



بررسی تاثیر همزمان ارتعاشات فراصوتی ابزار و میدان مغناطیسی خارجی بر یکپارچگی سطح ماشینکاری شده در فرآیند EDM

محمد رضا شبگرد^{1*}، احد قلی پور²، موسی محمد پور فرد³

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

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

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

* mrshabgard@tabrizu.ac.ir 5166616471 صندوق پستی

چکیده

علیرغم کاربردهای منحصر به فرد فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی در ماشینکاری قطعات با استحکام بالا که قابلیت ماشینکاری با روش های سستی را ندارند، یکپارچگی سطح پایین قطعات ماشینکاری شده با این روش، همواره از معایب آن می باشد. در این مطالعه با اعمال همزمان ارتعاشات فراصوتی به ابزار و میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سعی در بهبود وضعیت یکپارچگی سطح قطعات ماشینکاری شده با فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی شده است. بنابراین با انتخاب شدت جریان تخلیه و زمان روشنی پالس بعنوان پارامترهای ورودی، آزمونهایی بر اساس روش عاملی کامل طراحی و انجام شد، تا ضمن مطالعه تاثیر شدت جریان و زمان روشنی پالس بر یکپارچگی سطوح ماشینکاری شده با این فرآیند ترکیبی، تاثیر همزمان ارتعاشات فراصوتی ابزار و میدان مغناطیسی خارجی بر زبری سطح ماشینکاری شده و یکپارچگی سطوح ماشینکاری شده مطالعه شود. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که زبری سطح ماشینکاری شده با اعمال همزمان ارتعاشات فراصوتی به ابزار و میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی اندکی افزایش می یابد. با این وجود، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشنی سطوح ماشینکاری شده با فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی خارجی و به کمک ارتعاشات فراصوتی ابزار، نشان می دهد که اعمال همزمان میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ و ارتعاشات فراصوتی به ابزار در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی موجب کاهش میزان ترکهای سطحی، چاله ها، کره ها و دانه های باقی مانده تولید شده در سطح ماشینکاری شده و بهبود یکپارچگی سطوح ماشینکاری شده می شود.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 بهمن 1396

پذیرش: 13 فروردین 1397

ارائه در سایت: 07 اردیبهشت 1397

کلید واژگان:

ماشینکاری تخلیه الکتریکی

میدان مغناطیسی خارجی

ارتعاشات فراصوتی ابزار

یکپارچگی سطح ماشینکاری شده

Study of the effect of tools ultrasonic vibrations and external magnetic field on machined surface integrity at EDM process

Mohammad Reza Shabgard^{1*}, Ahad Gholipoor², Mousa Mohammadpourfard

1- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

3- Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 10 February 2018

Accepted 02 April 2018

Available Online 27 April 2018

Keywords:

Electrical Discharge Machining

External Magnetic Field

Tools Ultrasonic Vibrations

Machined Surface Integrity

ABSTRACT

Despite the unique usage of electrical discharge machining process at machining in small dimensions, machining complex shapes and machining of high-strength parts such as ceramics and heat treated steels, which can't be machined by traditional machining methods, low machined surface integrity achieved by electrical discharge machining process is one of the most important limitations of this process. In this investigation the machined surface integrity will be improved by applying ultrasonic vibrations to tool electrode and external magnetic field around gap distance of electrical discharge machining process, simultaneously. So several experiments were designed and performed based on full factorial method by selecting pulse current and pulse duration as the most important input parameters, in order to study the effects of pulse current and duration on surface integrity of workpiece machined by this hybrid process and to investigate the effects of tools ultrasonic vibrations and external magnetic field on machined surface roughness and integrity of machined surface. According the results, machined surfaces roughness is increased by applying ultrasonic vibrations to tool electrode and external magnetic field around gap distance of electrical discharge machining process, simultaneously, while the SEM pictures of machined surfaces showed that the, amount of created surface cracks, blowholes, globules and beads of debris are decreased and integrity of machined surfaces by EDM process is improved by applying ultrasonic vibrations to tool electrode and external magnetic field around gap distance, simultaneously.

1- مقدمه

ماشینکاری تخلیه الکتریکی یکی از پرکاربردترین روشهای ماشینکاری غیرسنتی می باشد که نقش مهمی را در صنایع ماشینکاری مدرن مخصوصاً در ماشینکاری مواد سخت با استحکام بالا و هادی جریان الکتریکی ایفا می نماید [1-3].

در کنار کاربردهای وسیع فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی، این فرآیند دارای محدودیتهای و معایبی از قبیل زبری سطح بالا، ترکهای سطحی، تغییرات متالورژیکی سطح و زیر سطح قطعات ماشینکاری شده، ایجاد منطقه متأثر از حرارت¹ و لایه دوباره منجمد شده روی سطوح ماشینکاری شده است [4, 5]. بنابراین محققان مختلفی روشهای ماشینکاری جدیدی بر پایه فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی مانند فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی² [6]، فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک پودرهای اضافه شده به دی الکتریک³ [7]، فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی⁴ [8]، فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک⁵ [9] و فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک⁶ [10] به منظور برطرف کردن این محدودیتهای معرفی کرده اند.

در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی، به منظور بهبود دفع براده های تولید شده از فاصله گپ، ارتعاشات فراصوتی به ابزار، قطعه کار و یا سیال دی الکتریک اعمال می شود و ماشینکاری در این شرایط انجام می گیرد [11].

شروانی تبار و همکاران [12]، ارتعاشات فراصوتی را بصورت همزمان به ابزار و قطعه کار در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی اعمال کردند و تأثیر آن را بر رفتار هیدرودینامیک جریان سیال اطراف حباب بخار تولید شده و نرخ براده برداری بصورت عددی مطالعه نمودند. مطابق نتایج آنها، ارتعاش همزمان ابزار و قطعه کار در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی و همچنین افزایش فرکانس و دامنه ارتعاشات، طول عمر حباب را افزایش داده و سرعت رشد و واژگونی حباب را بیشتر می کند و منجر به رشد حباب تا بیشترین میزان حجم خود می شود، که این امر موجب افت فشار درون حباب به کمترین میزان خود می شود و در نتیجه مقدار ماده برداشته شده از سطح قطعه کار و نرخ براده برداری بهبود می یابد.

شبگرد و همکاران [13]، شدت جریان تخلیه الکتریکی، زمان روشنی پالس و ارتعاشات فراصوتی ابزار را بعنوان پارامترهای ورودی و نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح ماشینکاری شده را بعنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته و از یک الگوریتم بر پایه فازی برای توسعه یک مدل برای پیش بینی نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح ماشینکاری شده در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی و فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی استفاده کردند. آنها مدل توسعه داده را با انجام آزمایشهایی اعتبارسنجی کرده و پس از اطمینان از صحت مدل، از آن برای انتخاب پارامترهای ورودی بهینه به منظور دستیابی به نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح ماشینکاری شده مطلوب با بهترین شرایط ماشینکاری و کمترین قیمت استفاده کردند. مطابق نتایج این محققان، نرخ براده برداری و زبری سطح ماشینکاری شده با افزایش زمان روشنی پالس و شدت جریان تخلیه افزایش یافته و نرخ سایش ابزار کاهش می یابد. یک

سیستم کنترل فازی انطباقی با سه ورودی و دو خروجی برای مکانیزم سروو فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی توسط ژانگ و همکاران [14]، توسعه داده شد. پارامترهای تخلیه و فاصله گپ بین ابزار و قطعه کار می تواند بطور مناسب توسط این سیستم کنترلی تنظیم و کنترل شود، بطوریکه منجر به افزایش کیفیت سطح ماشینکاری شده، دقت ابعادی و نرخ براده برداری گردد.

