



مطالعه تجربی نرخ براده‌برداری، زبری و توپوگرافی سطح ترکیب بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید در فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی

بهزاد جباری‌پور^{1*}، مهرداد مطلب‌پور علیشاهی²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی 28598، beh.jabbaripour@iauctb.ac.ir

چکیده

کلیدواژگان

ترکیبات بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید جزو گروه اندکی از مواد هستند که قابلیت کاربرد سازه‌ای مطلوب در دمای بالا که در آن‌ها استحکام ویژه (نسبت استحکام به چگالی) و سفتی ویژه (نسبت مدول الاستیسیته به چگالی) بسیار مهم است، را دارند. در این تحقیق برخی مشخصات خروجی فرایند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی این ترکیب بین‌فلزی، مانند نرخ براده‌برداری، زبری و توپوگرافی سطح ماشین‌کاری شده بررسی می‌شود. آزمایش‌های ماشین‌کاری به روش عاملی کامل طراحی شده‌اند، به طوری که دو پارامتر اصلی جریان پالس در پنج سطح و زمان روشنی پالس در چهار سطح تغییر داده می‌شوند و سایر پارامترهای ورودی ثابت نگه داشته می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که در جریان‌های کمتر (3 و 6 آمپر)، علی‌رغم افزایش زمان روشنی پالس، تغییر محسوسی در نرخ براده‌برداری از قطعه‌کار مشاهده نمی‌گردد و نرخ براده‌برداری به ازای این دو جریان بسیار ناچیز می‌باشد و بیانگر این است که فرایند پرداخت‌کاری تیتانیوم آلومیناید دشوار و زمان‌بر می‌باشد ولی در جریان‌های بیشتر (12، 24 و 64 آمپر) چنین شرایطی وجود ندارد و فرایند خشن‌کاری این ماده به صورت بهینه انجام‌پذیر است. در جریان بالاتر از 24 آمپر به دلیل وقوع پدیده آرک، شیب افزایش نرخ براده‌برداری کاهش می‌یابد. با افزایش جریان پالس، عموماً طول ترک‌ها بر روی سطح ماشین‌کاری شده بیشتر می‌شود و عرض دهانه ترک‌های سطحی در جریان‌های بالاتر، افزایش می‌یابد. همچنین به دلیل وقوع پدیده آرک بر روی سطح ماشین‌کاری شده به ازای مقادیر زیاد انرژی تخلیه الکتریکی، زبری و توپوگرافی سطح بسیار متفاوت از سایر جریان‌ها و زمان‌های روشنی پالس است.

ترکیب بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید
ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی
نرخ براده‌برداری
زبری سطح
توپوگرافی سطح

Experimental study of material removal rate, surface roughness and topography in electrical discharge machining of Titanium Aluminide intermetallic compound

Behzad Jabbaripour^{1*}, Mehrdad Motallebpouralishahi²

1- Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 28598, Tehran, Iran, beh.jabbaripour@iauctb.ac.ir

Keywords

Titanium Aluminide Intermetallic Compound
Electrical Discharge Machining
Material Removal Rate
Surface Roughness
Surface Topography

Abstract

Titanium aluminide intermetallic compounds are a small group of materials that can be used at high temperature structures where the specific strength (strength to density ratio) and specific stiffness (elastic modulus to density ratio) are very important. In this study, some output characteristics of electrical discharge machining (EDM) process; including material removal rate (MRR), surface roughness and topography are investigated for this material. The DOE method of full factorial is used for planning the machining tests that two main input parameters of pulse current and pulse on time are changed in five and four different levels, respectively and other input machining parameters are kept constant during tests. The results show that in lower currents (3 and 6 A), despite the increase in pulse time, there is no significant change in MRR and the MRR for these two currents is negligible, indicating that finishing process of titanium aluminide is difficult and time consuming, but there is no such situation in more currents (12, 24 and 64 A) and the roughing process of this material is optimally carried out. For the currents above the 24 A, the gradient of MRR increase, is decreased because of arc appearance. In the states of higher electrical currents, the lengths of cracks on the machined surface are increased and the widths of cracks are growing. While arc is occurred for the higher electrical discharge energy, the surface roughness and topography are intensively different from the other current and pulse on time conditions.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

B. Jabbaripour, M. Motallebpouralishahi, Experimental study of material removal rate, surface roughness and topography in electrical discharge machining of Titanium Aluminide intermetallic compound, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 29-39, 2016 (in Persian)

1- مقدمه

داده شده است.

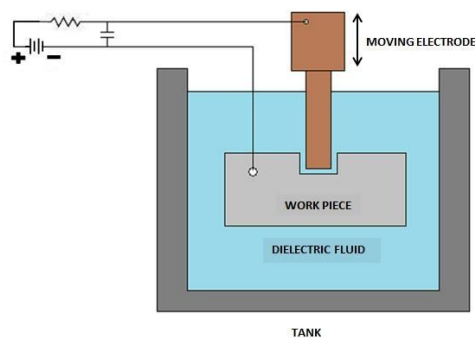


Fig. 1 Schematic illustration of electrical discharge machining [1]

شکل 1 نمایش شماتیک ماشین کاری تخلیه الکتریکی [1]

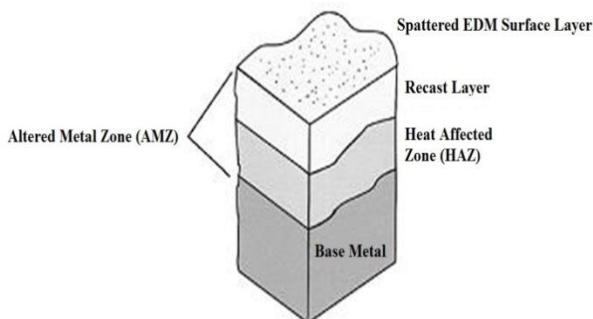


Fig. 2 Surface layers after electrical discharge machining [2]

شکل 2 لایه‌های سطحی پس از ماشین کاری تخلیه الکتریکی [2]

کیفیت سطح ماشین کاری شده به روش تخلیه الکتریکی، در قالب یکپارچگی سطح (سلامت سطح) بیان می‌گردد که معمولاً در قالب زبری سطح، انواع ترک، تنش پسماند، لایه انجماد مجدد و توپوگرافی سطح (مورفولوژی سطح) بیان می‌گردد [2]. گسترش فرایندهای تبدیل انرژی و افزایش راندمان عملکردی در این فرایندها، همواره با پیشرفت صنعت مورد نیاز بوده است. طراحی پیشرفته این فرایندها بر اساس دمای کاری بالاتر، وزن کمتر و سرعت عملیاتی بیشتر می‌باشد. سیستم‌های فلزی مورد استفاده در صنعت نزدیک به 50 سال است که گسترش یافته‌اند و تا سرحد محدودیت‌هایی که در کاربردهایشان وجود دارد، بهبود یافته‌اند و برای رسیدن به پیشرفت‌های بیشتر در این زمینه به کلاس‌های جدیدی از مواد نیاز است. ترکیبات جدید بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید⁸ به عنوان موادی که به طور گسترده از قابلیت بالایی برای برطرف کردن نیازهای طراحی ذکر شده برخوردارند، شناخته می‌شوند [3].

