



بررسی تجربی تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر زبری سطح و نرخ براده‌برداری سرامیک کاربید بور

محمد نعمتی¹، احسان شکوری²، پیام ساراعیان^{3*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

3- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

* نجف‌آباد، صندوق پستی 8514143131، p_saraeian@iau-tnb.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 شهریور 1399

داوری اولیه: 31 شهریور 1399

پذیرش: 28 مهر 1399

کلیدواژگان:

ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی

کاربید بور

نرخ براده‌برداری

زبری سطح

چکیده

سرامیک‌های پیشرفته به دلیل برخورداری از ویژگی‌هایی نظیر استحکام بالا، پایداری در دماهای بالا، مقاومت بالا در برابر خوردگی و خواص مغناطیسی و الکتریکی منحصر به فرد، در ساخت قطعات خاص و استراتژیک کاربرد ویژه‌ای دارند. کاربید بور، ماده‌ای کریستالی تیره مایل به سیاه است که پس از الماس و نیتريد بور مکعبی، سخت‌ترین ماده شناخته شده محسوب می‌گردد. با توجه به ویژگی‌ها و سختی بالای کاربید بور و توانایی خاص فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی در ماشین‌کاری مواد سخت و ایجاد شکل‌های پیچیده، در این پژوهش به بررسی تجربی و آماری تأثیر پارامترهای شدت جریان و زمان روشنی پالس بر زبری سطح و نرخ براده‌برداری نمونه‌های تهیه شده از کاربید بور پرداخته شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده نشان داد، شدت جریان بیشترین تأثیر را بر زبری سطح و نرخ براده‌برداری نمونه‌ها داشته است و همچنین مقایسه تصاویر میکروسکوپی از سطح نمونه‌های ماشین‌کاری شده نیز نشان داد که افزایش شدت جریان، افزایش ترک‌ها و اندازه حفره‌ها را به همراه داشته است. به طوری که، با افزایش شدت جریان از 16 آمپر به 24 آمپر، میانگین اندازه حفره‌ها، در حدود 30% افزایش یافته است و ادامه روند افزایش شدت جریان به 32 آمپر، سبب افزایش میانگین اندازه حفره‌ها در حدود 8% شده است. همچنین طی بهینه‌سازی انجام شده به روش فاکتوریل، مقدار بهینه برای نرخ براده‌برداری و زبری سطح نمونه‌ها به ترتیب، 2/45 میلی‌متر مکعب بر دقیقه و 4/30 میکرومتر بدست آمده است.

Experimental study of the effect of electrical discharge machining parameters on surface roughness and Material removal rate of boron carbide ceramic

Mohammad Nemati¹, Ehsan Shakouri², Payam Saraeian^{3*}

1, 2- Department of Mechanical Engineering, Tehran North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

*P.O.B 8514143131, Najafabad, Iran, p_saraeian@iau-tnb.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 5 September 2020
First Decision: 21 September 2020
Accepted: 19 October 2020

Keywords:

Electrical Discharge Machining (EDM)
Boron Carbide
Material Removal Rate
Surface Roughness

Abstract

Advanced ceramics have special applications in the manufacture of special and strategic parts due to their characteristics such as high strength, stability at high temperatures, high corrosion resistance and unique magnetic and electrical properties. Boron carbide is a dark crystalline material that is the hardest known material after diamond and cubic boron nitride. Due to the high characteristics and hardness of boron carbide and the special ability of the electrical discharge machining process in machining hard materials and creating complex shapes, in this study, the effect of peak current parameters and pulse-on time on surface roughness and material removal rate of samples prepared from boron carbide has been investigated experimentally and statistically. The results of the experiments showed that the peak current had the greatest effect on the surface roughness and material removal rate of the samples and also the comparison of microscopic images of the surface of the machined samples showed that the peak current has increased the cracks and the size of the cavities. Thus, with the increase of peak current from 16 ampere to 24 ampere, the average size of the cavities has increased by about 30% and the continuation of the process of increasing the current intensity to 32 ampere has increased the average size of the cavities by about 8%. Also, during the factorial optimization, the optimal values for the sampling material removal rate and surface roughness of the samples were 2.45 mm³/min and 4.30 μm, respectively.

1- مقدمه

کاربردهای مختلف نظیر سرامیک‌های مهندسی،

بیوسرامیک‌ها، الکتروسرامیک‌ها و شیشه‌سرامیک‌ها تقسیم‌بندی

سرامیک‌های پیشرفته مواد نوظهوری می‌باشند که بر اساس

Please cite this article using:

M. Nemati, E. Shakouri, P. Saraeian, Experimental study of the effect of electrical discharge machining parameters on surface roughness and Material removal rate of boron carbide ceramic, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 11, pp. 42- 51, 2020 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

شده به روش سطح پاسخ نشان داد که ولتاژ، شدت جریان و تأثیر تعاملی شدت جریان و زمان روشنی پالس، بیشترین تأثیر را بر نرخ براده‌برداری داشته است [10].

نتایج حاصل از بررسی تأثیر پارامترهای شدت جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس بر زبری سطح، نرخ براده‌برداری و سختی فولاد PH 17-4 ماشین‌کاری شده طی فرآیند تخلیه الکتریکی، نشان داد که شدت جریان و زمان روشنی پالس بیشترین تأثیر را بر کمیت‌های مورد بررسی داشته است و با افزایش زمان خاموشی پالس، ابتدا نرخ براده‌برداری افزایش یافته و ادامه روند افزایش زمان خاموشی پالس، کاهش نرخ براده‌برداری را سبب شده است [11]. طی پژوهشی به بررسی تأثیر پارامترهای ولتاژ گپ، ظرفیت و آستانه آن بر زبری سطح و نرخ براده‌برداری قطعه کار Si C طی فرآیند میکرو ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی پرداخته شد. نتایج نشان داد که ترکیبی از ولتاژ گپ بالا و ظرفیت و آستانه پایین، زبری سطح کمتری را در پی داشته است. در حالی که، بیشترین نرخ براده‌برداری به‌ازای ولتاژ گپ، ظرفیت و آستانه بالا حاصل شده است [12].

نتایج حاصل از بررسی تأثیر پارامترهای شدت جریان، زمان روشنی پالس و قطر الکترود بر نرخ براده‌برداری فولاد AISI P20 طی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با الکترود فولادی نشان داد که پس از شدت جریان، زمان روشنی پالس و قطر الکترود بیشترین تأثیر را بر نرخ براده‌برداری داشته است [13].