ژانگ و همکاران [15, 16]، در مطالعاتی دیگر در مورد اعمال ارتعاشات فراصوتی در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک، مدلهای تئوری برای پیش بینی نرخ براده برداری و زبری سطح ارائه دادند و با انجام آزمایشهایی این مدلهای تئوری را اعتبارسنجی نمودند. ماشینکاری کاربرید سمانته با فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک به همراه ارتعاشات فراصوتی توسط خو و همکاران [17]، انجام شد. آنها مکانیزمهای براده برداری کاربرید سمانته را که ذوب، تبخیر، اکسیداسیون و تجزیه، نیروی گاز با فشار بالا و تأثیر ارتعاشات فراصوتی می باشند، مطالعه کردند. این محققان میکرو ساختار سطح ماشینکاری شده را نیز بررسی کرده و مکانیزم تشکیل میکرو ترکها روی سطح ماشینکاری شده را مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که تشکیل میکرو ترکها به پارامترهای الکتریکی پروسه مانند شدت جریان تخلیه، ولتاژ تخلیه و زمان روشنی پالس و همچنین به خواص کاربرید سمانته مانند نقطه ذوب، هدایت حرارتی و سختی آن بستگی دارد. لی و زو [18]، عملکرد ماشینکاری فرآیند میکرو ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی قطعه کار را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که به دلیل بهبود دفع براده ها و لذا کاهش آلودگی گپ و تعداد پالسههای غیرنرمال مانند آرک با اعمال ارتعاشات فراصوتی به قطعه کار، نرخ براده برداری افزایش یافته و نرخ سایش ابزار کاهش می یابد.

در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی، یک میدان مغناطیسی به محدوده ابزار، گپ و قطعه کار اعمال شده و ماشینکاری تحت این شرایط انجام می شود. در این فرآیند به دلیل اعمال نیروی مغناطیسی بر قطرات مذاب، لایه دوباره منجمد شده تشکیل شده بر روی قطعه کار کاهش می یابد و صافی سطح بهتری حاصل می شود [19].

هیزن و همکاران [20]، یک میدان مغناطیسی خارجی را به فاصله گپ در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی و به منظور تولید نیروی لورنتز موثر بر قطرات مذاب، اعمال کردند. آنها فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک میدان مغناطیسی را برای مواد غیر مغناطیس توسعه دادند. مطابق نتایج آنها با اعمال میدان مغناطیسی و تولید نیروی لورنتز، نرخ براده برداری حدود 50 % افزایش می یابد، درحالیکه نیروی لورنتز هیچ اثر منفی بر روی نرخ سایش ابزار ندارد. یئو و همکاران [21]، فرآیند میکرو ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی را به منظور دستیابی به دقت ابعادی بالا در ماشینکاری میکرو سوراخها، بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که اعمال میدان مغناطیسی به گردش و دفع بهتر براده ها از گپ ماشینکاری می انجامد، بنابراین سوراخهای با عمق بیشتر را می توان با فرآیند میکرو ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی در مقایسه با فرآیند میکرو ماشینکاری تخلیه الکتریکی بدون، درحالیکه زبری سطح دیواره های سوراخ ماشینکاری شده با این دو فرآیند تقریباً برابر است. قلی پور و همکاران [22]، به بررسی تأثیر اعمال میدان مغناطیسی حول فاصله گپ در فرآیند تخلیه الکتریکی نیمه خشک پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با اعمال میدان مغناطیسی نرخ براده برداری فرآیند تخلیه الکتریکی نیمه

¹ Heat affected zone (HAZ)² ultrasonic vibrations assisted EDM (UEDM)³ Powder mixed EDM⁴ Magnetic field assisted EDM (MEDM)⁵ Dry EDM⁶ Near Dry EDM

فولاد H13، شدت جریان تخلیه و زمان روشنی پالس بعنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده و طبق اصول طراحی آزمایش ها و بر اساس مدل طرح عاملی کامل⁴، $4 \times 4 = 16$ آزمایش در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی، $4 \times 4 = 16$ آزمایش در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی میدان مغناطیسی، $4 \times 4 = 16$ آزمایش در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار و $4 \times 4 = 16$ آزمایش در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار و در مجموع 64 آزمایش برای بررسی تاثیر پارامترهای ورودی بر یکپارچگی سطح ماشینکاری شده شامل زبری سطح ماشینکاری شده و کیفیت سطح ماشینکاری شده طراحی و انجام شد.



Fig.1 The ultrasonic vibration generator used for machining

شکل 1 تصویر دستگاه مولد ارتعاشات فراصوتی استفاده شده برای انجام عملیات ماشینکاری

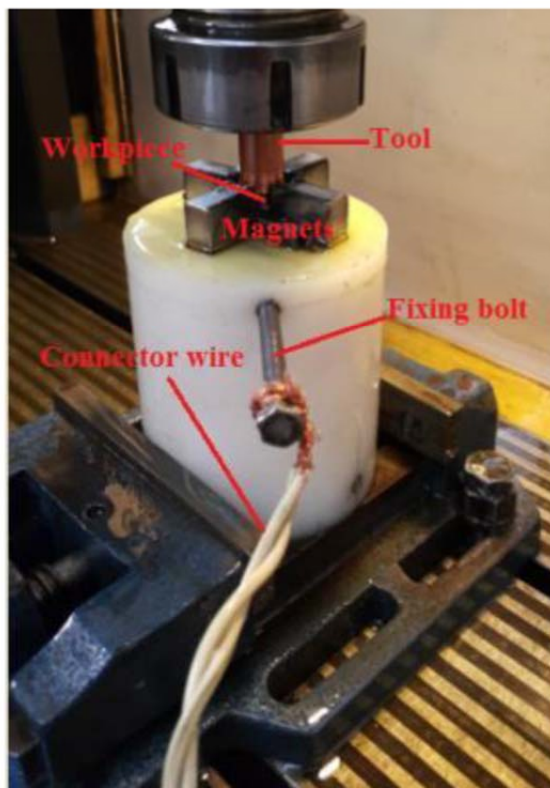


Fig.2 The fixture which was used at magnetic field assisted EDM

شکل 2 فیکسچر مورد استفاده برای قطعه کار در فرآیند EDM به کمک میدان مغناطیسی

خشک افزایش یافته و زبری سطح سطوح ماشینکاری شده کاهش می یابد، هر چند که نرخ سایش ابزار نیز اندکی افزایش می یابد. همچنین در فرآیند تخلیه الکتریکی نیمه خشک به همراه میدان مغناطیسی سطوحی با یکپارچگی بیشتر و کیفیت بالاتر تولید می شوند.

فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی به کمک میدان مغناطیسی توسط تامورا و کونیدا [23]، بررسی شد. آنها یک مدل دو بعدی با روش اجزای محدود و با در نظر گرفتن القای الکترومغناطیس به منظور پیدا کردن مکانیزم نیروی الکترومغناطیس اعمال شده به سیم در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی سیمی به کمک میدان مغناطیسی توسعه داده و جابجایی سیم را با آنالیز چگالی جریان و چگالی شار مغناطیسی، زمانیکه فقط نیروی الکترومغناطیس به سیم اعمال می شود، بعد از محاسبه تغییرات نیروی الکترومغناطیس اعمال شده به سیم، محاسبه کردند.

در این مطالعه فرآیند ترکیبی ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار و میدان مغناطیسی خارجی مورد مطالعه قرار گرفته و تاثیر اعمال همزمان ارتعاشات فراصوتی به ابزار و میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی بر یکپارچگی سطوح ماشینکاری شده شامل زبری سطوح ماشینکاری شده و کیفیت سطح ماشینکاری شده بررسی شده است.

