



مطالعه تجربی راندمان براده برداری و بافت سطحی ماشین کاری شده در فرآیند اسپارک بر روی آلیاژ تیتانیوم آلومیناید

بهزاد جباری پور^{1*}، مهرداد مطلب پور علیشاهی²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
* تهران، صندوق پستی 28598، beh.jabbaripour@iauctb.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 15 مرداد 1396
پذیرش: 17 آبان 1396
ارائه در سایت: 10 آذر 1396
کلید واژگان:
ماشین کاری تخلیه الکتریکی
سیال دی الکتریک
ترکیب بین فلزی تیتانیوم آلومیناید
قابلیت ماشین کاری
یکپارچگی سطح

چکیده

ترکیب بین فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما جزو گروه اندکی از مواد جدید است که قابلیت استفاده در کاربردهای سازه‌ای در دمای بالا را دارا می‌باشد، چرا که نسبت استحکام به چگالی و نسبت مدول الاستیسیته به چگالی، بسیار بالایی دارد. در این تحقیق برای دو نوع سیال دی الکتریک نفت سفید و آب دی یونیزه، تأثیر مهم‌ترین پارامترهای ورودی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی یعنی شدت جریان پالس و زمان روشنی پالس بر روی مشخصه‌های خروجی فرآیند مانند نرخ براده برداری، فرسایش نسبی ابزار و برخی شاخص‌های یکپارچگی سطح قطعه کار مانند زبری سطح، توپوگرافی سطح و ترک‌های سطحی تشکیل شده بعد از ماشین کاری بررسی می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که خشن کاری ترکیب بین فلزی تیتانیوم آلومیناید بر خلاف پرداخت کاری آن به روش تخلیه الکتریکی، با راندمان بسیار بالاتری انجام پذیر است. به دلیل هدایت حرارتی بیشتر آب نسبت به نفت، هدررفت انرژی و گسترش شعاع کانال پلاسما در آب نسبت به نفت بیشتر است و این عامل باعث می‌گردد که انرژی حرارتی بیشتر و متمرکزتری به سطح نمونه‌های ماشین کاری شده در نفت وارد شود. در نتیجه، میزان دانسیته ترک‌های سطحی، مقدار زبری سطح و شدت تغییر توپوگرافی سطح بر روی سطح نمونه ماشین کاری شده در نفت سفید بیشتر از سطح نمونه مربوط به آب دی یونیزه می‌باشد ولی در مقابل نرخ براده برداری با دی الکتریک نفت سفید بسیار بیشتر از آب دی یونیزه است و فرسایش نسبی ابزار در حین ماشین کاری با نفت به مقدار قابل توجهی کمتر از آب دی یونیزه است.

Experimental Investigation of Metal Removal Efficiency and Machined Surface Texture in EDM of Titanium Aluminide Compound

Behzad Jabbaripour^{1*}, Mehrdad Motallebpouralishahi²

1- Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Khajeh Nasiraldin Toosi University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 28598, Tehran, Iran, beh.jabbaripour@iauctb.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 August 2017
Accepted 08 November 2017
Available Online 01 December 2017

Keywords:
Electrical discharge machining
Dielectric fluid
Titanium aluminide intermetallic compound
Machinability
Surface integrity

ABSTRACT

The intermetallic compound of gamma titanium aluminide is a kind of recently developed material which has outstanding potential for utilization in high temperature structural applications due to higher ratios of strength to density and also elasticity modulus to density. In this study with considering two dielectric fluids of kerosene and de-ionized water, the effects of the most important input parameters of electrical discharge machining including pulse current and pulse on time on the output characteristics of material removal rate, tool wear ratio, some surface integrity criteria such as surface roughness and cracks, are investigated. The results indicate that, rough machining of titanium aluminide in contrary to finishing of this material, is performed efficiently. As the result of more thermal conductivity coefficient of water comparing with kerosene, the energy dissipation or loss and also plasma channel radius expansion in water is noticeably more than kerosene. This issue leads to more concentration and higher rates of thermal energy on the machined surface in the case of kerosene. Consequently, the density of surface cracks, surface roughness and intensity of surface topography alterations for the machined surface in kerosene is more than the samples which are machined in de-ionized water, but in contrary, the material removal rate with kerosene is much more than MRR in de-ionized water and also the tool wear ratio during machining process by means of kerosene is significantly less than the de-ionized water.

1- مقدمه

پالسی و منقطع بین دو الکتروود ابزار و قطعه کار که در سیالی موسوم به دی الکتریک غوطه‌ور می‌باشند، برقرار می‌شود. سپس جرقه‌ای در نزدیکترین فاصله بین ابزار و قطعه کار ایجاد گردیده و هر جرقه بخش بسیار کوچکی را از سطح قطعه کار جدا می‌کند و در نهایت بعد از تعداد زیادی جرقه شکل مکمل

ماشین کاری تخلیه الکتریکی¹ یک روش براده برداری است که در آن ولتاژ

¹ Electrical Discharge Machining (EDM)

Please cite this article using:

B. Jabbaripour, M. Motallebpouralishahi, Experimental Investigation of Metal Removal Efficiency and Machined Surface Texture in EDM of Titanium Aluminide Compound, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 47-55, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

در زیر لایه انجماد مجدد یک لایه دیگر وجود دارد که در اثر افزایش دما ذوب نشده و فقط حرارت دیده است. این لایه را لایه متأثر از حرارت یا لایه آنبیل شده⁷ نیز می‌نامند. ترکیب شیمیایی و فازهای متالورژیکی موجود در لایه متأثر از حرارت دچار تغییراتی می‌شود و این منطقه یکپارچگی سطح⁸ قطعه کار را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ضخامت این لایه به قابلیت انتقال حرارت ماده و توان مصرفی برای ماشین کاری بستگی دارد [3-5].

اکمکی و همکاران [4] تأثیر نوع سیال دی‌الکتریک و الکتروود ابزار بر ساختار لایه سفید و سطح ماشین کاری شده به روش تخلیه الکتریکی را با در نظر گرفتن آستنیت باقیمانده و تنش‌های تسلیم، مطالعه نمودند. آن‌ها آزمایش‌های ماشین کاری را با دو جنس مختلف الکتروود (مس و گرافیت) و دو نوع سیال دی‌الکتریک (نفت سفید و آب دی‌یونیزه) تحت شرایط عملیاتی مشابه انجام دادند و عنوان نمودند که صرف نظر از نوع الکتروود، سطح ماشین کاری شده با سیال دی‌الکتریک نفت از کربن اشباع شده است. زمانی که ماشین کاری در آب دی‌یونیزه انجام شده است، به واسطه کربن حاصل از الکتروود گرافیتی، در سطح آستنیت باقیمانده ایجاد شده است. آن‌ها گزارش کردند که نتایج آشکاری از وجود تنش‌های پسماند در زیر لایه سفید مشاهده نشده است. ژانگ و همکاران [6] خواص لایه انجماد مجدد تشکیل شده در امولسیون آب/نفت به عنوان دی‌الکتریک را با لایه انجماد مجدد تشکیل شده در دی‌الکتریک‌های نفت و آب دی‌یونیزه مقایسه نمودند. آن‌ها گزارش کردند که لایه انجماد مجدد شکل گرفته در امولسیون آب/نفت در مقایسه با لایه شکل گرفته در نفت و آب دی‌یونیزه، زبری، ضخامت و میکروسختی بیشتری دارد. آن‌ها در لایه انجماد مجدد شکل گرفته در امولسیون آب/نفت، فازهای کاربایدی و اکسیدی شناسایی کردند، در حالی که در لایه شکل گرفته در نفت فقط کارباید وجود داشت. علاوه بر این عنوان نمودند که به دلیل فوق اشباع شدن بیشتر گازها در مواد مذاب، لایه تشکیل شده در امولسیون آب/نفت دارای تخلخل بیشتری نسبت به آب دی‌یونیزه و نفت بوده است.