طی بهینه‌سازی مشخصه‌های فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی روی زبری سطح و نرخ براده‌برداری قطعه کار AA6061 نتایج نشان داد که زبری سطح و نرخ براده‌برداری با افزایش زمان روشنی پالس و شدت جریان افزایش می‌یابد. همچنین بررسی میکروسکوپی نمونه‌ها نشان داد که نرخ انرژی ورودی تأثیر بالایی بر زبری سطح نمونه‌ها داشته است [14]. طی بهینه‌سازی انجام شده به روش سطح پاسخ، به بررسی تأثیر پارامترهای شدت جریان، زمان روشنی پالس و درصد $Ti B_2$ در الکترود مسی بر نرخ براده‌برداری و نرخ فرسایش ابزار طی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی مونل 400 پرداخته شد. نتایج نشان داد که شدت جریان بیشترین تأثیر را بر نرخ براده‌برداری و فرسایش ابزار داشته و افزودن ذرات $Ti B_2$ به الکترود مسی، به مقدار قابل توجهی نرخ فرسایش ابزار را کاهش و نرخ براده‌برداری را افزایش می‌دهد [15].

طی تحقیقی با هدف افزایش نرخ براده‌برداری و کاهش زبری سطح به ارزیابی تأثیر جنس الکترود و تأثیر پارامترهای

می‌شوند. در بین سرامیک‌های مهندسی، کاربید بور (B_4C) به دلیل برخورداری از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی برجسته‌ای نظیر دانسیته پایین، فشردگی بالا، استحکام بالا، پایداری حرارتی و مقاومت در برابر خوردگی حتی در دماهای بالا، کاربرد گسترده‌ای در صنایع زرهی، هسته‌ای و ساخت ساینده‌ها و ابزارهای برش دارد [1-3].

کاربید بور ماده‌ای کریستالی و به رنگ تیره مایل به سیاه است که پس از الماس و نیتريد بور مکعبی، سخت‌ترین ماده شناخته شده است. کاربید بور دیرگداز بوده و نقطه ذوب و جوش بالایی دارد. دانسیته این ماده در مقایسه با سایر سرامیک‌ها پایین است و به دلیل وجود پیوند کووالانت درون شبکه کریستالی، این ماده از استحکام بالایی برخوردار می‌باشد [4].

فرآیندهای ماشین‌کاری متنوعی جهت تولید محصول از این ماده مورد استفاده قرار می‌گیرد که با توجه به ویژگی‌های کاربید بور، استفاده از فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، به دلیل توانایی ماشین‌کاری مواد سخت و ایجاد شکل‌های پیچیده به عنوان روشی مناسب برای تولید محصول از این ماده معرفی شده است [5].

ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، یک فرآیند ترموالکتریک است که در آن انرژی حرارتی حاصل از جرقه، برای براده‌برداری از مواد رسانا استفاده می‌گردد. ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی یک روش براده‌برداری است که در آن وقتی اختلاف پتانسیل بین دو الکترود (ابزار و قطعه کار)، به قدر کافی افزایش می‌یابد، یک تخلیه الکتریکی در سیال صورت می‌گیرد و جرقه‌ای در نزدیک‌ترین فاصله بین ابزار و قطعه کار ایجاد می‌شود. طی وقوع هر جرقه، بخش بسیار کوچکی از ماده از سطح قطعه کار جدا می‌گردد و در نهایت بعد از تعداد زیادی جرقه، شکل مکمل پیشانی ابزار با ایجاد حفره‌ای در قطعه کار حک می‌گردد [6-8].

در این راستا، طی پژوهشی به بهینه‌سازی پارامترهای شدت جریان، سرعت دوران ابزار، سیکل کاری، کنترل گپ و فشار سیال با هدف کاهش زبری سطح و فرسایش ابزار و افزایش نرخ براده‌برداری کامپوزیت زمینه فلزی Al/SiC پرداخته شد. نتایج حاصل از تحلیل آماری انجام شده نشان داد که بیشترین درصد مشارکت مربوط به کنترل گپ و کمترین درصد مشارکت مربوط به سیکل کاری و تأثیرات تعاملی پارامترها بوده است [9]. در بررسی تأثیر پارامترهای ولتاژ، شدت جریان و زمان روشنی پالس بر نرخ براده‌برداری، طی ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی کامپوزیت زمینه فلزی $Al-Mg_2Si$ ، نتایج حاصل از تحلیل آماری انجام

که ترکیب شیمیایی آن با استفاده از دستگاه XRD مدل EMMA، طی استاندارد مرجع آزمون BS EN 13925 مشخص گردیده است. ترکیب شیمیایی این سرامیک، در جدول 1 ارائه شده است. برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا نمونه‌ها به شکل صفحاتی با ابعاد $100 \times 100 \times 10$ میلی‌متر آماده‌سازی گردید. سپس به منظور انجام عملیات ماشین کاری، از ماشین تخلیه الکتریکی Charmilles مدل Roboform 200، استفاده شده است. این دستگاه دارای قابلیت برنامه نویسی بوده و توانایی ماشین کاری با استراتژی‌های مختلف را دارا می‌باشد.

دی‌الکترونیک مصرفی جهت انجام آزمایش‌ها، نفت سفید تجاری و نحوه شستشوی دی‌الکترونیک به صورت غوطه‌وری توأم با پاششی انتخاب گردید. قطبیت در تمام حالت‌های فرآیندی به صورتی تنظیم شد که قطعه کار منفی و الکتروود مسی مثبت باشد. الکتروود مسی استفاده شده در این پژوهش با چگالی $8/9$ گرم بر سانتی‌متر مکعب، دارای ابعاد $20 \times 10 \times 10$ میلی‌متر بوده که نتایج حاصل از بررسی ترکیب شیمیایی الکتروود با استفاده از روش پراش اشعه ایکس طی جدول 2 ارائه شده است.

در ادامه به منظور بررسی تجربی تأثیر پارامترهای فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر زبری سطح و نرخ براده برداری نمونه‌ها، مطابق با جدول 3 به معرفی پارامترها و سطوح آزمایش، پرداخته شد. انتخاب پارامترها و سطوح آزمایش با مراجعه به پیشینه تحقیقات مطالعه شده در این زمینه انجام شده است [14-16]. همچنین، طی بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های مقدماتی انجام شده، مقدار ولتاژ و زمان خاموشی پالس به ترتیب، 30 ولت و 100 میکروثانیه، ثابت در نظر گرفته شده است.

جدول 1 ترکیب شیمیایی کاربرد بور

Table 1 Chemical composition of Boron Carbide

درصد (%)	نماد	عنصر
0/07	Al	آلومینیوم
0/42	Fe	آهن
1/11	W	تنگستن
1/96	Ti	تیتانیم
37/60	C	کربن
58/84	B	بور

جدول 2 ترکیب شیمیایی الکتروود مسی

Table 2 Chemical composition of copper electrode

Ni	Fe	Pb	Sn	Zn	Cu	عنصر
0/007	0/009	0/006	0/009	0/14	99/83	درصد

ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر فولاد AISI 1040 پرداخته شد. نتایج نشان داد، افزایش جریان تخلیه و زمان روشنی پالس، افزایش نرخ براده برداری و زبری سطح را به دنبال دارد و استفاده از الکتروود ساخته شده از ALSIMG در مقایسه با الکتروود مسی، کاهش زبری سطح نمونه‌ها را سبب شده است [16].