2- شرایط آزمایش های تجربی

در این مطالعه، برای انجام عملیات سوراخکاری با روش تخلیه الکتریکی از دستگاه اسپارک شارمیلز روبروفرم¹ 200 با مولد ایزوپالس، استفاده می شود. برای اعمال ارتعاشات فراصوتی به ابزار، از دستگاه مولد ارتعاشات فراصوتی بندلین² 2200 با توان 200 وات و فرکانس ارتعاش 20 کیلوهرتز برای ایجاد امواج فراصوتی با دامنه 15 میکرون استفاده می شود. از متمرکز کننده آلومنیومی به منظور تقویت دامنه ارتعاشات استفاده شد. شکل 1، دستگاه مولد ارتعاشات فراصوتی مورد استفاده را نشان می دهد.

برای اعمال میدان مغناطیسی به فاصله گپ در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی، فیکسچر نشان داده شده در شکل 2، برای قطعه کار طراحی و در حول فاصله گپ قرار داده می شود. پس از قرار گرفتن قطعه کار در سوراخ تعبیه شده در فیکسچر (که اندازه آن 1 میلی متر بیشتر از قطر قطعه کار در نظر گرفته شد)، با استفاده از دو پیچ نشان داده شده در شکل، قطعه کار در محل خود ثابت می شود. در ادامه، با استفاده از ساعت اندازه گیری، عمود بودن قطعه کار تست می شود. از یک سیم رابط نیز برای برقراری جریان الکتریکی و اعمال قطبیت مد نظر استفاده می شود، بگونه ای که یکطرف سیم به پیچ سفت کننده قطعه کار که با آن در تماس است و طرف دیگر سیم به میز دستگاه متصل می شود. جنس این فیکسچر از پلاستیک بوده و چهار آهنربای ثابت مکعبی نئودیمیوم³ با شدت مغناطیسی 1.2 تسلا به ابعاد $25 \times 20 \times 10$ میلی متر در محل های تعبیه شده در فیکسچر قرار داده می شوند. شکل، ابعاد، شدت میدان مغناطیسی، تعداد و مکان آهنرباها در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی نیز با توجه به آزمونهای اکتشافی انجام شده قبل از شروع تست های اصلی مشخص گردید.

در این مطالعه، به منظور بررسی تاثیر همزمان اعمال میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ و ارتعاشات فراصوتی به ابزار بر یکپارچگی سطح ماشینکاری شده در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی

¹ Charmilles Roboform 200

² Bandelin

³ Neodymium magnet

⁴ Full factorial

جدول 2 پارامترهای ثابت استفاده شده در آزمایش ها

Table 2 The fixed parameters at experiments

پارامتر ثابت	سطح آزمایش
زمان خاموشی پالس (μs)	6.4
ولتاژ مدار باز (v)	200
فاصله گپ (μm)	50
نوع دی الکتریک	روغن فلاکس الف ²

جدول 3 خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی فولاد H13 [3]

Table 3 The physical, mechanical and thermal properties of H13 tool steel

مشخصه	مقدار
دانسیته (g/cm ³) در دمای 20°C	7.80
دمای ذوب (°C)	1427
استحکام کششی نهایی (MPa) در دمای 20°C	1200-1590
تنش تسلیم (MPa) در دمای 20°C	1000-1380
مدول الاستیک (GPa) در دمای 20°C	215
نسبت پواسون	0.27-0.3
رسانایی حرارتی (W/mK)	28.6

جدول 4 ترکیب شیمیایی فولاد H13

Table 4 Chemical composition of H13 tool steel

عنصر	درصد وزنی %	عنصر	درصد وزنی %
Fe	91.73	Mn	0.4
Cr	5.2	V	1.1
C	0.39	Cu	0.25
Si	0.9	S	0.03

جدول 5 مشخصات اصلی ابزار مسی [3]

Table 5 The main properties of copper tool

مشخصه	مقدار
وزن مخصوص (g/cm ³)	8.94
دمای ذوب (°C)	1065-1083
رسانایی حرارتی (W/mK)	388
گرمای ویژه (J/kgK)	385
ضریب انبساط حرارتی (1/°C)	1.67×10^{-6}
مقاومت الکتریکی (nΩcm)	17.1

فراصوتی ابزار در مقایسه با فرایندهای ماشینکاری تخلیه الکتریکی، ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار نشان می دهد.

مطابق شکل 3، با افزایش شدت جریان تخلیه، زبری سطح ماشینکاری شده با فرایند های ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، ماشینکاری تخلیه الکتریکی، ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی، در همه زمانهای روشنی پالس، افزایش می یابد.

با افزایش شدت جریان تخلیه از 4 آمپر تا 32 آمپر، به دلیل افزایش میزان انرژی تخلیه شده به فاصله گپ و افزایش میزان حرارت تولید شده بر روی سطح قطعه کار (مطابق رابطه (1) [24]، ابعاد حفرت تولید شده روی سطح قطعه کار افزایش می یابد و زبری سطح بیشتری حاصل می شود. این پدیده در همه زمانهای روشنی پالس مشاهده شد.

سطوح پارامترهای ورودی متغیر در فرایندهای ماشینکاری تخلیه الکتریکی، ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی، ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار و ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار و میدان مغناطیسی، منطبق بر یکدیگر و مطابق جدول 1، است. پارامترهای ثابت آزمایش ها نیز که در همه آزمایش ها رعایت شد، در جدول 2، آورده شده است.

در این تحقیق برای انجام هر تست یک الکتروود ابزار بکار می رود و زمان انجام هر کدام از آزمایشات ثابت و 10 دقیقه در نظر گرفته شده است.

بعد از عملیات ماشینکاری، زبری سطح نمونه های ماشینکاری شده توسط دستگاه زبری سنج ماهر¹، با طول معیار استاندارد 0.8 و حرکت پراب به طول 5.6 میلی متر روی نمونه، اندازه گیری می شود. در این مطالعه، Ra به عنوان معیار زبری سطح در نظر گرفته شده و برای افزایش دقت، زبری هر سوراخ در پنج امتداد مختلف اندازه گیری شده و میانگین این زبری ها به عنوان زبری سطح نهایی در نظر گرفته می شود.

برای بررسی کیفیت سطوح ماشینکاری شده، پس از انجام عملیات ماشینکاری، تصاویری از سطح قطعات با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی تهیه شد.

قطعه کار مورد استفاده در این مطالعه، فولاد استوانه ای گرمکار از جنس H13 به قطر 10 میلی متر است که پس از برش با دستگاه برشکاری سیمی به ارتفاع 20 میلی متر، سطوح پیشانی آن سنگ زنی و پولیش کاری شده است. ترکیب شیمیایی قطعه کار که رسانای الکتریسیته بوده و دارای خاصیت مغناطیسی است، در جدول 4 آمده است.

جنس ابزار مورد استفاده در این مطالعه مس با خلوص 99% و در مورد فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی و فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی، استوانه ای به قطر خارجی 14 میلی متر و ارتفاع 40 میلی متر می باشد که با عملیات تراشکاری تهیه شده است. مشخصات ابزار مسی در جدول 5 آمده است.

همچنین در فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار و فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار و میدان مغناطیسی خارجی، برای اتصال ابزار مسی به کلگی مخصوص فراصوتی برای انجام عملیات ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک ارتعاشات فراصوتی، عملیات رزوه کاری روی آنها انجام گردید. ابزار مورد استفاده در این فرایند ها، مس با خلوص 99%، به قطر خارجی 14 میلی متر و ارتفاع 22 میلی متر می باشد.

