مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1395، دوره 16، شماره 2، ص‌ص 41-50

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه مقایسه‌ای تأثیر افزودن نانوپودر به دی‌الکتریک برروی پارامترهای خروجی و سلامت سطح آلیاژ Ti-6Al-4V در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی

محمدرضا شبگرد[1*]، بهنام خسروزاده[2]

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

* تبریز، صندوق پستی 5166616471، mrshabgard@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 24 آذر 1394

پذیرش: 15 دی 1394

ارائه در سایت: 06 بهمن 1394

کلید واژگان:

EDM

نانوپودر

سلامت سطح

تیتانیوم

چکیده

آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V یکی از پرکاربردترین آلیاژهای صنعتی است که بیشترین استفاده را در صنایع مهم و پر مخاطره دارد، یکی از ملزومات ماشین‌کاری چنین قطعاتی، دستیابی به سلامت سطح مناسب است. ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با استفاده از ذرات معلق در دی الکتریک، فرایندی است که مکانیسم آن با فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سنتی متفاوت است و اغلب به منظور دستیابی به صافی سطح مناسب در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی از آن استفاده می‌شود. در این مطالعه دو نوع نانوپودر اکسید سیلسیم و اکسید آلومینیوم به سیال دی الکتریک، در فرایند ماشین‌کاری آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V اضافه می‌گردد، تا تأثیر افزودن آنها بر روی مشخصه‌های خروجی فرایند تخلیه الکتریکی از جمله نرخ براده‌برداری، سایش نسبی ابزار و صافی و سلامت سطح مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد. سطح نمونه‌های ماشین‌کاری شده و سطح مقطع برش خورده آنها با میکروسکوپ الکترونی روبشی عکس‌برداری شده تا اندازه و توزیع میکروترک‌های سطحی و عمق لایه متاثر از حرارت مطالعه گردد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانوپودرها بویژه نانوپودر اکسید سیلسیم باعث افزایش نرخ براده‌برداری شده، تأثیر نانوذرات بر روی فرسایش نسبی ابزار به تنظیمات و شرایط ماشین‌کاری بستگی دارد. تأثیر نانوپودر اکسید سیلسیم بر روی افزایش صافی سطح بیشتر از نانوپودر اکسید آلومینیوم می‌باشد، سلامت سطح ماشین‌کاری شده از لحاظ وجود میکروترک‌ها و عمق لایه تغییر یافته در اثر حرارت، با افزودن نانوذرات بهبود یافته است.

Comparative study of adding nanopowders in dielectric effects on outputs and surface integrity of Ti-6Al-4V alloy in Electrical Discharge Machining

Mohammadreza Shabgard*, Behnam Khosrozadeh

Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran.
* P.O.B. 5166616471 Tabriz, Iran, mrshabgard@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 15 December 2015
Accepted 05 January 2016
Available Online 26 January 2016

Keywords:
EDM
Nano powder
Surface integrity
Titanium

ABSTRACT

Titanium alloy Ti-6Al-4V is one of the most used industrial alloys, often employed in important and risky applications. One of the requirements for machining such parts is to achieve the appropriate surface integrity. Powder mixed electrical discharge machining is a process which has different mechanisms compared with traditional electrical discharge machining process; it is often used in order to obtain good surface finish. In this study two different kinds of Nano powders, SiO2 and Al2O3 were added in dielectric for machining of Ti-6Al-4V titanium alloy so that the effect of adding them on the output characteristics of the electric discharge process, including removal rate, tool wear ratio, surface roughness and integrity is investigated and compared. In order to investigate surface micro cracks and heat altered layer, surface and cross section of it were studied by scanning electron microscopy imaging. The results show addition of Nano powders into dielectric, especially SiO2, increases material removal rate, the effect of Nano powders on tool wear ratio depends on machining condition and setting. SiO2 Nano powder decreases surface roughness more than Al2O3 Nano powder. Surface integrity of machined sample in terms of micro-cracks and depth of the heat altered layer is improved with the addition of nanoparticles.

1- مقدمه

ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی[1] یک از پرکاربردترین روش‌های ماشین‌کاری غیر سنتی است که در صنایع مختلف به ویژه صنعت قالب‌سازی و ابزارسازی کاربرد زیادی دارد [1]. این روش ساخت تقریبا به یک روش استاندارد برای ساخت قطعات و محصولات استفاده شده در نمونه‌سازی سریع و برخی دیگر از روش‌های تولید، بویژه در مقیاس پایین تولید، تبدیل شده است [2]. در این روش جرقه یا تخلیه های الکتریکی بین ابزار و قطعه کار، در یک فاصله

1- Electrical Discharge Machining (EDM)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. Shabgard, B. Khosrozadeh, Comparative study of adding nanopowders in dielectric effects on outputs and surface integrity of Ti-6Al-4V alloy in Electrical Discharge Machining, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 16, No. 2, pp. 41-50, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-26]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.9.4]

حداقلی بین آنها اعمال می‌شود، در این حالت هیچگونه تماس مکانیکی بین آنها وجود ندارد و در نتیجه ماشین‌کاری در ابعاد بسیار کوچک در این روش میسر بوده و مشکلاتی مانند ارتعاش و تنش های مکانیکی به حداقل می‌رسد.

باوجود روش براده‌برداری پیشرفته‌ای که در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی وجود دارد، کاربرد آن بویژه در شرایطی که با نرخ براده‌برداری زیادی همراه است، با محدودیت‌ها و مشکلاتی همراه است. به علت ترموالکتریکی بودن مکانیسم براده‌برداری در این فرایند، منطقه متأثر از حرارت که از چندین لایه مختلف تشکیل شده است، در سطح قطعه کار ایجاد می‌گردد. در سطح خارجی قطعه کار لایه دوباره منجمد شده‌ای (لایه سفید) پدید می‌آید که حاصل سطح ذوب شده‌ای است که از حفره مذاب به بیرون پرتاب نشده و مجددا در سطح قطعه انجماد یافته است؛ این لایه سخت و شکننده با ترک‌های ریز و حفره‌هایی همراه است و مواد تشکیل دهنده آن از مواد مذاب حفره، مواد منتقل شده از ابزار و براده های داخل دی الکتریک است [3]. ماهیت حرارتی فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی مستقیما بر خواص شیمیایی، فیزیکی و ریزساختار لایه سطحی قطعه کار تأثیر گذاشته، در نهایت عملکرد قطعه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این اثرات در کاربردهایی مانند قالب‌های تزریق که با سایش مکانیکی و شیمیایی همراه هستند اهمیت بیشتری پیدا می‌کند [4]. به منظور برطرف کردن مشکلات ناشی در این زمینه و تأمین نیازهای در حال توسعه که شامل تولید قطعات دقیق با حداقل زبری سطح و مقاومت کافی سایشی و شیمیایی است، بخش وسیعی از تحقیقات و توسعه فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به بهبود کیفیت سلامت سطح[1] اختصاص می‌یابد.

یکی از نوآوری‌های جدید در زمینه بهبود قابلیت‌های فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی افزودن پودر به سیال دی الکتریک می‌باشد، که به این فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر[2] اطلاق می‌گردد [6,5]. در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر ذرات پودری رسانا یا نیمه رسانا به سیال دی الکتریک افزوده شده تا قابلیت ماشین‌کاری فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی را از طریق کاهش استحکام دی الکتریک و افزایش فاصله گپ بین الکترودها، افزایش دهد. در این حالت خصوصیات مربوط به شکست دی‌الکتریک تغییر کرده و خروجی‌های فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی مانند نرخ براده‌برداری، سایش نسبی ابزار و صافی سطح بهبود می‌یابند، که این موضوع به علت افزایش پایداری فرایند، در نتیجه شستشوی بهتر محصولات ماشین‌کاری در فاصله گپ بزرگتر است [2].

عصارزاده و قریشی تأثیر افزودن پودر اکسید آلومینیوم[3] به دی‌الکتریک را بر روی خروجی‌های فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی فولاد ابزار CK 45 مطالعه کرده‌اند. پودر های اکسید آلومینیوم در اندازه 50 و 45 میکرومتر در غلظت‌های 2.8 و 2.5 گرم بر لیتر به دی‌الکتریک پایه نفتی افزوده شده است. آنها گزارش داده‌اند که افزودن پودر اکسید آلومینیوم به دی‌الکتریک در شرایط ماشین‌کاری جریان و زمان روشنی پالس کم، باعث تولید سطوح بسیار صافی می‌شود. همچنین وجود این ذرات باعث عریض‌تر شدن گپ ماشین‌کاری شده که این امر موجب شستشوی بهتر می‌شود؛ درحالی که افزایش فاصله گپ در اثر افزایش ولتاژ ماشین‌کاری باعث ناپایداری فرایند می‌شود [7].

اکمکچی و ارسوز نحوه تأثیر پودر کاربید سیلیسیم[4] بر روی توپوگرافی و ساختار سطح فولاد ماشین‌کاری شده را بررسی کرده‌اند. بر این اساس نتایج نشان می‌دهد که ذرات پودری اطراف ستون پلاسما در داخل سطح ماشین‌کاری شده نفوذ کرده و مانع پیشرفت ترک‌های عمقی می‌شوند در حالی که تأثیری روی ترک‌های سطحی ندارند [8].