ماشین کاری تخلیه الکتریکی¹ که به فرسایش جرقه‌ای نیز موسوم است، یک روش براده‌برداری غیر سنتی است که در آن دو الکترود به نام ابزار و قطعه‌کار در فاصله معین و کنترل شده‌ای از یکدیگر قرار دارند و فضای بین آنها را سیالی به نام دی‌الکتریک پر کرده است. در نزدیکترین فاصله بین ابزار و قطعه‌کار، جرقه الکتریکی تولید و باربرداری صورت می‌گیرد. با این روش می‌توان مواد هادی و نیمه‌هادی را ماشین کاری نمود که در شکل 1 تصویر شماتیک این فرایند به طور مختصر نشان داده شده است [1].

از مزیت‌های این روش عدم وابستگی به سختی ماده، پلیسه‌دار نبودن قطعه‌کار، عدم نیاز به نیروی مکانیکی، امکان ماشین کاری در زوایا و جهات مختلف و نیز در مواردی عدم نیاز به قید و بند، را می‌توان نام برد.

در فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی که براده‌برداری در اثر حرارت بالا صورت می‌گیرد، دماهای موضعی بسیار بالا در حدود 8000 تا 12000 درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. این دما روی ساختار و خواص متالورژیکی و مکانیکی سطوح ماشین کاری شده اثر گذاشته و باعث تغییرات متالورژیکی در لایه‌های سطحی قطعه‌کار می‌شود. بعد از فرایند تخلیه الکتریکی مطابق شکل 2، سه لایه بر روی قسمت تحت تأثیر قرار نگرفته فلز² قطعه‌کار شکل می‌گیرد. اولین لایه، لایه پاششی یا ترشح شده³ حاصل از فوران فلز ذوب شده قطعه‌کار و اثرات مذابی مواد الکترود ابزار بر روی سطح قطعه‌کار می‌باشد و بعد از ماشین کاری به آسانی قابل رفع است. لایه زیرین آن، منطقه انجماد مجدد شده⁴ است که لایه سفید⁵ نیز نامیده می‌شود. عملیات تخلیه الکتریکی، سبب تغییرات متالورژیکی و تغییر خواص لایه انجماد مجدد می‌گردد. آخرین لایه که زیرین می‌باشد، لایه تحت تأثیر حرارت⁶ فقط تحت تأثیر حرارت قرار گرفته است ولی ذوب نشده است. ضخامت لایه انجماد مجدد و لایه تحت تأثیر حرارت وابسته به قابلیت ماشین کاری (تخلیه الکتریکی) مواد و انرژی ایجاد شده در اثر عملیات تخلیه الکتریکی می‌باشد. این نواحی استحاله شده و تأثیر پذیرفته سطح قطعه‌کار، به شدت یکپارچگی (سلامت) سطح⁷ مواد قطعه‌کار را تحت تأثیر قرار می‌دهد [2]. در شکل 2 لایه‌های سطحی حاصل از ماشین کاری تخلیه الکتریکی نشان

¹ Electrical Discharge Machining (EDM)

² Bulk

³ Spattered

⁴ Recast Layer

⁵ White Layer

⁶ Heat Affected Zone

⁷ Surface Integrity

⁸ Titanium aluminide intermetallic compound

در سال‌های اخیر تلاش‌های قابل ملاحظه‌ای جهت توسعه ترکیبات بین فلزی تیتانیوم آلومیناید برای استفاده در کاربردهای سازه‌ای با دمای کاری بالا که دارای دانسیته پایین، مقاومت بالا و مدول یانگ مناسب هستند، انجام شده است. با توجه به این خواص، ترکیبات بین فلزی تیتانیوم آلومیناید جایگزین سوپر آلیاژهای پایه نیکل سنگین تر می‌گردند که باید در دماهای کاری نسبتاً بالا (حدود 700 درجه سانتی‌گراد) ایفای نقش کنند. هرچند تردی و شکل‌پذیری ضعیف ذاتی آن‌ها در دمای محیط، از معایب اصلی این ترکیب بین فلزی می‌باشد [4].

ترکیبات بین فلزی¹، مخصوصاً آن‌هایی که از عناصر سبک مانند تیتانیوم و آلومینیوم تشکیل شده‌اند، بدلیل چگالی کم و استحکام زیاد در دمای بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند [5]. اساساً خواص برجسته این مواد از جمله چگالی پایین، مدول الاستیسیته بالا، پایداری ساختاری خوب، مقاومت خوب در برابر اکسیداسیون و خوردگی، مقاومت بالا در برابر احتراق، استحکام کششی و استحکام خزشی مناسب در دمای بالا، در مقایسه با آلیاژهای مرسوم تیتانیوم، به دلیل ماهیت شدیداً منظم و پیوندهای جهت‌دار ترکیبات آن‌ها است [6]. بر اساس این خواص، ترکیبات بین فلزی تیتانیوم آلومیناید می‌توانند در محدوده وسیعی از قطعات در صنعت هوافضا، ساخت توربین و خودروسازی به کار گرفته شوند [6].

یائو و همکاران [7] در تراشکاری سنتی تیتانیوم آلومیناید به کمک اینسرت‌های کاربیدی که توسط روش رسوب فیزیکی بخار² پوشش داده شده بودند به بررسی رفتار خستگی و یکپارچگی سطح پرداختند. آنها گزارش کردند که با افزایش عمق برش و سرعت برشی، عمق لایه حاصل از تنش فشاری باقی‌مانده، لایه سخت شده و لایه تغییر پلاستیک داده شده افزایش می‌یابد. همچنین عمر خستگی با افزایش زبری سطح افزایش چشمگیری دارد.

لیو و همکاران [8] به بررسی تجربی ماشین‌کاری الکتروشیمیایی تیتانیوم آلومیناید بر روی زبری سطح، نرخ براده برداری و گپ ماشین‌کاری پرداختند. نتایج نشان می‌دهد نرخ پیشروی، موثرترین عامل بر روی پارامترهای خروجی می‌باشد. همچنین ماشین‌کاری بهینه این ماده نیز انجام گرفت. سارکار و همکاران [9-11] ماشین‌کاری ترکیب بین فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما را به روش وایرکات مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که ماشین‌کاری این ماده به

روش تخلیه الکتریکی با راندمانی مناسب امکان‌پذیر است. تا کنون، به غیر از تحقیقات منتشر شده نویسندگان مقاله [۱۲،۱۳] هیچ‌گونه بررسی بر روی قابلیت ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی غوطه‌وری ترکیب بین فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما انجام و یا گزارش نشده است.