3- نتایج و بحث

3-1- زبری سطح ماشینکاری شده

شکل 3، تاثیر شدت جریان تخلیه را بر روی زبری سطح ماشینکاری شده با فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات

جدول 1 پارامترهای ورودی متغیر و سطوح آنها

Table 1 Input variables and their levels

زمان روشنی پالس (میکرو ثانیه)	شدت جریان (آمپر)	
6.4	4	1
12.8	8	2
50	16	3
100	32	4

² Oil Flux ELF

¹ Mahr

که در آن T دوره تناوب نوسان، A دامنه ارتعاش، f فرکانس نوسان، M_s جرم ذره موجود در پلاسما و u معادله ارتعاش ابزار در لحظه t است. ضمناً در اثر وقوع پدیده کاویتاسیون در صورت اعمال ارتعاشات فراصوتی به ابزار، مقدار بیشتری از مذاب به بیرون از چاله مذاب پرتاب می شود و این سبب می شود که عمق چاله ها بعد از انجماد و در واقع زبری سطح به دست آمده بیشتر باشد. بالاتر بودن نرخ افت فشار با حرکت به سمت بالای ابزار و افزایش فاصله گپ در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار نیز، عامل دیگری بر پرتاب مقدار بیشتری از مواد مذاب به بیرون از چاله مذاب و افزایش زبری سطح ماشینکاری شده می باشد [27].

صافتر شدن سطح ماشینکاری شده در اثر حرکت افقی براده های تیز تولید شده در سطح ماشینکاری با اعمال میدان مغناطیسی به فاصله گپ که یکی از عوامل کاهش زبری سطح با اعمال میدان مغناطیسی به فاصله گپ در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی می باشد [28]، با اعمال همزمان ارتعاشات فراصوتی به ابزار که موجب حرکت عمودی براده ها و دور شدن آنها از سطح ماشینکاری شده می شود، تضعیف می شود. خروج بیشتر براده ها از فاصله گپ و کاهش جرقه آرک و افزایش تعداد و ابعاد حفرات تولید شده در سطح ماشینکاری در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، موجب بیشتر بودن زبری سطح ماشینکاری شده در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، می شود.

$$Q = R \times I^2 \times T_{on} \quad (1)$$

در رابطه (1)، Q میزان حرارت تولید شده، R مقاومت الکتریکی بین ابزار و قطعه کار بر حسب اهم، I مقدار شدت جریان تخلیه بر حسب آمپر، و T_{on} زمان روشنی پالس بر حسب میکروثانیه می باشد.

مطابق شکل 3، زبری سطح به دست آمده از فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، در همه حالتها، بیشتر است.

در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار، به دلیل افزایش انرژی ذرات پلاسما، انرژی جرقه ها بیشتر شده و حجم مذاب به ازای هر جرقه بیشتر می شود. زمانی که ابزار به سمت پایین حرکت می کند، سرعت ارتعاش ابزار به مولفه عمودی سرعت ذرات برادر موجود در پلاسما افزوده می شود که موجب افزایش زاویه و انرژی برخورد ذرات برادر می شود. زمانی هم که ابزار بالا می رود، افت شدید فشار در کانال پلاسما باعث افزایش سرعت جابجایی ذرات برادر در کانال تخلیه می شود و انرژی برخورد الکترونها و پروتونها بیشتر می شود و در نتیجه انرژی ذرات برادر پلاسما افزایش می یابد. همچنین ارتعاشات قادرند ذرات خنثی ای را که توسط میدان الکتریکی گپ شتابدار نشده اند به حرکت وادار کرده و سبب افزایش انرژی شوند. مقدار انرژی افزایش یافته توسط رابطه (2) محاسبه می شود [25، 26].

$$\delta E_z = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} M_s u^2(t) dt = \frac{M_s U^2}{4} = M_s \pi^2 f^2 A^2 \quad (2)$$

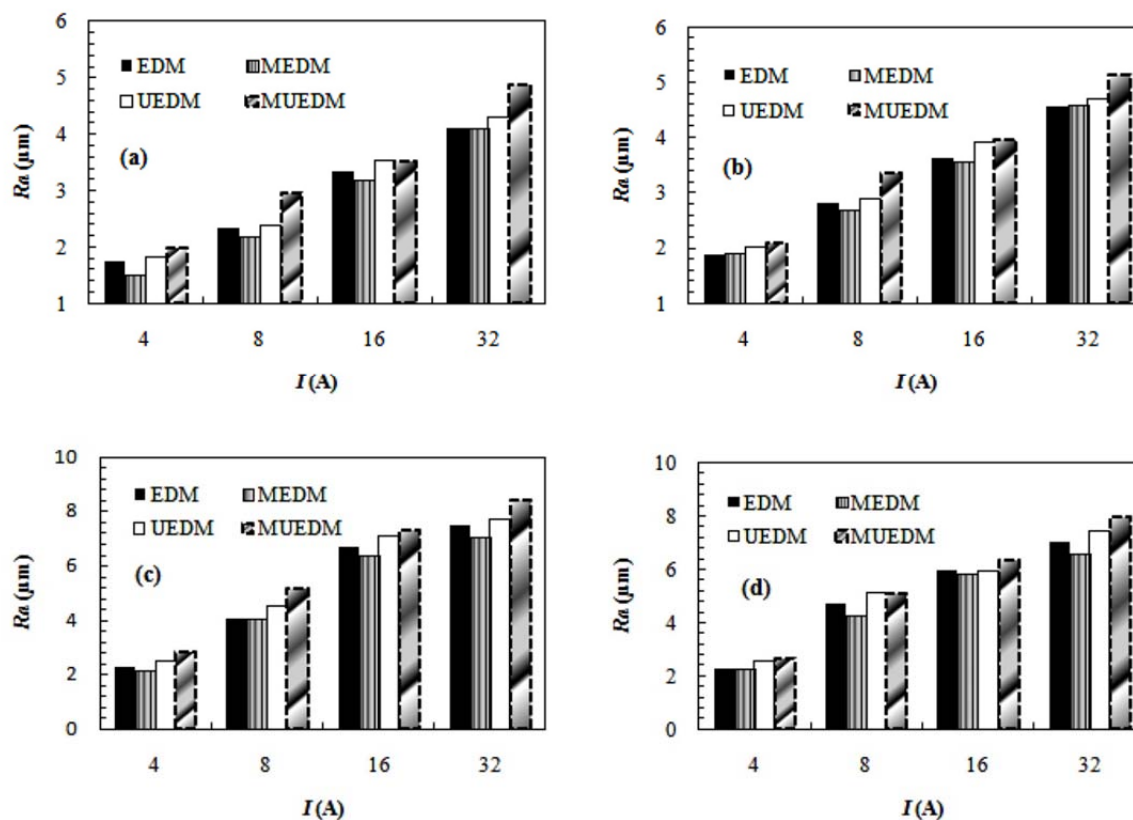


Fig. 3 Effects of pulse current on surface roughness of MUEDEM as compared with EDM, MEDM and UEDM processes at (a) $T_{on}=6.4 \mu s$ (b) $T_{on}=12.8 \mu s$ (c) $T_{on}=50 \mu s$ (d) $T_{on}=100 \mu s$

شکل 3 تأثیر شدت جریان تخلیه بر زبری سطح ماشینکاری شده با فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار در مقایسه با فرآیندهای ماشینکاری تخلیه الکتریکی، ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار در

$T_{on}=100 \mu s$ (d) $T_{on}=50 \mu s$ (c) $T_{on}=12.8 \mu s$ (b) $T_{on}=6.4 \mu s$ (a)

های پی در پی دی الکتریک و در نتیجه به دفع پی در پی مواد مذاب از چاله مذاب منجر می شود که به تجمع کره ها² در سطح ماشینکاری شده کمک کرده و سطح بی کیفیتی تولید می کند.

همچنین کانال پلاسما با افزایش زمان روشنی پالس گسترش می یابد و ناحیه برخورد جرقه ها وسیع تر می شود و به تبع آن دانسیته انرژی و نیروی ضربه ای کاهش می یابد. بنابراین مقدار کمتری از مواد مذاب از چاله مذاب به بیرون دفع می شود و لایه دوباره منجمد شده و کره هایی در سطح ماشینکاری شده ایجاد می شود و سطح را خراب می کند.