چو و هکارانش پودرهای کاربید سیلسیم و آلومینیوم را به دی‌الکتریک پایه نفتی فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ تیتیانیوم اضافه کرده‌اند. افزودن هر دو پودر باعث افزایش طول ستون اسپارک شده و در نتیجه براده ها بهتر از این ناحیه تخلیه می‌شوند؛ همچنین نرخ براده‌برداری افزایش یافته است [9].

قریشی و اسدی افزایش صافی سطح قطعات ماشین‌کاری شده با روش ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر را تأیید کرده و همچنین افزوده‌اند که می‌توان با جریان‌های پالس بالاتر که موجب افزایش نرخ براده‌برداری می‌شود، صافی سطح را در حد مورد نظر نگه داشت؛ در حالی که بدون افزودن پودر این موضوع میسر نمی‌باشد [10].

چن و همکارانش ساختار سطحی آلیاژ تیتانیوم الکتریکی سنتی و تخلیه الکتریکی به همراه پودر تیتانیوم افزوده شده به دی الکتریک را در جریانهای پایین جرقه، با هم مقایسه کرده اند. مطابق تحقیقات آنها، با افزودن پودر تیتانیوم با غلظت 3 گرم بر لیتر به دی الکتریک آب دی‌یونیزه ترک‌های سطحی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و در غلظت 6 گرم بر لیتر ترکی در سطح مشاهده نمی‌گردد [11].

کومار و باترا سلامت سطح فولاد ابزار را با استفاده از پودر تنگستن و فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی اصلاح کرده‌اند. طبق این نتایج معلوم گردید که در شرایط مشخص ماشین‌کاری مقادیر قابل توجهی تنگستن موجود در دی‌الکتریک به سطح قطعه کار انتقال می‌یابد و بهبود خواص سطح با این روش امکان‌پذیر است. آلیاژسازی سطحی قطعه کار با تنگستن و کربن حاصل از تجزیه دی‌الکتریک موجب افزایش صد درصدی میکروسختی سطح شد [12].

جانمانی و موتامارا با استفاده از پودر تیتانیوم و تعیین شرایط ماشین‌کاری مناسب لایه‌ای روی قطعه تنگشتن کاربابد ایجاد کرده‌اند، این لایه متشکل از کربن و تیتانیوم بوده و ترک‌های بسیار محدودی در آن مشاهده شده، همچنین سختی سطح از 990 HV به 1750 HV رسیده که نزدیک به سختی تیتانیوم کاربابد است [13].

پری هاندانا و همکاران میکرو ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ نقره تنگستن را با نانوپودر گرافیت در دی‌الکتریک انجام داده‌اند. نتایج آنها بیان می‌کند که در این حالت زمان ماشین‌کاری 35% کاهش می‌یابد و دقت ماشین‌کاری بهبود می‌یابد. به علت توزیع یکنواخت جرقه‌ها میکروترک‌های سطح ماشین‌کاری نیز به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [14].

آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V یکی از پرکاربردترین آلیاژهای صنعتی است که در صنایعی مانند خودروسازی، هوافضا و زیست پزشکی و غیره کاربرد فراوانی دارد. خواص منحصر به فرد آن مانند نسبت استحکام به وزن بالا، قابلیت کارکرد در دماهای بالا، مقاومت بالا در مقابل خوردگی و خستگی، خواص خزشی مناسب و قابلیت کامپوزیتی و زیست سازگاری می‌باشد. به خاطر محدودیت‌های ماشین‌کاری این آلیاژ با روش‌های ماشین‌کاری سنتی، از فرایندهای ماشین‌کاری پیشرفته مانند ماشین‌کاری لیزر، ماشین‌کاری الکتروشیمیایی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی برای ماشین‌کاری آن استفاده می‌شود [15].

1- Surface Integrity
2- Powder Mixed Electrical Discharge Machining (PMEDM)
3- Al2O3
4- SiC

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.9.4]

باوجود تحقیقات صورت گرفته در خصوص تأثیر پودرهای افزوده شده به دی‌الکتریک، تحقیق جامعی در خصوص بررسی تأثیر پودرها با خواص متفاوت بر روی پارامترهای خروجی فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و علی‌الخصوص سلامت سطح قطعات تولیدی انجام نگرفته است؛ در این مطالعه تأثیر افزودن نانوپودرهای اکسید سیلسیم[1] و اکسید آلومینیوم به دی‌الکتریک در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V مورد بررسی قرار گرفته است تا اثرات پودرها با خواص متفاوت روی نرخ براده‌برداری، سایش نسبی ابزار، صافی سطح، ترک‌های سطحی و عمق لایه متأثر از حرارت مورد تجزیه تحلیل قرار گیرد.

2- مواد و روش‌ها

نمونه‌های استفاده شده برای انجام عملیات ماشین‌کاری از آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V ساخته شدند. نمونه‌ها در ارتفاع 10 mm از میلگردهای تیتانیوم به قطر 20 mm به وسیله دستگاه برش سیمی[2] بریده شدند. در آخرین مرحله آماده‌سازی، سطح قطعات سنگ‌زنی شدند. ابزار استفاده شده از جنس فلز مس بود که از میلگردهای مسی به قطر 10 mm با عملیات تراش‌کاری تهیه شدند. ترکیب درصد عناصر آلیاژی قطعه کار و مشخصات فیزیکی و مکانیکی قطعه کار و ابزار به ترتیب در جدول‌های 1 و 2 ارائه شده است.

آزمایش‌های ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با دستگاه اسپارک شارمیلز روبوفرم[3] 200 با مولد ایزوپالس انجام شد. به منظور کنترل فرآیند و مقایسه شکل پالس‌ها 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 شکل‌های 1 و 2 نشان داده شده است.

آزمایش‌های ماشین‌کاری طبق اصول طراحی آزمایشات و براساس مدل طرح عاملی کامل[4]، 4 سطح جریان پالس، 4 سطح زمان روشنی پالس، 3 سطح سیال (دی الکتریک با و بدون نانوپودرهای اکسید سیلسیم و اکسید آلومینیوم) انجام شدند. هر آزمایش دو بار انجام شد و میانگین خروجی آنها در نظر گرفته شد. برخی از مشخصات مهم و تأثیرگذار نانوپودرها در فرایند EDM در جدول 3 نشان داده شده است. سایر متغیرهای ورودی و پارامترهای تنظیمی آزمایش‌ها و دستگاه اسپارک در جدول 4 آورده شده است.

جدول 1 ترکیب درصد عناصر تشکیل دهنده آلیاژ Ti-6Al-4V

Table 1 Chemical composition of Ti-6Al-4V alloy in %

Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
89.464	6.08	4.02	0.22	0.18	0.02	0.01	0.0053

جدول 2 خواص فیزیکی و مکانیکی قطعه کار و ابزار

Table 2 Physical and mechanical properties of work piece and tool materials

خواص مکانیکی	Ti-6Al-4V	Cu
هدایت حرارتی	6.7 W/mK	401 W/mK
مدول الاستیک	113 GPa	110 GPa
نقطه ذوب	1660 °c	1084 °c
مقاومت الکتریکی	178 μΩ.cm	16.78 μΩ.cm
چگالی	4.43 g/cm^3	8.9 g/cm^3

1- SiO2
2- Wire cut
3- Charmilles Roboform 200
4- Full factorial

وزن قطعات قبل و بعد از هر آزمایش توسط ترازوی دیجیتالی (با دقت 0.0001g) اندازه‌گیری شده و با استفاده از رابطه (1) نرخ براده‌برداری محاسبه شد.

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

در این رابطه MRR[5] مقدار نرخ براده‌برداری (mm^3/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/cm^3) است.

فرسایش نسبی ابزار TWR[6] 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 میلی‌متر مکعب مشخص شده و از تقسیم این مقدار بر حجم مواد

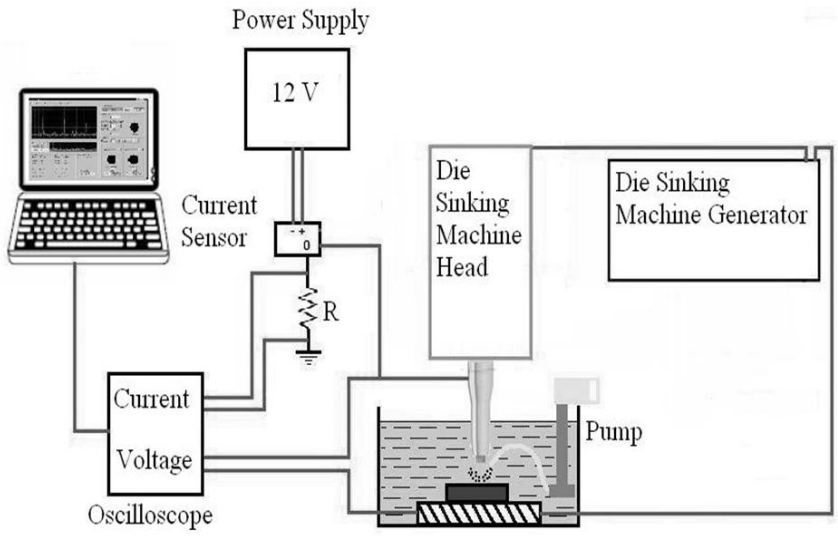

Fig. 1 Schematic set up of experiments

شکل 1 تجهیزات و تنظیمات مربوط به انجام آزمایش‌ها

Fig. 2 picture of used equipment for Experimental tests

شکل 2 تصویر تجهیزات استفاده شد برای انجام آزمایشهای ماشین‌کاری

جدول 3 برخی از مشخصات فیزیکی موثر در فرایند EDM نانوپودرها

Table 3 Some of Effective physical properties of Nano powders in EDM

نانو پودر	مقاومت الکتریکی (μΩcm)	رسانایی حرارتی (W/cmK)	چگالی (gr/cm^3)
Al_2O_3	10^3	1.5-2	2.9
SiO_2	10^8-10^{12}	1.3	2.4

