مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1396، دوره 17، شماره 12، ص‌ص 47-55

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه تجربی راندمان براده‌برداری و بافت سطحی ماشین‌کاری شده در فرآیند اسپارک بر روی آلیاژ تیتانیوم آلومیناید

بهزاد جباری‌پور[1*]، مهرداد مطلب‌پورعلیشاهی[2]

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:

ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی

سیال دی‌الکتریک

ترکیب بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید

قابلیت ماشین‌کاری

یکپارچگی سطح

چکیده

ترکیب بین‌فلزی 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 دی‌الکتریک نفت سفید و آب دی‌یونیزه، تأثیر مهمترین پارامترهای ورودی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی یعنی شدت جریان پالس و زمان روشنی پالس بر روی مشخصه‌های خروجی فرآیند مانند نرخ براده‌برداری، فرسایش نسبی ابزار و برخی شاخص‌های یکپارچگی سطح قطعه‌کار مانند زبری سطح، توپوگرافی سطح و ترک‌های سطحی تشکیل شده بعد از ماشین‌کاری بررسی می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که خشن‌کاری ترکیب بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید بر خلاف پرداخت‌کاری آن به روش تخلیه الکتریکی، با راندمان بسیار بالاتری انجام‌پذیر 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 ماشین‌کاری شده در نفت وارد شود. در نتیجه، میزان دانسیته ترک‌های سطحی، مقدار زبری سطح و شدت تغییر توپوگرافی سطح بر روی سطح نمونه ماشین‌کاری شده در نفت سفید بیشتر از سطح نمونه مربوط به آب دی‌یونیزه می‌باشد ولی در مقابل نرخ براده‌برداری با دی‌الکتریک 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.

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

Behzad Jabbaripour[1*], Mehrdad Motallebpouralishahi[2]

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

ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی[1] یک روش براده‌برداری است که در آن ولتاژ پالسی و منقطع بین دو الکترود ابزار و قطعه‌کار که در سیالی موسوم به دی‌الکتریک غوطه‌ور می‌باشند، برقرار می‌شود. سپس جرقه‌ای در نزدیکترین فاصله بین ابزار و قطعه‌کار ایجاد گردیده و هر جرقه بخش بسیار کوچکی را از سطح قطعه‌کار جدا می‌کند و در نهایت بعد از تعداد زیادی جرقه شکل مکمل

[1] Electrical Discharge Machining (EDM)

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

پیشانی ابزار با ایجاد حفره‌ای در قطعه‌کار حک می‌گردد. در طول این فرآیند همواره ابزار در فاصله نزدیک و کنترل شده‌ای از قطعه‌کار 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 الکترود ابزار و قطعه‌کار، 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 الکترود ابزار و قطعه‌کار رخ می‌دهد، به استحکام سیال دی‌الکتریک بستگی دارد. استحکام دی‌الکتریک برای یک سیال هیدروکربنی معمولی در حدود 170 ولت در میل[1] می‌باشد. یک میل برابر با 0.001 اینچ (0.025 میلی‌متر) است. در طول زمان پیشروی الکترود ابزار، ولتاژی بین الکترود و قطعه‌کار اعمال می‌شود. از آن‌جایی که هیچ جریان الکتریسیته‌ای بین الکترود و قطعه وجود ندارد، این ولتاژ، ولتاژ مدار باز[2] نامیده می‌شود. زمانی که اختلاف پتانسیل الکتریکی بین الکترود ابزار و قطعه‌کار برقرار است ولی الکترود ابزار به اندازه کافی به قطعه‌کار نزدیک نیست تا جرقه‌زنی انجام شود، نشان دهنده ولتاژ مدار باز می‌باشد. در حالی که ولتاژ اعمال و اندازه‌گیری شده در حین جرقه‌زنی، ولتاژ ماشین‌کاری یا ولتاژ رفرنس نامیده می‌شود. ولتاژ مدار باز معمولاً در محدوده 300-100 ولت و ولتاژ ماشین‌کاری معمولاً در محدوده 50-20 ولت قرار دارد [1]. مهمترین پارامترهای ورودی و تنظیمی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی شامل ولتاژ مدار باز، ولتاژ ماشین‌کاری (ولتاژ رفرنس)، شدت جریان پالس، زمان روشنی و زمان خاموشی پالس، قطبیت، جنس الکترود ابزار و نوع سیال دی‌الکتریک می‌باشد [2].

ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی سطح قطعه‌کار، چند لایه متمایز از ماده پایه[3] قطعه‌کار ایجاد می‌کند. هنگامی که مواد مذاب در پایان زمان روشنی پالس به بیرون از حفره‌های حاصل از ماشین‌کاری فوران می‌کنند، بخشی از مواد الکترودها به شکل برجستگی‌ها و زائده‌های سطحی بر روی قطعه‌کار می‌نشینند. این بخش‌ها عموماً بعد از ماشین‌کاری با پولیش و پرداخت‌کاری از بین می‌روند. علاوه بر این لایه سطحی، قطعه ماشین‌کاری شده دارای دو لایه مهم دیگر نیز خواهد بود. این دو لایه شامل لایه انجماد مجدد[4] و لایه متأثر از حرارت[5] 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 به‌دلیل این‌که به سختی اچ می‌شود و در زیر میکروسکوپ نوری به رنگ سفید دیده می‌شود، لایه سفید[6] 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، میکروترک‌ها 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 قطعه‌کار گردد.