میکروتَرکهای سطحی ایجاد شده در فرآیندهای ماشینکاری، فاکتور مهمی در تعیین یکپارچگی سطح قطعات تولید شده هستند. تعداد، اندازه و توزیع میکروتَرکها نقش تعیین کننده ای در کارکرد، عمر خستگی، خوردگی و حتی مقدار تنشهای پسماند موجود در قطعات دارند [29].

بعد از اتمام زمان روشنی پالس، مواد مذاب در برخورد با سیال دی الکتریک، خیلی سریع سرد شده و بصورت غیر تعادلی منجمد می شوند. در اثر ضربه انبساط و انقباض بالا و انجماد غیر تعادلی، تنشهای حرارتی خیلی بالایی تولید می شود که اگر این تنشها از استحکام شکست مواد منجمد شده بالاتر باشد موجب ایجاد ترکهای عرضی موازی با سطح ماشینکاری شده و ترکهای طولی یا شعاعی یا عمقی عمود بر سطح ماشینکاری شده خواهد شد. مقدار این تنشها بستگی به انرژی جرقه و حجم موادی دارد که تبدیل به مذاب شده و پس از اتمام زمان روشنی پالس دوباره منجمد می شوند [27].

در شدت جریان ها و زمان های روشنی پالس پایین به دلیل کم بودن انرژی جرقه و حجم موادی که ذوب شده و دوباره در سطح قطعه کار منجمد می شوند، تنشهای حرارتی ایجاد شده در حین فرایند انجماد به اندازه ای نیست که تولید ترک نماید و بنابراین در شدت جریان ها و زمان های روشنی پالس پایین ترکهای چندانی مشاهده نمی شود. با افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس، بر تعداد ترکها و ابعاد آنها افزوده می شود که این به علت افزایش انرژی ورودی به قطعه کار بوده که باعث افزایش حجم ماده مذاب می شود. بنابراین مقدار ماده مذاب باقی مانده روی سطح که از چاله مذاب خارج نمی گردد نیز، افزایش یافته و انقباضهای حین انجماد و سرد شدن ماده مذاب بیشتر می شود و ترکهای بیشتر و بزرگتری ایجاد می گردد [27].

همچنین در شدت جریانها و زمانهای روشنی پالس بالا، آلودگی گپ و احتمال ترکیب کربن با مواد فلزی موجود در گپ زیاد است. بنابراین تشکیل ترکیبات شکننده کربیدی و سرامیکی در سطح قطعه کار می تواند علت دیگری برای افزایش تعداد و ابعاد ترکهای ایجاد شده در شدت جریانها و زمانهای روشنی پالس بالا باشد [27].

2-2-3- بررسی تأثیر اعمال همزمان میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی بر

یکپارچگی سطوح ماشینکاری شده در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی شکل های 6 الی 9، سطوح ماشینکاری شده با فرآیند های ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، ماشینکاری تخلیه الکتریکی، ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی را در شدت جریان ها و زمان های روشنی پالس مختلف در مقایسه با یکدیگر نشان می دهد.

مطابق شکل های 6 الی 9، یکپارچگی سطوح ماشینکاری شده با فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار در همه شدت جریان ها و زمان های روشنی پالس بهترین و یکپارچگی

در واقع، نقش اعمال ارتعاشات فراصوتی به ابزار در افزایش زبری سطح ماشینکاری شده بر نقش اعمال میدان مغناطیسی در کاهش زبری سطح غلبه می کند و موجب بیشتر شدن زبری سطح ماشینکاری شده با فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، در مقایسه با فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی، می شود.

شکل 4، تأثیر زمان روشنی پالس را بر روی زبری سطح ماشینکاری شده با فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار در مقایسه با فرآیندهای ماشینکاری تخلیه الکتریکی، ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار نشان می دهد.

مطابق شکل 4، با افزایش زمان روشنی پالس تا 50 میکرو ثانیه، زبری سطح به دست آمده از فرآیند های ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، ماشینکاری تخلیه الکتریکی، ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی در همه شدت جریانها افزایش می یابد، اما بعد از 50 میکرو ثانیه روند افزایشی زبری سطح به دست آمده متوقف شده یا کاهش می یابد.

با افزایش زمان روشنی پالس از 6.4 میکروثانیه تا 50 میکروثانیه، در همه شدت جریانهای تخلیه، میزان انرژی تخلیه شده به فاصله گپ مطابق رابطه (1)، بیشتر شده و ابعاد حفرات تولید شده روی سطح قطعه کار افزایش می یابد و زبری سطح بیشتری حاصل می شود. اما بعد از 50 میکرو ثانیه تا 100 میکروثانیه، به دلیل افزایش میزان آلودگی فاصله گپ ناشی از حضور براده های تولید شده در فاصله گپ، تعداد جرقه های آرک افزایش یافته، نرخ براده برداری و ابعاد حفرات تولید شده روی سطح قطعه کار کاهش می یابد. بنابراین روند افزایش زبری سطح ماشینکاری شده بعد از 50 میکرو ثانیه متوقف و در بعضی موارد به روند کاهشی تبدیل می شود.

2-3- یکپارچگی سطح ماشینکاری شده

2-3-1- تأثیر شدت جریان و زمان روشنی پالس بر یکپارچگی سطوح ماشینکاری شده در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات فراصوتی ابزار

شکل 5 تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطوح ماشینکاری شده با فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار را در شدت جریان ها و زمان های روشنی پالس مختلف نشان می دهد. مطابق شکل 5، با افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس، سطوحی خشن تر، با کیفیت پایین تر، با ساختار نامنظم و دارای عیوب بیشتر (ترکها، دانه های باقیمانده¹، چاله ها و مواد باقی مانده کروی بیشتر) تولید می شوند که این میزان در مورد افزایش شدت جریان بیشتر از افزایش زمان روشنی پالس است.

میزان انرژی الکتریکی تخلیه شده به فاصله گپ با افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس افزایش می یابد که منجر به تولید گرمای بیشتر در سطح الکترودها، بزرگتر شدن چاله مذاب و افزایش مواد مذاب می شود. بنابراین میزان تغییرات دما در سطح قطعه کار پس از سرد شدن و ترکهای ایجاد شده در سطح قطعه کار و همچنین میزان ماده مذابی که دوباره سرد شده و به سطح قطعه کار می چسبد و نیز چاله های ناشی از عملیات ماشین کاری افزایش می یابد. بعبارت دیگر افزایش شدت جریان ورودی، به شکست