در تحقیق جاری، با توجه به کمبود و خلاء شدید منابع تحقیقاتی در مورد فرایندهای مختلف ماشین‌کاری (سنتی و غیر سنتی) ترکیبات بین فلزی تیتانیوم آلومیناید و به منظور مطالعه قابلیت ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی ترکیب بین فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما، با تغییر دو پارامتر اصلی ورودی ماشین‌کاری یعنی جریان و زمان روشنی پالس و ثابت نگه داشتن سایر پارامترهای ورودی، مشخصات خروجی نرخ براده برداری و زبری سطح در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی این ماده مورد بررسی قرار می‌گیرند و در ادامه توپوگرافی و مورفولوژی سطوح ماشین‌کاری شده و همچنین نحوه شکل‌گیری ترک‌های سطحی بر روی نمونه‌های قطعه‌کار، به ازای تغییرات جریان و زمان روشنی پالس مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرند.

2- تجهیزات و طراحی آزمایشات تجربی

در آزمایش‌های ماشین‌کاری از الکترودهای مسی استوانه‌ای با قطر 18 mm و طول 40 mm به عنوان ابزار استفاده شده است. چگالی الکترودهای مس مورد استفاده برابر با $8/93 \text{ gr/cm}^3$ می‌باشد و قبل از انجام آزمایش‌های ماشین‌کاری، دو طرف الکترودهای ابزار تا شماره 600 سمباده‌زنی شده بودند.

برای نمونه‌های قطعه‌کار از ترکیب بین فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما استفاده گردید. چگالی ماده مورد استفاده برابر با $3/78 \text{ gr/cm}^3$ می‌باشد. با استفاده از وایرکات نمونه‌هایی به ابعاد $10 \times 10 \times 10$ میلی‌متر از شمش ریخته‌گری شده، بریده شدند.

برای انجام تست‌ها از ماشین اسپارک با کنترلر عددی مدل شارمیلز روبوفرم³ استفاده گردید که تصویر ماشین در شکل 3 ارائه شده است و سیال دی‌الکتریک مورد استفاده نوعی روغن مخصوص ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی⁴ می‌باشد.

جهت بررسی توپوگرافی و مورفولوژی سطح ماشین‌کاری شده و همچنین نحوه شکل‌گیری ترک‌ها، از میکروسوپ الکترونی روبشی⁵ و جهت بررسی زبری سطح از دستگاه زبری‌سنج⁶ استفاده گردیده است.

³ CNC-CHARMILLES ROBOFORM 200

⁴ Oil flux-Elf 2

⁵ Scanning Electronic Microscope (SEM)- Cam Scan 2300 MV

⁶ Mahr-Perthometer M2

¹ Intermetallic compounds

² PVD

جدول 1 پارامترهای ماشین کاری مورد استفاده در آزمایشات

Table 1 Machining parameters during tests

پارامترهای ورودی	سطح 1	سطح 2	سطح 3	سطح 4	سطح 5
جریان (A)	3	6	12	24	64
زمان روشنی پالس (μs)	6.4	25	50	100	-----
ولتاژ مدار باز (V)	120	-----	-----	-----	-----
ولتاژ ماشین کاری (V)	35	-----	-----	-----	-----
زمان خاموشی پالس (μs)	25	-----	-----	-----	-----
قطبیت قطعه کار	منفی	-----	-----	-----	-----
نحوه شستشوی دی الکتریک	غوطه وری در سیال به همراه شستشوی جانبی	-----	-----	-----	-----
	با فشار ثابت	-----	-----	-----	-----



Fig. 3 Applied Charmilles EDM machine during the machining tests

شکل 3 دستگاه اسپارک شارمیلز مورد استفاده در آزمایشها

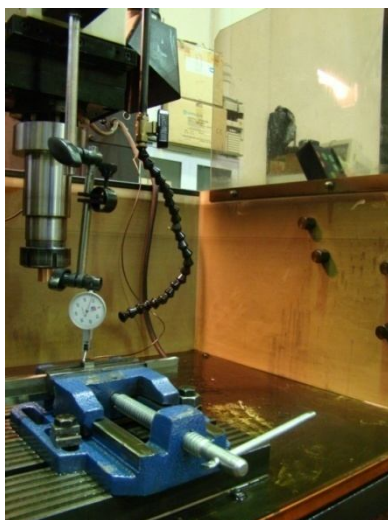


Fig. 4 Illustration of copper tool electrode, TiAl workpiece sample and adjusting the work surface before each machining test

شکل 4 نمایش الکتروود ابزار مسی، نمونه قطعه کار تیتانیوم آلومیناید و ساعت کردن سطح نمونه قطعه کار قبل از هر تست ماشین کاری

می توان روابط تجربی (3-1) را برای نرخ براده برداری بیان کرد [14]:

$$MRR = kP^n \quad (1)$$

$$P = \left(\frac{I_{dis} \times T_{dis}}{T_{on} + T_{off}} \right) \times V_{dis} \quad (2)$$

$$T_{dis} = T_{on} - T_d \quad (3)$$

همان طور که در شکل 5 مشاهده می شود و روابط (3-1) نیز آن را تأیید می کنند، نرخ براده برداری متناسب با جریان و زمان روشنی پالس است. از آنجا که نیروی محرکه ضربه ای حاصل از تبخیر سیال دی الکتریک، وابسته به انرژی تخلیه الکتریکی است، هر چه انرژی جرقه بیشتر شود، نیروی محرکه برای خارج کردن براده ها از مرکز حفره های حاصل از ماشین کاری تخلیه الکتریکی بیشتر می شود و در نتیجه اندازه حفره های حاصل از اسپارک در

تمامی تستها در حالت ایزوپالس دستگاه اسپارک انجام شده است و در این مرحله جهت بررسی مشخصه های خروجی، دو پارامتر ورودی اصلی جریان و زمان روشنی پالس در سطوح مختلف تغییر داده شدند و سایر پارامترها و شرایط کاری در تمام مراحل آزمایشات ثابت نگه داشته شدند، شرایط کاری در جدول 1 آورده شده است.

برای طراحی آزمایشات از روش عاملی کامل استفاده می شود و با توجه به پارامترهای ورودی ذکر شده در جدول 1 و سطوح آنها تعداد آزمایشات ماشین کاری برابر است با $5 \times 4 = 20$ حالت. زمان ماشین کاری هر نمونه 20 دقیقه می باشد. در شکل 4 الکتروود ابزار مسی، نمونه قطعه کار تیتانیوم آلومیناید و نحوه بستن و به کارگیری آنها نشان داده شده است. برای بستن الکتروود ابزار مسی به کلگی دستگاه از یک کولت 18 استفاده گردیده است، این کولت به واسطه یک رینگ رزوه دار بر روی کلگی دستگاه بسته می شود. همان طور که در شکل 4 مشخص است، قبل از انجام هر تست ماشین کاری، سطح نمونه قطعه کار در جهات X و Y در زیر سطح الکتروود ابزار ساعت و تنظیم می شود.

در آزمایشهای ماشین کاری تخلیه الکتریکی طراحی شده، جریان و زمان روشنی پالس تغییر داده می شوند و با استفاده از نرم افزار مینی تب به تحلیل نتایج تجربی مقادیر نرخ براده برداری و زبری سطح پرداخته می شود.