[1] Mil
[2] Open circuit voltage
[3] Bulk material
[4] Recast layer
[5] Heat Affected Zone (HAZ)
[6] White layer

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 آنیل شده[7] نیز می‌نامند. ترکیب شیمیایی و فازهای متالوژیکی موجود در لایه متأثر از حرارت دچار تغییراتی می‌شود و این منطقه یکپارچگی سطح[8] قطعه‌کار را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ضخامت این لایه به قابلیت انتقال حرارت ماده و توان مصرفی برای ماشین‌کاری بستگی دارد [3-5].

اکمکی و همکاران [4] تأثیر نوع سیال دی‌الکتریک و الکترود ابزار بر ساختار لایه سفید و سطح ماشین‌کاری شده به روش تخلیه الکتریکی را با در نظر گرفتن آستنیت باقیمانده و تنش‌های تسلیم، مطالعه نمودند. آن‌ها آزمایش‌های ماشین‌کاری را با دو جنس مختلف الکترود (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 الکترود، سطح ماشین‌کاری شده با سیال دی‌الکتریک نفت از کربن اشباع شده است. زمانی که ماشین‌کاری در آب دی‌یونیزه انجام شده است، به واسطه کربن حاصل از الکترود 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 کاربابد 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 گاما[9] 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 ماشین‌کاری آن است. چقرمگی شکست این مواد در دمای اتاق پایین است و به دلیل شکل‌پذیری پایینی که

[7] Annealed layer
[8] Surface integrity
[9] Gamma titanium aluminide intermetallic compound (γ-TiAl)

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

در این ارتباط وینرت و همکاران [11] با هدف تولید شاتون از جنس تیتانیوم آلومیناید گاما مطالعه‌ای در زمینه قابلیت ماشین‌کاری این ماده انجام داده‌اند. آن‌ها ابتدا شمش تیتانیوم آلومیناید گاما را بوسیله فرآیند ریخته‌گری تحت خلاء تولید نموده و سپس فرآیندهای سوراخ‌کاری، قلاویزکاری، فرزکاری و بورینگ را برای تولید شاتون انجام داده‌اند. آن‌ها گزارش کردند که به‌دلیل سختی، تردی و استحکام بالای تیتانیوم آلومیناید گاما تنها می‌توان از ابزارهایی با جنس کاربایدهای پوشش‌دار و یا مواد برشی سخت‌تر مانند سی-بی‌ان[1] و الماس چندکریستال[2] برای ماشین‌کاری این ماده استفاده نمود. علاوه بر این شکل لبه برشی نیز باید مناسب باشد تا عمر ابزار طولانی‌ترگردد.

سارکار و همکاران [14-12] ماشین‌کاری تیتانیوم آلومیناید گاما را به روش وایرکات مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که ماشین‌کاری این ماده به روش وایرکات با راندمان مناسب امکان‌پذیر است.

اسپینوال و همکاران [15] مطالعاتی را در زمینه روش‌های مختلف ماشین‌کاری 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 قطعه‌کار، ماشین‌کاری سنتی این ترکیب بین‌فلزی بسیار مشکل‌تر از آلیاژهای تیتانیوم است. همچنین آن‌ها گزارش داده‌اند که برای ماشین‌کاری این ماده، فرآیند تراش‌کاری باعث به‌وجود آمدن ترک‌های بسیار زیادی بر روی سطح شده و در فرآیند سوراخ‌کاری نیز مشکلات یکپارچگی سطح اجتناب ناپذیر است. به‌دلیل 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 ماشین‌کاری سرعت بالا می‌توان به سطوح نسبتاً عاری از عیب دست یافت ولی راندمان ماشین‌کاری پایین است.

در این‌جا لزوم استفاده از فرآیندهای ماشین‌کاری غیرسنتی مطرح می‌شود و در این مورد می‌توان از روش‌های ماشین‌کاری الکتروشیمیایی و ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی استفاده نمود. مطالعات بسیار محدود در زمینه ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی این ماده، تحقیقات گسترده‌ای در این مورد را ایجاب می‌کند. خوشبختانه اخیرا در سطح داخل کشور نظر به کاربردهای بسیار پیشرفته و روزافزون صنعتی این آلیاژ در سطح دنیا، ماشین‌کاری این آلیاژ مدرن مورد توجه برخی از محققان و متخصصان حوزه ماشین‌کاری قرار گرفته است، از این جمله شبگرد و همکاران [16] تأثیر پارامترهای ورودی شدت جریان و زمان روشنی پالس در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی ترکیب بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما را بر روی مشخصه‌های خروجی نرخ براده‌برداری[3]، نرخ سایش ابزار[4]، بافت سطحی، عناصر و فازهای شیمیایی و متالوژیکی تشکیل شده بر روی سطح ماشین‌کاری شده را بررسی نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که فرآیند ماشین‌کاری، یکپارچگی سطح نمونه‌های تیتانیوم آلومیناید را تحت تاثیر قرار می‌دهد و حتی در کمترین مقدار انرژی تخلیه الکتریکی، بر روی سطوح قطعه‌کار ترک ایجاد می‌گردد. افزایش انرژی تخلیه الکتریکی منجر به شکل‌گیری ترک‌هایی طویل‌تر و با دهانه پهن‌تر شده است. به‌دلیل نفوذ کربن و اکسیژن به سطح نمونه قطعه‌کار، ترکیب شیمیایی و فازهای متالوژیکی سطوح ماشین‌کاری شده تغییر کرده

[1] Cubic Boron Nitride (CBN)
[2] Polycrystalline Diamond (PCD)
[3] Material Removal Rate (MRR)
[4] Tool Wear Ratio (TWR)

است و طبق مشاهدات آن‌ها فازهای تردی همچون Ti_3Al و TiC بر روی سطوح ماشین‌کاری شده، تشکیل شده است.

