



Effect of Tool Material on Metal Removal Efficiency, Surface Integrity, and Electrochemical Corrosion Resistance in EDM of Gamma Titanium Aluminide Alloy

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Dinarvand S. ^{*1} PhD,
Jabbaripour B. ¹ PhD

How to cite this article

Dinarvand S, Jabbaripour B. Effect of Tool Material on Metal Removal Efficiency, Surface Integrity, and Electrochemical Corrosion Resistance in EDM of Gamma Titanium Aluminide Alloy. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(7):1815-1828.

¹Mechanical Engineering Faculty, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Niayesh Complex, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Emam Hasan Boulevard, Ashrafi Esfahani Boulevard, Pounak Square, Tehran, Iran. Postal code: 1483766957
Phone: +98 (21) 44600038
Fax: +98 (21) 44600038
sae.dinarvand@iauctb.ac.ir

Article History

Received: January 21, 2020
Accepted: April 8, 2020
ePublished: July 20, 2020

ABSTRACT

Modern intermetallic compound of gamma titanium aluminide (γ -TiAl) due to its low density, high elastic modulus, high resistance to oxidation, corrosion, and ignition has recently been considered in the aerospace and automotive industries. Traditional machining of this alloy is so difficult. In the current study, electrical discharge machining of γ -TiAl samples is investigated using different tool electrodes of graphite, copper, and aluminum. The results show that when using aluminum electrodes, tool wear rate is averagely 3.2 times more than copper and 5.8 times more than graphite tools. In addition, when using graphite electrodes, the average material removal rate is 4.2 times more than copper and 7.7 times more than aluminum. Machining by aluminum tool leads to formation of Al₂O₃ and TiO₂ oxide compounds on the work surface but in machining by graphite electrode, TiC and Ti₈C₅ carbide phases are created on the work surface. In machining by graphite due to formation of hard carbide compounds in the recast layer, the microhardness is higher than the machined sample by the aluminum tool, where oxide compounds exist on the surface and the hardness of recast layer in the machined sample by copper electrode is less than the other two electrodes, because of existing phases such as copper oxide with less hardness. The highest electrochemical corrosion resistance belongs to the machined specimen using graphite tool and the lowest corrosion resistance is related to the machined sample by aluminum electrode. Reducing oxide and aluminum compounds and increasing carbide phases enhance the corrosion resistance of γ -TiAl machined samples.

Keywords Electrical Discharge Machining (EDM); γ -TiAl Intermetallic Compound; Material Removal Rate; Tool Wear Rate; Surface Integrity; Electrochemical Corrosion Resistance

CITATION LINKS

[1] After 60 years of EDM the discharge process remains still ... [2] Titanium and titanium alloys: fundamentals and ... [3] Titanium [4] Machining sequence to manufacture a γ -TiAl-Conrod for application in combustion ... [5] Parametric analysis and optimization of wire electrical discharge machining of γ -titanium aluminide ... [6] Parametric optimisation of wire electrical discharge machining of γ -titanium aluminide alloy through an artificial neural network ... [7] Modeling and optimization of wire electrical discharge machining of γ -TiAl in trim cutting ... [8] The Machining of γ -TiAl Intermetallic ... [9] High speed ball nose end milling of γ -TiAl ... [10] Milling of gamma titanium-aluminum ... [11] On high-speed turning of a third-generation gamma titanium ... [12] Investigating the effects of powder mixed electrical discharge machining on the surface quality of γ -TiAl ... [13] Investigating the effects of tool materials on the properties of electrical discharge machining of γ -TiAl ... [14] Investigating output characteristics in powder mixed electrical discharge machining of ... [15] Experimental study of material removal rate, surface roughness and topography in electrical discharge machining of Titanium ... [16] The comparison of output characteristics in electrical discharge machining and aluminum powder mixed EDM processes on Titanium Aluminide intermetallic ... [17] Experimental investigation of metal removal efficiency and machined surface texture in EDM of titanium aluminide ... [18] Investigating surface roughness, material removal rate and corrosion resistance in PMEDM of γ -TiAl ... [19] Material removal rate and electrode wear ratio study on the powder mixed electrical discharge machining of cobalt-bonded tungsten ... [20] Electrical discharge machining of titanium alloy ... [21] The effect in EDM of a dielectric of urea solution in water on modifying the surface of titanium [22] Surface integrity in ... [23] CRC Handbook of chemistry and ... [24] Corrosion ... [25] Oxygen ion irradiation effect on corrosion behavior of titanium in nitric acid ... [26] Electrical circuits in electrochemical impedance ... [27] Electrochemical Impedance ... [28] Electrochemical methods: fundamentals and applications