با توجه به اینکه توسعه سیستم‌های تبدیل انرژی پیشرفته و بهبود راندمان عملکردی آن‌ها همواره مورد تقاضا بوده است، طراحی این سیستم‌ها بر اساس دمای کارکردی بالاتر، وزن سبکتر و سرعت عملیاتی بیشتر انجام می‌شود تا نیازهای فوق را بر طرف نماید. سیستم‌های فلزی مرسوم بیش از 50 سال است که توسعه یافته‌اند و برای دست یافتن به پیشرفت‌های بیشتر در این زمینه، به کلاس‌های جدیدی از مواد که الزامات مذکور را برآورده کنند نیاز است. در میان آلیاژهای مختلف فلزی، ترکیب بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما⁹ از قابلیت بالایی برای برآورده کردن نیازهای طراحی اشاره شده، برخوردار است. تیتانیوم آلومیناید گاما چگالی کم و استحکام زیادی دارد و خواص خود را در دماهای بالا حفظ می‌کند و می‌توان از آن در محدوده وسیعی از قطعات در صنایع خودروسازی، هوافضا، توربین‌های نیروگاه برق و موتورهای توربین‌گازی استفاده نمود. این ترکیبات بین‌فلزی برای کاربرد در سیستم‌های پیشرفته تبدیل انرژی به جای سوپرآلیاژهای پایه آهن یا سوپرآلیاژهای سنگین پایه نیکل در محدوده مشخصی از تنش کاری در دماهای بالا، در نظر گرفته شده‌اند [7-10].

یکی از مباحث مطرح در زمینه ساخت و تولید قطعاتی از جنس ترکیب بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما، فرآیند ماشین کاری آن است. چقرمگی شکست این مواد در دمای اتاق پایین است و به دلیل شکل‌پذیری پایینی که

پیشانی ابزار با ایجاد حفره‌ای در قطعه کار حک می‌گردد. در طول این فرآیند همواره ابزار در فاصله نزدیک و کنترل شده‌ای از قطعه کار نگه داشته می‌شود. در حالت عادی ماده دی‌الکتریک یک سیال است و معمولاً در ماشین‌های نوع اسپارک از سیالات هیدروکربنی و در ماشین‌های نوع وایرکات از آب دی‌یونیزه استفاده می‌شود. مشخصه اصلی سیال دی‌الکتریک این است که این سیال یک عایق جریان الکتریسیته است و تا زمانی عایق باقی می‌ماند که یک ولتاژ الکتریکی کافی اعمال شود و موجب گردد که این سیال به یک هادی الکتریسیته تبدیل شود. سیال‌های دی‌الکتریک مورد استفاده پس از اعمال ولتاژ، به جز در نزدیک‌ترین فاصله بین الکتروود ابزار و قطعه کار، عایق جریان الکتریسیته باقی می‌مانند. اعمال ولتاژ باعث می‌شود که سیال دی‌الکتریک در این نقاط به یک هادی تبدیل شود و سپس جرقه‌زنی رخ دهد [1]. هر جرقه که مابین الکتروود ابزار و قطعه کار رخ می‌دهد، به استحکام سیال دی‌الکتریک بستگی دارد. استحکام دی‌الکتریک برای یک سیال هیدروکربنی معمولی در حدود 170 ولت در میل¹ می‌باشد. یک میل برابر با 0.001 اینچ (0.025 میلی‌متر) است. در طول زمان پیشروی الکتروود ابزار، ولتاژی بین الکتروود و قطعه کار اعمال می‌شود. از آنجایی که هیچ جریان الکتریسیته‌ای بین الکتروود و قطعه وجود ندارد، این ولتاژ، ولتاژ مدار باز² نامیده می‌شود. زمانی که اختلاف پتانسیل الکتریکی بین الکتروود ابزار و قطعه کار برقرار است ولی الکتروود ابزار به اندازه کافی به قطعه کار نزدیک نیست تا جرقه‌زنی انجام شود، نشان دهنده ولتاژ مدار باز می‌باشد. در حالی که ولتاژ اعمال و اندازه‌گیری شده در حین جرقه‌زنی، ولتاژ ماشین کاری یا ولتاژ رفرنس نامیده می‌شود. ولتاژ مدار باز معمولاً در محدوده 100-300 ولت و ولتاژ ماشین کاری معمولاً در محدوده 20-50 ولت قرار دارد [1]. مهمترین پارامترهای ورودی و تنظیمی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی شامل ولتاژ مدار باز، ولتاژ ماشین کاری (ولتاژ رفرنس)، شدت جریان پالس، زمان روشنی و زمان خاموشی پالس، قطبیت، جنس الکتروود ابزار و نوع سیال دی‌الکتریک می‌باشد [2].

ماشین کاری تخلیه الکتریکی بر روی سطح قطعه کار، چند لایه متمایز از ماده پایه³ قطعه کار ایجاد می‌کند. هنگامی که مواد مذاب در پایان زمان روشنی پالس به بیرون از حفره‌های حاصل از ماشین کاری فوران می‌کنند، بخشی از مواد الکتروودها به شکل برجستگی‌ها و زائده‌های سطحی بر روی قطعه کار می‌نشینند. این بخش‌ها عموماً بعد از ماشین کاری با پولیش و پرداخت کاری از بین می‌روند. علاوه بر این لایه سطحی، قطعه ماشین کاری شده دارای دو لایه مهم دیگر نیز خواهد بود. این دو لایه شامل لایه انجماد مجدد⁴ و لایه متأثر از حرارت⁵ می‌باشد. در پایان زمان روشنی پالس، بخشی از فلز مذاب خارج شده و مواد مذاب باقیمانده مجدداً منجمد شده و لایه انجماد مجدد را ایجاد می‌کنند. لایه انجماد مجدد به دلیل این‌که به سختی اچ می‌شود و در زیر میکروسکوپ نوری به رنگ سفید دیده می‌شود، لایه سفید⁶ نیز نامیده می‌شود. این لایه به سرعت سرد شده است و ضخامت آن به انرژی پالس بستگی دارد. از ویژگی‌های این لایه می‌توان به سختی زیاد آن اشاره کرد و به دلیل همین ویژگی، میکروتورک‌ها به سادگی در این لایه شکل می‌گیرند. اگر این لایه بسیار ضخیم باشد توسط عملیات پرداخت و پولیش از بین نخواهد رفت و می‌تواند باعث بروز مشکلاتی در عملکرد قطعه کار گردد.

¹ Mil

² Open circuit voltage

³ Bulk material

⁴ Recast layer

⁵ Heat Affected Zone (HAZ)

⁶ White layer

⁷ Annealed layer

⁸ Surface integrity

⁹ Gamma titanium aluminide intermetallic compound (γ -TiAl)

است و طبق مشاهدات آن‌ها فازهای تدری همچون Ti_3Al و TiC بر روی سطوح ماشین کاری شده، تشکیل شده است.

جباری پور و همکاران نیز در قالب چندین کار پژوهشی منتشر شده داخلی و خارجی به جنبه‌های ماشین کاری مختلف ترکیب بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید پرداخته‌اند که در ادامه ارائه می‌گردند. آن‌ها در تحقیقی [17] تأثیر انواع مختلف الکترودهای ابزار گرافیت، آلومینیوم و مس را بر روی نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار، زبری سطح، آنالیز عنصری و آنالیز فازی سطح ماشین کاری شده تیتانیوم آلومیناید بررسی نمودند. در تحقیقی دیگر [18] اثر افزودن انواع پودرهای گرافیت، آلومینیوم، سلیکون کارباید، آهن و کروم با غلظت ذرات پودر مختلف مخلوط شده در سیال نفت سفید و چگونگی تأثیر آن بر روی نرخ براده‌برداری، زبری سطح و همچنین مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی سطح ماشین کاری شده تیتانیوم آلومیناید را بررسی و نسبت به یکدیگر و همچنین حالت ماشین کاری بدون پودر مقایسه نمودند. در تحقیقی دیگر [19] مورفولوژی، ترک‌ها و توپوگرافی سطح ماشین کاری شده در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی به کمک انواع پودر مخلوط شده در سیال دی‌الکتریک نفت سفید را بررسی نموده‌اند و همچنین، در پژوهشی دیگر [20] چگونگی تأثیر تغییرات غلظت ذرات پودر آلومینیوم مخلوط شده در سیال نفت سفید را بر روی ناپایداری‌های تخلیه الکتریکی همچون آرک، اتصال کوتاه و یکپارچگی سطح ماشین کاری شده بررسی کرده‌اند.