3- نرخ براده برداری از نمونه های قطعه کار

در شکل 5 نمودار اثرات اصلی پارامترهای ورودی ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر روی مقادیر نرخ براده برداری از نمونه های قطعه کار، نشان داده شده است.

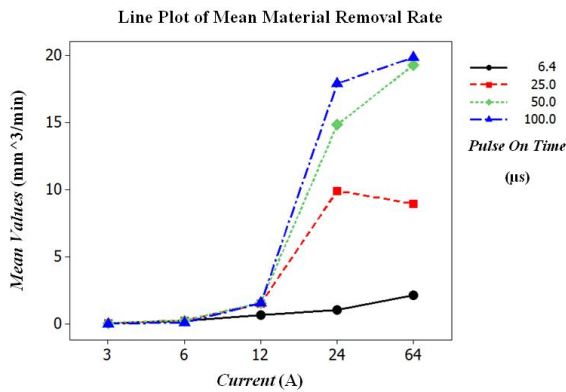


Fig. 6 Line plots of material removal variations versus current variations

شکل 6 نمودار خطی تغییرات نرخ براده برداری با توجه به تغییرات جریان

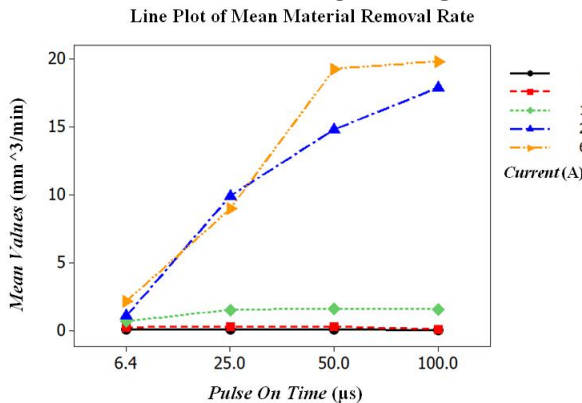


Fig. 7 Line plots of material removal variations versus pulse on time variations

شکل 7 نمودار خطی تغییرات نرخ براده برداری با توجه به تغییرات زمان روشنی پالس

همان طور که در شکل 7 دیده می شود، به غیر از جریان های 3 و 6 آمپر، در سایر جریان ها با افزایش زمان روشنی پالس، نرخ براده برداری نیز افزایش می یابد. عموماً در اکثر مواقع با افزایش زمان پالس، مقدار انرژی حرارتی بیشتری به سطح قطعه کار منتقل می گردد و مواد بیشتری ذوب می گردند و نرخ براده برداری بیشتر می شود و این اثر غالب است، مگر اینکه افزایش زمان پالس به حدی باشد که گسترش کانال پلاسما در مراحل پایانی خود باشد و منجر به تضعیف شدت تخلیه الکتریکی گردد و نهایتاً بر نرخ براده برداری اثر کاهشی بگذارد.

نکته قابل توجه دیگر در شکل 7 این است که در جریان های پالس 3 و 6 آمپر، علیرغم افزایش زمان روشنی پالس تغییر محسوسی در نرخ براده برداری از سطح قطعه کار مشاهده نمی گردد و مقادیر براده برداری از سطح قطعه کار به ازای این دو جریان بسیار ناچیز می باشد و بیانگر این است که فرایند پرداخت کاری بر روی ترکیب بین فلزی تیتانیوم آلومیناید که اصولاً در جریان پایین باید انجام شود، دشوار، زمان بر و به

سطح نمونه بزرگتر می شود و به ازای هر تخلیه الکتریکی مقادیر بیشتری از ماده قطعه کار جدا می شود [12]. به عبارتی با افزایش جریان، نرخ براده برداری از قطعه کار بیشتر می گردد، ولی شکل 5 نشان می دهد که مقدار تغییرات نرخ براده برداری با توجه به جریان بیشتر از مقدار تغییرات نرخ براده برداری با توجه به روشنی پالس است و همچنین در این شکل نرخ تغییرات با توجه به جریان بیشتر از نرخ تغییرات با توجه به زمان است، چرا که شیب کلی نمودار جریان بیشتر از شیب کلی نمودار زمان است و این بیانگر این است که جریان پالس مؤثرتر از زمان روشنی پالس، منجر به تغییرات نرخ براده برداری از سطح قطعه کار می گردد.

برای درک بهتر تغییرات نرخ براده برداری با توجه به تغییرات جریان و زمان روشنی پالس، نمودارهای خطی¹ در شکل های 6 و 7 ارائه می گردند.

همان طور که در شکل 6 دیده می شود برای تمام زمان های روشنی پالس، با افزایش جریان، نرخ براده برداری از قطعه کار نیز افزایش می یابد، ولی به غیر از حالت (زمان روشنی پالس 6/4 میکروثانیه)، برای سایر زمان های روشنی پالس بعد از جریان 24 آمپر، شیب افزایش نرخ براده برداری کاهش پیدا می کند و به وضوح دیده می شود که شیب نمودارها کاسته شده است. عموماً با افزایش بیش از حد جریان، به دلیل اینکه نرخ براده برداری نیز افزایش یافته است و دانسیته حجمی براده ها و مواد جدا شده از قطعه کار در فاصله گپ بین ابزار و قطعه کار افزایش یافته است، منجر به ناپایداری در فرایند تخلیه الکتریکی می شود و احتمال بروز آرک² و اتصال کوتاه بیشتر می گردد و در چنین حالتی از تعداد تخلیه های الکتریکی موثر و پایدار بر روی سطح قطعه کار کاسته می شود، که به دنبال آن آهنگ افزایش براده برداری نیز کاهش می یابد.

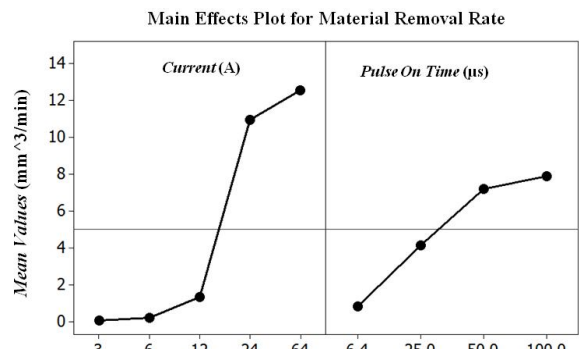


Fig. 5 Main effects plot of input parameters versus material removal rate
شکل 5 نمودار اثرات اصلی پارامترهای ورودی بر روی مقادیر نرخ براده برداری

¹ Line Plots
² Arc

شده قطعه کار و یک حفره بزرگ بر روی سطح الکتروود ابزار مسی در شکل 11 قابل مشاهده هستند.