جباری‌پور و همکاران نیز در قالب چندین کار پژوهشی منتشر شده داخلی و خارجی به جنبه‌های ماشین‌کاری 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 ماشین‌کاری شده تیتانیوم آلومیناید بررسی نمودند. در تحقیقی دیگر [18] اثر افزودن انواع پودرهای گرافیت، آلومینیوم، سیلیکون‌کاربااید، 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 ماشین‌کاری شده تیتانیوم آلومیناید را بررسی و نسبت به یکدیگر و همچنین حالت ماشین‌کاری بدون پودر مقایسه نمودند. در تحقیقی دیگر [19] مورفولوژی، ترک‌ها و توپوگرافی سطح ماشین‌کاری شده در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به کمک انواع پودر مخلوط شده در سیال دی‌الکتریک نفت سفید را بررسی نموده‌اند و همچنین، در پژوهشی دیگر [20] چگونگی تاثیر تغییرات غلظت ذرات پودر آلومینیوم مخلوط شده در سیال نفت سفید را بر روی ناپایداری‌های تخلیه الکتریکی همچون آرک، اتصال کوتاه و یکپارچگی سطح ماشین‌کاری شده بررسی کرده‌اند.

در تحقیق جاری جهت تکمیل‌تر کردن داده‌های تجربی برای ارزیابی گسترده‌تر قابلیت ماشین‌کاری ترکیب بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما و به منظور ارائه راهنمای فنی و کاربردی قابل استفاده بخش صنعت در حوزه ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی آلیاژ تیتانیوم آلومیناید گاما، تأثیر مهمترین پارامترهای ورودی فرآیند ماشین‌کاری 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 قطعه‌کار مانند زبری متوسط سطح[5]، توپوگرافی سطح و ترک‌های سطحی تشکیل شده بعد از ماشین‌کاری بررسی می‌شود، سپس نتایج ارائه و مقایسه می‌گردند.

2- تجهیزات، تنظیمات و طراحی آزمایش‌ها

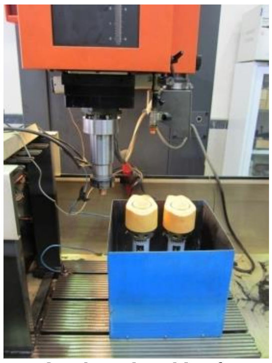
جهت آزمایش‌های ماشین‌کاری از الکترودهای مسی استوانه‌ای شکل به قطر 18 mm و طول 40 mm به عنوان ابزار استفاده شده است. چگالی الکترودهای مورد استفاده برابر با 8.93 gr/cm^3 می‌باشد و قبل از انجام آزمایشات ماشین‌کاری، دو طرف الکترودهای ابزار تا شماره 600 سمباده‌زنی شده بودند. برای نمونه‌های قطعه‌کار از ترکیب 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 10×10×10 میلی‌متر از شمش ریخته‌گری شده، بریده شدند.

تمامی آزمایش‌های ماشین‌کاری بر روی ماشین اسپارک با کنترلر عددی مدل شارمیلز روبوفرم[6] که به یک ژنراتور آیزوپالس مجهز است، انجام گردیده است. تغییرات جرم ابزار و قطعه‌کار، قبل و بعد از هر تست ماشین‌کاری به وسیله ترازوی دقیق دیجیتال[7] با دقت 0.0001 گرم و زبری سطح متوسط به وسیله

[5] Roughness Average
[6] CNC- CHARMILLES ROBOFORM 200
[7] CP224S- Surtorius

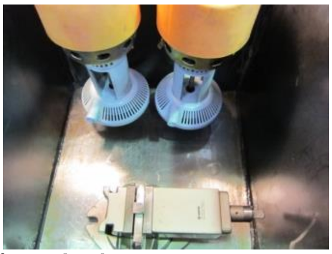
دستگاه زبری‌سنج[1] با دقت 0.001 میکرومتر اندازه‌گیری شده است. به منظور بررسی توپوگرافی سطح و ترک‌های سطحی تشکیل شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی[2] استفاده گردیده است.

در آزمایش‌های ماشین‌کاری، به‌منظور بررسی تأثیر نوع سیال دی‌الکتریک بر مشخصه‌های خروجی فرآیند، آب دی‌یونیزه و نفت سفید به عنوان دو نوع سیال دی‌الکتریک مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور انجام آزمایش‌ها از یک مخزن ویژه که بر روی میز ماشین اسپارک شارمیلز قرار می‌گرفت استفاده شد و برای ایجاد جریان مناسب در سیال دی‌الکتریک از دو پمپ استفاده گردید. نمونه‌های قطعه‌کار بر روی یک گیره رومیزی دقیق بسته شده و گیره در داخل مخزن قرار می‌گرفت. سطح پایینی مخزن از یک صفحه فولادی سنگ‌زنی شده ساخته شد تا انحرافی در موازی بودن سطوح قطعه‌کار و ابزار ایجاد نشود. حجم سیال دی‌الکتریک مورد استفاده در هر آزمایش برابر با 12 لیتر بود که پس از انجام هر آزمایش تعویض می‌شد. شکل 1 تصاویری از نحوه چیدمان مجموعه مخزن ویژه ماشین‌کاری، پمپ‌ها، گیره و همچنین انجام آزمایش‌های ماشین‌کاری درون مخزن را نشان می‌دهد.