5- Material Removal Rate
6- Tool Wear Ratio

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.9.4]

جدول 4 متغیرهای ورودی و پارامترهای تنظیمی دستگاه اسپارک

Table 4 Input variables and process parameters of spark

متغیر	سطح آزمایش
زمان روشنی پالس (µS)	400, 100, 25, 6.4
شدت جریان (A)	48, 24, 12, 6
زمان خاموشی پالس (µS)	6.4
ولتاژ مدار باز (v)	200
فاصلهٔ گپ (µm)	50
نوع دی الکتریک	روغن فلاکس الف[1]

برداشته شده از قطعه کار، میزان فرسایش نسبی ابزار از روی رابطه (2) به دست می‌آید. در این رابطه TRR[2] نرخ سایش حجمی ابزار و MRR نرخ براده برداری از قطعه کار است.

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

برای اندازه‌گیری صافی سطح نمونه‌های ماشین‌کاری شده از دستگاه اندازه‌گیری صافی سطح استفاده شد؛ عدد اندازه‌گیری شده میانگین 3 داده اندازه گرفته شده از سطح نمونه‌ها بود که در راستاهای مختلف از سطح اندازه‌گیری شده بود.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی تأثیر افزودن نانوپودرها بر روی شکل پالس‌ها

شکل پالس‌های تولیدی در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی در شکل 3-A نمایش داده شده است؛ در قسمت پایین این شکل پالس‌ها در مدت زمان طولانی تری نشان داده شده و یک قسمت از پالس‌ها به صورت بزرگنمایی شده در بالای تصویر آورده شده است همانطور که از قسمت پایین این شکل معلوم می‌شود، پالس‌ها نامنظم بوده و پالس‌های مدار باز زیادی در آن مشاهده می‌گردد، با توجه به یکسان نبودن شکل پالس‌ها انرژی آزاد شده از آنها هم مشابه هم نبوده و این امر موجب از بین رفتن کیفیت سطح تولید شده و عدم یکنواختی آن می‌شود. با توجه به اینکه پالس‌های غیر مفید و مزاحم در این فرایند بیشتر است، زمان اتلاف شده نیز در ماشین‌کاری بیشتر شده و از نرخ براده‌برداری می‌کاهد. پالس‌های تولید شده در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر با نانوپودرهای اکسید سیلسیم و اکسید آلومینیوم به ترتیب در شکل‌های 3-B و 3-C نشان داده شده است.

با توجه به این تصاویر شکل پالس‌های تولیدی بسیار منظم‌تر بوده و زمان تأخیر جرقه در هر دو شکل به صورت قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با شکل 3-A کمتر شده و پالس‌های مزاحم و غیر مفید در ماشین‌کاری علی الخصوص در شکل 3-B با پودر اکسید سیلسیم به حداقل رسیده‌اند. این موضوع به دلیل افزایش فاصله گپ در حضور نانو ذرات است که با کاهش استحکام شکست دی‌الکتریک و آسانتر شدن شکست دی‌الکتریک، تخلیه ها در گپ بزرگتری رخ داده و براده ها و عوامل ناپایدار کننده فرایند به راحتی از این محل دور شده و پایداری ماشین‌کاری را بیشتر می‌کند [16]. این امر موجب افزایش بازده ماشین‌کاری شده و با کاهش زمان‌های تلف شده در ماشین‌کاری و افزایش زمان‌های براده‌برداری باعث بیشتر شدن نرخ براده‌برداری می‌گردد. همچنین پالس‌های حاصل از فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر با نانوپودرهای اکسید سیلسیم منظم‌تر از فرایند با

1- Oil Flux ELF
2- Tool Removal Rate

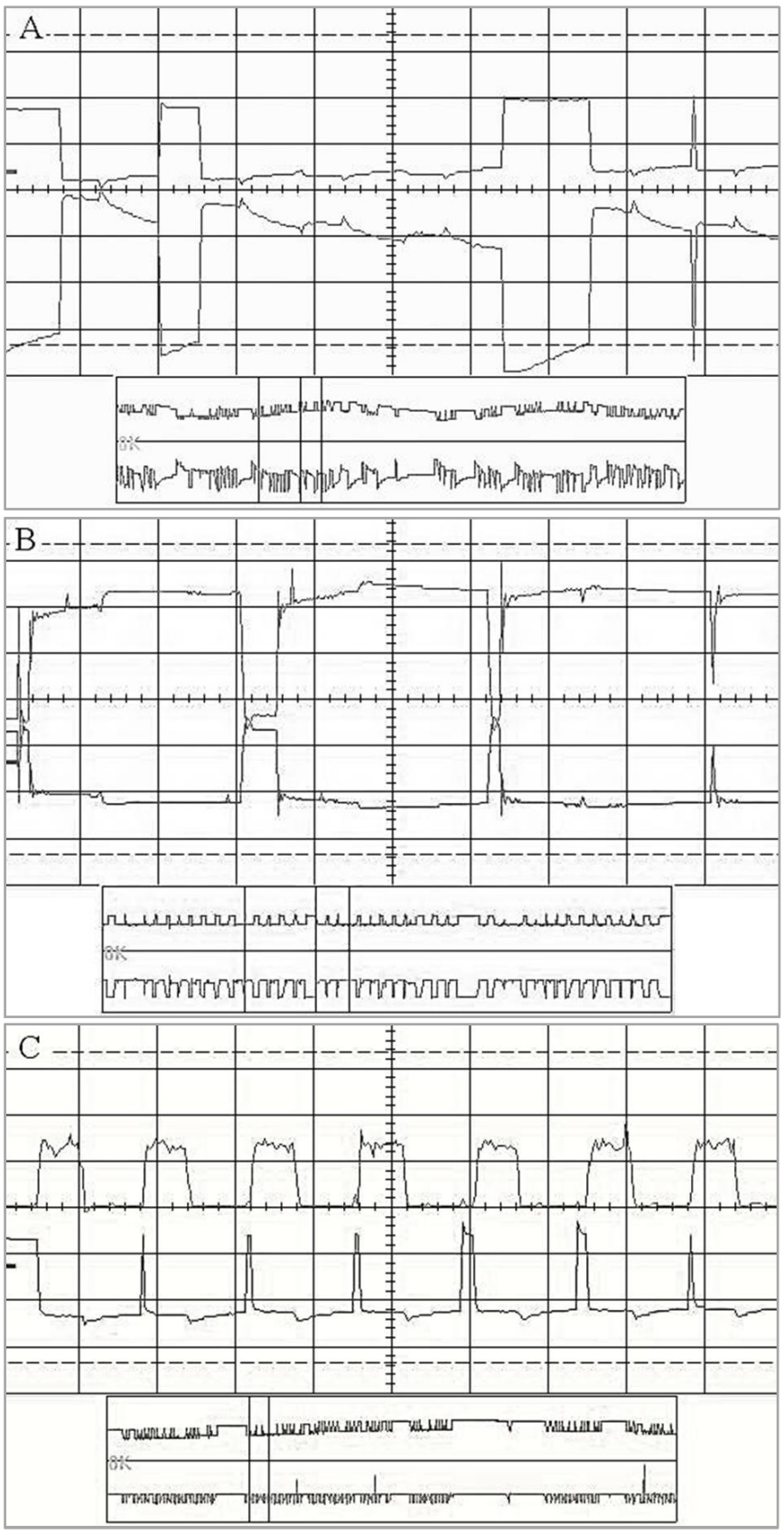

Fig. 3 Shape of pulses produced in processes A) EDM B) PMEDM with SiO_2 powder C) PMEDM with Al_2O_3 powder

شکل 3 شکل پالس‌های تولید شده در فرایندهای A) EDM B) PMEDM با پودر اکسید سیلسیم C) PMEDM با پودر اکسید آلومینیوم

پودرهای اکسید آلومینیوم می‌باشد که این موضوع به علت چگالی کمتر و توزیع بهتر نانوپودرهای اکسید سیلسیم در کانال پلاسما است. اثرات چندین جرقه در یک پالس تخلیه الکتریکی به وضوح در شکل‌های 3-B و 3-C قابل رویت است که این پدیده باعث توزیع انرژی تک جرقه بین جرقه‌های مختلف شده و باعث بهبود کیفیت سطح می‌شود [17].

3-2- بررسی تأثیر افزودن نانوپودرها بر روی نرخ براده‌برداری

شکل 4-A و 4-B تأثیر افزودن نانوپودرهای اکسید سیلسیم و اکسید آلومینیوم را بر روی نرخ براده‌برداری به ترتیب در مقابل زمان روشنی پالس و جریان پالس نشان می‌دهد. همانطور که از شکل 4-A ملاحظه می‌شود، با افزایش زمان روشنی پالس به دلیل افزایش انرژی جرقه‌ها نرخ براده‌برداری در هر سه فرایند افزایش می‌یابد. اما در زمان‌های روشنی پالس طولانی‌تر به علت

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.9.4]

تجمع محصولات ماشین‌کاری در گپ و ناپایدار شدن ماشین‌کاری نرخ براده‌برداری افزایشی نداشته و حتی در برخی فرایندها کاهش هم داشته است.