² Globules

¹ Beads of debris

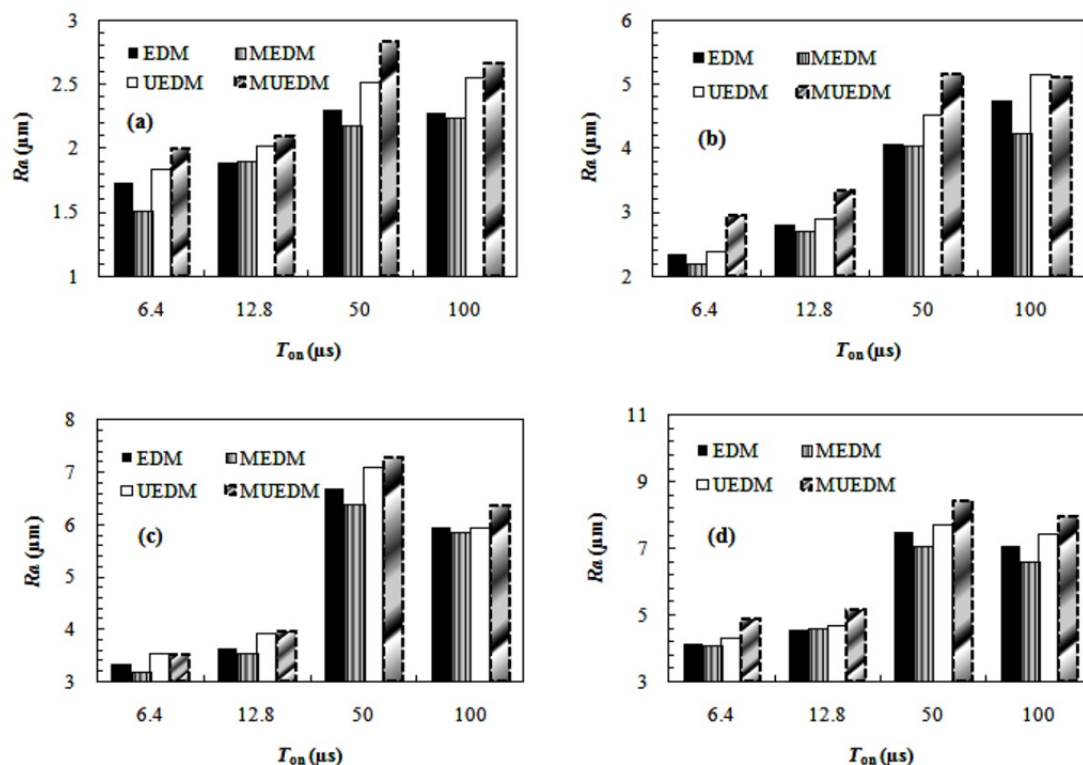


Fig. 4 Effects of pulse duration on surface roughness of MUEDM as compared with EDM, MEDM and UEDM processes at (a) $I=4\text{ A}$ (b) $I=8\text{ A}$ (c) $I=16\text{ A}$ (d) $I=32\text{ A}$

شکل 4 تأثیر زمان روشنی پالس بر زبری سطح ماشینکاری شده با فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار در مقایسه با فرآیندهای ماشینکاری تخلیه الکتریکی، ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه ارتعاشات فراصوتی ابزار در $I=32\text{ A}$ (d) $I=16\text{ A}$ (c) $I=8\text{ A}$ (b) $I=4\text{ A}$ (a)

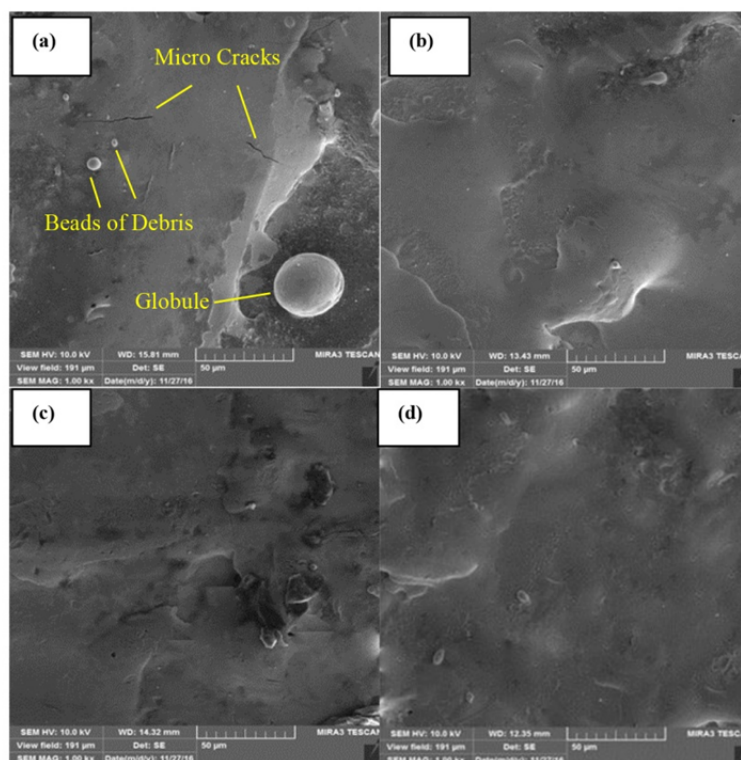


Fig. 5 The SEM picture of machined surfaces with MUEDM process in different pulse currents and pulse durations (a) 32 A, 50 μs (b) 8 A, 50 μs (c) 32 A, 12.8 μs (d) 8 A, 12.8 μs

شکل 5 تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطوح ماشینکاری شده با فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار در شدت جریان ها و زمان های روشنی پالس مختلف (a) 32 A, 50 μs (b) 8 A, 50 μs (c) 32 A, 12.8 μs (d) 8 A, 12.8 μs

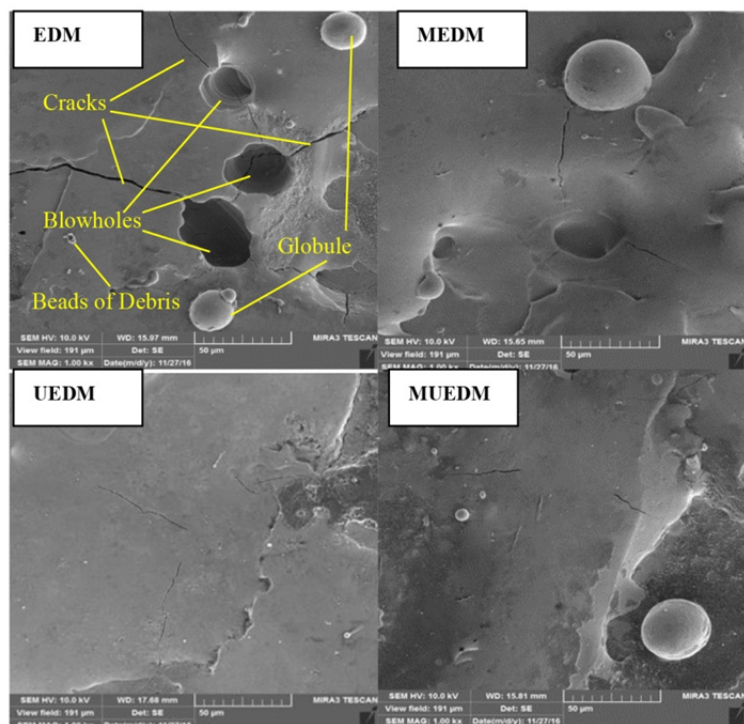


Fig. 6 The SEM picture of machined surfaces in $I=32$ A, $T_{on}=50 \mu s$ with (a) EDM (b) MEDM (c) UEDM, and (d) MUEDM processes

شکل 6 تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطوح ماشینکاری شده در $I=32$ A, $T_{on}=50 \mu s$ با فرآیندهای (a) ماشینکاری تخلیه الکتریکی (b) ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی (c) ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک ارتعاشات فراصوتی ابزار و (d) ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار

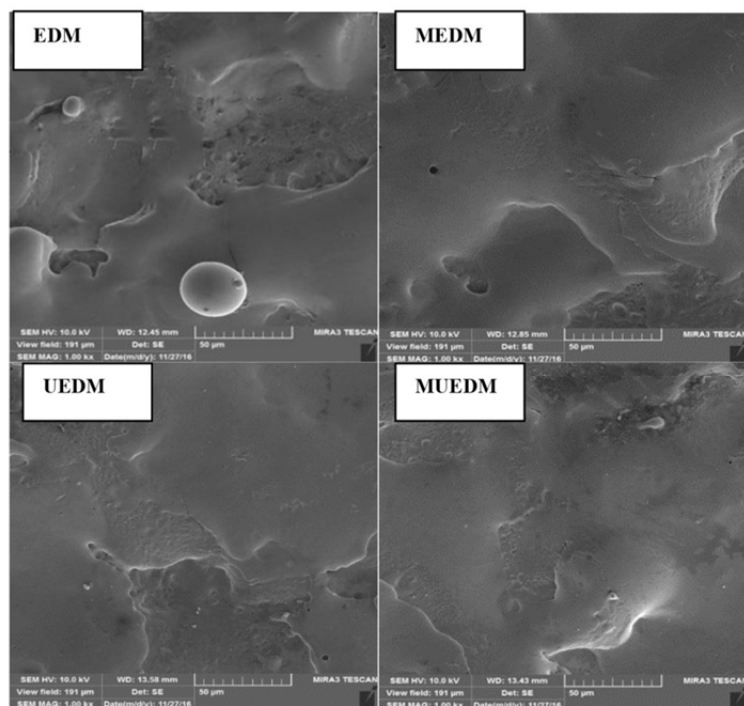


Fig. 7 The SEM picture of machined surfaces in $I=8$ A, $T_{on}=50 \mu s$ with (a) EDM (b) MEDM (c) UEDM, and (d) MUEDM processes