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 آزمایش‌های ماشین‌کاری درون مخزن ویژه

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

شکل 1 نحوه چیدمان مجموعه مخزن ویژه ماشین‌کاری، پمپ‌ها، گیره و انجام آزمایش‌های ماشین‌کاری

[1] Mahr- Perthometer M2
[2] Scanning Electronic Microscope (SEM)- Cam Scan 2300 MV

در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی ترکیب بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما، دو پارامتر اصلی فرآیند ماشین‌کاری یعنی شدت جریان پالس و زمان روشنی پالس به‌عنوان پارامترهای ورودی انتخاب شدند. برای بررسی اثر این دو متغیر ورودی تحت شرایط سیال‌های دی‌الکتریک آب دی‌یونیزه و نفت سفید، شدت جریان و زمان روشنی پالس هر کدام در سه سطح تغییر داده شدند و به این ترتیب 18 آزمایش ماشین‌کاری انجام شد. نتایج نرخ براده-برداری و فرسایش نسبی ابزار به‌عنوان متغیرهای خروجی فرآیند در نظر گرفته شدند. همچنین پارامترهای زبری متوسط، توپوگرافی و ترک‌های سطحی بر روی نمونه ماشین‌کاری شده به‌عنوان مؤلفه‌های یکپارچگی سطح مورد بررسی قرار گرفتند. نرخ براده‌برداری و فرسایش نسبی ابزار (نسبت حجم برداشته شده از ابزار به حجم برداشته شده از قطعه‌کار) به ترتیب با استفاده از روابط (1) و (2) محاسبه گردیدند. همچنین شرایط ثابت و متغیرهای آزمایش‌های ماشین‌کاری مورد نظر، در جدول 1 ارائه شده است.

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

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

در روابط (1) و (2)، MRR و TWR به ترتیب نرخ براده‌برداری برحسب (mm^3/min) و فرسایش نسبی ابزار برحسب (٪)، $\Delta m_{\mathrm{W.P.}}$ و $\Delta m_{\mathrm{T.}}$ به ترتیب اختلاف جرم قطعه‌کار و ابزار، قبل و بعد از هر تست ماشین‌کاری (gr)، $\rho_{\mathrm{W.P.}}$ و $\rho_{\mathrm{T.}}$ به ترتیب چگالی قطعه‌کار و ابزار (gr/cm^3) و t زمان ماشین‌کاری (min) می‌باشد.

آزمایش‌های طراحی شده به صورت تصادفی و بدون هیچ‌گونه ترتیب خاصی انجام شده است. پس از انجام آزمایش‌ها و استخراج نمودارهای مربوط به مشخصه‌های خروجی، نقاطی از نمودار که دارای روند متفاوتی از سایر قسمت‌های آن بوده و نتایج آن‌ها مورد تردید بوده است، دو مرتبه دیگر تکرار شده و پس از اطمینان از انحراف کم نتایج آزمایش‌های تکرار شده از همدیگر، میانگین سه مرتبه انجام تست موردنظر، لحاظ شده است.

3- تأثیر نوع دی‌الکتریک بر روی مشخصه‌های خروجی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی

در جدول 2 نتایج حاصل از آزمایش‌های ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی نشان داده شده است که شامل تأثیر شدت جریان پالس و زمان روشنی پالس بر روی مشخصه‌های خروجی فرآیند، هنگام استفاده از سیال‌های دی‌الکتریک

جدول 1 شرایط ثابت و متغیرهای فرآیند در آزمایش‌های ماشین‌کاری

Table 1 Constant conditions and process parameters in machining tests

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 ماشین‌کاری	V	70
زمان ماشین‌کاری	min	15
قطبیت قطعه‌کار	-----	منفی
سیال دی‌الکتریک	-----	آب دی‌یونیزه، نفت سفید
نوع شستشو	-----	غوطه‌وری به همراه ایجاد جریان متلاطم

آب دی‌یونیزه و نفت سفید می‌باشد. در ادامه تحقیق جاری، نتایج حاصل از این آزمایش‌ها، به تفکیک، مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

3-1- تأثیر نوع دی‌الکتریک بر روی نرخ براده‌برداری در شدت جریان‌ها و زمان‌های روشنی پالس مختلف

"شکل 2"، اثر تغییرات شدت جریان پالس و زمان روشنی پالس را بر روی نرخ براده‌برداری برای دو دی‌الکتریک آب دی‌یونیزه و نفت سفید نشان می‌دهد.