طی پژوهشی به بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و ایجاد ترکیب مناسبی از پارامترهای ورودی جهت کاهش نرخ فرسایش ابزار و افزایش نرخ براده برداری طی ماشین کاری فولاد AISI 2312 گرم‌کار پرداخته شد. سپس جهت بهینه‌سازی پاسخ‌ها از الگوریتم ازدحام ذرات استفاده گردید. نتایج نشان دهنده کارایی بهینه سازی انجام شده به روش الگوریتم ازدحام ذرات بود، به طوری که خطای ایجاد شده طی این بهینه‌سازی کمتر از 4% برآورد شد [17]. نتایج حاصل از بررسی تجربی و تحلیل آماری تأثیر پارامترهای شدت جریان و زمان روشنی و خاموشی پالس بر نرخ براده برداری و نرخ فرسایش ابزار طی ماشین کاری تخلیه الکتریکی کامپوزیت آلومینیوم-کارباید بور نشان داد که شدت جریان بیشترین تأثیر را بر کمیت‌های مورد بررسی داشته است [18].

سرامیک پیشرفته کاربرد بور، به دلیل برخورداری از خواص منحصر به فردی همچون استحکام فوق العاده بالا، نقطه ذوب بالا، دانسیته پایین و خواص مغناطیسی و الکتریکی خاص، پتانسیل بالایی برای بسیاری از کاربردهای مکانیکی، شیمیایی، هسته‌ای دارند. کاربرد ویژه این ماده در صنایعی از جمله صنایع دفاع، هوافضا و خودروسازی، سبب شده که کاربرد بور یک ماده استراتژیک محسوب شود. مطالعه پیشینه تحقیقات انجام شده پیرامون ماشین کاری مواد مختلف طی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی نشان داد که تحقیقات گسترده‌ای در زمینه بررسی تأثیر پارامترهای مختلف فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر روی مواد مختلفی از جمله انواع فولادها، سرامیک‌ها و آلیاژهای مختلف انجام شده است. در حالی که در زمینه ماشین کاری کاربرد بور طی فرآیند تخلیه الکتریکی موردی یافت نشد. بنابراین، با توجه به ویژگی‌ها و سختی بالای کاربرد بور و توانایی خاص فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی در ماشین کاری مواد سخت و ایجاد شکل‌های پیچیده، در این پژوهش به بررسی تأثیر پارامترهای شدت جریان و زمان روشنی پالس بر زبری سطح و نرخ براده برداری نمونه‌های تهیه شده از کاربرد بور پرداخته شده است.

2- روش تجربی

جنس قطعه کار استفاده شده در این پژوهش کاربرد بور می‌باشد

0/8mm انجام گردید. به این ترتیب که اندازه گیری میانگین زبری سطح برای هر حالت فرآیندی، در سه ناحیه و راستای مختلف از نمونه ها انجام گردید و جهت اطمینان از درستی نتایج، هر آزمون 3 بار تکرار شد.

در ادامه جهت بررسی توپوگرافی سطوح ماشین کاری شده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی 3 TESCAN VEGA با قابلیت بزرگنمایی تا 100000 برابر استفاده شده است. در شکل 1 نمایی از نمونه های کاربید بور ماشین کاری شده طی فرآیند تخلیه الکتریکی نشان داده شده است.

3- نتایج و بحث

در این قسمت پس از انجام آزمایش ها، به تحلیل آماری نتایج حاصل از تأثیر پارامترهای متغیر ورودی بر میزان زبری سطح و نرخ براده برداری نمونه های کاربید بور ماشین کاری شده طی فرآیند تخلیه الکتریکی پرداخته شده است.

3-1- بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر زبری سطح نمونه ها

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر زبری سطح نمونه ها، پس از اندازه گیری مقدار زبری سطح در هر حالت فرآیندی، به منظور بررسی اهمیت نسبی پارامترها، از آنالیز واریانس (ANOVA) استفاده شد. بنابراین، پس از بررسی کفایت مدل طی مواردی نظیر، نرمال بودن مقادیر، فرض ثابت بودن واریانس ها، نمودار هیستوگرام و نمودار مستقل از زمان، آنالیز واریانس برای زبری سطح نمونه ها، در جدول 5، ارائه شده است.

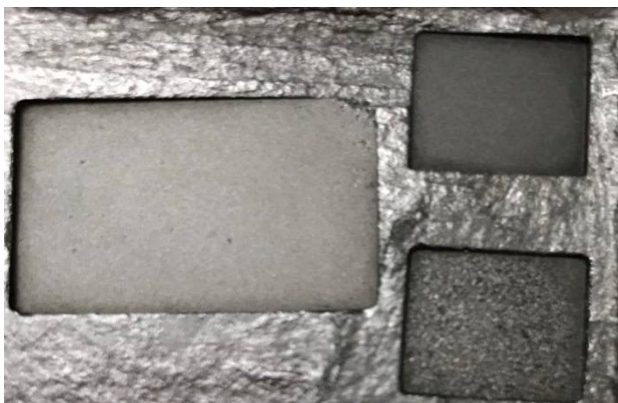


Fig. 1 View of machined samples

شکل 1 نمایی از نمونه های ماشین کاری شده

در این آنالیز، مقایسه انحراف کل نمونه ها با استفاده از آزمون F و تعیین سطوح معنادار نیز با استفاده از مقدار P Value

جدول 3 پارامترها و سطوح انتخابی فرآیند

Table 3 Selected process parameters and their levels

نمایش متغیرها	پارامترهای ورودی	سطوح آزمایش
I شدت جریان (A)		8 12 16 24 32
T_{On} زمان روشن پالس (μs)		25 50 100
V_{ocv} ولتاژ مدار باز (v)		120
V ولتاژ ماشین کاری (v)		30
T_{off} زمان خاموشی پالس (μs)		100
T زمان ماشین کاری (min)		15

در این پژوهش، به منظور بهره مندی از تحلیل آماری نتایج، از نرم افزار مینی تب 17 و روش فاکتوریل کامل استفاده شده است. در جدول 4 طراحی آزمایش انجام شده توسط نرم افزار مینی تب ارائه شده است.

به منظور بررسی تغییرات نرخ براده برداری، جرم نمونه ها قبل و بعد از انجام فرآیند ماشین کاری توسط ترازوی دیجیتال با دقت 0/001 گرم مورد توزین قرار گرفت و از حاصل تقسیم تفاضل حجم براده برداشته شده بر زمان ماشین کاری، نرخ براده برداری در هر حالت فرآیندی محاسبه گردیده است.