تأثیر جنس ابزار بر راندمان براده برداری، یکپارچگی سطح و مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی در ماشین کاری اسپارک آلیاژ

سعید دیناروند^{*} PhD

دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

بهزاد جباری پور PhD

دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

ترکیب بین فلزی مدرن تیتانیوم آلمیناید گاما (γ -TiAl) به علت چگالی پایین، مدول الاستیسیته بالا، مقاومت زیاد در برابر اکسیداسیون، خوردگی و احتراق، اخیراً در صنایع هوافضا و خودروسازی مورد توجه قرار گرفته است. ماشین کاری این آلیاژ به روش های سنتی بسیار دشوار است. در مطالعه حاضر، با استفاده از انواع الکترودهی ابزار گرافیت، مس و آلومینیوم به ماشین کاری تخلیه الکتریکی نمونه های γ -TiAl پرداخته می شود. نتایج نشان می دهد که در هنگام استفاده از الکترودهی آلومینیومی، نرخ سایش ابزار به طور متوسط $3/2$ برابر بیشتر از ابزارهای مسی و $5/8$ برابر بیشتر از گرافیت است. در هنگام استفاده از گرافیت، نرخ براده برداری به طور متوسط $4/2$ برابر بیشتر از مس و $7/7$ برابر بیشتر از ابزارهای آلومینیومی است. ماشین کاری با آلومینیوم منجر به شکل گیری ترکیبات اکسیدی TiO_2 و Al_2O_3 روی سطح قطعه کار می شود، ولی در ماشین کاری با گرافیت، فازهای کاربیدی TiC ، Ti_8O_5 روی سطح تشکیل می شود. در ماشین کاری با گرافیت به دلیل شکل گیری ترکیبات سخت کاربیدی در لایه انجماد مجدد، میکروسختی بیشتر از نمونه ماشین کاری شده توسط ابزار آلومینیومی است که ترکیبات اکسیدی روی سطح وجود دارند و سختی لایه انجماد مجدد در نمونه ماشین کاری شده با ابزار مسی کمتر از دو ابزار دیگر است و دلیل آن وجود فازهایی با سختی کمتر همچون اکسید مس است. بیشترین مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی متعلق به نمونه ماشین کاری شده توسط گرافیت و کمترین مقاومت به خوردگی برای نمونه ماشین کاری شده توسط آلومینیوم است. کاهش ترکیبات اکسیدی و آلومینیومی و افزایش فازهای کاربیدی منجر به افزایش مقاومت به خوردگی نمونه های ماشین کاری شده γ -TiAl می شود.

کلیدواژه ها: ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM)، ترکیب بین فلزی γ -TiAl، نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار، یکپارچگی سطح، مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۲۰

*نویسنده مسئول: sae.dinarvand@iauctb.ac.ir

مقدمه

ماشین کاری به کمک تخلیه الکتریکی غوطه وری (Die Sinking) (Electrical Discharge Machining; EDM) یا اسپارک که به فرسایش جرقه ای نیز موسوم است یک روش براده برداری غیرسنتی است که در آن بین دو الکترودهی به نام ابزار و قطعه کار که در فاصله معین و کنترل شده ای از یکدیگر قرار دارند و فضای بین آنها را سیالی به نام دی الکتریک پر کرده است، در نزدیک ترین فاصله بین ابزار و قطعه کار، جرقه الکتریکی تولید و باربرداری صورت می گیرد. با این روش می توان مواد هادی و نیمه هادی را ماشین کاری نمود [1].