با افزایش شدت جریان، به‌واسطه افزایش چگالی جریان و در پی آن افزایش انرژی حرارتی ایجاد شده در محل تخلیه، نرخ براده‌برداری در هر دو دی‌الکتریک افزایش یافته است. مطابق شکل، قابلیت براده‌برداری در دی‌الکتریک نفت سفید بسیار بیشتر از آب دی‌یونیزه است و در برخی از تنظیمات افزایش چند برابری را نشان می‌دهد. استحکام دی‌الکتریک[1] و

جدول 2 تنظیمات فرآیند و نتایج حاصل از آزمایش‌های ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی با استفاده از سیال‌های دی‌الکتریک آب دی‌یونیزه و نفت سفید

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

دی-الکتریک	شدت جریان پالس (A)	زمان روشنی پالس (µs)	نرخ براده‌برداری (mm^3/min) MRR	فرسایش نسبی ابزار (٪) TWR	زبری متوسط سطح (µm) Ra
آب دی-یونیزه	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
	12	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
نفت سفید	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
	12	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

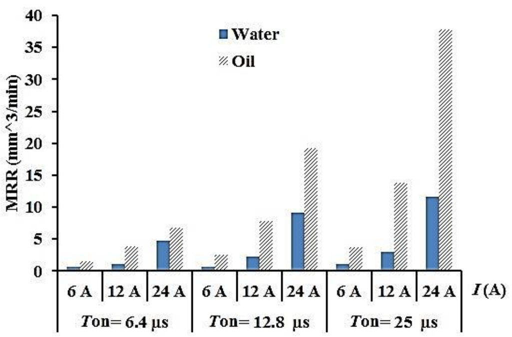


Fig. 2 The effects of pulse current and pulse on time variations on the material removal rate for de-ionized water and kerosene

شکل 2 اثر تغییرات شدت جریان و زمان روشنی پالس بر روی نرخ براده‌برداری برای آب دی‌یونیزه و نفت سفید

هدایت حرارتی[2] از جمله خواص فیزیکی سیال دی‌الکتریک هستند که اثر زیادی بر نرخ براده‌برداری دارند. استحکام دی‌الکتریک در مورد آب دی‌یونیزه تقریبا 1.87 برابر استحکام دی‌الکتریک نفت سفید می‌باشد [22,21]. بیشتر بودن استحکام آب دی‌یونیزه باعث می‌شود که هنگام ماشین‌کاری در این سیال، زمان‌های تأخیر جرقه نسبت به زمانی که ماشین‌کاری در نفت سفید انجام می‌شود، بیشتر باشد. به بیان ساده‌تر تخلیه الکتریکی در نفت سفید راحت‌تر از آب دی‌یونیزه انجام می‌شود و به همین دلیل زمانی‌که از نفت سفید استفاده می‌شود، راندمان ماشین‌کاری بیشتر است. از طرف دیگر هدایت حرارتی آب در دمای محیط تقریبا 3.86 برابر هدایت حرارتی نفت سفید در این دما می‌باشد [23].

این مطلب به این معنی است که مقدار انرژی که در اثر انتقال حرارت در دی‌الکتریک هدر می‌رود، در آب دی‌یونیزه بسیار بیشتر از نفت است و به‌واسطه این کاهش انرژی، نرخ براده‌برداری در آب کمتر از نفت می‌باشد.

افزایش زمان روشنی پالس باعث می‌گردد که انرژی حرارتی بیشتری به قطعه‌کار اعمال شود و انتظار می‌رود که این افزایش انرژی به افزایش نرخ براده‌برداری منجر گردد. اما در مورد آب دی‌یونیزه مشاهده می‌شود که افزایش زمان روشنی پالس در شدت جریان کم 6 آمپر، تأثیر بسیار ناچیزی بر افزایش نرخ براده‌برداری داشته است. همچنین در مورد نفت سفید نیز مشاهده می‌گردد که افزایش زمان روشنی پالس در شدت جریان زیاد 24 آمپر، منجر به افزایش بسیار قابل توجه نرخ براده‌برداری شده است. برای انجام ماشین‌کاری مؤثر به روش تخلیه الکتریکی به حداقلی از شدت جریان نیاز است تا انرژی موردنیاز جهت براده‌برداری از سطح قطعه‌کار تأمین شود. همان‌طور که بیان شد به‌دلیل هدایت حرارتی دی‌الکتریک، بخشی از انرژی حرارتی کانال پلاسما به اطراف منتشر می‌شود و باعث افزایش حرارت دی‌الکتریک پیرامون کانال پلاسما و حباب گاز می‌گردد. با افزایش زمان روشنی پالس، این انرژی باعث تبخیر بخش بیشتری از دی‌الکتریک شده و حباب گاز اطراف کانال پلاسما را بزرگتر می‌نماید که در نهایت به افزایش شعاع کانال پلاسما و کاهش تمرکز انرژی حرارتی در محل تخلیه الکتریکی منجر می‌گردد. به‌طوری‌که افزایش انرژی حرارتی (در اثر افزایش زمان روشنی پالس) فقط سبب گسترش منطقه حرارت دیده می‌شود. به همین علت هرچقدر هدایت حرارتی دی‌الکتریک بیشتر باشد، حداقل شدت جریان مورد نیاز برای براده‌برداری مؤثر نیز بیشتر خواهد بود تا کاهش تمرکز انرژی که در اثر هدررفت انرژی حرارتی و همچنین افزایش شعاع کانال پلاسما ایجاد می‌شود، جبران گردد. با توجه به "شکل 2" مشخص است زمانی‌که از آب دی‌یونیزه (با هدایت حرارتی بیشتر) استفاده شده است، افزایش زمان روشنی پالس تا شدت جریان 12 آمپر تأثیر محسوسی بر افزایش نرخ براده‌برداری نداشته است ولی هنگامی‌که از نفت سفید (با هدایت حرارتی کمتر) استفاده می‌گردد، افزایش زمان روشنی پالس در شدت جریان 6 آمپر نیز باعث افزایش نرخ براده‌برداری شده است.