در تحقیق جاری جهت تکمیل‌تر کردن داده‌های تجربی برای ارزیابی گسترده‌تر قابلیت ماشین کاری ترکیب بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما و به منظور ارائه راهنمای فنی و کاربردی قابل استفاده بخش صنعت در حوزه ماشین کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ تیتانیوم آلومیناید گاما، تأثیر مهمترین پارامترهای ورودی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی یعنی شدت جریان پالس و زمان روشنی پالس تحت شرایط دو نوع مختلف سیال دی‌الکتریک نفت سفید و آب دی‌یونیزه، بر روی مشخصه‌های خروجی فرآیند مانند نرخ براده‌برداری، فرسایش نسبی ابزار و برخی شاخص‌های یکپارچگی سطح قطعه کار مانند زبری متوسط سطح⁵، توپوگرافی سطح و ترک‌های سطحی تشکیل شده بعد از ماشین کاری بررسی می‌شود، سپس نتایج ارائه و مقایسه می‌گردند.

2- تجهیزات، تنظیمات و طراحی آزمایش‌ها

جهت آزمایش‌های ماشین کاری از الکترودهای مسی استوانه‌ای شکل به قطر 18 mm و طول 40 mm به عنوان ابزار استفاده شده است. چگالی الکترودهای مورد استفاده برابر با 8.93 gr/cm^3 می‌باشد و قبل از انجام آزمایشات ماشین کاری، دو طرف الکترودهای ابزار تا شماره 600 سمباده‌زنی شده بودند. برای نمونه‌های قطعه کار از ترکیب بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما استفاده گردید. چگالی نمونه مورد استفاده برابر با 3.78 gr/cm^3 می‌باشد. با استفاده از وایرکات نمونه‌هایی به ابعاد $10 \times 10 \times 10$ میلی‌متر از شمش ریخته‌گری شده، بریده شدند.

تمامی آزمایش‌های ماشین کاری بر روی ماشین اسپارک با کنترلر عددی مدل شارمیلز روبرفورم⁶ که به یک ژنراتور آیزوپالس مجهز است، انجام گردیده است. تغییرات جرم ابزار و قطعه کار، قبل و بعد از هر تست ماشین کاری به وسیله ترازوی دقیق دیجیتالی⁷ با دقت 0.0001 گرم و زبری سطح متوسط به وسیله

دارند از نظر ماشین کاری به عنوان مواد سخت طبقه‌بندی می‌شوند. تحقیقات بسیار محدودی در ارتباط با ماشین کاری این ماده به عمل آمده است.

در این ارتباط وینتر و همکاران [11] با هدف تولید شاتون از جنس تیتانیوم آلومیناید گاما مطالعه‌ای در زمینه قابلیت ماشین کاری این ماده انجام داده‌اند. آن‌ها ابتدا شمش تیتانیوم آلومیناید گاما را بوسیله فرآیند ریخته‌گری تحت خلاء تولید نموده و سپس فرآیندهای سوراخ‌کاری، فلاویزکاری، فرزکاری و بورینگ را برای تولید شاتون انجام داده‌اند. آن‌ها گزارش کردند که به دلیل سختی، تدری و استحکام بالای تیتانیوم آلومیناید گاما تنها می‌توان از ابزارهایی با جنس کارباید‌های پوشش‌دار و یا مواد برشی سخت‌تر مانند سی-بی‌ان¹ و الماس چندکریستال² برای ماشین کاری این ماده استفاده نمود. علاوه بر این شکل لبه برشی نیز باید مناسب باشد تا عمر ابزار طولانی‌تر گردد. سارکار و همکاران [14-12] ماشین کاری تیتانیوم آلومیناید گاما را به روش وایرکات مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که ماشین کاری این ماده به روش وایرکات با راندمان مناسب امکان‌پذیر است.

اسپینوال و همکاران [15] مطالعاتی را در زمینه روش‌های مختلف ماشین کاری تیتانیوم آلومیناید گاما انجام داده‌اند. بررسی آن‌ها نشان می‌دهد که از نظر سایش ابزار، نیروهای برشی، دما، قابلیت تولید و مهمتر از همه یکپارچگی سطح قطعه کار، ماشین کاری سنتی این ترکیب بین‌فلزی بسیار مشکل‌تر از آلیاژهای تیتانیوم است. همچنین آن‌ها گزارش داده‌اند که برای ماشین کاری این ماده، فرآیند تراشکاری باعث به‌وجود آمدن ترک‌های بسیار زیادی بر روی سطح شده و در فرآیند سوراخ‌کاری نیز مشکلات یکپارچگی سطح اجتناب‌ناپذیر است. به دلیل استحکام بالای تیتانیوم آلومیناید گاما و هدایت حرارتی پایین آن فرسایش ابزارهای برشی بسیار بالاست و این مشکل در فرزکاری نیز مشاهده می‌شود. در فرآیندهای سنگ‌زنی و ماشین کاری سرعت بالا می‌توان به سطوح نسبتاً عاری از عیب دست یافت ولی راندمان ماشین کاری پایین است.

در این‌جا لزوم استفاده از فرآیندهای ماشین کاری غیرسنتی مطرح می‌شود و در این مورد می‌توان از روش‌های ماشین کاری الکتروشیمیایی و ماشین کاری تخلیه الکتریکی استفاده نمود. مطالعات بسیار محدود در زمینه ماشین کاری تخلیه الکتریکی این ماده، تحقیقات گسترده‌ای در این مورد را ایجاد می‌کند. خوشبختانه اخیراً در سطح داخل کشور نظر به کاربردهای بسیار پیشرفته و روزافزون صنعتی این آلیاژ در سطح دنیا، ماشین کاری این آلیاژ مدرن مورد توجه برخی از محققان و متخصصان حوزه ماشین کاری قرار گرفته است، از این جمله شبرگرد و همکاران [16] تأثیر پارامترهای ورودی شدت جریان و زمان روشنی پالس در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی ترکیب بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما بر روی مشخصه‌های خروجی نرخ براده‌برداری³، نرخ سایش ابزار⁴، بافت سطحی، عناصر و فازهای شیمیایی و متالوژیکی تشکیل شده بر روی سطح ماشین کاری شده را بررسی نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که فرآیند ماشین کاری، یکپارچگی سطح نمونه‌های تیتانیوم آلومیناید را تحت تأثیر قرار می‌دهد و حتی در کمترین مقدار انرژی تخلیه الکتریکی، بر روی سطوح قطعه کار ترک ایجاد می‌گردد. افزایش انرژی تخلیه الکتریکی منجر به شکل‌گیری ترک‌هایی طول‌تر و با دهانه پهن‌تر شده است. به دلیل نفوذ کربن و اکسیژن به سطح نمونه قطعه کار، ترکیب شیمیایی و فازهای متالوژیکی سطوح ماشین کاری شده تغییر کرده

¹ Cubic Boron Nitride (CBN)

² Polycrystalline Diamond (PCD)

³ Material Removal Rate (MRR)

⁴ Tool Wear Ratio (TWR)

⁵ Roughness Average

⁶ CNC- CHARMILLES ROBOFORM 200

⁷ CP224S- Surtorius

در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی ترکیب بین فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما، دو پارامتر اصلی فرآیند ماشین کاری یعنی شدت جریان پالس و زمان روشنی پالس به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شدند. برای بررسی اثر این دو متغیر ورودی تحت شرایط سیال های دی الکتریک آب دی یونیزه و نفت سفید، شدت جریان و زمان روشنی پالس هر کدام در سه سطح تغییر داده شدند و به این ترتیب 18 آزمایش ماشین کاری انجام شد. نتایج نرخ براده برداری و فرسایش نسبی ابزار به عنوان متغیرهای خروجی فرآیند در نظر گرفته شدند. همچنین پارامترهای زبری متوسط، توپوگرافی و ترک های سطحی بر روی نمونه ماشین کاری شده به عنوان مؤلفه های یکپارچگی سطح مورد بررسی قرار گرفتند. نرخ براده برداری و فرسایش نسبی ابزار (نسبت حجم برداشته شده از ابزار به حجم برداشته شده از قطعه کار) به ترتیب با استفاده از روابط (1) و (2) محاسبه گردیدند. همچنین شرایط ثابت و متغیرهای آزمایش های ماشین کاری مورد نظر، در جدول 1 ارائه شده است.

$$MRR = \frac{\Delta m_{W.P.}}{\rho_{W.P.} \times t} \times 1000 \quad (1)$$

$$TWR = \frac{\Delta m_{T.} \times \rho_{W.P.}}{\Delta m_{W.P.} \times \rho_{T.}} \times 100 \quad (2)$$

در روابط (1) و (2)، MRR و TWR به ترتیب نرخ براده برداری برحسب (mm³/min) و فرسایش نسبی ابزار برحسب (%). $\Delta m_{W.P.}$ و $\Delta m_{T.}$ به ترتیب اختلاف جرم قطعه کار و ابزار، قبل و بعد از هر تست ماشین کاری (gr) و $\rho_{W.P.}$ و $\rho_{T.}$ به ترتیب چگالی قطعه کار و ابزار (gr/cm³) و t زمان ماشین کاری (min) می باشد.