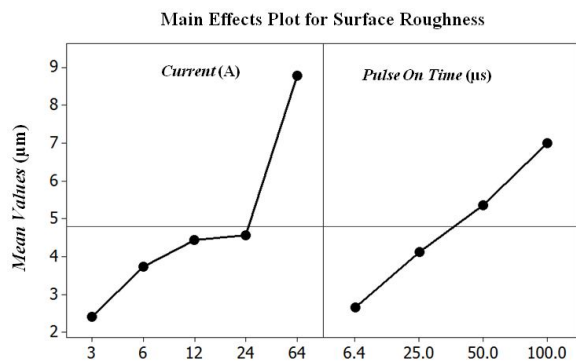


Fig. 8 Main effects plot of input parameters versus surface roughness

شکل 8 نمودار اثرات اصلی پارامترهای ورودی بر روی مقادیر زبری سطح

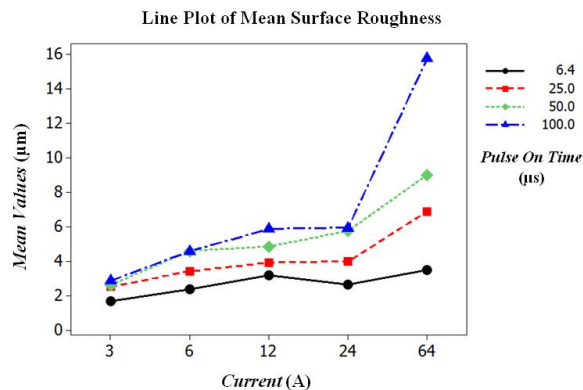


Fig. 9 Line plots of surface roughness variations versus current variations

شکل 9 نمودار خطی تغییرات زبری سطح با توجه به تغییرات جریان

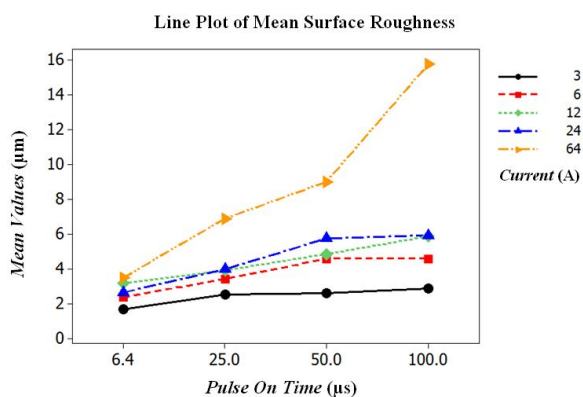


Fig. 10 Line plots of surface roughness variations versus pulse on time variations

شکل 10 نمودار خطی تغییرات زبری سطح با توجه به تغییرات زمان روشنایی

5- توپوگرافی سطح نمونه‌های ماشین کاری شده

متغیرهای زیادی بر روی یکپارچگی (سلامت) سطح اسپارک شده اثر دارند که عبارتند از: جریان تخلیه الکتریکی، مدت زمان

عبارتی پرهزینه می‌باشد ولی در جریان‌های پالس بیشتر (12، 24 و 64 آمپر) چنین شرایطی وجود ندارد و به بیان دیگر فرایند خشن کاری بر روی این ماده مشکل خاصی ندارد و به صورت بهینه نیز انجام پذیر است.

4- زبری سطح نمونه‌های قطعه کار

در شکل 8 نمودار اثرات اصلی پارامترهای ورودی بر روی مقادیر زبری سطح ماشین کاری شده نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش جریان و زمان روشنی پالس، مقدار زبری سطح نیز افزایش می‌یابد. با افزایش جریان و زمان روشنی پالس، انرژی تخلیه الکتریکی بیشتر می‌شود و نیروهای ضربه‌ای روی سطح ماشین کاری شده بیشتر می‌گردد و سبب می‌شود که مواد مذاب بیشتری خارج گردد که منجر به تولید حفره‌های عمیق‌تر و بزرگ‌تر می‌شود [14].

بعد از فوران مواد مذاب از درون حفره‌ها، در حین سرد شدن در اثر جریان سیال دی‌الکتریک، باقیمانده مواد مذاب پیرامون حفره‌ها، منجمد می‌شود و سطح زبر و ناهمواری تولید می‌کند. در جریان و زمان روشنی پالس پایین که انرژی تخلیه الکتریکی نیز کمتر است، عمق حفره‌ها کمتر می‌باشد و در نتیجه زبری سطح کمتر می‌گردد. برای درک بهتر تغییرات زبری سطح ماشین کاری شده با توجه به تغییرات جریان و زمان روشنی پالس، نمودارهای خطی در شکل‌های 9 و 10 ارائه می‌گردند.

در نمودار تغییرات زبری با توجه به جریان در شکل 8 و همچنین در شکل 9، دیده می‌شود که زبری سطح ماشین کاری شده به ازای جریان 64 آمپر و زمان 100 میکروثانیه بسیار متفاوت از زبری سطوح به ازای سایر جریان‌ها و زمان‌های پالس است. دلیل این تفاوت چشمگیر وقوع پدیده آرک بر روی سطح ماشین کاری شده می‌باشد که سطح نمونه قطعه کار را به شدت زبر کرده است.

همان‌طور که در شکل 10 نیز دیده می‌شود، به ازای تمام جریان‌ها، با افزایش زمان روشنی پالس، زبری سطح ماشین کاری شده افزایش یافته است و دلیل اصلی آن همان‌گونه که قبلاً نیز بیان شد، افزایش انرژی حاصل از تخلیه الکتریکی می‌باشد. در این شکل هم مشخص است که زبری سطح ماشین کاری شده در حالت (64 آمپر و 100 میکروثانیه) به صورت چشمگیری متفاوت از زبری سایر سطوح ماشین کاری شده است که دلیل آن پدیده آرک در این حالت ماشین کاری می‌باشد.

علائم ظاهری و نشانه‌های پدیده آرک به صورت یک برجستگی و برآمدگی تیره‌رنگ بر روی سطح نمونه ماشین کاری

در شکل 12 جهت بررسی اثر جریان پالس بر روی توپوگرافی سطح اسپارک شده، تصویر 5 نمونه با بزرگنمایی 1000X که به غیر از جریان دارای شرایط ماشین کاری یکسان می باشند، آورده شده است. برای نمونه های زیر زمان روشنی پالس برابر با $50 \mu s$ است. لازم به ذکر است که تصاویر زیر تقریباً مربوط به منطقه مرکزی سطح نمونه ماشین کاری شده می باشند، در تصاویر شکل 12، محدوده ترک های عمده و قابل توجه، با استفاده از علائم دایره ای شکل رنگی نشان داده شده است.