همچنین با افزایش زمان پالس قطر کانال پلاسما زیاد شده و تمرکز انرژی در سطح کم شده و در نتیجه اندازه چاله‌ها کمتر می‌شود که منجر به کاهش نرخ براده‌برداری می‌شود.

افزودن هر دو نانوپودر باعث افزایش نرخ براده‌برداری شده است، (در شکل 4-A نانوپودر اکسید سیلسیم نرخ براده‌برداری را 30 درصد و نانوپودر اکسید آلومینیوم آن را 15 درصد افزایش می‌دهد و در شکل 4-B نانوپودر اکسید سیلسیم 20 درصد و نانوپودر اکسید آلومینیوم 10 درصد، نرخ براده‌برداری را افزایش می‌دهد) که به دلایل کاهش زمان تأخیر جرقه در اثر کاهش استحکام شکست دی‌الکتریک، به حداقل رسیدن جرقه‌های آرک و اتصال کوتاه به علت افزایش فاصله گپ و شستشوی بهتر گپ می‌باشد. در هر دو شکل تأثیر ناپودر اکسید سیلسیم بر افزایش نرخ براده‌برداری بشتر از نانوپودر اکسید آلومینیوم است که به علت سنگین‌تر بودن و بیشتر بودن

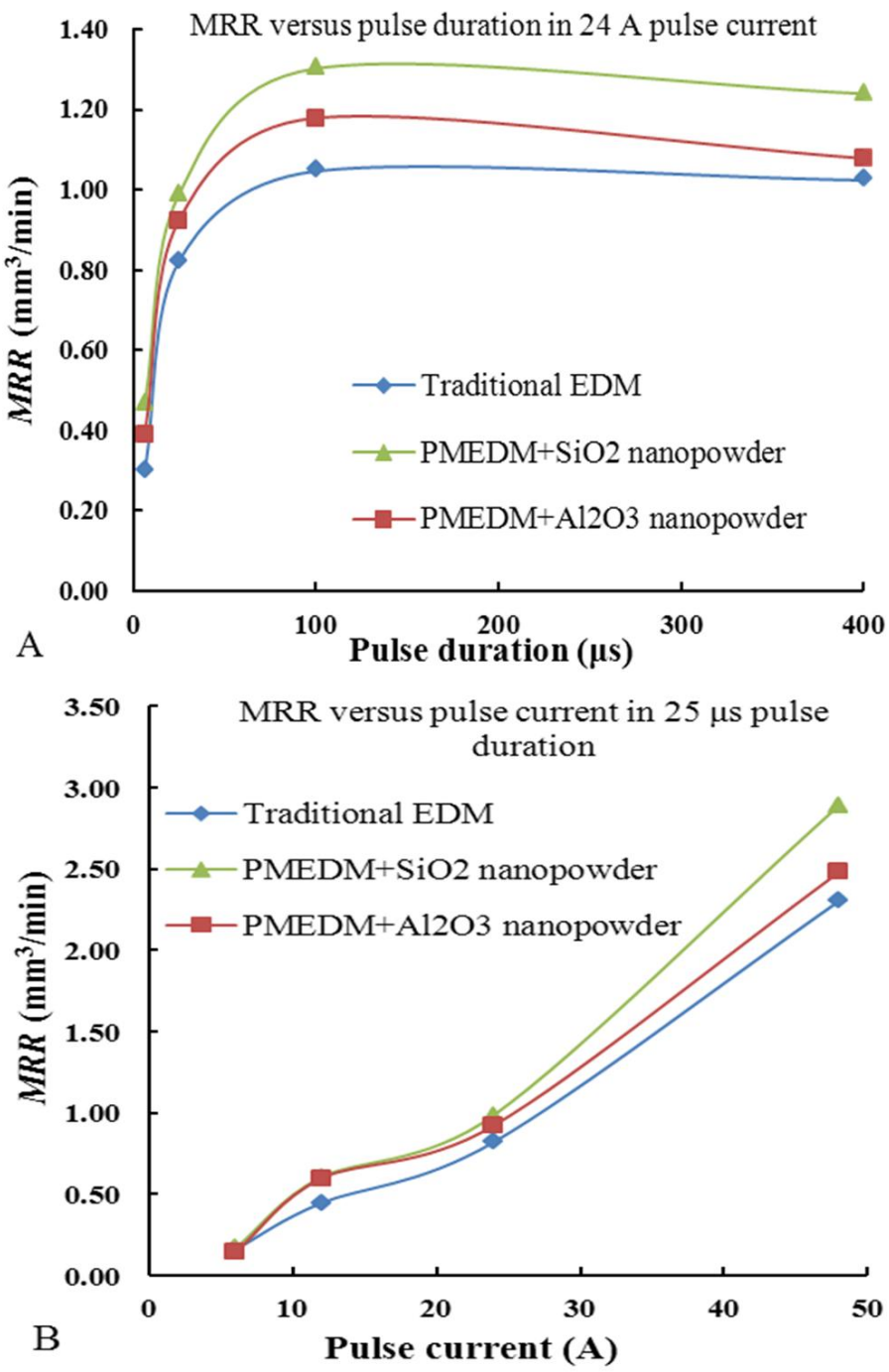

Fig. 4 Material removal rate of EDM and PMEDM processes A) versus pulse duration in 24 A pulse current B) versus pulse current in 25 micro second pulse duration

شکل 4 نرخ براده‌برداری فرایندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر با پودرهای مختلف A) در مقابل زمان روشنی پالس در جریان تخلیه 24 آمپر B) درمقابل جریان پالس در زمان روشنی پالس 25 میکروثانیه

چگالی نانوپودر اکسید آلومینیوم نسبت به نانوپودر اکسید سیلسیم می‌باشد که نمی‌تواند توزیع بهتری در گپ ماشین‌کاری داشته باشد و سریع‌تر ته‌نشین می‌شود؛ همچنین هدایت حرارتی نانوپودر اکسید آلومینیوم نیز از اکسید سیلسیم بالاتر بوده در نتیجه مقدار بیشتری از حرارت کانال پلاسما را به دی‌الکتریک انتقال می‌دهد، این دو عامل باعث می‌شود نرخ براده‌برداری در حضور نانوپودر اکسید سیلسیم بیشتر از اکسید آلومینیوم شود.

3-3- بررسی تأثیر افزودن نانوپودرها بر روی سایش نسبی ابزار

سایش نسبی ابزار در مقابل زمان روشنی پالس و جریان تخلیه به ترتیب در شکل‌های 5-A و 5-B آورده شده است. از روی شکل 5-A مشخص می‌شود بیشترین نرخ سایش نسبی ابزار مربوط به فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر با نانوپودر اکسید سیلسیم می‌باشد (تقریبا افزایش 90 درصدی نسبت به فرایند بدون پودر)، و کمترین مقدار مربوط به فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی است؛ علت این امر اثر این ذرات بر روی افزایش نرخ براده‌برداری است که در بخش 3-2 ذکر شد، همان مکانیسم باعث افزایش مواد جدا شده از ابزار می‌شود، و نرخ سایش نسبی ابزار را افزایش می‌دهد [18].

روند مشاهده شد در خصوص تأثیر نانوپودرها بر روی سایش نسبی ابزار در شکل 5-A با شکل 5-B متفاوت است و در شکل 5-B در ابتدای نمودار افزودن نانوپودرها باعث کاهش سایش نسبی ابزار شده است. این پدیده به این دلیل است که در شرایط مذکور، ماشین‌کاری در شدت جریان 6 آمپر انجام شده و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی معمولی به‌دلیل کم بودن شدت جریان و فاصله کم ابزار و قطعه کار پایدار نبوده، پالس‌های ایجاد شده کم انرژی بوده و با توجه به فاصل کم گپ ماشین‌کاری، بیشتر از نوع آرک و اتصال کوتاه هستند، در نتیجه مواد چندانی از قطعه کار برداشته نشده و باتوجه به رابطه (2) سایش نسبی ابزار بیشتر می‌شود.

اما با افزودن نانوپورها اولا استحکام شکست دی‌الکتریک کمتر شده، زمان تاخیر جرقه‌ها کاهش می‌یابد و در شدت جریان‌های پایین هم تخلیه‌ها انجام می‌شوند. ثانیا کانال پلاسما توسعه یافته و عرض گپ تخلیه الکتریکی بیشتر می‌شود که باعث زدوده شدن بهتر آلودگی‌ها از محل جرقه‌ها شده و پالس‌های غیر مفید به حداقل می‌رسند. هر دو پارامتر مذکور نرخ براده‌برداری را افزایش داده در نتیجه سایش نسبی ابزار کم می‌گردد (کاهش 45 درصدی و 75 درصدی سایش نسبی ابزار با حضور نانوپودرهای اکسید سیلسیم و اکسید آلومینیوم به ترتیب) [20,19].