آزمایش های طراحی شده به صورت تصادفی و بدون هیچ گونه ترتیب خاصی انجام شده است. پس از انجام آزمایش ها و استخراج نمودارهای مربوط به مشخصه های خروجی، نقاطی از نمودار که دارای روند متفاوتی از سایر قسمت های آن بوده و نتایج آن ها مورد تردید بوده است، دو مرتبه دیگر تکرار شده و پس از اطمینان از انحراف کم نتایج آزمایش های تکرار شده از همدیگر، میانگین سه مرتبه انجام تست مورد نظر، لحاظ شده است.

3- تأثیر نوع دی الکتریک بر روی مشخصه های خروجی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی

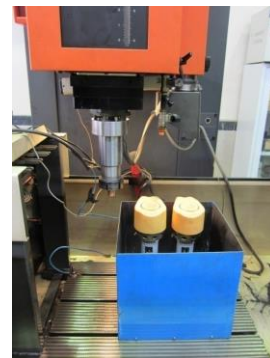
در جدول 2 نتایج حاصل از آزمایش های ماشین کاری تخلیه الکتریکی نشان داده شده است که شامل تأثیر شدت جریان پالس و زمان روشنی پالس بر روی مشخصه های خروجی فرآیند، هنگام استفاده از سیال های دی الکتریک

جدول 1 شرایط ثابت و متغیرهای فرآیند در آزمایش های ماشین کاری

متغیرها	واحد	مقادیر و شرایط
شدت جریان پالس	A	24, 12, 6
زمان روشنی پالس	μs	25, 12.8, 6.4
زمان خاموشی پالس	μs	50
ولتاژ مدار باز	V	120
ولتاژ ماشین کاری	V	70
زمان ماشین کاری	min	15
قطبیت قطعه کار	----	منفی
سیال دی الکتریک	----	آب دی یونیزه، نفت سفید
نوع شستشو	----	غوطه وری به همراه ایجاد جریان متلاطم

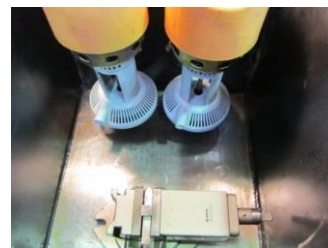
دستگاه زبری سنج¹ با دقت 0.001 میکرومتر اندازه گیری شده است. به منظور بررسی توپوگرافی سطح و ترک های سطحی تشکیل شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی² استفاده گردیده است.

در آزمایش های ماشین کاری، به منظور بررسی تأثیر نوع سیال دی الکتریک بر مشخصه های خروجی فرآیند، آب دی یونیزه و نفت سفید به عنوان دو نوع سیال دی الکتریک مورد استفاده قرار گرفت. به منظور انجام آزمایش ها از یک مخزن ویژه که بر روی میز ماشین اسپارک شارمیلز قرار می گرفت استفاده شد و برای ایجاد جریان مناسب در سیال دی الکتریک از دو پمپ استفاده گردید. نمونه های قطعه کار بر روی یک گیره رومیزی دقیق بسته شده و گیره در داخل مخزن قرار می گرفت. سطح پایینی مخزن از یک صفحه فولادی سنگ زنی شده ساخته شد تا انحرافی در موازی بودن سطوح قطعه کار و ابزار ایجاد نشود. حجم سیال دی الکتریک مورد استفاده در هر آزمایش برابر با 12 لیتر بود که پس از انجام هر آزمایش تعویض می شد. شکل 1 تصاویری از نحوه چیدمان مجموعه مخزن ویژه ماشین کاری، پمپ ها، گیره و همچنین انجام آزمایش های ماشین کاری درون مخزن را نشان می دهد.



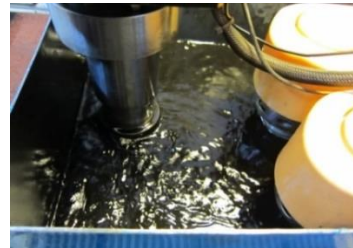
a) Outside view of special tank on the table of EDM machine

الف) نمای بیرونی مخزن ویژه بر روی میز ماشین اسپارک



b) Inside view of special tank

ب) نمای داخلی مخزن ویژه



c) Performing machining tests in the special tank

ج) انجام آزمایش های ماشین کاری درون مخزن ویژه

Fig. 1 Layout of special machining tank, pumps, vise and performing machining tests

شکل 1 نحوه چیدمان مجموعه مخزن ویژه ماشین کاری، پمپ ها، گیره و انجام آزمایش های ماشین کاری

¹ Mahr- Perthometer M2

² Scanning Electronic Microscope (SEM)- Cam Scan 2300 MV

هدایت حرارتی² از جمله خواص فیزیکی سیال دی الکتریک هستند که اثر زیادی بر نرخ براده برداری دارند. استحکام دی الکتریک در مورد آب دی یونیزه تقریباً 1.87 برابر استحکام دی الکتریک نفت سفید می باشد [22,21]. بیشتر بودن استحکام آب دی یونیزه باعث می شود که هنگام ماشین کاری در این سیال، زمان های تأخیر جرقه نسبت به زمانی که ماشین کاری در نفت سفید انجام می شود، بیشتر باشد. به بیان ساده تر تخلیه الکتریکی در نفت سفید راحت تر از آب دی یونیزه انجام می شود و به همین دلیل زمانی که از نفت سفید استفاده می شود، راندمان ماشین کاری بیشتر است. از طرف دیگر هدایت حرارتی آب در دمای محیط تقریباً 3.86 برابر هدایت حرارتی نفت سفید در این دما می باشد [23].

این مطلب به این معنی است که مقدار انرژی که در اثر انتقال حرارت در دی الکتریک هدر می رود، در آب دی یونیزه بسیار بیشتر از نفت است و به واسطه این کاهش انرژی، نرخ براده برداری در آب کمتر از نفت می باشد.

افزایش زمان روشنی پالس باعث می گردد که انرژی حرارتی بیشتری به قطعه کار اعمال شود و انتظار می رود که این افزایش انرژی به افزایش نرخ براده برداری منجر گردد. اما در مورد آب دی یونیزه مشاهده می شود که افزایش زمان روشنی پالس در شدت جریان کم 6 آمپر، تأثیر بسیار ناچیزی بر افزایش نرخ براده برداری داشته است. همچنین در مورد نفت سفید نیز مشاهده می گردد که افزایش زمان روشنی پالس در شدت جریان زیاد 24 آمپر، منجر به افزایش بسیار قابل توجه نرخ براده برداری شده است. برای انجام ماشین کاری مؤثر به روش تخلیه الکتریکی به حداقلی از شدت جریان نیاز است تا انرژی مورد نیاز جهت براده برداری از سطح قطعه کار تأمین شود. همان طور که بیان شد به دلیل هدایت حرارتی دی الکتریک، بخشی از انرژی حرارتی کانال پلاسما به اطراف منتشر می شود و باعث افزایش حرارت دی الکتریک پیرامون کانال پلاسما و حباب گاز می گردد. با افزایش زمان روشنی پالس، این انرژی باعث تبخیر بخش بیشتری از دی الکتریک شده و حباب گاز اطراف کانال پلاسما را بزرگتر می نماید که در نهایت به افزایش شعاع کانال پلاسما و کاهش تمرکز انرژی حرارتی در محل تخلیه الکتریکی منجر می گردد. به طوری که افزایش انرژی حرارتی (در اثر افزایش زمان روشنی پالس) فقط سبب گسترش منطقه حرارت دیده می شود. به همین علت هر چقدر هدایت حرارتی دی الکتریک بیشتر باشد، حداقل شدت جریان مورد نیاز برای براده برداری مؤثر نیز بیشتر خواهد بود تا کاهش تمرکز انرژی که در اثر هدررفت انرژی حرارتی و همچنین افزایش شعاع کانال پلاسما ایجاد می شود، جبران گردد. با توجه به "شکل 2" مشخص است زمانی که از آب دی یونیزه (با هدایت حرارتی بیشتر) استفاده شده است، افزایش زمان روشنی پالس تا شدت جریان 12 آمپر تأثیر محسوسی بر افزایش نرخ براده برداری نداشته است ولی هنگامی که از نفت سفید (با هدایت حرارتی کمتر) استفاده می گردد، افزایش زمان روشنی پالس در شدت جریان 6 آمپر نیز باعث افزایش نرخ براده برداری شده است.