جدول 4 جدول طراحی آزمایش

Table 4 Design of Experiment table

NO	Current (A)	Ton (μs)	MRR (mm ³ /min)	SR (μm)
1	12	50	1/111	4/90
2	16	25	0/926	4/30
3	8	25	0/370	2/30
4	8	50	0/741	3/40
5	12	100	2/407	5/22
6	16	100	4/630	6/76
7	16	50	1/852	5/90
8	8	100	1/296	4/25
9	24	100	5/185	7/40
10	12	25	0/556	3/45
11	24	50	3/519	6/86
12	32	50	5/556	7/92
13	32	25	2/778	6/36
14	32	100	8/333	9/30
15	24	25	1/481	5/70

همچنین میانگین زبری سطح نمونه ها نیز با استفاده از دستگاه زبری سنج Mitutoyo مدل Sj-201 با رزولوشن 0/002 میکرومتر، اندازه گیری شده است. اندازه گیری میانگین زبری سطح نمونه ها، طی حرکت رفت و برگشتی نوک سوزنی شکل دستگاه در مسیری به طول 4 mm، شامل 5 قسمت به طول

نحوه تأثیرگذاری پارامترها بر زبری سطوح ماشین کاری شده، مطابق شکل 4، نمودار مقادیر میانگین سازگار شده بر حسب زبری سطح نمونه‌ها نیز ترسیم شد.

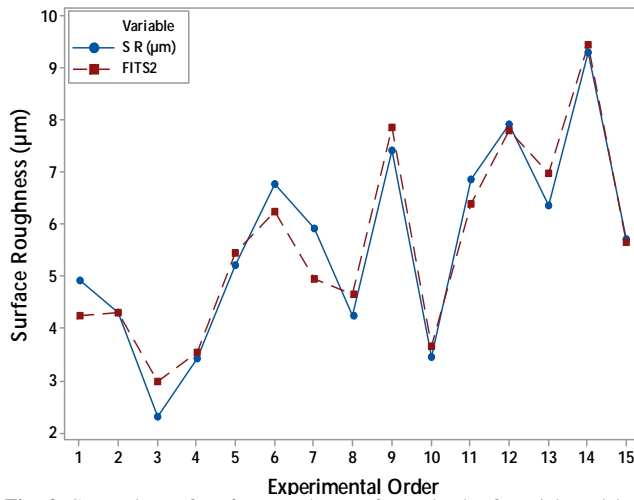


Fig. 2 Comparison of surface roughness of samples by factorial model and experimental method

شکل 2 مقایسه زبری سطح نمونه‌ها طی مدل فاکتوریل و روش تجربی

جدول 6 مقایسه درصد خطا برای زبری سطح نمونه‌ها، طی مدل فاکتوریل و روش تجربی

Table 6 Comparison error percentage for surface roughness of samples by factorial model and experimental method

NO	I (A)	T _{on} (µs)	SR (µm)	Model (µm)	Error(%)
7	16	50	5/90	4/95	-16/10

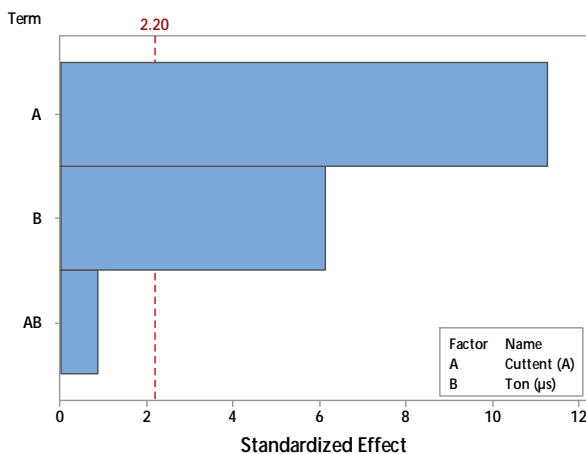


Fig. 3 Pareto plot for surface roughness of samples

شکل 3 نمودار پارتو برای زبری سطح نمونه‌ها

این نمودار بیانگر اختلاف میان میانگین پاسخ و سطوح هر پارامتر می‌باشد. همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود، این اختلاف، برای پارامتر شدت جریان بیشتر از زمان روشنی پالس بوده که نشان دهنده تأثیر بیشتر این پارامتر بر کنترل زبری

انجام شده است. از آنجایی که پارامترها با سطح اطمینان 95% مدل شده‌اند، بنابراین مقادیر کمتر از 0/05 برای P، به عنوان مقادیر معنادار در نظر گرفته شده است.

جدول 5 آنالیز واریانس مربوط به زبری سطح نمونه‌ها

Table 5 Analysis of variance for surface roughness

Source	Degrees of freedom	Adjusted sum of squares	Adjusted mean of squares	F-value	P-value
model	3	44/601	14/867	30/56	0/000
Linear	2	44/428	22/214	45/66	0/000
I	1	31/633	31/633	65/02	0/000
T _{on}	1	13/779	13/779	28/32	0/000
Interaction	1	0/964	0/964	1/98	0/187
I × T _{on}	1	0/964	0/964	1/98	0/187

همچنین، مقدار P Value برای مدل رگرسیون و جملات خطی، کوچک‌تر از سطح معنادار 0/05 است که نشان می‌دهد که این پیش‌بینی‌کننده‌ها، تأثیر قابل توجهی بر جواب داشته‌اند. ضریب انطباق یا سازگاری مدل R^2 یا R^2_{adj} منطبق شده 92% بدست آمد که به این معنا است که داده‌ها توسط مدل پوشش داده شده است.

معادله رگرسیون برای زبری سطح نمونه‌ها، با رابطه (1) ارائه شده است.

$$\text{Surface Roughness}(\mu\text{m}) = 1.742 + 0.1110 I(\text{A}) + 0.0124 T_{\text{on}}(\mu\text{s}) + 0.000944 I(\text{A}) \times T_{\text{on}}(\mu\text{s}) \quad (1)$$

به منظور مقایسه زبری سطح بدست آمده، طی مدل طراحی شده و مقادیر حاصل از آزمایش‌های انجام شده، نمودار زبری سطح بر حسب ترتیب و نظم آزمایش‌ها، در شکل 2 ارائه شده است.

برای بررسی درصد خطا و مقایسه مقادیر بدست آمده برای زبری سطح طی دو روش فاکتوریل و روش تجربی، مقدار خطا برای بیشترین خطای ایجاد شده در اندازه‌گیری زبری سطح طی جدول 6 ارائه شده است.

مقادیر گزارش شده، نشان دهنده سازگاری و دقت پیش‌بینی مدل می‌باشد. به منظور بررسی میزان تأثیرگذاری پارامترها و تعامل آنها بر زبری سطح نمونه‌ها، مطابق شکل 3، نمودار حالت‌ها بر حسب تأثیر استاندارد شده آنها، طی نمودار پارتو ارائه گردیده است.

مطابق شکل 3، پارامترهایی که از خط مرجع عبور کرده باشند بر نتایج تأثیرگذار می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تأثیر تعاملی شدت جریان و زمان روشنی پالس، کمترین تأثیر را بر زبری سطح نمونه‌ها داشته است. جهت تعیین

3-2- بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند تخلیه الکتریکی بر نرخ براده برداری

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر نرخ براده برداری، پس از بررسی کفایت مدل ریاضی، به منظور بررسی اهمیت نسبی پارامترها، از آنالیز واریانس (ANOVA) استفاده شد. به این ترتیب، آنالیز واریانس برای نرخ براده برداری، در جدول 7 ارائه شده است. از آنجایی که در این آنالیز پارامترها با سطح اطمینان 95% مدل شده اند، بنابراین مقادیر کمتر از 0/05 برای P، به عنوان مقادیر معنادار در نظر گرفته شده است.