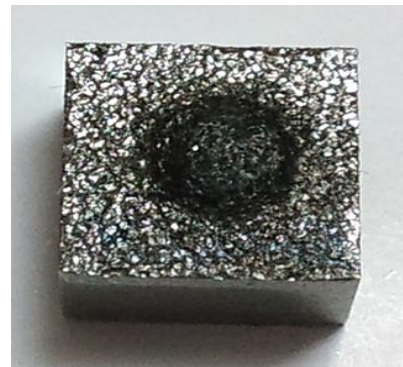
تنش های پسماند در حین ماشین کاری تخلیه الکتریکی، عمدتاً به دلیل غیریکنواختی در شار حرارتی و تغییر فاز متالورژیکی و همچنین تغییر شکل پلاستیکی غیرهمگن موضعی است [16]. با افزایش جریان پالس، عموماً طول ترک ها بیشتر می شود و عرض دهانه ترک های سطحی در جریان های بالاتر، افزایش می یابد. شکل گیری ترک های سطحی به این دلیل می باشد که تنش های کششی که حاصل از انقباض ماده در حین سرد شدن سطح قطعه کار پس از جرقه زنی هستند، در صورت گذشتن از مقدار حداکثر استحکام کششی ماده قطعه کار منجر به ایجاد ترک های سطحی می شوند. با افزایش جریان الکتریکی، انرژی تخلیه الکتریکی بیشتر می شود و نیروی ضربه ای نیز بیشتر می شود و مواد مذاب بیشتری خارج می گردد و همان طور که در شکل 12 هم مشخص است، حفره ها و ناهمواری های سطحی بزرگتر و عمیق تری تولید می شوند که این مسأله زبری سطح را نیز افزایش می دهد.

در شکل 13 برای بررسی اثر زمان روشنی پالس بر روی توپوگرافی سطح اسپارک شده، تصویر 4 نمونه با بزرگنمایی 200X که به غیر از زمان روشنی پالس دارای شرایط ماشین کاری یکسان می باشند، آورده شده است. برای نمونه های مذکور جریان پالس برابر با 6 A است. لازم به ذکر است که این تصاویر تقریباً مربوط به منطقه مرکزی سطح نمونه ماشین کاری شده می باشند.

با افزایش زمان روشنی پالس، انرژی پالس بیشتر می شود و توان و نیروی ضربه ای بالاتری در اثر تخلیه الکتریکی ایجاد می شود و سبب تولید حفره ها و ناهمواری های عمیق تر و بزرگتری در سطح قطعه کار می گردد؛ از طرف دیگر زبری سطح ماشین کاری شده را نیز افزایش می دهد که این مسأله در بخش زبری سنجی نیز تأیید شده بود.

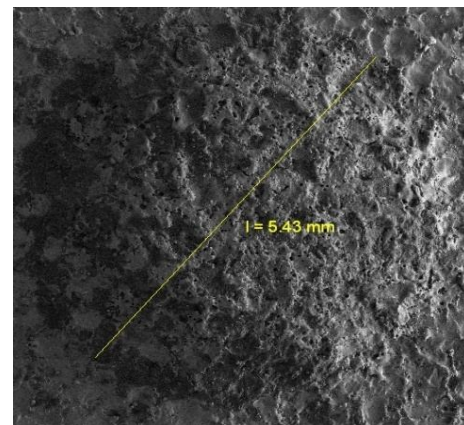
در اثر تخلیه های متوالی الکتریکی بر روی سطح قطعه کار، حفره هایی بر روی سطح ماشین کاری شده ایجاد می گردد. این

تخلیه الکتریکی، ولتاژ گپ، قطبیت الکترودها، خواص مواد ابزار و قطعه کار، مشخصات سیال دی الکتریک، غلظت براده ها در سیال و حتی ابعاد الکتروود و همه این عوامل تأثیر مهمی بر مقاومت خستگی، مقاومت خوردگی و مقاومت به سایش مواد قطعه کار دارند [15].



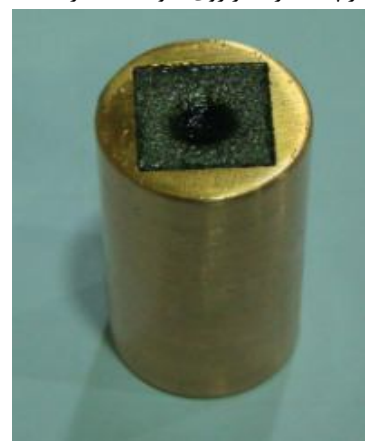
a) Arc effect on TiAl workpiece sample

الف) اثر آرک بر روی نمونه قطعه کار TiAl



b) SEM image of arc occurrence on previous TiAl workpiece sample

ب) تصویر SEM از پدیده آرک بر روی نمونه قطعه کار TiAl قبلی



c) Arc effect on copper tool electrode

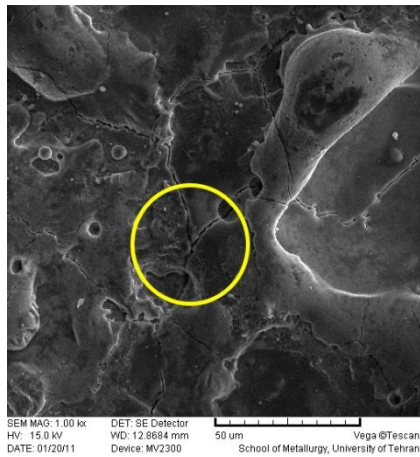
ج) اثر آرک بر روی الکتروود ابزار مسی

Fig. 11 Arc phenomenon effects on workpiece machined surface and tool electrode

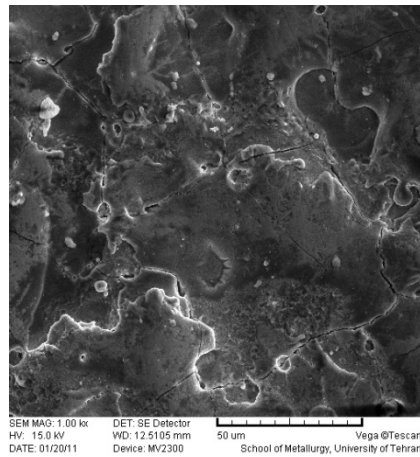
شکل 11 آثار پدیده آرک بر روی سطح ماشین کاری شده نمونه قطعه کار و الکتروود ابزار

که با افزایش زمان روشنی پالس، فاصله نسبی این دیواره‌ها و لبه‌های احاطه کننده حفره‌های حاصل از ماشین‌کاری نیز افزایش می‌یابد. با مقایسه شکل‌های 12 و 13 دیده می‌شود که با وجود میزان بزرگنمایی‌های متفاوت، در شکل 12 دانسیته ترک‌های سطحی در نمونه‌های ماشین‌کاری شده بسیار بیشتر از نمونه‌های آورده شده در شکل 13 می‌باشد.