3-2- تأثیر نوع دی الکتریک بر روی فرسایش نسبی ابزار در شدت جریان ها و زمان های روشنی پالس مختلف

"شکل 3"، اثر تغییرات شدت جریان پالس و زمان روشنی پالس را بر فرسایش نسبی ابزار را برای دو دی الکتریک آب دی یونیزه و نفت سفید نشان می دهد. طبق این نمودار با افزایش شدت جریان، فرسایش نسبی ابزار ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است. دو عامل بر فرسایش نسبی ابزار تأثیر

آب دی یونیزه و نفت سفید می باشد. در ادامه تحقیق جاری، نتایج حاصل از این آزمایش ها، به تفکیک، مورد بحث و بررسی قرار گرفته اند.

3-1- تأثیر نوع دی الکتریک بر روی نرخ براده برداری در شدت جریان ها و زمان های روشنی پالس مختلف

"شکل 2"، اثر تغییرات شدت جریان پالس و زمان روشنی پالس را بر روی نرخ براده برداری برای دو دی الکتریک آب دی یونیزه و نفت سفید نشان می دهد.

با افزایش شدت جریان، به واسطه افزایش چگالی جریان و در پی آن افزایش انرژی حرارتی ایجاد شده در محل تخلیه، نرخ براده برداری در هر دو دی الکتریک افزایش یافته است. مطابق شکل، قابلیت براده برداری در دی الکتریک نفت سفید بسیار بیشتر از آب دی یونیزه است و در برخی از تنظیمات افزایش چند برابری را نشان می دهد. استحکام دی الکتریک¹ و

جدول 2 تنظیمات فرآیند و نتایج حاصل از آزمایش های ماشین کاری تخلیه الکتریکی با استفاده از سیال های دی الکتریک آب دی یونیزه و نفت سفید

Table 2 Process settings and results of EDM tests by means of de-ionized water and kerosene dielectrics

شدت جریان پالس (A)	زمان روشنی پالس (μs)	نرخ براده برداری (mm ³ /min)	فرسایش نسبی ابزار (%)	زبری متوسط سطح (Ra)
6	6.4	0.5914	17.56	3.136
6	12.8	0.6649	13.45	4.073
6	25	1.0257	11.24	4.805
آب دی-یونیزه	6.4	1.1006	15.33	3.972
12	12.8	2.308	6.52	4.726
12	25	3.0252	4.19	5.472
24	6.4	4.7822	22.25	4.388
24	12.8	9.1234	9.73	5.955
24	25	11.6098	6.18	6.905
6	6.4	1.5363	3.86	4.296
6	12.8	2.5642	2.35	5.586
6	25	3.6592	1.68	6.127
نفت سفید	6.4	3.8075	2.71	5.113
12	12.8	7.8775	1.24	6.273
12	25	13.776	0.69	7.426
24	6.4	6.7122	4.92	6.432
24	12.8	19.249	3.18	7.341
24	25	37.7352	2.43	8.478

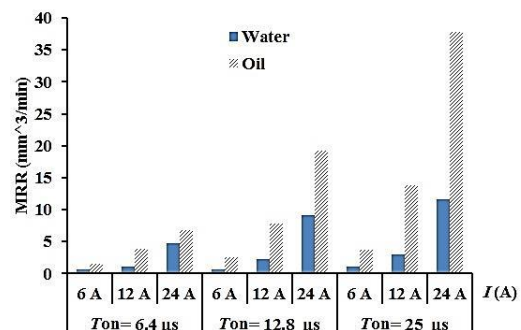


Fig. 2 The effects of pulse current and pulse on time variations on the material removal rate for de-ionized water and kerosene

شکل 2 اثر تغییرات شدت جریان و زمان روشنی پالس بر روی نرخ براده برداری برای آب دی یونیزه و نفت سفید

² Thermal conductivity

¹ Dielectric strength

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 و به تبع آن افزایش زبری سطح می‌شود. همچنین با افزایش زمان روشنی پالس، طول زمان ماشین کاری و انرژی جرقه‌ها بیشتر شده و شعاع کانال پلاسما افزایش می‌یابد. با افزایش انرژی جرقه‌ها و شعاع کانال پلاسما، عمق و قطر چاله‌های به وجود آمده در قطعه کار افزایش یافته و چاله‌های بزرگتری در سطح نمونه ایجاد می‌گردند که باعث افزایش مقدار زبری سطح می‌شود. با توجه به "شکل 4"، مشاهده می‌شود که به ازای هر حالت تنظیمی جریان پالس و زمان روشنی پالس، زبری سطح نمونه ماشین کاری شده در نفت سفید نسبت به نمونه ماشین کاری شده در آب دی‌یونیزه بیشتر است، چرا که به واسطه هدایت حرارتی بالاتر آب نسبت به نفت، مقدار انرژی که در اثر انتقال حرارت در دی‌الکتریک هدر می‌رود، در آب دی‌یونیزه بسیار بیشتر از نفت است، لذا انرژی جرقه‌های حاصل از تخلیه الکتریکی و شار حرارتی متمرکز شده بر روی سطح قطعه کار، در حالت آب دی‌یونیزه کمتر بوده و حفره‌ها یا چاله‌هایی با عمق کمتر بر روی سطح ماشین کاری شده ایجاد می‌گردد که این امر به مفهوم کاهش زبری سطح برای نمونه‌های ماشین کاری شده در آب دی‌یونیزه می‌باشد.

3-4- تأثیر نوع دی‌الکتریک بر توپوگرافی سطح در شدت جریان‌ها و

زمان‌های روشنی پالس مختلف

در "شکل‌های 5، 6 و 7" توپوگرافی و مورفولوژی سطح برخی از نمونه‌های ماشین کاری شده در دی‌الکتریک‌های آب دی‌یونیزه و نفت سفید نشان داده شده است. لازم به ذکر است برای بررسی توپوگرافی سطوح ماشین کاری شده، تقریباً بخش میانی سطح نمونه‌های قطعه کار لحاظ گردیده است. با توجه به این تصاویر، مشاهده می‌شود که حفره‌ها و چاله‌های سطحی ایجاد شده در سطح نمونه‌های ماشین کاری شده در نفت سفید عمق بیشتری نسبت به نمونه‌های ماشین کاری شده در آب دی‌یونیزه دارند. چرا که به واسطه هدایت حرارتی بالاتر آب نسبت به نفت، هدرفت انرژی تخلیه الکتریکی در آب دی‌یونیزه بیشتر بوده و لذا حفره‌هایی با عمق کمتر بر روی سطح نمونه، ایجاد شده است و این تصاویر توپوگرافی سطحی به‌طور کلی تأیید کننده و متناظر با نتایج زبری‌سنجی نمونه‌های ماشین کاری شده در سیال‌های دی‌الکتریک آب دی‌یونیزه و نفت سفید می‌باشند که در "شکل 4" ارائه گردیده بودند.

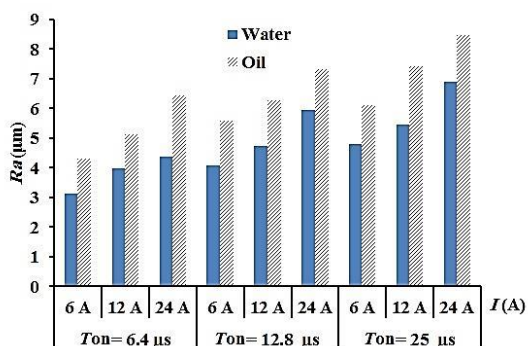


Fig. 4 The effects of pulse current and pulse on time variations on the surface roughness for de-ionized water and kerosene

شکل 4 اثر تغییرات شدت جریان و زمان روشنی پالس بر روی زبری سطح برای آب دی‌یونیزه و نفت سفید

زیادی دارد که شامل هدایت حرارتی و دمای ذوب ابزار و قطعه کار می‌شود. به دلیل اینکه ضریب هدایت حرارتی ابزار مسی تقریباً 17.73 برابر هدایت حرارتی ترکیب بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما است [21,15]، با افزایش شدت جریان پالس تا یک حد بهینه، مقدار انرژی حرارتی تلف شده به واسطه رسانش حرارتی در بدنه ابزار مسی نسبت به قطعه کار افزایش می‌یابد و باعث کاهش تمرکز حرارتی و در نتیجه کاهش فرسایش نسبی ابزار می‌گردد، ولی بعد از آن حد بهینه، با افزایش چگالی جریان و انتقال انرژی حرارتی متمرکزتر و بیشتر به ابزار و همچنین به دلیل کم‌تر بودن دمای ذوب ابزار مسی (1084 °C) نسبت به قطعه کار تیتانیوم آلومیناید گاما (1450 °C) [21,9]، مقدار فرسایش نسبی ابزار افزایش می‌یابد.