3-2- تأثیر نوع دی‌الکتریک بر روی فرسایش نسبی ابزار در شدت جریان‌ها و زمان‌های روشنی پالس مختلف

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

[1] Dielectric strength

[2] Thermal conductivity

زیادی دارد که شامل هدایت حرارتی و دمای ذوب ابزار و قطعه‌کار می‌شود. به دلیل اینکه ضریب هدایت حرارتی ابزار مسی تقریبا 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 به‌واسطه رسانش حرارتی در بدنه ابزار مسی نسبت به قطعه‌کار 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 به‌دلیل کمتر بودن دمای ذوب ابزار مسی (1084 °C) نسبت به قطعه‌کار تیتانیوم آلومیناید گاما (1450 °C) [21,9]، مقدار فرسایش نسبی ابزار افزایش می‌یابد.

با توجه به این‌که نرخ براده‌برداری در نفت بسیار بیشتر از مقدار آن در آب است، نسبت حجم برداشته شده از ابزار به حجم برداشته شده از قطعه‌کار (فرسایش نسبی ابزار) در مورد نفت کمتر از آب خواهد بود و به همین دلیل مشاهده می‌شود که فرسایش نسبی ابزار در مورد قطعات ماشین‌کاری شده در آب دی‌یونیزه بسیار بیشتر از نفت سفید است. همان‌طورکه 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 (قطعه‌کار) 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 قطعه‌کار (قطب منفی) آسانتر شده و مکانیزم غالب براده‌برداری، برخورد یون‌های مثبت با سطح قطعه‌کار 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 ماشین‌کاری 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 ماشین‌کاری 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

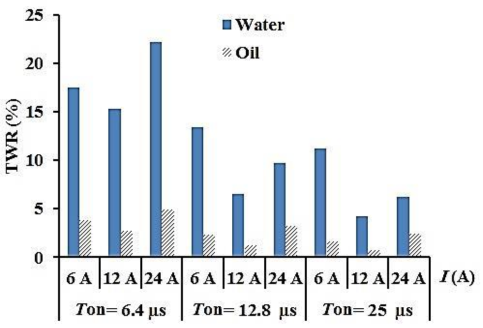


Fig. 3 The effects of pulse current and pulse on time variations on the tool wear ratio for de-ionized water and kerosene

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

بیشتر می‌شود و نیروهای ضربه‌ای روی سطح ماشین‌کاری 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 ماشین‌کاری 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 قطعه‌کار 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 ماشین‌کاری شده در نفت سفید نسبت به نمونه ماشین‌کاری شده در آب دی‌یونیزه بیشتر است، چرا که به‌واسطه 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 قطعه‌کار، در حالت آب دی‌یونیزه کمتر بوده و حفره‌ها یا چاله‌هایی با عمق کمتر بر روی سطح ماشین‌کاری شده ایجاد می‌گردد که این امر به مفهوم کاهش زبری سطح برای نمونه‌های ماشین‌کاری شده در آب دی‌یونیزه می‌باشد.

4-3- 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 ماشین‌کاری شده در دی‌الکتریک‌های آب دی‌یونیزه و نفت سفید نشان داده شده است. لازم به ذکر است برای بررسی توپوگرافی سطوح ماشین‌کاری شده، تقریباً بخش میانی سطح نمونه‌های قطعه‌کار لحاظ گردیده است. با توجه به این تصاویر، مشاهده می‌شود که حفره‌ها و چاله‌های سطحی ایجاد شده در سطح نمونه‌های ماشین‌کاری شده در نفت سفید عمق بیشتری نسبت به نمونه‌های ماشین‌کاری شده در آب دی‌یونیزه دارند. چرا که به واسطه هدایت حرارتی بالاتر آب نسبت به نفت، هدررفت 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 ماشین‌کاری شده در سیال‌های دی‌الکتریک آب دی‌یونیزه و نفت سفید می‌باشند که در "شکل 4" ارائه گردیده بودند.

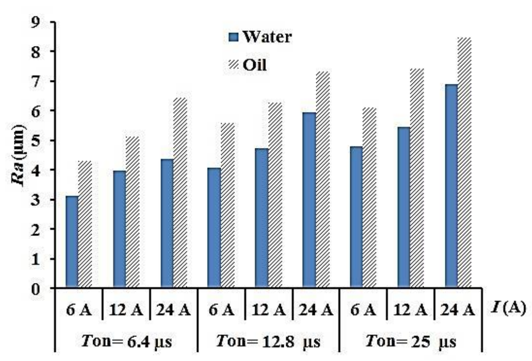
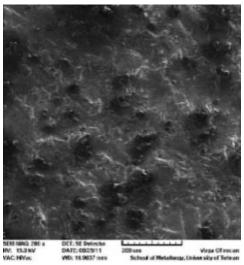