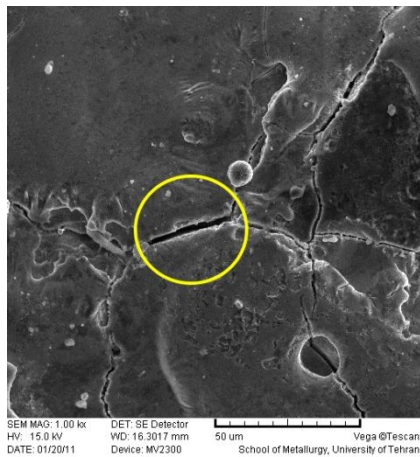
حفره‌ها به دلیل فوران بخشی از مواد مذاب روی سطح قطعه‌کار در انتهای زمان پالس ایجاد می‌گردند. با توجه به اینکه افزایش زمان روشنی پالس منجر به افزایش انرژی پالس می‌گردد، به دنبال آن ابعاد حفره‌های حاصل از ماشین‌کاری روی سطح قطعه‌کار نیز افزایش می‌یابد. اطراف حفره‌ها به طور کلی لبه‌های برجسته‌ای وجود دارد که با توجه به شکل 13 مشاهده می‌گردد



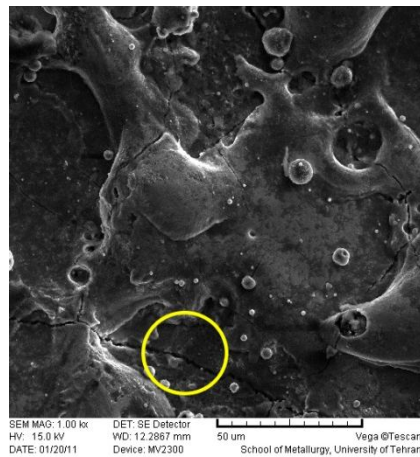
(ب) $I=6A$



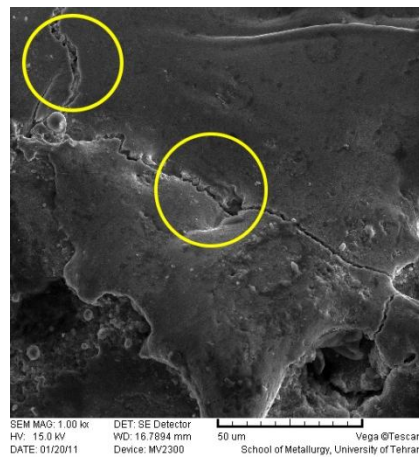
(الف) $I=3A$



(د) $I=24A$



(ج) $I=12A$



(ه) $I=64A$

Fig. 12 The effect of pulse current variations on the machined surface topography

شکل 12 اثر تغییرات جریان پالس بر روی توپوگرافی سطح ماشین‌کاری شده

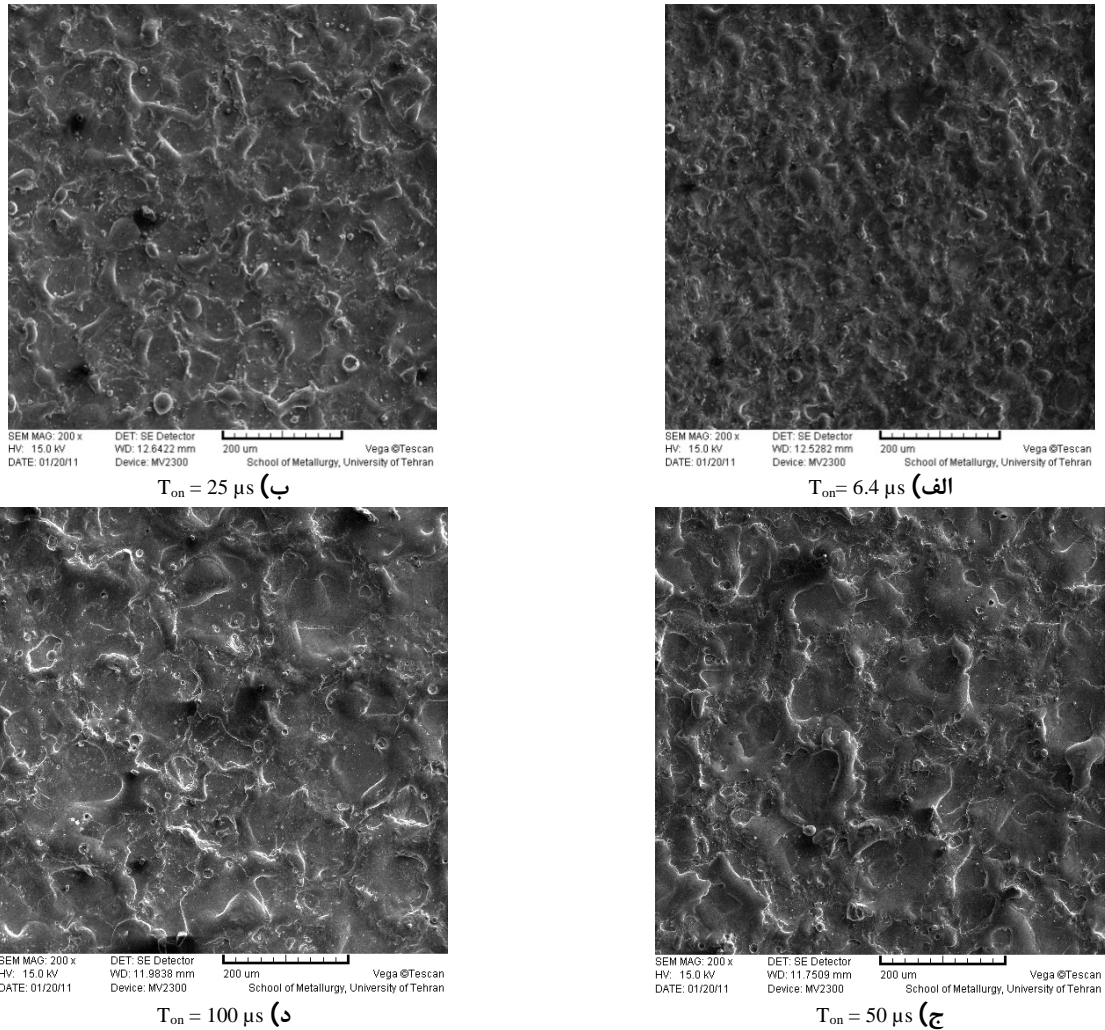


Fig. 13 The effect of pulse on time variations on the machined surface topography

شکل 13 اثر تغییرات زمان روشنی پالس بر روی توپوگرافی سطح ماشین کاری شده

به عنوان ابزار استفاده گردید. در آزمایش‌های ماشین کاری، دو پارامتر اصلی ورودی فرایند ماشین کاری تخلیه الکتریکی یعنی جریان و زمان روشنی پالس در چند سطح تغییر داده شدند و سایر پارامترهای ورودی ثابت نگه داشته شده‌اند. در ادامه مشخصات خروجی فرایند از جمله نرخ براده‌برداری، زبری و توپوگرافی سطح ماشین کاری شده نمونه‌های قطعه‌کار، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند که در ذیل به طور خلاصه نتایج حاصل ارائه می‌شوند:

- 1) نرخ براده‌برداری متناسب با افزایش جریان پالس و زمان روشنی پالس تغییر می‌کند یعنی با افزایش جریان یا زمان روشنی پالس نرخ براده برداری نیز افزایش می‌یابد.
- 2) با مقایسه نمودارهای مربوط به نرخ براده‌برداری می‌توان نتیجه گرفت که نرخ تغییرات یا به عبارتی شیب تغییرات نرخ براده‌برداری به ازای افزایش جریان پالس بیشتر از شیب تغییرات نرخ براده‌برداری به ازای افزایش زمان روشنی پالس می‌باشد.