با توجه به این که نرخ براده‌برداری در نفت بسیار بیشتر از مقدار آن در آب است، نسبت حجم برداشته شده از ابزار به حجم برداشته شده از قطعه کار (فرسایش نسبی ابزار) در مورد نفت کمتر از آب خواهد بود و به همین دلیل مشاهده می‌شود که فرسایش نسبی ابزار در مورد قطعات ماشین کاری شده در آب دی‌یونیزه بسیار بیشتر از نفت سفید است. همان‌طور که در "شکل 3" مشاهده می‌شود به ازای هر شدت جریان معین، با افزایش زمان روشنی پالس در هر دو سیال، فرسایش نسبی ابزار به‌طور یکنواخت کاهش یافته است. در فرآیند تخلیه الکتریکی با قطبیت مثبت ابزار، مکانیزم غالب براده‌برداری در زمان‌های روشنی پالس کوتاه، حرکت الکترون‌ها از سوی قطب منفی (قطعه کار) به طرف قطب مثبت (ابزار) می‌باشد که در این شرایط حجم بیشتری از ابزار فرسایش می‌یابد. ولی با افزایش زمان روشنی پالس که به گسترش شعاع کانال پلاسما منجر می‌شود، حرکت یون‌های مثبت از طرف ابزار (قطب مثبت) به طرف قطعه کار (قطب منفی) آسانتر شده و مکانیزم غالب براده‌برداری، برخورد یون‌های مثبت با سطح قطعه کار خواهد بود و این عامل باعث کاهش درصد فرسایش نسبی ابزار هم‌زمان با افزایش زمان روشنی پالس می‌شود.

3-3- تأثیر نوع دی‌الکتریک بر زبری سطح ماشین کاری شده در

شدت جریان‌ها و زمان‌های روشنی پالس مختلف

"شکل 4"، اثر تغییرات شدت جریان پالس و زمان روشنی پالس را بر روی زبری سطح ماشین کاری شده برای آب دی‌یونیزه و نفت نشان می‌دهد. طبق این نمودار مشاهده می‌شود که برای هر دو سیال دی‌الکتریک نفت سفید و آب دی‌یونیزه، با افزایش جریان و زمان روشنی پالس، مقدار زبری سطح به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. با افزایش جریان پالس، انرژی تخلیه الکتریکی

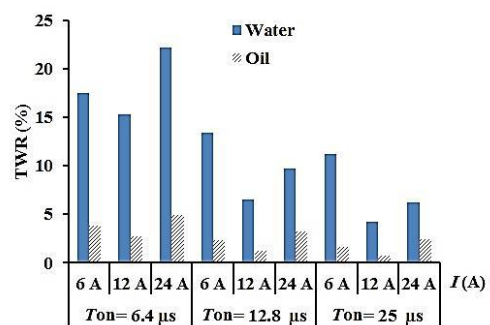


Fig. 3 The effects of pulse current and pulse on time variations on the tool wear ratio for de-ionized water and kerosene

شکل 3 اثر تغییرات شدت جریان و زمان روشنی پالس بر روی فرسایش نسبی ابزار برای آب دی‌یونیزه و نفت سفید

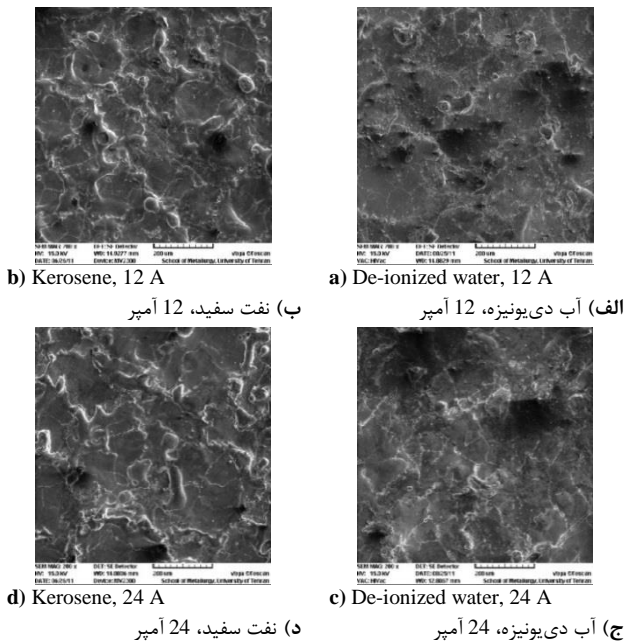


Fig. 7 Machined surface topography by SEM images with 200 X magnification for the 25 μ s pulse on time

شکل 7 توپوگرافی سطوح ماشین کاری شده به کمک تصاویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی 200 برابر برای زمان روشنی پالس 25 میکروثانیه

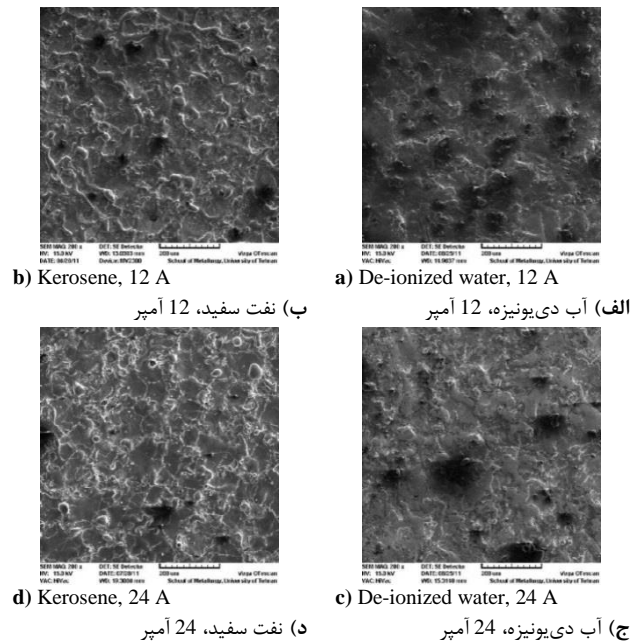


Fig. 5 Machined surface topography by SEM images with 200 X magnification for the 6.4 μ s pulse on time

شکل 5 توپوگرافی سطوح ماشین کاری شده به کمک تصاویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی 200 برابر برای زمان روشنی پالس 6.4 میکروثانیه

نشان می‌دهد که به‌طور کلی با افزایش شدت جریان، ترک‌های سطحی در نمونه‌های ماشین کاری شده در آب کمتر می‌شود ولی در نفت افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که به ازای هر شدت جریان تنظیمی معین، تغییرات زمان روشنی پالس تأثیر چندانی بر ترک‌های سطحی ندارد. با توجه به این که هدایت حرارتی آب نسبت به نفت بیشتر است، سرعت خنک شدن قطعه هنگام ماشین کاری در آب دی‌یونیزه بیشتر از نفت سفید می‌باشد. به همین دلیل مشاهده می‌شود در شدت جریان‌های کم در سطح نمونه‌های ماشین کاری شده در آب دی‌یونیزه ترک ایجاد شده است ولی نمونه‌های ماشین کاری شده در نفت سفید تقریباً فاقد ترک هستند. با افزایش شدت جریان، انرژی حرارتی بیشتر و متمرکزتری به قطعه وارد شود و باعث افزایش تنش‌های حرارتی در سطح قطعه‌کار می‌گردد. به همین دلیل مشاهده می‌شود هنگامی که شدت جریان افزایش می‌یابد، مقدار ترک‌های سطحی در قطعات ماشین کاری شده در نفت سفید افزایش می‌یابد. ولی از آنجایی که با افزایش شدت جریان، شعاع کانال پلاسمای تشکیل شده در آب دی‌یونیزه به شدت افزایش می‌یابد، تمرکز انرژی حرارتی کاهش یافته و در نتیجه تنش‌های حرارتی کمتری در سطح ایجاد می‌گردد، لذا با افزایش شدت جریان، میزان ترک‌های سطحی در نمونه‌های ماشین کاری شده در آب دی‌یونیزه کمتر شده است.