همواره تقاضا برای توسعه سیستم های تبدیل انرژی و بهبود راندمان این سیستم ها با افزایش روبرو بوده است. طراحی پیشرفته این سیستم ها براساس دماهای سرویس دهی بالاتر، وزن های سبک تر و سرعت های عملیاتی بالاتر است. سیستم های فلزی مرسوم بیش از ۵۰ سال است که توسعه یافته اند و برای دست یافتن به پیشرفت های بیشتر در این زمینه به کلاس های جدیدی از مواد نیاز است. آلیاژهای تیتانیوم آلومیناید براساس فازهای بین فلزی γ -TiAl و α -TiAl به عنوان موادی که از پتانسیل بالایی برای برآورده کردن نیازهای طراحی مدرن برخوردارند، شناخته می شوند [2]. ترکیبات بین فلزی، مخصوصاً آنهایی که از عناصر سبک مانند تیتانیوم و آلومینیوم تشکیل شده اند، به دلیل چگالی کم و استحکام خوبشان در دمای بالا مورد توجه قرار گرفته اند [3]. اساساً خواص برجسته این مواد به دلیل ماهیت شدیداً منظم و پیوندهای جهت دار ترکیبات آنها است. این خواص شامل چگالی پایین، مدول الاستیسیته بالا، پایداری ساختاری خوب، مقاومت خوب در برابر اکسیداسیون و خوردگی، مقاومت بالا در برابر احتراق، استحکام کششی و خزشی در دمای بالا هستند. براساس این خواص، ترکیبات بین فلزی تیتانیوم آلومیناید می توانند در محدوده وسیعی از قطعات در صنعت خودروسازی، صنایع هوافضا، توربین های نیروگاه برق و موتورهای توربین گازی استفاده شوند [2].

یکی از روش های اصلی مطرح شده در زمینه ساخت و تولید قطعاتی از جنس ترکیب بین فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما γ -TiAl، فرآیند ماشین کاری آن است. چقرمگی شکست این مواد در دمای اتاق پایین است و به دلیل شکل پذیری پایینی که دارند، از نظر ماشین کاری به عنوان مواد سخت ماشین کاری شونده محسوب می شوند. تحقیقات بسیار محدودی درباره ماشین کاری ترکیب بین فلزی تیتانیوم آلومیناید انجام شده است. وینرت و همکاران [4]، با هدف تولید شاتون از جنس γ -TiAl مطالعه ای در زمینه قابلیت ماشین کاری این ماده انجام داده اند. آنها ابتدا شمش γ -TiAl را به وسیله مراحل ریخته گری قوسی تحت خلاء (Vacuum Arc Re-melting; VAR)، تولید نموده و سپس فرآیندهای سوراخ کاری، قلاویزکاری، فرزکاری و بورینگ را برای تولید شاتون انجام دادند. آنها گزارش کردند که به دلیل سختی، تردی و استحکام بالای γ -TiAl تنها می توان از ابزارهایی با جنس کاربیدهای سممانته پوشش دار و یا مواد برشی سخت تر مانند نیترات بور مکعبی (CBN) و الماس چند کریستالی (PCD) برای ماشین کاری این ماده استفاده نمود. سارکار و همکاران [5-7]، ماشین کاری γ -TiAl را به روش وایرکات مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان می دهد که ماشین کاری این ماده به روش تخلیه الکتریکی با راندمان مناسب امکان پذیر است. اسپینوال و همکاران [8] و هود و همکاران [9]، مطالعاتی را در زمینه روش های مختلف ماشین کاری γ -TiAl، به خصوص فرزکاری سرعت بالا انجام دادند. بررسی آنها نشان می دهد که از نظر سایش یا عمر