شکل 7 تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطوح ماشینکاری شده در $I=8$ A, $T_{on}=50 \mu s$ با فرآیندهای (a) ماشینکاری تخلیه الکتریکی (b) ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی (c) ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک ارتعاشات فراصوتی ابزار و (d) ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار

با اعمال ارتعاشات فراصوتی به ابزار، پدیده کاویتاسیون رخ داده و موجب ایجاد جت سیالی با سرعت بالا می شود و به بهبود دفع براده ها از گپ ماشینکاری کمک می کند. اعمال میدان مغناطیسی حول فاصله گپ نیز به جذب براده های حاضر در فاصله گپ کمک کرده و مانع تجمع

سطوح ماشینکاری شده با فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی بدترین است، که دلیل آن، اثر مطلوب اعمال ارتعاشات فراصوتی به ابزار و نیز میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی است.

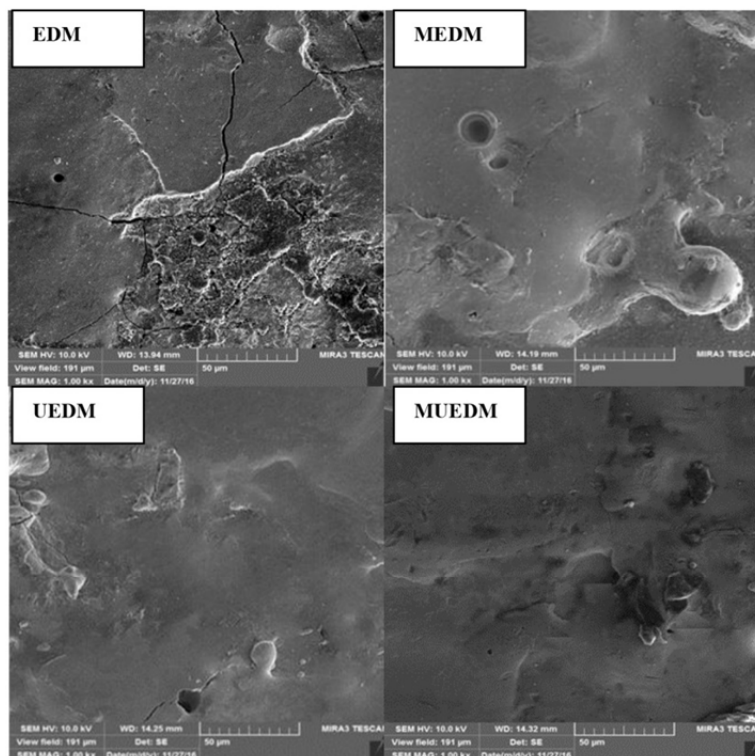


Fig. 8 The SEM picture of machined surfaces in $I=32$ A, $T_{on}=12.8$ μ s with (a) EDM (b) MEDM (c) UEDM, and (d) MUEDM processes

شکل 8 تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطوح ماشینکاری شده در $I=32$ A, $T_{on}=12.8$ μ s با فرآیند های (a) ماشینکاری تخلیه الکتریکی (b) ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی (c) ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک ارتعاشات فراصوتی ابزار و (d) ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار

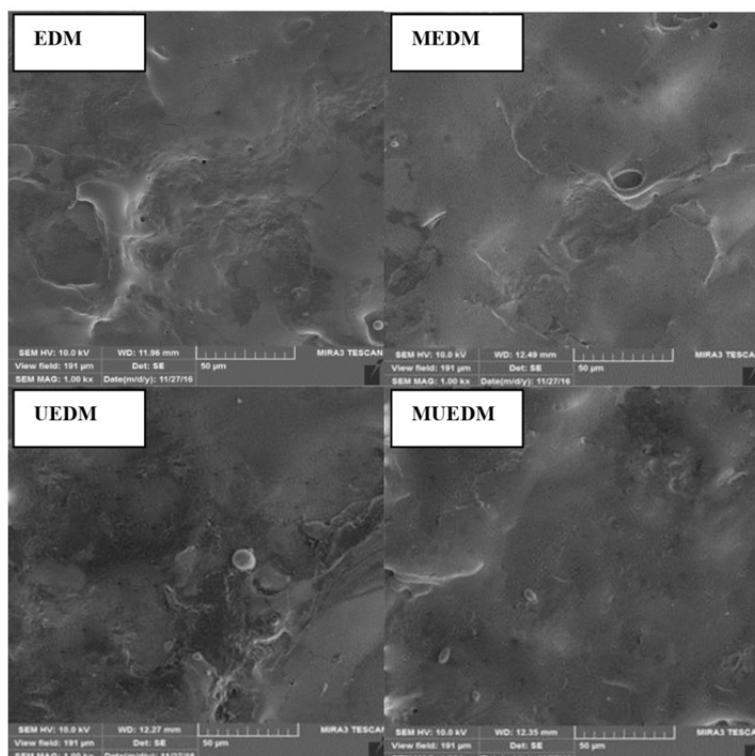


Fig. 9 The SEM picture of machined surfaces in $I=8$ A, $T_{on}=12.8$ μ s with (a) EDM (b) MEDM (c) UEDM, and (d) MUEDM processes

شکل 9 تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطوح ماشینکاری شده در $I=8$ A, $T_{on}=12.8$ μ s با فرآیند های (a) ماشینکاری تخلیه الکتریکی (b) ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی (c) ماشینکاری تخلیه الکتریکی به کمک ارتعاشات فراصوتی ابزار و (d) ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار

براده‌ها و سایر آلودگی‌ها در گپ ماشینکاری می‌شود و بدین طریق از ایجاد جرقه‌های آرک و چاله‌های ناشی از آن جلوگیری می‌کند. همچنین کره‌ها