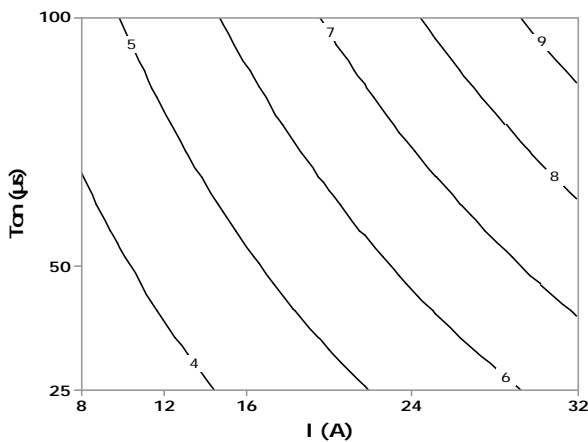


Fig.5 Contour plot Surface roughness versus current and pulse- on time
شکل 5 نمودار کانتور زبری سطح بر حسب شدت جریان و زمان روشنی پالس

جدول 7 آنالیز واریانس مربوط به نرخ براده برداری

Table 7 Analysis of variance for MRR

Source	Degrees of freedom	Adjusted sum of squares	Adjusted mean of squares	F-value	P-value
model	3	71/545	23/848	66/69	0/000
Linear	2	71/268	35/634	144/47	0/000
I	1	44/735	44/734	181/37	0/000
T _{on}	1	28/210	28/209	114/37	0/000
Interaction	1	5/397	5/396	21/88	0/001
I × T _{on}	1	5/397	0/246	21/88	0/001

همچنین مقدار P Value برای تمامی جملات، کوچکتر از سطح معنادار 0/05 است که نشان می دهد که این پیش بینی کننده ها، تأثیر قابل توجهی بر جواب داشته اند. همچنین ضریب انطباق یا سازگاری مدل R^2 یا R^2_{adj} منطبق شده نیز، حدود 95% بدست آمد که به این معنا است که داده ها توسط مدل پوشش داده شده است. به این ترتیب، معادله رگرسیون برای

سطح نمونه می باشد.

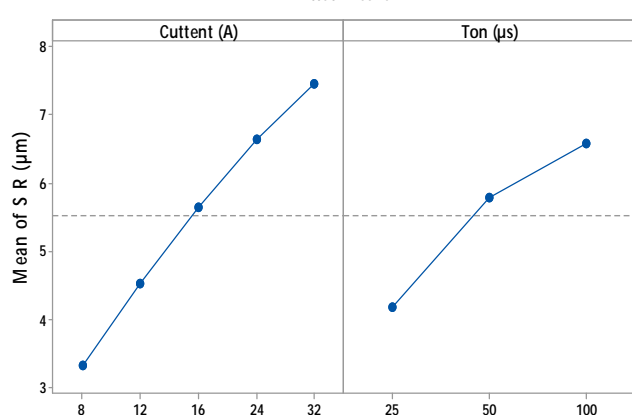


Fig. 4 Comparison the effect of process parameters on surface roughness

شکل 4 مقایسه میزان تأثیر پارامترهای فرآیند بر زبری سطح نمونه ها

با افزایش شدت جریان، انرژی تخلیه الکتریکی بیشتر می شود و نیروهای ضربه ای روی سطح ماشین کاری شده بیشتر می گردد و سبب می شود که مواد مذاب بیشتری خارج گردد که منجر به تولید حفره های عمیق تر و بزرگتر و به تبع آن افزایش زبری سطح می شود [8].

تأثیر تعاملی پارامترهای فرآیند بر زبری سطح نمونه ها نیز طی شکل 5 مورد بررسی قرار گرفته است.

همان طور که در شکل 5 مشاهده می شود، افزایش توأم شدت جریان و زمان روشنی پالس، افزایش زبری سطح نمونه ها را به همراه داشته است. پارامتر شدت جریان تأثیر مستقیم بر میزان انرژی تخلیه دارد. بنابراین افزایش انرژی تخلیه در ناحیه گپ به واسطه افزایش شدت جریان، سبب تشکیل حفره های بزرگتر بر سطح نمونه و افزایش زبری سطح نمونه ها می شود که در برخی از منابع به آن اشاره شده است [11، 19]. علاوه بر آن، مطابق مقالات مطالعه شده در این زمینه، به ازای مقادیر بالاتر برای شدت جریان، جرقه قوی تر با انرژی گرمایی بالاتر تولید می شود و به این ترتیب مقدار حرارت بیشتری میان الکترودها منتقل می گردد. بنابراین با افزایش شدت جریان، تخلیه الکتریکی در سطح نمونه با شدت بیشتری انجام شده و سبب می شود که خروج مواد مذاب از حوضچه مذاب با شدت بیشتری انجام گیرد که افزایش زبری سطح نمونه ها را در پی دارد [20].

با افزایش توأم زمان روشنی پالس و شدت جریان، انرژی تخلیه و زمان انتقال آن به موضع ماشین کاری افزایش می یابد که شکل گیری حفره های عمیق تر و بزرگتر و به دنبال آن افزایش زبری سطح نمونه ها را به همراه دارد [16].

و زمان روشنی پالس بیشترین تأثیر را بر نرخ براده برداری داشته است.

برای تعیین نحوه تأثیرگذاری پارامترها بر زبری سطوح ماشین کاری شده، مطابق شکل 8، نمودار مقادیر میانگین سازگار شده بر حسب نرخ براده برداری نمونه‌ها نیز ترسیم شد. این نمودار تفاوت مقدار میانگین پاسخ را از سطوح بالایی و پایینی هر پارامتر نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 8 مشاهده می‌شود، پارامتر شدت جریان، تأثیر بیشتری بر نرخ براده برداری داشته است. تأثیر تعاملی پارامترهای فرآیند بر نرخ براده برداری نیز طی شکل 9، مورد بررسی قرار گرفته است.