دلیل این است که جریان پالس برای نمونه‌های آورده شده در شکل 13 به ازای تمام زمان‌های روشنی پالس برابر با 6 آمپر بوده است و در این جریان پایین، تنش‌های کششی حاصل از انقباض ماده در حین سرد شدن سطح قطعه‌کار پس از جرقه‌زنی، عمدتاً در حدی نیستند که از مقدار حداکثر استحکام کششی ماده قطعه‌کار فراتر روند و منجر به ایجاد ترک‌های سطحی فراوان گردند و دانسیته ترک‌های سطحی زیادی وجود داشته باشد. در حالی که در سطح نمونه‌های ماشین کاری شده و ارائه شده در شکل 12 به دلیل اینکه جریان‌هایی بالاتر از 6 آمپر نیز وجود دارند، به وضوح دیده می‌شود که ترک‌های سطحی بیشتر و پهن‌تر شده‌اند.

6- نتیجه‌گیری

در تحقیق جاری پس از آماده‌سازی نمونه‌های ترکیب بین فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما به عنوان قطعه‌کار، از الکترودهای مسی

T_{on} زمان روشنی پالس (μs)
 T_d زمان تاخیر جرقه (μs)
 V_{dis} ولتاژ تخلیه الکتریکی (V)

8- مراجع

- [1] M. Bernd, After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 149: pp. 736-381, 2004.
- [2] S. Kumar, R. Singh, B. Sethi, Surface modification by electrical discharge machining: A review, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 57, pp. 1-15, 2008.
- [3] C. Leyens, M. Peters, Titanium and Titanium Alloys, Fundamentals and Applications, *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*, Weinheim, 2003.
- [4] W. O. Soboyejo, T. S. Srivatsan, Advanced Structural Materials, Properties, Design Optimization, and Applications, *Taylor & Francis Group*, LLC, 2007.
- [5] G. Lütjering, J. C. Williams, Titanium, Engineering Materials and Processes, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2007.
- [6] C. Leyens, M. Peters, Titanium and Titanium Alloys, Fundamentals and Applications, *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*, Weinheim, 2003.
- [7] C. Yao, J. Lin, D. Wu, and J. Ren, Surface integrity and fatigue behavior when turning γ -TiAl alloy with optimized PVD-coated carbide inserts, *Chinese J. Aeronaut.*, (In press).
- [8] J. Liu, D. Zhu, L. Zhao, and Z. Xu, Experimental Investigation on Electrochemical Machining of γ -TiAl Intermetallic, *Procedia CIRP*, vol. 35, no. Supplement C, pp. 20-24, 2015.
- [9] S. Sarkar, S. Mitra, B. Bhattacharyya, Parametric analysis and optimization of wire electrical discharge machining of γ -titanium aluminide alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 159, pp. 286-294, 2005.
- [10] S. Sarkar, S. Mitra, B. Bhattacharyya, Parametric optimisation of wire electrical discharge machining of γ titanium aluminide alloy through an artificial neural network model, *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 27, pp. 501-508, 2006.
- [11] S. Sarkar, M. Sekh, S. Mitra, B. Bhattacharyya, Modeling and optimization of wire electrical discharge machining of γ -TiAl in trim cutting operation, *Journal of materials processing technology*, Vol. 205, pp. 376-387, 2008.
- [12] B. Jabbaripour, M. Motallebpour alishahi, M. Payandehzad, Investigating the Electrical Discharge Machinability of γ -TiAl Intermetallic Compound, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of*

(3) در جریان‌های پالس کمتر (3 و 6 آمپر)، علیرغم افزایش زمان روشنی پالس، تغییر محسوسی در نرخ براده‌برداری از سطح قطعه‌کار مشاهده نمی‌گردد و نرخ براده‌برداری از سطح کار به ازای این دو جریان بسیار ناچیز می‌باشد و بیانگر این است که فرایند پرداخت‌کاری بر روی ترکیب بین فلزی تیتانیوم آلومیناید دشوار و زمان‌بر می‌باشد ولی در جریان‌های پالس بیشتر (12، 24 و 64 آمپر) چنین شرایطی وجود ندارد و به بیان دیگر فرایند خشن‌کاری این ماده مشکل خاصی ندارد.

(4) در جریان‌های بالا (بیشتر از 24 آمپر) شیب افزایش نرخ براده‌برداری کاهش می‌یابد که دلیل این اتفاق، افزایش احتمال وقوع پدیده آرک می‌باشد.

(5) مقدار زبری سطح با افزایش جریان و زمان روشنی پالس، افزایش می‌یابد. زبری سطح ماشین‌کاری شده به ازای جریان 64 آمپر و زمان 100 میکروثانیه بسیار متفاوت از زبری سطوح ماشین‌کاری شده به ازای سایر جریان‌ها و زمان‌های پالس است، دلیل این تفاوت چشمگیر، وقوع پدیده آرک بر روی سطح ماشین‌کاری شده می‌باشد.

(6) با افزایش جریان پالس، عموماً دانسیته ترک‌های سطحی بیشتر و ترک‌ها پهن‌تر شده‌اند. افزایش زمان روشنی پالس منجر به افزایش انرژی پالس می‌گردد و به دنبال آن ابعاد حفره‌های حاصل از ماشین‌کاری روی سطح قطعه‌کار نیز افزایش می‌یابد. اطراف حفره‌ها به طور کلی لبه‌های برجسته‌ای وجود دارد که با افزایش زمان روشنی پالس، فاصله نسبی این دیواره‌ها و لبه‌های احاطه‌کننده حفره‌های حاصل از ماشین‌کاری نیز افزایش می‌یابد.

(7) تأثیر جریان پالس بر روی مورفولوژی سطح ماشین‌کاری شده و همچنین طول و پهنای دهانه ترک‌های سطحی بر روی نمونه‌های قطعه‌کار، بیشتر از تأثیر زمان روشنی پالس می‌باشد.

7- فهرست علائم

I_{dis} جریان تخلیه الکتریکی (A)
 K مقدار ثابت تجربی
 MRR نرخ براده‌برداری (mm^3/min)
 n مقدار ثابت تجربی
 P توان ماشین‌کاری (kW)
 T_{dis} زمان تخلیه الکتریکی (μs)
 T_{off} زمان خاموشی پالس (μs)

- machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V), *Journal of applied surface science*, Vol. 253, pp. 9007-9016, 2007.
- [15] B. H. Yan, H. C. Tsai, F. Y. Huang, The effect in EDM of a dielectric of urea solution in water on modifying the surface of titanium, *Journal of machine tools and manufacture*, Vol. 45, pp. 194-200, 2005.
- [16] B. Ekmekci, Residual stresses and white layer in EDM, *Applied surface science*, Vol. 253, pp. 9234-9240, 2007.
- the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 349-353, 2015 (in Persian).
- [13] B. Jabbaripour, N. Mollaramezani, M. Motallebpour alishahi, Experimental Investigation of Powder Mixed Electrical Discharge Machining (PMEDM) on Intermetallic Compound γ -TiAl, Modares Mechanical Engineering, *Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 354-359, 2015 (in Persian).
- [14] A. Hasclik, U. Caydas, Electrical discharge