4-3- بررسی تأثیر افزودن نانوپودرها بر روی صافی سطح

شکل‌های 6-A و 6-B نتایج مربوط به زبری سطح را نشان می‌دهد. همانطور که در هر دو شکل ملاحظه می‌شود، افزودن نانوپودرهای اکسید سیلسیم و اکسید آلومینیوم به دی‌الکتریک باعث کاهش زبری سطح شده است، از جمله دلایل آن را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

وجود نانوپودرها در سیال دی‌الکتریک باعث بازتر و عریض‌تر شدن کانال پلاسما می‌شود، 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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.9.4]

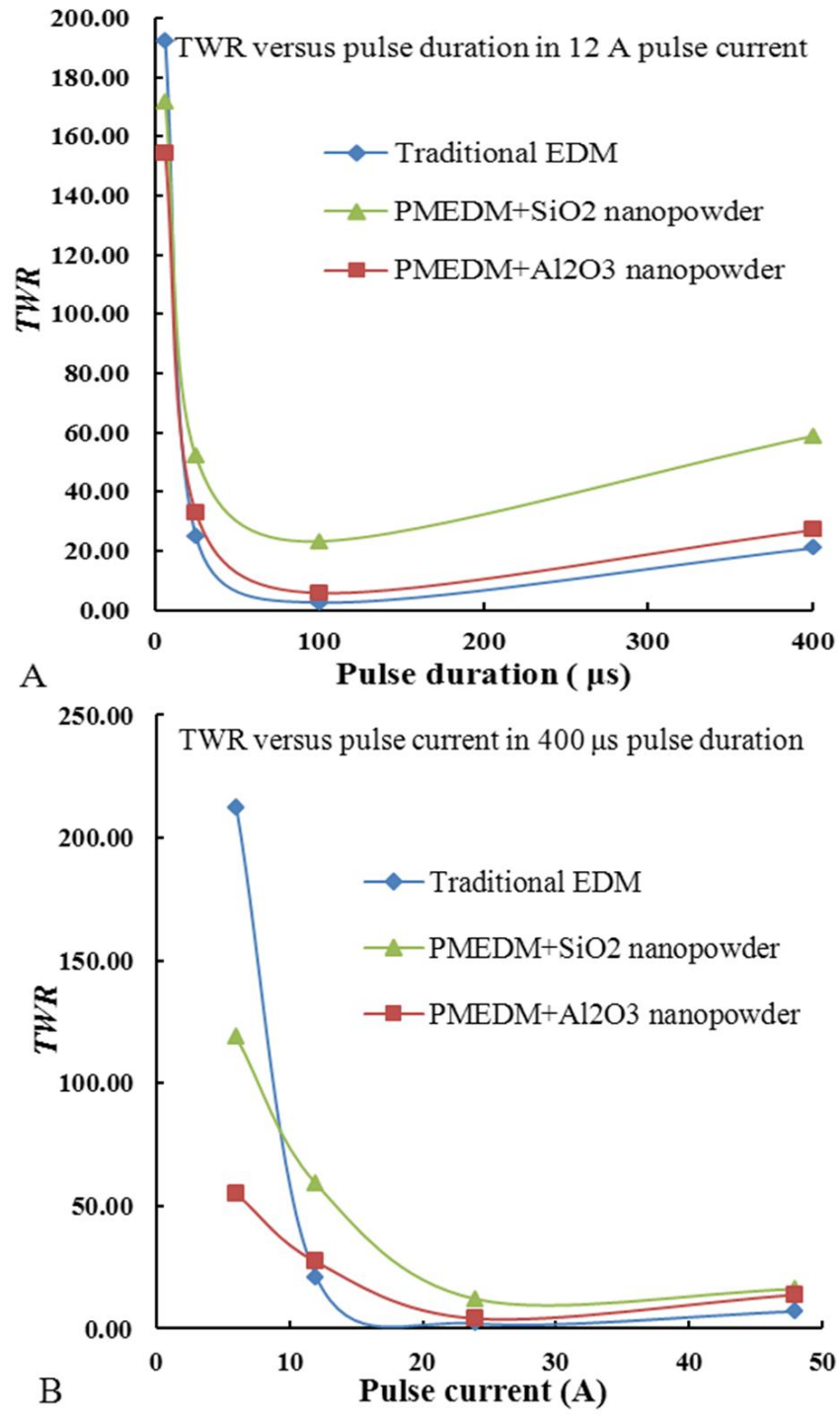

Fig. 5 Tool wear ratio of EDM and PMEDM processes A) versus pulse duration in 12 A pulse current B) versus pulse current in 400 micro second pulse duration

شکل 5 سایش نسبی ابزار فرایندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر با پودرهای مختلف A) در مقابل زمان روشنی پالس در جریان تخلیه 12 آمپر B) درمقابل جریان پالس در زمان روشنی پالس 400 میکروثانیه

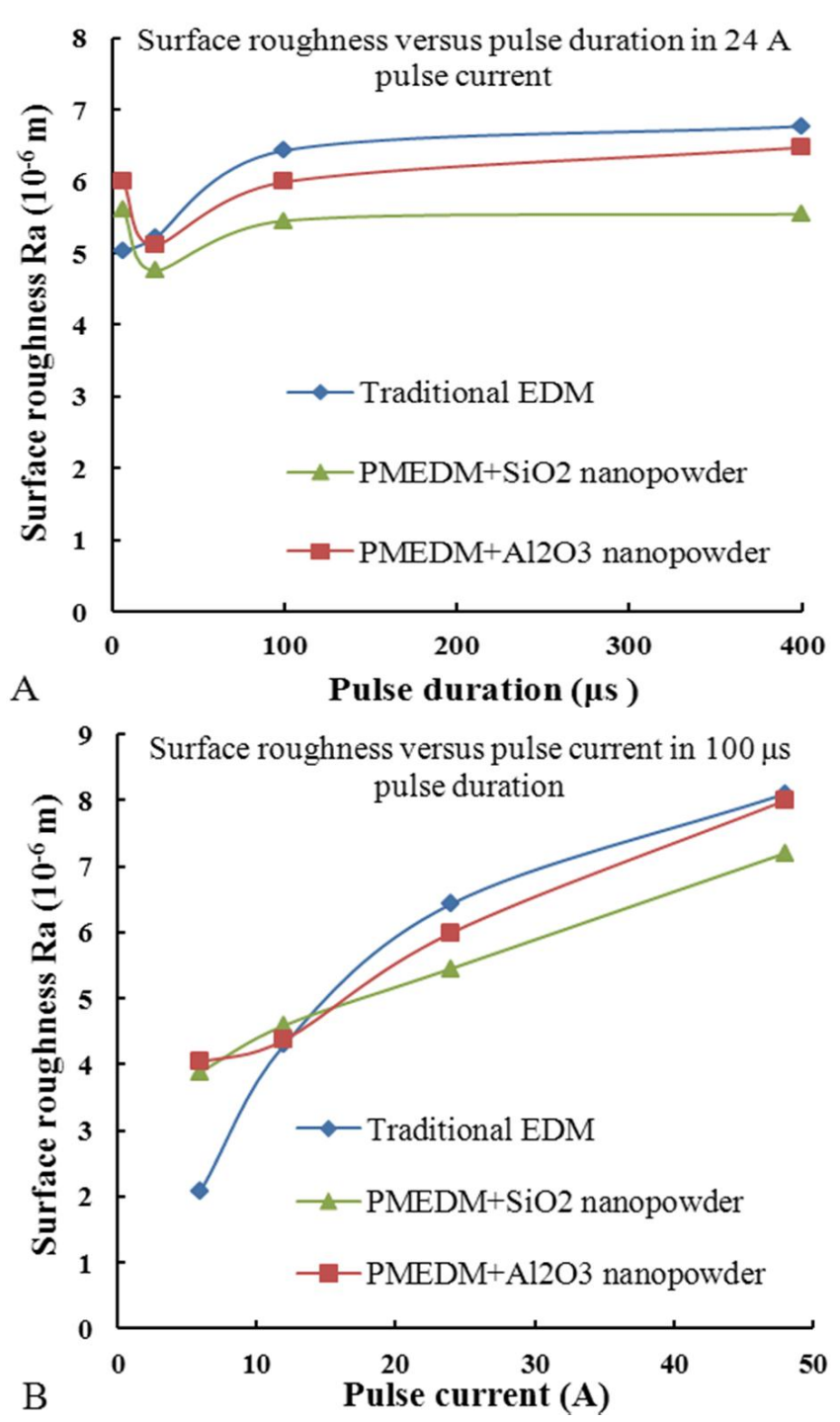

Fig. 6 Surface roughness of EDM and PMEDM processes A) versus pulse duration in 24 A pulse current B) versus pulse current in 100 micro second pulse duration

شکل 6 زبری سطوح حاصله در فرایندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر با پودرهای مختلف A) در مقابل زمان روشنی پالس در جریان تخلیه 24 آمپر B) درمقابل جریان پالس در زمان روشنی پالس 100 میکروثانیه

ایجاد می‌شود [21,18].