4- نتایج

در تحقیق جاری، پس از انجام آزمایش‌های ماشین کاری طراحی شده، جهت ارزیابی قابلیت ماشین کاری ترکیب بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما تحت شرایط دو سیال دی‌الکتریک آب دی‌یونیزه و نفت سفید، نرخ براده‌برداری و فرسایش نسبی ابزار بررسی شده است و با استفاده از تجهیزات زبری‌سنج و میکروسکوپ الکترونی روشنی، تأثیر دو متغیر اصلی فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی یعنی شدت جریان پالس و زمان روشنی پالس، بر روی برخی مشخصه‌های یکپارچگی سطح مانند زبری سطح، توپوگرافی سطح و ترک‌های

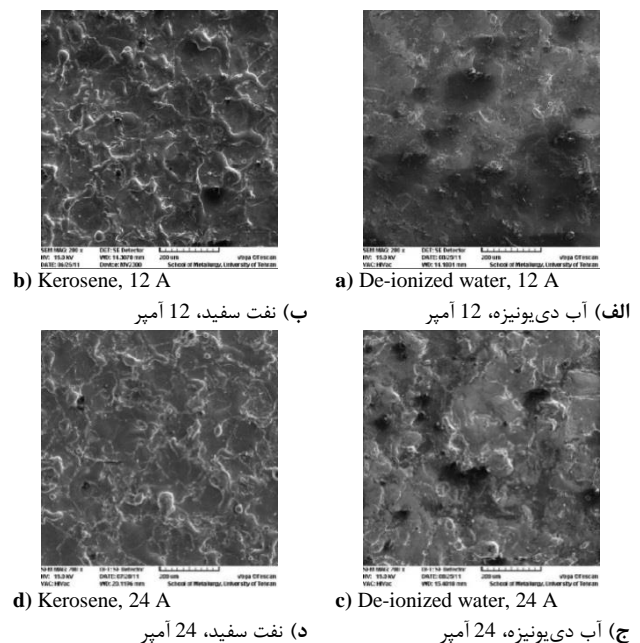


Fig. 6 Machined surface topography by SEM images with 200 X magnification for the 12.8 μ s pulse on time

شکل 6 توپوگرافی سطوح ماشین کاری شده به کمک تصاویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی 200 برابر برای زمان روشنی پالس 12.8 میکروثانیه

3-5- تأثیر نوع دی‌الکتریک بر ترک‌های سطحی در شدت جریان‌ها و زمان‌های روشنی پالس مختلف

در "شکل‌های 8، 9 و 10" تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی 500 برابر مربوط به سطح برخی از نمونه‌های ماشین کاری شده نشان داده شده است. همچنین برای بررسی ترک‌های سطحی، بخش میانی سطح نمونه‌های ماشین کاری شده لحاظ گردیده است. مقایسه این تصاویر

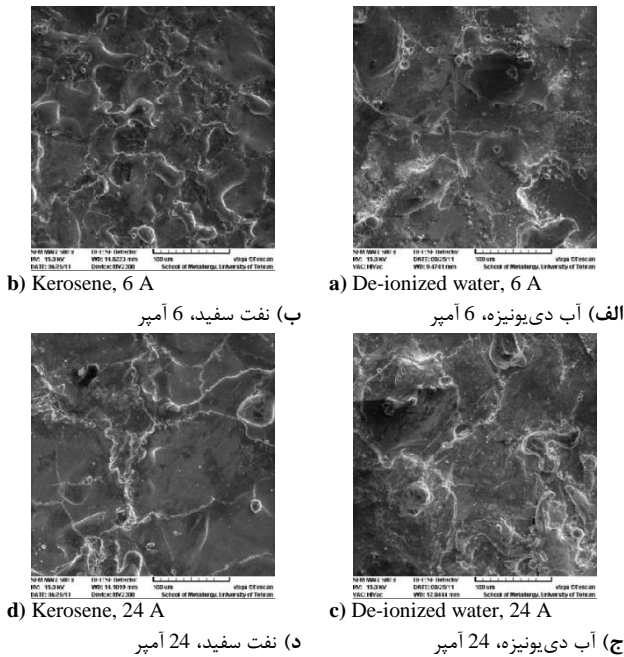


Fig. 10 Investigating surface cracks by SEM images with 500 X magnification for the 25 μ s pulse on time

شکل 10 بررسی ترک‌های سطحی به کمک تصاویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی 500 برابر برای زمان روشنی پالس 25 میکروثانیه

- استحکام دی‌الکتریک و هدایت حرارتی سیال دی‌الکتریک اثر زیادی بر نرخ براده برداری دارند. بیشتر بودن استحکام دی‌الکتریک آب دی‌یونیزه باعث می‌شود که هنگام ماشین کاری در این سیال، زمان‌های تأخیر جرقه نسبت به زمانی که ماشین کاری در نفت سفید انجام می‌شود، بیشتر باشد. لذا تخلیه الکتریکی در نفت سفید راحت‌تر از آب دی‌یونیزه انجام می‌شود و به دنبال آن نرخ براده برداری بیشتر است.

- هدایت حرارتی آب به مقدار قابل توجهی بیشتر از هدایت حرارتی نفت سفید می‌باشد، لذا مقدار هدررفت انرژی حرارتی در دی‌الکتریک آب دی‌یونیزه بسیار بیشتر از نفت است و به واسطه این کاهش انرژی حاصل از تخلیه الکتریکی، نرخ براده برداری در آب کمتر از نفت می‌باشد.

- با افزایش شدت جریان پالس تا یک حد بهینه، مقدار انرژی حرارتی تلف شده به واسطه رسانش حرارتی در بدنه ابزار مسی نسبت به قطعه کار افزایش می‌یابد و باعث کاهش تمرکز حرارتی و در نتیجه کاهش فرسایش نسبی ابزار می‌گردد ولی بعد از آن حد بهینه، با افزایش چگالی جریان و انتقال انرژی حرارتی متمرکزتر و بیشتر به ابزار و همچنین به دلیل کمتر بودن دمای ذوب ابزار مسی نسبت به قطعه کار تیتانیوم آلومیناید گاما، مقدار فرسایش نسبی ابزار افزایش می‌یابد. به ازای هر شدت جریان معین، با افزایش زمان روشنی پالس، در هر دو سیال دی‌الکتریک، فرسایش نسبی ابزار به‌طور یکنواخت کاهش می‌یابد.

- با افزایش شدت جریان، ترک‌های سطحی در نمونه‌های ماشین کاری شده در آب کمتر می‌شود ولی در نمونه‌های ماشین کاری شده در نفت افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که تغییرات زمان روشنی پالس تأثیر چندانی بر ترک‌های سطحی ندارد. در شدت

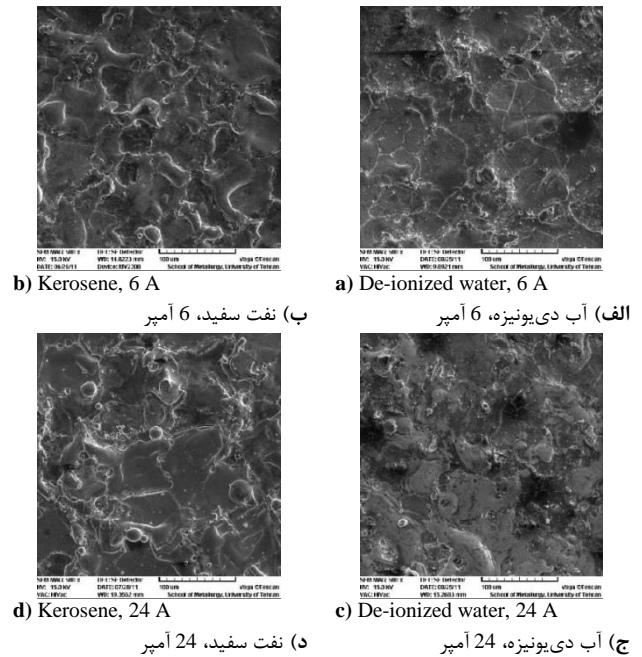


Fig. 8 Investigating surface cracks by SEM images with 500 X magnification for the 6.4 μ s pulse on time