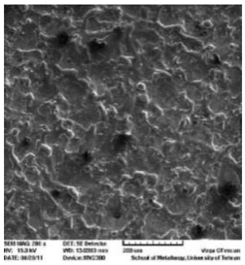
Fig. 4 The effects of pulse current and pulse on time variations on the surface roughness for de-ionized water and kerosene

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



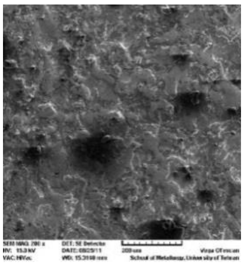
a) De-ionized water, 12 A

الف) آب دی‌یونیزه، 12 آمپر



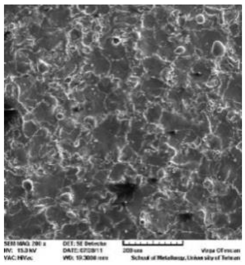
b) Kerosene, 12 A

ب) نفت سفید، 12 آمپر



c) De-ionized water, 24 A

ج) آب دی‌یونیزه، 24 آمپر

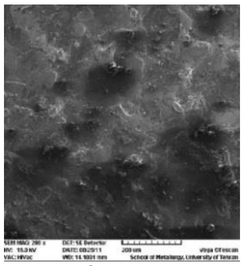


d) Kerosene, 24 A

د) نفت سفید، 24 آمپر

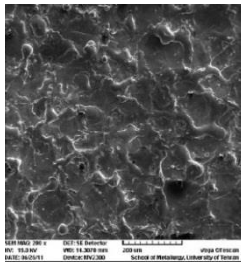
Fig. 5 Machined surface topography by SEM images with 200 X magnification for the 6.4 µs pulse on time

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



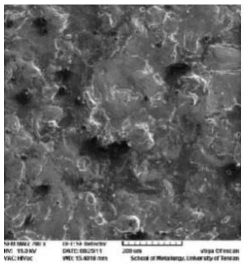
a) De-ionized water, 12 A

الف) آب دی‌یونیزه، 12 آمپر



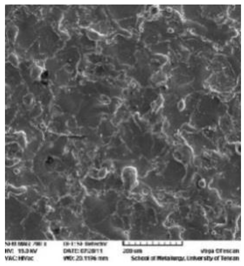
b) Kerosene, 12 A

ب) نفت سفید، 12 آمپر



c) De-ionized water, 24 A

ج) آب دی‌یونیزه، 24 آمپر



d) Kerosene, 24 A

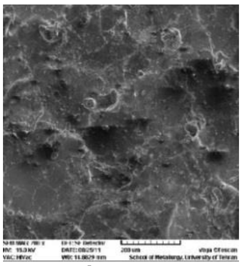
د) نفت سفید، 24 آمپر

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

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

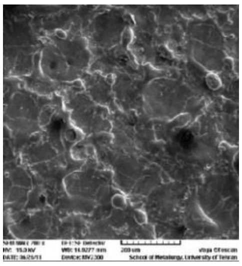
3-5- تأثیر نوع دی‌الکتریک بر ترک‌های سطحی در شدت جریان‌ها و زمان‌های روشنی پالس مختلف

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



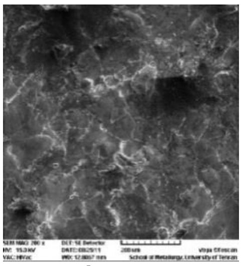
a) De-ionized water, 12 A

الف) آب دی‌یونیزه، 12 آمپر



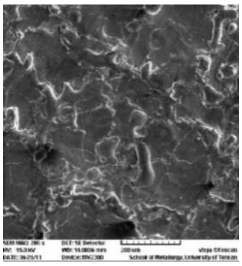
b) Kerosene, 12 A

ب) نفت سفید، 12 آمپر



c) De-ionized water, 24 A

ج) آب دی‌یونیزه، 24 آمپر



d) Kerosene, 24 A

د) نفت سفید، 24 آمپر

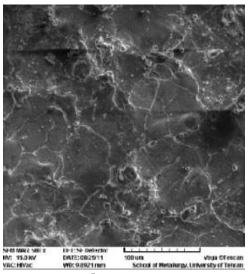
Fig. 7 Machined surface topography by SEM images with 200 X magnification for the 25 µs pulse on time

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

نشان می‌دهد که به‌طور کلی با افزایش شدت جریان، ترک‌های سطحی در نمونه‌های ماشین‌کاری 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 این‌که هدایت حرارتی آب نسبت به نفت بیشتر است، سرعت خنک شدن قطعه هنگام ماشین‌کاری در آب دی‌یونیزه بیشتر از نفت سفید می‌باشد. به همین دلیل مشاهده می‌شود در شدت جریان‌های کم در سطح نمونه‌های ماشین‌کاری شده در آب دی‌یونیزه ترک ایجاد شده است ولی نمونه‌های ماشین‌کاری شده در نفت سفید تقریبا 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 هنگامی‌که شدت جریان افزایش می‌یابد، مقدار ترک‌های سطحی در قطعات ماشین‌کاری شده در نفت سفید افزایش می‌یابد. ولی از آن‌جایی‌که 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 ماشین‌کاری شده در آب دی‌یونیزه کمتر شده است.