با افزودن نانوذرات به دی‌الکتریک استحکام شکست دی‌الکتریک کمتر شده و در یک ولتاژ مدار باز ثابت شروع تخلیه‌های الکتریکی در فواصل گپ بزرگتری رخ می‌دهد، این پدیده باعث شستشو و تمیزی بهتر گپ ماشین‌کاری شده و احتمال رخداد پالس‌های مضر مانند اتصال کوتاه و آرک کمتر می‌شود با توجه به تأثیر منفی این پالس‌ها بر صافی سطح، با کاهش آنها بر کیفیت و صافی سطح افزوده می‌شود [22,21]. افزودن نانوپودر اکسید سیلسیم 14 درصد و اکسید آلومینیوم 4 درصد زبری سطح را کاهش می‌دهد (بدون در نظر گرفتن داده‌های اولیه نمودار که در آن شرایط ناپایدار می‌باشد و افزودن نانوپودرها صافی سطح را افزایش می‌دهد). پروفیل سطوح تولید شده در این فرایندها در شکل 7 ارائه شده است و تأثیر نانوپودرها در افزایش صافی سطح در این تصاویر کاملا آشکار است.

در هر دو شکل 6-A و 6-B رفتار منحنی ها در ابتدای نموارها با بقیه نقاط آن متفاوت است؛ در شکل 6-A در مدت زمان روشنی پالس 6.4 میکروثانیه صافی سطح نمونه ماشین‌کاری شده با ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی معمولی صافتر از موارد دیگر است.

این موضوع را به این صورت می‌توان توضیح داد که با توجه به زمان روشنی پالس کم یونیزاسیون دی‌الکتریک اتفاق نیفتاده و براده‌برداری چندانی رخ نمی‌دهد؛ در این شرایط افزودن نانوپودرها باعث افزایش پایداری فرایند از طریق کاهش استحکام شکست دی‌الکتریک شده و باعث افزایش تعداد جرقه-های موثر در این زمان کم روشنی پالس می‌شود و به تبع آن زبری سطح بیشتر می‌شود.

در شکل 6-B نیز در ماشین‌کاری با ولتاژ 6 ولت همین اتفاق رخ می‌دهد چرا که در این حالت فاصله گپ بسیار کم بوده و امکان جدایش و تمیزی براده‌ها در این فاصله امکان پذیر نیست بنابراین ماشین‌کاری چندانی رخ نمی‌دهد وجود نانوپودرها در این وضعیت باعث افزایش طول کانال پلاسما شده و ماشین‌کاری را امکان پذیر می‌کند در نتیجه در مقایسه با دی‌الکتریک بدون پودر، صافی سطح بدتر می‌گردد.

با توجه به شکل‌های 6-A و 6-B تأثیر نانوپودر اکسید سیلسیم برروی افزایش صافی سطوح بیشتر از نانوپودر اکسید آلومینیوم می‌باشد این موضوع

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.9.4]

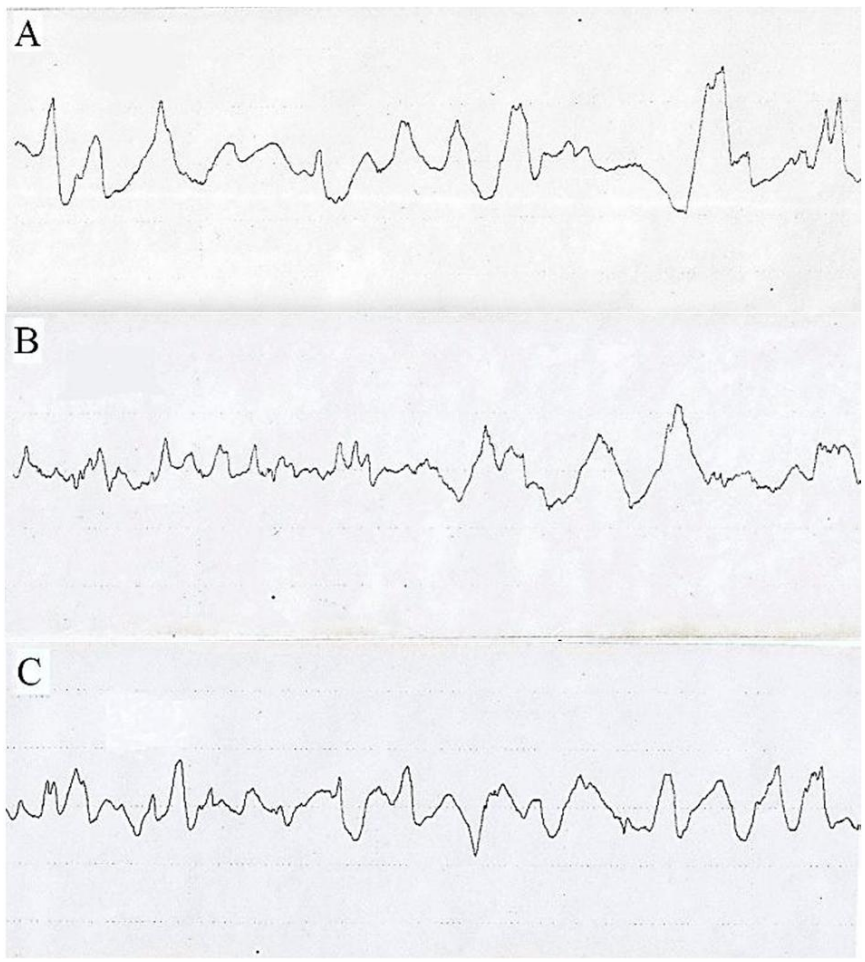

Fig. 7 Profiles of produced surfaces in A) EDM B) PMEDM with SiO_2 powder C) PMEDM with Al_2O_3 powder

شکل 7 پروفیل سطوح تولید شده تولید شده در فرایندهای A) ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی B) ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با پودر اکسید سیلسیم C) ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با پودر اکسید آلومینیوم

در اثر پایین بودن چگالی نانوپودر اکسید سیلسیم است که در فضای بین دو الکترود بهتر معلق شده و حتی در زمانهای روشنی پالس طولانی‌تر هم نسبت به نانوپودر اکسید آلومینیوم کمتر ته نشین می‌شود. در شکل 6-B اختلاف بین نمودارهای مربوط به این دو پودر بیشتر شده که ناشی از رسوب نانوپودر اکسید آلومینیوم در فضای بین ابزار و قطعه کار است.

5-3- بررسی تأثیر افزودن نانوپودرها بر روی ترک‌های سطحی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطح نمونه‌های ماشین‌کاری شده با فرایندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی معمولی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر با نانوپودرهای اکسید سیلسیم و اکسید آلومینیوم در شکلهای 8-A، 8-B و 8-C به ترتیب آورده شده است.

یکی از ویژگی‌های مهم سلامت سطح قطعات تولیدی وجود ترک‌های سطحی است، اندازه و تعداد ترک‌های ریز سطحی در سطوح تولید شده توسط فرایندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر متفاوت می‌باشد؛ همچنین خصوصیات پودرهای مورد استفاده در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر بر روی این ترک‌ها تأثیرگذار است.

با توجه به این تصاویر بزرگترین میکروترک‌های ایجاد شده مربوط به فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی است، افزودن نانوپودرها باعث کاهش اندازه و تعداد ترک‌های سطحی شده است که کوچکترین ترک‌ها مربوط به فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر اکسید سیلسیم است. افزودن نانوپودرها در دی‌الکتریک باعث افزایش فرکانس جرقه‌ها شده و تعداد جرقه‌های زیادی با انرژی پایین‌تر در ستون پلاسما ایجاد می‌شود [14]. همچنین ذرات اضافه شده به دی‌الکتریک باعث افزایش طول و عرض کانال پلاسما می‌شود. به علت افزایش جرقه‌های کم انرژی، انرژی الکتریکی به

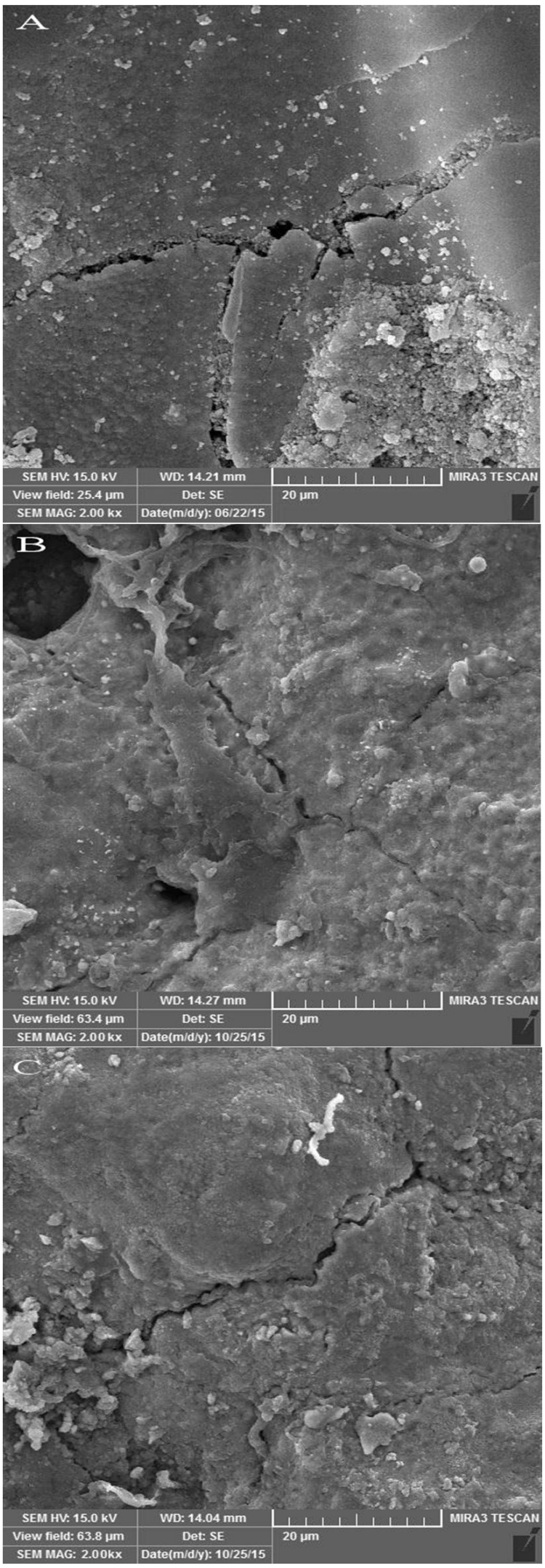

Fig. 8 SEM micrograph of produced surfaces in processes A) EDM B) PMEDM with SiO_2 powder C) PMEDM with Al_2O_3 powder

