al-4V Alloy With Silicon Carbide Powder Mixed, *Advanced Materials Research*, Vol. 566, pp. 466-469, 2012.
- [13] M.L. Jeswani, Effect Of The Addition Of Graphite Powder To Kerosene Used As The Dielectric Fluid In Electrical Discharge Machining, *Wear*, Vol. 70, pp. 133-139, 1981.
- [14] B. Ekmekci, Y. Ersoz, How Suspended Particles Affect Surface Morphology in Powder Mixed Electrical Discharge Machining (PMEDM), *Metallurgical And Materials Transactions B*, Vol. 43B, pp. 1138-1148, 2012.
- [15] J. Zhixin, Z. Jianhua, A. Xing, Study On A New Kind Of Combined Machining Technology Of Ultrasonic Machining And Electrical Discharge Machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 37, No. 2, pp. 193-199, 1997.
- [16] Y.C. Lin, B.H. Yan, Y.S. Chang, Machining characteristics of titanium alloy (Ti-6Al-4V) using a combination process of EDM with USM, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 70, pp. 104-171-177, 2000.