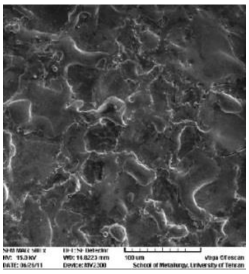
4- نتایج

در تحقیق جاری، پس از انجام آزمایش‌های ماشین‌کاری طراحی شده، جهت ارزیابی قابلیت ماشین‌کاری 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 روبشی، تأثیر دو متغیر اصلی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی یعنی شدت جریان پالس و زمان روشنی پالس، بر روی برخی مشخصه‌های یکپارچگی سطح مانند زبری سطح، توپوگرافی سطح و ترک‌های



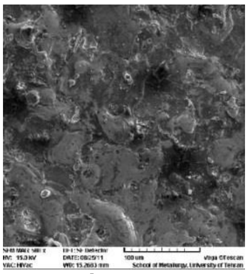
a) De-ionized water, 6 A

الف) آب دی‌یونیزه، 6 آمپر



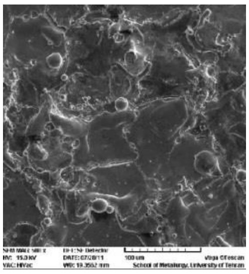
b) Kerosene, 6 A

ب) نفت سفید، 6 آمپر



c) De-ionized water, 24 A

ج) آب دی‌یونیزه، 24 آمپر

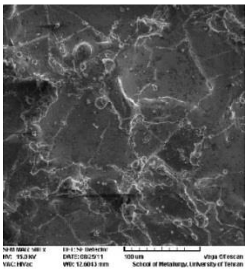


d) Kerosene, 24 A

د) نفت سفید، 24 آمپر

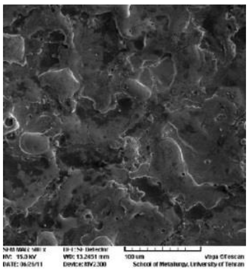
Fig. 8 Investigating surface cracks by SEM images with 500 X magnification for the 6.4 µs pulse on time

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



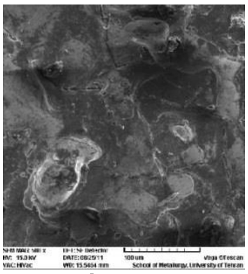
a) De-ionized water, 6 A

الف) آب دی‌یونیزه، 6 آمپر



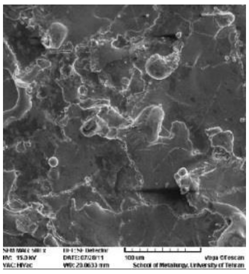
b) Kerosene, 6 A

ب) نفت سفید، 6 آمپر



c) De-ionized water, 24 A

ج) آب دی‌یونیزه، 24 آمپر



d) Kerosene, 24 A

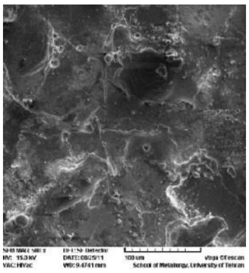
د) نفت سفید، 24 آمپر

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

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

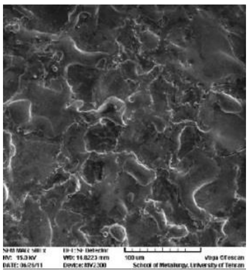
سطحی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج کلی در ذیل ارائه می‌گردند:

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



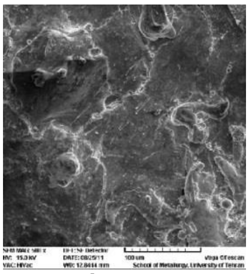
a) De-ionized water, 6 A

الف) آب دی‌یونیزه، 6 آمپر



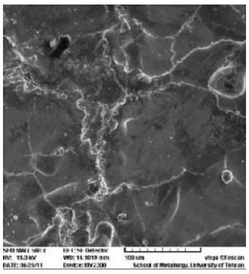
b) Kerosene, 6 A

ب) نفت سفید، 6 آمپر



c) De-ionized water, 24 A

ج) آب دی‌یونیزه، 24 آمپر



d) Kerosene, 24 A

د) نفت سفید، 24 آمپر

Fig. 10 Investigating surface cracks by SEM images with 500 X magnification for the 25 µs 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 براده‌برداری دارند. بیشتر بودن استحکام دی‌الکتریک آب دی‌یونیزه باعث می‌شود که هنگام ماشین‌کاری در این سیال، زمان‌های تأخیر جرقه نسبت به زمانی که ماشین‌کاری در نفت سفید انجام می‌شود، بیشتر باشد. لذا تخلیه الکتریکی در نفت سفید راحت‌تر از آب دی‌یونیزه انجام می‌شود و به دنبال آن نرخ براده‌برداری 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 به‌واسطه این کاهش انرژی حاصل از تخلیه الکتریکی، نرخ براده‌برداری در آب کمتر از نفت می‌باشد.
- با افزایش شدت جریان پالس تا یک حد بهینه، مقدار انرژی حرارتی تلف شده به‌واسطه رسانش حرارتی در بدنه ابزار مسی نسبت به قطعه‌کار 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 قطعه‌کار 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 ماشین‌کاری شده در آب کمتر می‌شود ولی در نمونه‌های ماشین‌کاری شده در نفت افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که تغییرات زمان روشنی پالس تأثیر چندانی بر ترک‌های سطحی ندارد. در شدت

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 دنبالش 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 دی‌الکتریک 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. Hasçalik, 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.

[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.