شکل 8 تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطوح حاصل از فرایندهای A) ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی B) ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با پودر اکسید سیلسیم C) ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با پودر اکسید آلومینیوم (زمان روشنی پالس 25 میکروثانیه، شدت جریان 48 آمپر)

صورت یکنواخت‌تری بر روی سطح تخلیه، توزیع شده و انرژی حرارتی بر سطح بزرگتری پخش می‌شود. به علت موارد ذکر شده تنش‌های حرارتی و انقباضهای انجمادی کاهش یافته و موجب کاهش طول و تعداد ترک‌های

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.9.4]

سطحی می‌گردد [23]. سطوح نشان داده شده در تصاویر 8-B و 8-C که به ترتیب با ذرات اکسید سیلسیم و اکسید آلومینیوم معلق در دی‌الکتریک ماشین‌کاری شده‌اند، تفاوت چندانی از لحاظ میکروترک‌ها با هم ندارند. تفاوت جزئی که بین این دو تصویر وجود دارد بزرگتر بودن ترک‌های مربوط به فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر با نانوپودر اکسید آلومینیوم می‌باشد که به احتمال زیاد در اثر تعلیق نامناسب این ذرات نسبت به ذرات اکسید سیلسیم در فضای دی‌الکتریک می‌باشد که به علت چگالی بالای آن ذرات است؛ در این شرایط با ته‌نشین شدن نانوذرات اثرات ذکر شده برای آنها در کاهش میکروترک‌ها کمتر می‌شود.

6-3- بررسی تأثیر افزودن نانوپودرها بر روی عمق لایه تغییر یافته[1] ازحرارت

بعد از فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی لایه‌ای در سطح ماشین‌کاری شده ایجاد می‌شود که خواص شیمیایی و متالوژیکی آن در اثر حرارت اعمال شده از تخلیه‌های الکتریکی تغییر می‌یابد. این لایه شامل لایه ذوب مجدد[2] و لایه متأثر از حرارت[3] می‌باشد. در این لایه خیلی سخت و شکننده به دلیل غیریکنواختی فازهای تشکیل دهنده، میکروترک‌هایی ظاهر می‌شوند [25,24]. لایه ذوب مجدد لایه بیرونی بوده که در اثر انرژی ناشی از جرقه‌ها ذوب شده است ولی به بیرون از چاله مذاب پرتاب نشده و دوباره انجماد یافته است. لایه ذوب مجدد دارای سختی بالایی بوده ، اتصال محکمی با ماده پایه داشته و مقاومت خوردگی خوبی دارد، اما این لایه زبری سطح را افزایش داده، باعث می‌شود سطح سخت و شکننده شده و استحکام خستگی نمونه را به دلیل وجود ترک‌ها و خلل و فرج ریز در سطح، کاهش می‌دهد [26].

تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقاطع برش خورده نمونه‌های ماشین‌کاری شده با فرایندهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی معمولی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر با نانوپودرهای اکسید سیلسیم و اکسید آلومینیوم به ترتیب در شکل‌های 9-A، 9-B و 9-C ارائه شده است.

از روی این تصاویر به وضوح قابل مشاهده است که لایه تغییر یافته در اثر حرارت در تصویر 9-A مربوط به فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی معمولی بیشرین ضخامت را نسبت به سایر فرایندها دارد، همچنین ضخامت لایه مذکور در مقایسه با دو تصویر دیگر غیر یکنواخت‌تر است. کمترین ضخامت و یکنواخت ترین لایه تغییر یافته در اثر حرارت مربوط به فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر اکسید سیلسیم می‌باشد.

کاهش ضخامت و یکنواخت‌تر شدن لایه تغییر یافته در اثر حرارت را با افزودن نانوذرات، می‌توان به این صورت بیان کرد، با افزایش طول و قطر ستون تخلیه که در اثر حضور نانوذرات در دی‌الکتریک است، هرکدام از جرقه‌های پر انرژی به چندین جرقه کم انرژی تبدیل می‌شوند و انرژی کانال پلاسما در سطح بزرگتری پخش می‌شود، بنابراین با کاهش انرژی وارد شده به سطح قطعه عمق ناحیه ذوب شده و تأثیر دیده از حرارت کاهش می‌یابد و لایه ذوب مجدد هم نازکتر می‌شود [20].

افزودن نانوپودرها باعث تغییر خواص الکتریکی دی‌الکتریک شده و زمان تاخیر جرقه‌ها را کمتر می‌کند، بنابراین مقدار انرژی انباشته شده در هر جرقه قبل از تخلیه کمتر می‌گردد و انرژی اعمال شده به سطح کاهش می‌یابد، در نتیجه عمق لایه متأثر از حرارت کمتر می‌شود [27]. همچنین افزایش رسانایی حرارتی سیال دی‌الکتریک با افزودن نانوپودرها دلیل دیگری است که

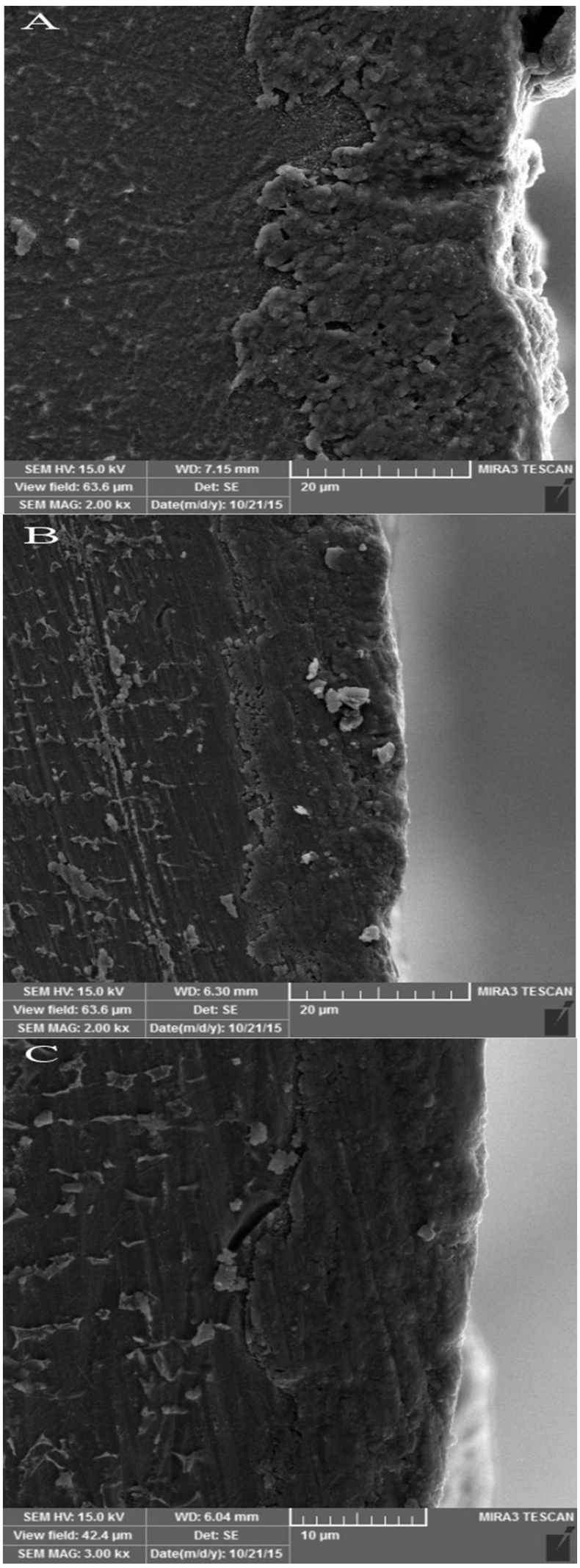

Fig. 9 SEM micrograph of cross section of produced surfaces in processes A) EDM B) PMEDM with SiO_2 powder C) PMEDM with Al_2O_3 powder

شکل 9 تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع برش خورده نمونه‌های حاصل از فرایندهای A) ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی B) ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با پودر اکسید سیلسیم C) ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با پودر اکسید آلومینیوم (زمان روشنی پالس 25 میکروثانیه، شدت جریان 48 آمپر)

منجر به کاهش ضخامت لایه تغییر یافته در اثر حرارت می‌گردد، در این حالت کسر بیشتری از حرارت کانال پلاسما به سیال دی‌الکتریک منتقل شده

1- Heat Altered Layer
2- Recast Layer
3- Heat Affected Zone

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.9.4]

و سهم انرژی انتقال یافته به قطعه ماشین‌کاری کم می‌شود، بنابراین ضخامت لایه متأثر از حرارت کاهش می‌یابد.