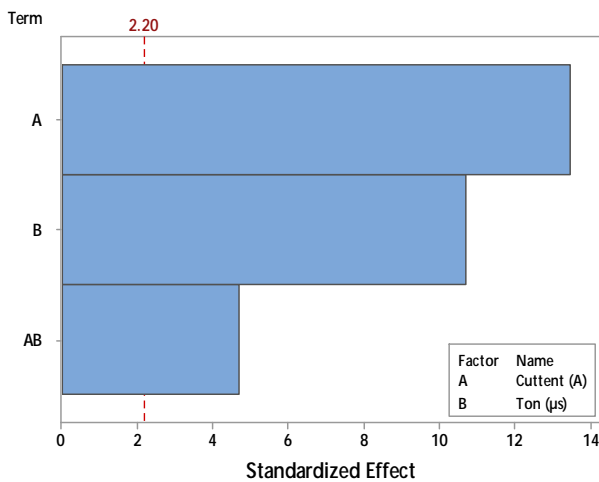


Fig. 7 Pareto plot for MRR of samples

شکل 7 نمودار پارتو مربوط به نرخ براده برداری نمونه‌ها

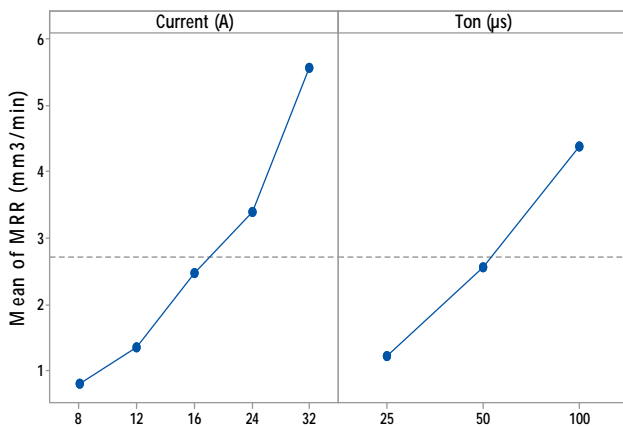


Fig. 8 Comparison the effect of process parameters on MRR

شکل 8 مقایسه میزان تأثیر پارامترهای فرآیند بر نرخ براده برداری

همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌شود، افزایش توأم شدت جریان و زمان روشنی پالس، افزایش نرخ براده برداری را به همراه داشته است. زیرا مطابق منابع مطالعه شده در این زمینه، افزایش شدت جریان، افزایش انرژی تخلیه و چگالی جریان در

نرخ براده برداری، طی معادله (2)، ارائه شد.

$$\text{MRR}(\text{mm}^3/\text{min}) = -0.838 + 0.0627 I (A) + 0.00008 \text{Ton} (\mu\text{s}) + 0.002233 I (A) \times \text{Ton} (\mu\text{s}) \quad (2)$$

به منظور مقایسه نرخ براده برداری بدست آمده، طی مدل طراحی شده و مقادیر حاصل از آزمایش‌های انجام شده، نمودار نرخ براده برداری بر حسب ترتیب و نظم آزمایش‌ها، طی شکل 6 ارائه شده است.

برای بررسی درصد خطا و مقایسه مقادیر بدست آمده برای نرخ براده برداری طی دو روش فاکتوریل و روش تجربی، مقدار خطا برای بیشترین خطای ایجاد شده در اندازه‌گیری نرخ براده برداری طی جدول 8 ارائه شده است.

مقادیر گزارش شده، نشان دهنده سازگاری و دقت پیش‌بینی مدل می‌باشد. به منظور بررسی میزان تأثیرگذاری پارامترها و تعامل آنها بر نرخ براده برداری، مطابق شکل 7، نمودار حالت‌ها بر حسب تأثیر استاندارد شده آنها، طی نمودار پارتو ارائه گردیده است.

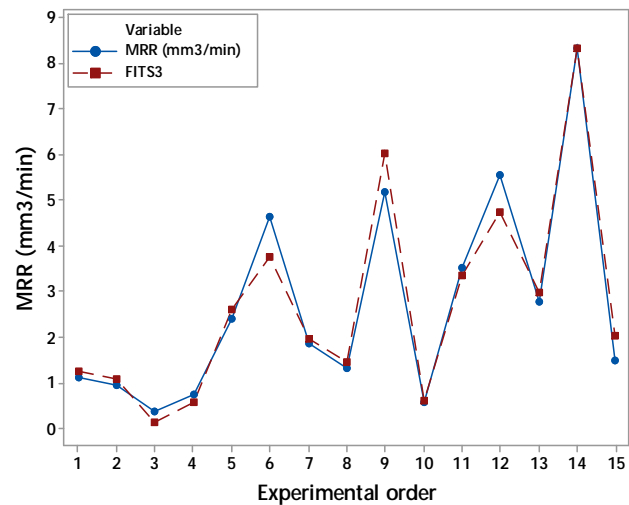


Fig. 6 Comparison of material removal rate by factorial model and experimental method

شکل 6 مقایسه نرخ براده برداری طی مدل فاکتوریل و روش تجربی

جدول 8 مقایسه درصد خطا برای نرخ براده برداری، طی مدل فاکتوریل و روش تجربی

Table 8 Comparison error percentage for MRR of samples by factorial model and experimental method

NO	I (A)	T _{on} (µs)	MRR (µm)	Model (µm)	Error (%)
12	32	50	5/55	4/74	-14/6

مطابق شکل 7، پارامترهایی که از خط مرجع عبور کرده باشند بر نتایج تأثیرگذار می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از شدت جریان، زمان روشنی پالس و تأثیر تعاملی شدت جریان

شدت جریان بر کمیت‌های مورد بررسی بیشتر از زمان روشنی پالس بوده است. به همین دلیل با ثابت نگاه داشتن زمان پالس، به بررسی تأثیر تغییرات شدت جریان بر توپوگرافی سطح نمونه‌ها پرداخته شده است. در شکل‌های 11 تا 13، نمایی از تصاویر حاصل از سطح نمونه‌های ماشین کاری شده با بزرگ‌نمایی 2000 برابر، ارائه شده است.

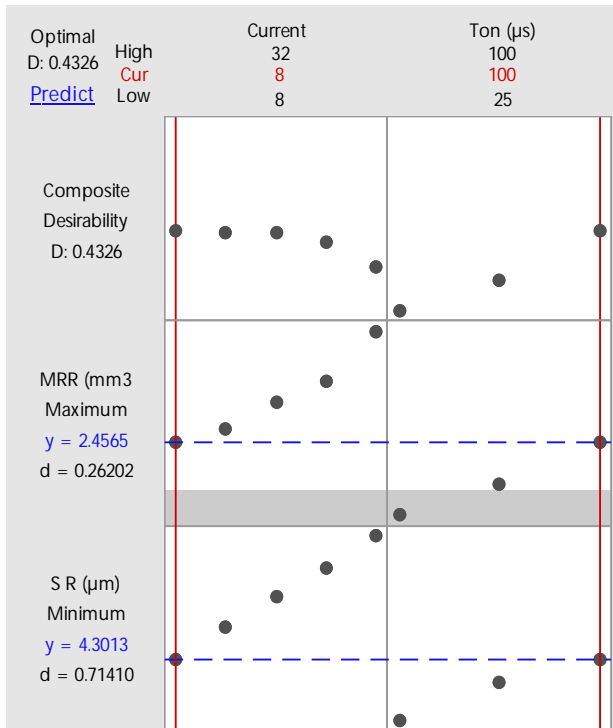


Fig. 10 Optimal values for the MRR and surface roughness of the samples

شکل 10 مقادیر بهینه برای کمیت‌های نرخ براده برداری و زبری سطح نمونه‌ها

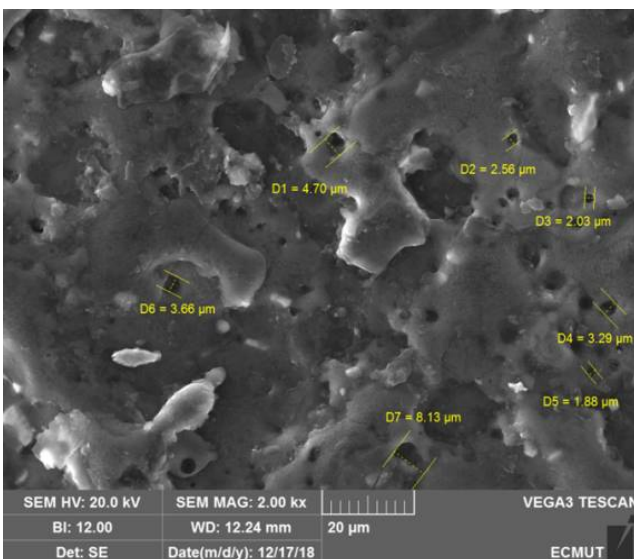


Fig. 11 SEM image of machined sample surface (Pulse-on time 100 µs and current 16 A)