- [4] M. Seyedzavvar, M. R. Shabgard, Influence of tool material on the electrical discharge machining of AISI H13 tool steel, *Advanced Materials Research*, Vol. 445, No. 1, pp. 988-993, 2012.
- [5] M. R. Shabgard, M. Seyedzavvar, S. N. Babil Oliaei, A. Ivanov, A numerical method for predicting depth of heat affected zone in EDM process for AISI H13 tool steel, *Journal of Scientific & Industrial Research*, Vol. 70, No. 1, pp. 493-499, 2011.
- [6] M. R. Shabgard, B. Khosrozadeh, Study on the effect of ultrasonic assisted electrical discharge machining process on residual stress and hardness of Ti-6Al-4V alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 169-176, 2016. (in Persian فارسی)
- [7] 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 فارسی)
- [8] A. Gholipour, H. Baseri, M. Shakeri and M. R. Shabgard, Investigation of the effects of magnetic field on near-dry electrical discharge machining performance, *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part B: Journal of engineering manufacture*, Vol. 230, No. 4, pp. 744-751, 2016.
- [9] E. Uhlmann, T. Schimmelpennig, I. Perfilov, J. Streckenbach, L. Schweitzer, Comparative analysis of Dry-EDM and conventional EDM for the manufacturing of micro holes in Si3N4-TiN, *Procedia CIRP*, Vol. 42, No. 1, pp. 173-178, 2016.
- [10] A. Gholipour, H. Baseri, M. Shakeri, Experimental investigation of near dry EDM process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 106-112, 2014. (in Persian فارسی)
- [11] M. R. Shabgard, B. Sadizadeh, K. Amini, H. Pourziaie, Comparative study and mathematical modeling of machining parameters in Ultrasonic-assisted EDM of AISI H13 tool steel by the application of workpiece vibration, *Advanced Materials Research*, Vol. 154, No. 1, pp. 1604-1613, 2011.
- [12] M. T. Shervani-Tabar, K. Maghsoudi, M. R. Shabgard, Effects of simultaneous ultrasonic vibration of the tool and the workpiece in ultrasonic assisted EDM, *International Journal for Computational Methods in Engineering Science & Mechanics*, Vol. 14, No. 1, pp. 1-9, 2013.
- [13] M. R. Shabgard, M. A. Badamchizadeh, G. Ranjbary, K. Amini, Fuzzy approach to select machining parameters in electrical discharge machining (EDM) and ultrasonic-assisted EDM processes, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 32, No. 1, pp. 32-39, 2013.
- [14] J. H. Zhang, H. Zhang, D. S. Su, Y. Qin, M. Y. Hou, Q. H. Zhang, L. Wang, Adaptive fuzzy control system of a servomechanism for electro-discharge machining combined with ultrasonic vibrations, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 129, No. 1, pp. 45-49, 2002.
- [15] Q. H. Zhang, J. H. Zhang, S. F. Ren, J. X. Deng, X. Ai, Study on technology of ultrasonic vibration aided electrical discharge machining in gas, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 149, No. 1, pp. 640-644, 2004.
- [16] Q. H. Zhang, R. Dub, J. H. Zhang, Q. B. Zhang, An investigation of ultrasonic-assisted electrical discharge machining in gas, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, No. 1, pp. 1582-1588, 2006.
- [17] M. G. Xu, J. H. Zhang, Y. Li, Q. H. Zhang, S. F. Ren, Material removal mechanisms of cemented carbides machined by ultrasonic vibration assisted EDM in gas medium, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 1, pp. 1742-1746, 2009.
- [18] L. Q. Li, G. Z. Zhu, Investigate on Micro-EDM in air (dry MEDM) by external blowing mode based on RC pulse generator, *Advanced Materials Research*, Vol. 317, No. 1, pp. 334-340, 2011.
- [19] R. Teimouri, H. Baseri, Effects of magnetic field and rotary tool on EDM performance, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 14, No. 1, pp. 316-322, 2012.
- [20] K. Heinz, V. Surla, Sh. G. Kapoor, R. E. D. Vor, An investigation of magnetic-field-assisted material removal in micro EDM for nonmagnetic materials, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 133, No. 2, pp. 221-230, 2011.
- [21] S. H. Yeo, M. Murali, H. T. Cheah, Magnetic field assisted micro electro-discharge machining, *Journal of Micromechanics and Micro Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 15-26, 2004.
- [22] H. Singh, Experimental study of distribution of energy during EDM process for utilization in thermal models, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 19, pp. 5053-5064, 2012.
- [23] Sh. Tomura, M. Kunieda, Analysis of electromagnetic force in wire-EDM, *Precision Engineering*, Vol. 33, No. 1, pp. 255-262, 2009.
- [24] M. Shabgard, S. Farzaneh, A. Gholipour, Investigation of the surface integrity characteristics in wire electrical discharge machining of Inconel 617, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 39, No. 3, pp. 857-864, 2017.
- [25] M. Shabgard, A. Gholipour, Experimental investigation of the influence of tools ultrasonic vibrations and external magnetic field on machining characteristics at EDM process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 495-504, 2018. (in Persian فارسی)
- [26] B. Khosrozadeh, M. R. Shabgard, Investigating the effect of simultaneous ultrasonic vibration of tool and addition of SiO₂ 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)

و برجستگی های غیر معمول در سطح قطعه کار که ناشی از چسبیدن قطرات مذابی که از چاله مذاب بیرون پریده و به خاطر شستشوی ضعیف نتوانسته اند گپ ماشینکاری را ترک کند و به سطح قطعه کار چسبیده اند، در سطوح ماشینکاری شده با فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار دیده نمی شوند [30].

از طرفی، در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، با توجه به وقوع پدیده کاویتاسیون و اعمال نیروی مغناطیسی به مواد مذاب، مقدار بیشتری از ماده مذاب از چاله مذاب به بیرون دفع می شود و انقباضهای حین انجماد ماده مذاب کمتر می شود و ترکهای کوچکتر و کمتری روی سطح ماشینکاری شده ایجاد می شود [27].

بنابراین در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار سطوح ماشینکاری شده یکنواخت تر با آسیب های سطحی کمتری (میزان ترکهای سطحی، چاله ها، دانه های باقی مانده و کره های ایجاد شده بر سطوح ماشینکاری شده کمتری) ایجاد می شود.

4- نتیجه گیری

در این مطالعه، یکپارچگی سطوح ماشینکاری شده با فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی خارجی و ارتعاشات فراصوتی ابزار بررسی شد و نتایج عمده زیر به دست آمد.

- علیرغم افزایش اندک زبری سطح ماشینکاری شده در صورت اعمال همزمان میدان مغناطیسی خارجی حول فاصله گپ و ارتعاشات فراصوتی به ابزار در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی، کیفیت سطوح ماشینکاری شده با این روش بهبود می یابد و سطوحی با ترکهای سطحی، چاله ها، دانه های باقیمانده، کره های کمتری تولید می شود.
- با افزایش شدت جریان تخلیه، زبری سطح ماشینکاری شده با فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، در همه زمانهای روشنی پالس، افزایش می یابد.
- با افزایش زمان روشنی پالس تا 50 میکرو ثانیه، زبری سطح به دست آمده از فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار، در همه شدت جریانها افزایش می یابد، اما بعد از 50 میکرو ثانیه روند افزایشی زبری سطح به دست آمده متوقف شده یا کاهش می یابد.
- با افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس، سطوحی خشن تر، با کیفیت پایین تر، با ساختار نامنظم و دارای عیوب بیشتر در فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی به همراه میدان مغناطیسی و ارتعاشات فراصوتی ابزار تولید می شوند. ایجاد عیوب سطحی با افزایش شدت جریان، بیشتر از افزایش زمان روشنی پالس است.

5- مراجع

- [1] B. Bojorquez, R. T. Marloth, O. S. Es-Said, Formation of a crater in the workpiece on an electrical discharge machine, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 9, No. 1, pp. 93-97, 2002.
- [2] M. T. Shervani-Tabar, A. Abdullah, M. R. Shabgard, Numerical study on the dynamics of an electrical discharge generated bubble in EDM, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 30, No. 1, pp. 503-514, 2006.
- [3] M. R. Shabgard, R. Ahmadi, M. Seyedzavvar, S. N. Babil Oliaei, Mathematical and numerical modeling of the effect of input parameters on the flushing efficiency of plasma channel in EDM process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 65, No. 1, pp. 79-87, 2013.

- 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 فارسی).
- [30] M. R. Shabgard, B. Khosrozadeh, B. Sadizadeh, S. 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, 2014. (in Persian فارسی)
- [27] M. R. Shabgard, B. Khosrozadeh, Study on the effect of ultrasonic assisted electrical discharge machining process on residual stress and hardness of Ti-6Al-4V alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 169-176, 2016. (in Persian فارسی)
- [28] R. Teimouri, H. Baseri, Effects of magnetic field and rotary tool on EDM performance, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 14, No. 1, pp. 316-322, 2012.
- [29] M. Shabgard, B. Khosrozadeh, Comparative study of adding nanopowders in