با مقایسه تصاویر 9-B و 9-C مشاهده می‌شود لایه تغییر یافته در اثر حرارت ناشی از فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر اکسید سیلسیم بسیار یکنواخت‌تر و نازکتر از فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر اکسید آلومینیوم می‌باشد؛ این پدیده نیز می‌تواند ناشی از عدم پخش مناسب ذرات اکسید آلومینیوم به علت چگالی بالای آن در کانال پلاسما باشد. با استفاده از نانوپودر اکسید سیلسیم در طول زمان روشنی پالس توزیع مناسب ذرات در این محیط پایدار بوده و با تبدیل همه جرقه‌های بزرگ پر انرژی به جرقه‌های کوچکتر کم انرژی و توزیع یکنواخت انرژی در سطح، لایه تغییر یافته ناشی از حرارت حداقل ضخامت را داشته و بسیار یکنواخت‌تر می‌شود.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر افزودن نانوپودرهای اکسید سیلسیم و اکسید آلومینیوم به دی‌الکتریک در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V مورد بررسی قرار گرفته، نتایج حاصل را در موارد زیر می‌توان خلاصه کرد:

- پالس‌های تولید شده در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی همراه شده با نانوپودرهای اکسید سیلسیم و اکسید آلومینیوم در مقایسه با فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سنتی بسیار منظم بوده و زمان تأخیر جرقه و پالس‌های مزاحم و غیر مفید در ماشین‌کاری علی الخصوص با پودر اکسید سیلسیم به حداقل رسیده‌اند.
- افزودن نانوپودرها به دی‌الکتریک در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی باعث افزایش نرخ براده‌برداری می‌شود، مقدار افزایش نرخ براده‌برداری با پودر اکسید سیلسیم در مقایسه با پودر اکسید آلومینیوم بیشتر است.
- تأثیر افزوذن نانوپودرهای اکسید سیلسیم و اکسید آلومینیوم بر روی سایش نسی ابزار به شرایط و پارامترهای ماشین‌کاری (شدت جریان جرقه و زمان روشنی پالس) بستگی دارد، اما در شرایط پایدار ماشین‌کاری اضافه کردن پودرها سایش نسبی ابزار را بیشتر می‌کند.
- صافی سطوح تولید شده در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر با نانوپودرهای اکسید سیلسیم و اکسید آلومینیوم بیشتر از فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سنتی است، تأثیر نانوپودر اکسید سیلسیم بر افزایش صافی سطح بیشتر از نانوپودر اکسید آلومینیوم می‌باشد. بارزترین تأثیر نانوذرات اضافه شده به دی الکتریک بالابردن صافی سطح همزمان با افزایش نرخ براده‌برداری است.
- افزودن نانوپودرها باعث کاهش اندازه و تعداد میکروترک‌های سطحی می‌شود. کوچکترین ترک‌های ایجاد شده مربوط به فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه نانوپودر اکسید سیلسیم است.
- لایه تغییر یافته ناشی از حرارت در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی سنتی غیر یکنواخت‌تر و دارای ضخامت بیشتری نسبت به فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه پودر است. وجود نانوپودرهای اکسید سیلسیم و اکسید آلومینیوم در دی‌الکتریک باعث نازکتر شدن این لایه می‌شود، که کمترین ضخامت و یکنواخت‌ترین لایه تغیر یافته در اثر حرارت مربوط به فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به همراه نانوپودر اکسید سیلسیم می‌باشد.

5- مراجع

[1] K. L. Wu, B. H. Yan, F. Y. Huang, S. C. Chen, Improvement of surface finish on SKD steel using electro–discharge machining with aluminium and surfactant added dielectric. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, No. 10, pp. 1195–1201, 2005.

[2] Z. M. Zain, M. B. Ndaliman, A. A. Khan, M. Y. Ali, Improving micro-hardness of stainless steel through powder-mixed electrical discharge machining, *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 228, No. 18, pp. 3374–3380, 2014.

[3] A. Molinetti, F. L. Amorim, P. C. Soares Jr, T. Czelusniak, Surface modification of AISI H13 tool steel with silicon or manganese powders mixed to the dielectric in electrical discharge machining process, Accessed on 6 August 2015; *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-015-7613-1.

[4] F. Klocke, The process sequence in tool and die-making, *Proceedings of the XII International Symposium for Electromachining*, pp. 65-97, Aachen, Germany, 1998.

[5] Y. F. Tzeng, C. Y. Lee, Effects of powder characteristics on electro discharge machining efficiency. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 17, No. 8, pp. 586–592, 2001.

[6] A. Kumar, S. Masheshwari, C. Sharma, N. Beri, Research developments in additives mixed electrical discharge machining (AEDM): a state of art review, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 25, pp. 1166–1180, 2010.

[7] S. Assarzadeh, M. Ghoreishi, A dual response surface-desirability approach to process modeling and optimization of Al2O3 powder-mixed electrical discharge machining (PMEDM) parameters, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 64, No. 9, pp. 1459-1477, 2013.

[8] 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.

[9] H. M. Chow, B. H. Yan, F. Y. Huang, J. C. Hung, Study of added powder in kerosene for the micro-slit machining of titanium alloy using electro-discharge machining, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 101, No.1-3, pp. 95-103, 2000.

[10] M. Ghoreishi, M. Asadi, investigation of the influence of different added powders in dielectric on machining parameters of electrical discharge machining (EDM), *sixth conference of production and manufaction engineering of Iran*, Tehran, Iran 1-4 day, 1382. (in persian فارسی)

[11] S. L. Chen, M. H. Lin, K. H. Huang, C. C. Wang, Research of the recast layer on implant surface modified by micro-current electrical discharge machining using deionized water mixed with titanium powder as dielectric solvent, *Applied Surface Science*, Vol. 311, pp. 47-53, 2014.

[12] S. Kumar, U. Batra, Surface modification of die steel materials by EDM method using tungsten powder-mixed dielectric, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 14, No. 35-40, 2012.

[13] P. Janmanee, A. Muttamara, Surface modification of tungsten carbide by electrical discharge coating (EDC) using a titanium powder suspension, *Applied Surface Science*, Vol. 258, No. 19, pp. 7255–7265, 2012.

[14] 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, No. 1, pp. 143–149, 2011.

[15] G. Kibria, B. R. Sarkar, B. B. Pradhan, B. Bhattacharyya, Comparative study of different dielectrics for micro-EDM performance during microhole machining of Ti-6Al-4V alloy, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 48, No. 5, pp. 557-570, 2010.

[16] W. S. Zhao, Q. G. Meng, Z. L. Wang, The application of research on powder mixed EDM in rough machining, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 129, No. 1-3, pp. 30-33, 2002.

[17] M. S. Han, B. K. Min, S. J. Lee, Improvement of surface integrity of electro-chemical discharge machining process using powder-mixed electrolyte, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191, No. 1-3, pp. 224–227, 2007.

[18] K. Y. Kung, J. T. Horng, K. T. Chiang, Material removal rate and electrode wear ratio study on the powder mixed electrical discharge machining of cobalt-bonded tungsten carbide, *International Jpurnal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 40, No. 1, pp.95–104, 2009.

[19] T. Y. fong, C. 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, No. 1-2, pp. 385–39, 2005.

[20] Y. Zhang, Y. Liu, Y. Shen, R. Ji, B. Cai, H. Li, F. Wang, A Review of the Current Understanding and Technology of Powder Mixed Electrical Discharge Machining (PMEDM), *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, August 5 - 8, 2012, Chengdu, China.

[21] 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.

[22] P. Peças, E. Henriques, Effect of the powder concentration and dielectric flow in the surface morphology in electrical discharge machining with powder-mixed dielectric (PMD-EDM), *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 37, No. 11, pp. 1120–1132, 2008.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-26]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.9.4]

[23] Q. Y. Ming, L. Y. He, Powder-suspension dielectric fluid for EDM, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 52, No. 1, pp. 44-54, 1995.

[24] M. Manohar, T. Selvaraj , D. Sivakumar, S. Gopinath, K. M. George, Experimental study to assess the effect of Electrode bottom profiles while machining Inconel 718 through EDM Process, *3rd International Conference on Materials Processing and Characterisation* (ICMPC 2014)*:* Procedia Materials Science, Vol. 6, pp. 92-104, 2014.

[25] Y. S. Liao, J. T. Huang, Y. H. Chen, A study to achieve a fine surface finish in Wire-EDM, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 149, No. 1-3, pp. 165–171, 2004.

[26] M. J. Haddad, A. F. Tehrani, Material removal rate (MRR) study in the cylindrical wire electrical discharge turning (CWEDT) process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 199, pp. 369–378, 2008.

[27] Y. Wang, F. Zhao, Y. Liu, Behaviors of Suspended Powder in Powder Mixed EDM, *Key Engineering Materials*, Vol. 375-376, pp. 36-41, 2008.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-26]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.9.4]