شکل 11 تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح نمونه ماشین کاری شده

ناحیه گپ را به همراه دارد که افزایش سریع حرارت در موضع ماشین کاری را سبب می‌شود که این افزایش حرارت، ذوب و تبخیر و خروج بیشتر مواد از حوضچه مذاب و به دنبال آن افزایش نرخ براده برداری را به همراه دارد [13، 19]. بنابراین، افزایش انرژی تخلیه در کانال پلاسما با افزایش شدت جریان و انتقال بیشتر این انرژی با افزایش زمان روشنی پالس، سبب ایجاد حوضچه مذاب بزرگتر و افزایش نرخ براده برداری می‌گردد [11].

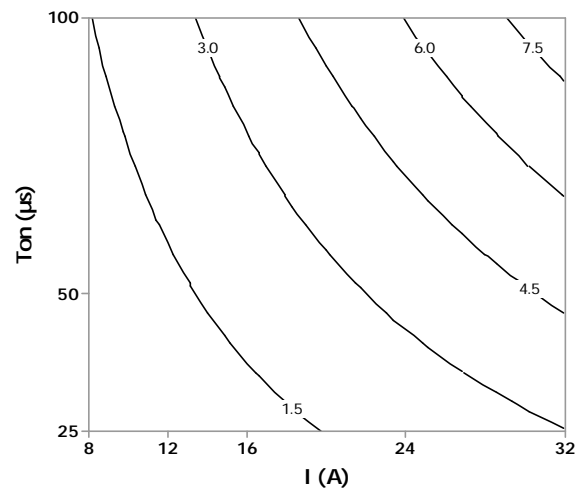


Fig. 9 Contour plot of MRR versus current and pulse-on time

شکل 9 نمودار کانتور نرخ براده برداری بر حسب شدت جریان و زمان روشنی پالس

در ادامه به منظور بهینه‌سازی پاسخ‌ها، مقادیر وارد شده به نرم‌افزار برای توابع هدف، به ازای کمترین مقدار برای زبری سطح و بیشترین مقدار برای نرخ براده برداری تنظیم گردید و به این ترتیب سطوح بهینه و مقادیر بهینه برای کمیت‌های مورد نظر تعیین گردید. همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌شود، به ازای سطوح بهینه 8 آمپر برای شدت جریان و 100 میکروثانیه برای زمان روشنی پالس، مقدار بهینه شده توسط مدل برای زبری سطح نمونه‌ها، 4/301 میکرومتر و برای نرخ براده برداری 2/456 میلی‌متر مکعب بر دقیقه به دست آمده است.

3-3- بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند تخلیه الکتریکی بر توپوگرافی سطح نمونه‌ها

جهت بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر توپوگرافی سطح نمونه‌ها، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بهره گرفته شد.

طی آزمایش‌های انجام شده مشخص گردید که تأثیر پارامتر

مجدد در سطح نمونه‌ها افزایش می‌یابد که دلیل آن را می‌توان به جامد شدن حجم بیشتری از مواد مذاب طی استفاده از شدت جریان‌های بالاتر نسبت داد [14]. افزایش شدت جریان و به دنبال آن افزایش میزان لایه انجماد مجدد در سطح نمونه‌ها، کاهش کیفیت سطح نمونه‌ها را در پی دارد.

4- نتیجه‌گیری

خواص منحصر به فرد سرامیک کاربرد بور سبب شده که این ماده اهمیت و جایگاه ویژه‌ای را در صنایع مختلف از جمله، صنایع دفاع و هسته‌ای به خود اختصاص دهد. با توجه به ویژگی‌ها و سختی بالای کاربرد بور و توانایی خاص فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی در ماشین کاری مواد سخت و ایجاد شکل‌های پیچیده، در این پژوهش به بررسی تأثیر پارامترهای شدت جریان و زمان روشنی پالس بر زبری سطح و نرخ براده برداری نمونه‌های تهیه شده از کاربرد بور پرداخته شده که اهم نتایج ارائه به صورت زیر می‌باشد.

- جهت بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر نرخ براده برداری و زبری سطح نمونه‌ها، تحلیل آماری با سطح اطمینان 95% انجام شد و میزان پوشش داده‌ها توسط مدل ریاضی ایجاد شده، برای نرخ براده برداری و زبری سطح نمونه‌ها به ترتیب در حدود 95% و 92% محاسبه شد.

- طی تحلیل آماری انجام شده، مشخص شد که شدت جریان بیشترین تأثیر را بر نرخ براده برداری و زبری سطح نمونه‌ها داشته و افزایش شدت جریان و زمان روشنی پالس، افزایش نرخ براده برداری و زبری سطح نمونه‌ها را در پی داشته است.

- طی بهینه‌سازی انجام شده، مقدار بهینه برای نرخ براده برداری و زبری سطح نمونه‌ها به ازای سطوح بهینه 8 آمپر برای شدت جریان و 100 میکرو ثانیه برای زمان روشنی پالس، به ترتیب، 2/45 میلی‌متر مکعب بر دقیقه و 4/30 میکرومتر بدست آمد.