شکل 8 بررسی ترک‌های سطحی به کمک تصاویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی 500 برابر برای زمان روشنی پالس 6.4 میکروثانیه

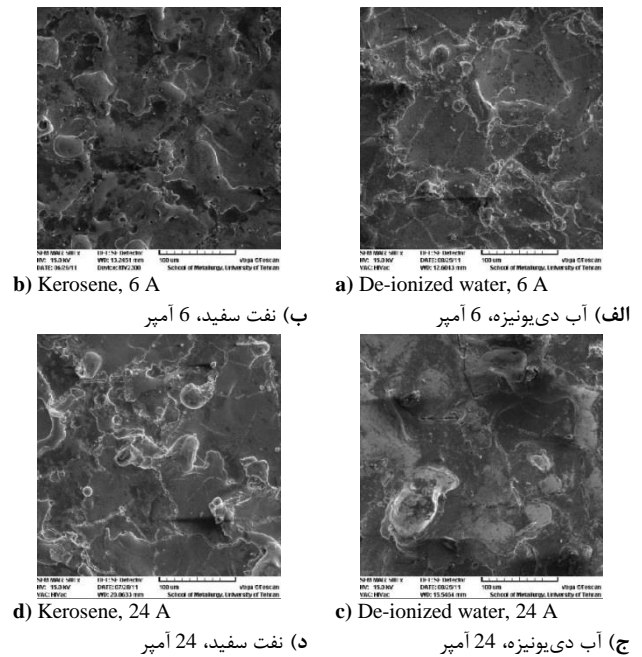


Fig. 9 Investigating surface cracks by SEM images with 500 X magnification for the 12.8 μ s pulse on time

شکل 9 بررسی ترک‌های سطحی به کمک تصاویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی 500 برابر برای زمان روشنی پالس 12.8 میکروثانیه

سطحی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج کلی در ذیل ارائه می‌گردند:

- در فرآیند ماشین کاری تخلیه الکتریکی، خشن کاری (ماشین کاری تحت جریان‌ها و زمان‌های روشنی پالس بالا) ترکیب بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید برخلاف پرداخت کاری آن (ماشین کاری تحت جریان‌ها و زمان‌های روشنی پالس پایین)، با راندمان بسیار بالاتری انجام پذیر است.

- [8] G. Lutjering, J. C. Williams, *Titanium, Engineering Materials and Processes*, pp. 217-246, Germany: Springer-Verlag, 2007.
- [9] F. Appel, U. Brossmann, U. Christoph, S. Eggert, P. Janschek, U. Lorenz, J. Müllauer, M. Oehring, J. D. H. Paul, Recent progress in the development of gamma titanium aluminide alloys, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 2, No. 11, pp. 699-720, 2000.
- [10] H. Clemens, H. Kestler, Processing and applications of intermetallic γ -TiAl-based alloys, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 2, No. 9, pp. 551-570, 2000.
- [11] K. Weinert, S. Bergmann, C. Kempmann, Machining sequence to manufacture a γ -TiAl-conrod for application in combustion engines, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 8, No. 2, pp. 41-47, 2006.
- [12] S. Sarkar, S. Mitra, B. Bhattacharyya, Parametric analysis and optimization of wire electrical discharge machining of γ -titanium aluminide alloy, *Materials Processing Technology*, Vol. 159, No. 3, pp. 286-294, 2005.
- [13] S. Sarkar, S. Mitra, B. Bhattacharyya, Parametric optimisation of wire electrical discharge machining of γ titanium aluminide alloy through an artificial neural network model, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 27, No. 6, pp. 501-508, 2006.
- [14] S. Sarkar, M. Sekh, S. Mitra, B. Bhattacharyya, Modeling and optimization of wire electrical discharge machining of γ -TiAl in trim cutting operation, *Materials Processing Technology*, Vol. 205, No. 3, pp. 376-387, 2000.
- [15] D. K. Aspinwall, R. C. Dewes, A. L. Mantle, The machining of γ -TiAl intermetallic alloys, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 1, pp. 99-104, 2005.
- [16] M. R. Shabgard, H. Faraji, B. Khosrozadeh, K. Amini, M. Seyedzavvar, Experimental investigation into the EDM process of γ -TiAl, *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*, Vol. 38, No. 2, pp. 231-239, 2014.
- [17] B. Jabbaripour, M. H. Sadeghi, M. R. Shabgard, Sh. Faridvand, Investigating the effects of tool materials on the properties of electrical discharge machining of γ -TiAl intermetallic, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 135-146, 2011. (in Persian فارسی)
- [18] B. Jabbaripour, M. H. Sadeghi, M. R. Shabgard, H. Faraji, Investigating surface roughness, material removal rate and corrosion resistance in PMEDM of γ -TiAl intermetallic, *Manufacturing Processes*, Vol. 15, No. 1, pp. 56-68, 2013.
- [19] B. Jabbaripour, M. H. Sadeghi, M. R. Shabgard, H. Faraji, Investigating output characteristics in powder mixed electrical discharge machining of γ -TiAl Intermetallic, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 74-86, 2012. (in Persian فارسی)
- [20] B. Jabbaripour, M. H. Sadeghi, M. R. Shabgard, Sh. Shajari, H. Hassanpour, Investigating the effects of powder mixed electrical discharge machining on the surface quality of γ -TiAl intermetallic, *Advanced Materials Research*, Vol. 11, No. 2, pp. 135-146, 2015.
- [21] D. R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, pp. 589-607, United States of America: Taylor & Francis Group, 2010.
- [22] S. Biswal, *Basic Electronics*, pp. 292-311, India: Atlantic Publishers and Distributors, 2001.
- [23] Thermal Conductivity of common Materials and Gases, Accessed on 11 July 2017; http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html.

جریان‌های کم در سطح نمونه‌های ماشین‌کاری شده در آب دی‌یونیزه ترک ایجاد شده است ولی نمونه‌های ماشین‌کاری شده در نفت سفید تقریباً فاقد ترک هستند. با افزایش شدت جریان و به دنبال افزایش انرژی حرارتی، مقدار ترک‌های سطحی در قطعات ماشین‌کاری شده در نفت سفید افزایش می‌یابد.

• به دلیل هدایت حرارتی بیشتر آب نسبت به نفت، هدررفت انرژی و گسترش شعاع کانال پلاسما در آب نسبت به نفت بیشتر است و این عامل باعث می‌گردد که انرژی حرارتی بیشتر و متمرکزتری به سطح نمونه‌های ماشین‌کاری شده در نفت وارد شود. به همین جهت میزان دانسیته ترک‌های سطحی، مقدار زبری سطح و شدت تغییر توپوگرافی سطح قطعه‌کار در نفت سفید بیشتر از سطح نمونه مربوط به آب دی‌یونیزه می‌باشد ولی در مقابل نرخ براده‌برداری با دی‌الکترونیک نفت سفید بسیار بیشتر از آب دی‌یونیزه است و فرسایش نسبی ابزار در حین ماشین‌کاری با نفت به مقدار قابل توجهی کمتر از آب دی‌یونیزه است.

5- مراجع

- [1] E. C. Jameson, *Electrical Discharge Machining*, pp. 147-159, United States of America: Society of Manufacturing Engineers, 2001.
- [2] S. Kumar, R. Singh, T. P. Singh, B. L. Sethi, Surface modification by electrical discharge machining: A review, *Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 8, pp. 3675-3687, 2009.
- [3] A. Haşçalık, U. Çaydaş, Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V), *Applied Surface Science*, Vol. 253, No. 22, pp. 9007-9016, 2007.
- [4] B. Ekmekci, Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM), *Applied Surface Science*, Vol. 253, No. 23, pp. 9234-9240, 2007.
- [5] H. Ramasawmy, L. Blunt, K. P. Rajurkar, Investigation of the relationship between the white layer thickness and 3D surface texture parameters in the die sinking EDM process, *Precision Engineering*, Vol. 29, No. 4, pp. 479-490, 2005.
- [6] Y. Zhang, Y. Liu, R. Ji, B. Cai, Study of the recast layer of a surface machined by sinking electrical discharge machining using water-in-oil emulsion as dielectric, *Applied Surface Science*, Vol. 257, No. 14, pp. 5989-5997, 2011.
- [7] C. Leyens, M. Peters, *Titanium and Titanium Alloys, Fundamentals and Applications*, pp. 478-515, Germany: Wiley-VCH Verlag, 2003.