5- مراجع

- [1] Y. Shen, G. Li, Q. An, Enhanced fracture toughness of boron carbide from microalloying and nanotwinning, Scripta Materialia, 162 (2019) 306-310.
- [2] V. Domnich, S. Reynaud, R.A. Haber, M. Chhowalla, Boron carbide: structure, properties, and stability under stress, Journal of the American Ceramic Society, 94(11) (2011) 3605-3628.
- [3] D.W. Richerson, Modern ceramic engineering:

(زمان پالس 100 میکروثانیه و شدت جریان 16 آمپر)

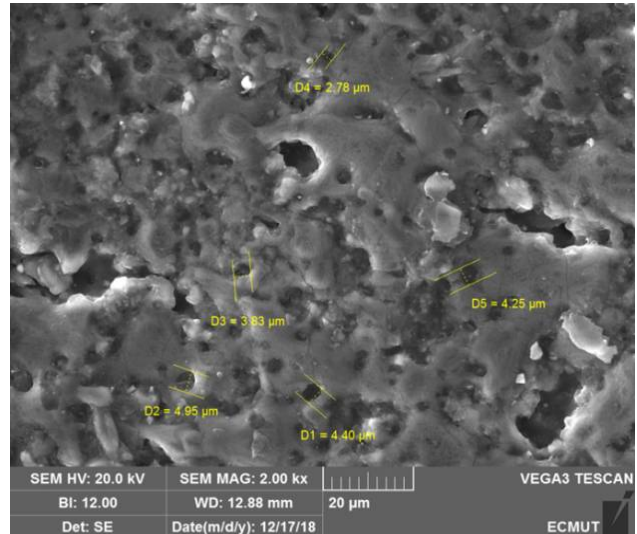


Fig. 12 SEM image of machined sample surface (Pulse-on time 100 μ s and current 24 A)

شکل 12 تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح نمونه ماشین کاری شده (زمان پالس 100 میکروثانیه و شدت جریان 24 آمپر)

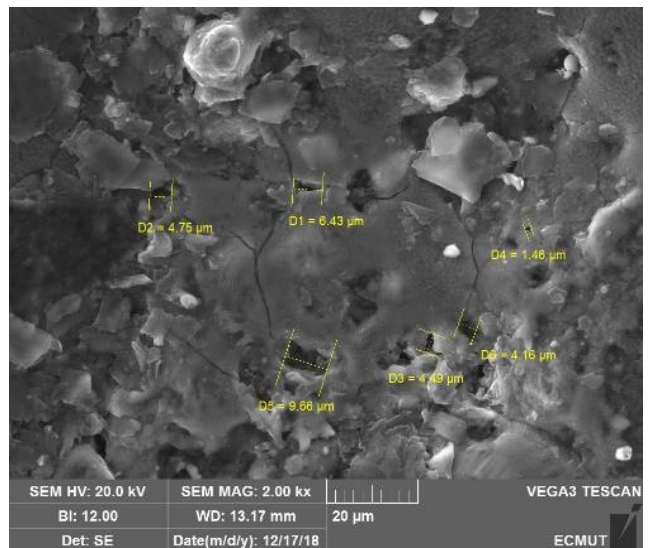


Fig. 13 SEM image of machined sample surface (Pulse-on time 100 μ s and current 32 A)

شکل 13 تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح نمونه ماشین کاری شده (زمان پالس 100 میکروثانیه و شدت جریان 32 آمپر)

مقایسه تصاویر ارائه شده نشان داد که افزایش شدت جریان، افزایش ترک‌ها و ابعاد حفره‌ها را به همراه داشته است. به طوری که، مطابق شکل‌های 11 تا 13، با افزایش شدت جریان از 16 آمپر به 24 آمپر، میانگین اندازه حفره‌ها، در حدود 30% افزایش یافته است و ادامه روند افزایش شدت جریان به 32 آمپر، سبب افزایش میانگین اندازه حفره‌ها در حدود 8% شده است. علاوه بر آن همان‌طور که در برخی از منابع به آن اشاره شده است، با افزایش شدت جریان، مقدار و ضخامت لایه انجماد

- characteristics of conductive SiC, *Ceramics International*, 42(1) (2016) 1597-1610.
- [13] P. Mishra, L.P. Singh, Experimental study of process parameters in EDM using tool steel electrode, *International Journal Of Engineering Science and Research Technology*, 6(9) (2017) 309-313.
- [14] B.C. Kandpal, J. Kumar, H. Singh, Optimization and characterization of EDM of AA 6061/10% Al₂O₃ AMMC using Taguchi's approach and utility concept, *Production & Manufacturing Research*, 5(1) (2017) 351-370.
- [15] P.M. Kumar, K. Sivakumar, N. Jayakumar, Multiobjective optimization and analysis of copper-titanium diboride electrode in EDM of monel 400™ alloy, *Materials and Manufacturing Processes*, 33(13) (2018) 1429-1437.
- [16] A.K. Sahu, S.S. Mahapatra, Comparison of performance of different tool electrodes during electrical discharge machining, (2019) 1-11.
- [17] M. Azadi Moghaddam, F. Kolahan, Modeling and optimization of the electrical discharge machining process based on a combined artificial neural network and particle swarm optimization algorithm, *Scientia Iranica*, 27(3) (2020) 1206-1217.
- [18] S. Gudipudi, S. Nagamuthu, K.S. Subbian, S.P.R. Chilakalapalli, Experimental Investigation and Mathematical Modeling for Material Removal and Tool Wear in Making of Rectangular Channels by Electric Discharge Machining (EDM) on Aluminum-Boron Carbide Composite Sintered Preform, in: *Advances in Applied Mechanical Engineering*, Springer, (2020) 1011-1019.
- [19] K. Chattopadhyay, S. Verma, P. Satsangi, P. Sharma, Development of empirical model for different process parameters during rotary electrical discharge machining of copper-steel (EN-8) system, *Journal of materials processing technology*, 209(3) (2009) 1454-1465.
- [20] M. Shabgard, M. Seyedzavvar, S.N.B. Oliaei, Influence of Input Parameters on the Characteristics of the EDM Process, *Journal of Mechanical Engineering*, 57(9) (2011) 689-696.
- properties, processing, and use in design, CRC press, (2005).
- [4] C. Cheng, K.M. Reddy, A. Hirata, T. Fujita, M. Chen, Structure and mechanical properties of boron-rich boron carbides, *Journal of the European Ceramic Society*, 37(15) (2017) 4514-4523.
- [5] 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*, 17(12) (2018) 495-504.
- [6] J.P. Davim, *Machining: fundamentals and recent advances*, Springer Science & Business Media, (2008).
- [7] M.R. Shabgard, H. Tavanaei, B. Khosrozadeh, study the effect of Electrical Discharge Machining (EDM) on residual stress and corrosion resistance of Ti-6Al-4V alloy, (2018) 1-11.
- [8] B. Jabbaripour, M. pouralishahi, Experimental Investigation of Metal Removal Efficiency and Machined Surface Texture in EDM of Titanium Aluminide Compound, *Modares Mechanical Engineering*, 17(12) (2018) 47-55.
- [9] M.S. Cheema, A. Dvivedi, A.K. Sharma, S. Biswas, Multicriteria optimization of rotary tool electric discharge machining on metal matrix composite, in: *Materials Processing Fundamentals*, Springer, (2013) 159-168.
- [10] M. Hourmand, S. Farahany, A.A. Sarhan, M.Y. Noordin, Investigating the electrical discharge machining (EDM) parameter effects on Al-Mg 2 Si metal matrix composite (MMC) for high material removal rate (MRR) and less EWR-RSM approach, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(5-8) (2015) 831-838.
- [11] V.V. Reddy, P.M. Valli, A. Kumar, C.S. Reddy, Influence of process parameters on characteristics of electrical discharge machining of PH17-4 stainless steel, *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 14(03) (2015) 189-202.
- [12] K.K. Saxena, A.S. Srivastava, S. Agarwal, Experimental investigation into the micro-EDM