جنس الکترودها نیز تاثیر قابل توجهی بر روی تغییرات مورفولوژی سطح حاصل از اسپارک داشته است. جباری‌پور و همکاران^[14]، در تحقیقی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر بر روی تیتانیوم آلومیناید گاما را با استفاده از انواع پودرهای آلومینیوم، گرافیت، سیلیکون کارباید، کروم و آهن بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که پودر آلومینیوم در غلظت بهینه ۲ گرم بر لیتر، نرخ سایش ابزار را در حدود ۱۹٪ کاهش و البته نرخ براده‌برداری را نیز ۷/۵٪ کاهش داده است و همچنین نسبت به ماشین‌کاری با سایر پودرهای مخلوط در نفت سفید، بیشترین بهبود را در توپوگرافی سطح ماشین‌کاری و کاهش عیوب سطحی ایجاد کرده است. جباری‌پور و مطلب‌پورعلی‌شاهی^[15]، در تحقیقی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به‌ازای سطوح مختلف جریان و زمان روشنی پالس بر روی تیتانیوم آلومیناید گاما را بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که در جریان‌های کمتر (۳ و ۶ آمپر) علی‌رغم افزایش زمان روشنی پالس، تغییر محسوسی در نرخ براده‌برداری از قطعه‌کار مشاهده نمی‌شود و بیانگر این است که فرآیند پرداخت تیتانیوم آلومیناید دشوار و زمان‌بر است ولی در جریان‌های بیشتر (۱۲، ۲۴ و ۶۴ آمپر)، چنین شرایطی وجود ندارد و فرآیند خشن‌کاری این ماده به‌صورت بهینه انجام پذیر است. جباری‌پور و مطلب‌پورعلی‌شاهی^[16]، در فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی تیتانیوم آلومیناید گاما، تاثیر تغییرات جریان، زمان روشنی پالس و تغییرات اندازه و غلظت ذرات پودر مخلوط در سیال نفت سفید را بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش غلظت ذرات پودر آلومینیوم، نرخ سایش ابزار و زبری سطح تا حد بهینه‌ای کاهش و سپس افزایش می‌یابد. برای پودر با اندازه ذرات ۲ و ۲۰ میکرومتر، با افزایش غلظت پودر در سیال، نرخ براده‌برداری ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در حالی که برای اندازه ذرات ۶۳ میکرومتر، با افزایش غلظت پودر آلومینیوم، نرخ براده‌برداری کاهش می‌یابد. جباری‌پور و مطلب‌پورعلی‌شاهی^[17]، در تحقیقی فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی تیتانیوم آلومیناید گاما را تحت دو محیط سیال دی‌الکتریک نفت سفید و آب دی‌یونیزه بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که میزان چگالی ترک‌های سطحی، مقدار زبری سطح و شدت تغییر توپوگرافی سطح بر روی نمونه ماشین‌کاری‌شده در نفت سفید بیشتر از سطح نمونه مربوط به آب دی‌یونیزه است ولی در مقابل نرخ براده‌برداری با دی‌الکتریک نفت سفید بسیار بیشتر از آب دی‌یونیزه است و فرسایش ابزار در ماشین‌کاری با نفت به مقدار قابل توجهی کمتر از آب دی‌یونیزه است. جباری‌پور و همکاران^[18]، فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی بر روی تیتانیوم آلومیناید گاما را به کمک پنج نوع پودر مختلف (با اندازه ذرات و غلظت‌های متفاوت) مخلوط‌شده در نفت سفید بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که پودر آلومینیوم تحت شرایط اندازه ذرات ۲ میکرومتر، نسبت به سایر انواع پودرها، بیشترین افزایش نرخ براده‌برداری (حدود ۵۴٪) را نسبت به حالت ماشین‌کاری بدون کمک پودر، سبب شده است.

ابزار، نیروهای برشی، دما، قابلیت تولید و مهم‌تر از همه یکپارچگی سطح قطعه، ماشین‌کاری سنتی γ -TiAl بسیار مشکل‌تر از آلیاژهای تیتانیوم است. همچنین بیان کردند که ماشین‌کاری این ماده به روش تخلیه الکتریکی و الکتروشیمیایی انجام‌پذیر و ممکن است ولی جزییات بیشتری گزارش نکردند. برانویگر و همکاران^[10]، تحقیقی در مورد فرآیند فرزکاری γ -TiAl انجام دادند. آنها در حین آزمایش‌های ماشین‌کاری، سرعت برشی و پیشروی را تغییر دادند و اثرات آن را بر روی سایش ابزار مشاهده نمودند. آنها در حین آزمایش‌ها از ابزارهای اینسرتی تنگستن کارباید با روکش TiAlN استفاده کردند و مشاهده نمودند که اینسرت‌های ابزار در حین فرزکاری متحمل نرخ سایش بسیار شدیدی می‌شوند. کلوکه و همکاران^[11]، تحقیقی در مورد تراشکاری سرعت بالای γ -TiAl انجام دادند، آنها در حین آزمایش‌ها علاوه بر پارامترهای سرعت برشی، سرعت پیشروی و عمق برش، هندسه‌های مختلف ابزار و انواع روش‌های خنک‌کاری را به‌کار برده‌اند. پارامترهای خروجی مورد مطالعه آنها یکپارچگی سطح، شکل براده، نیروهای ماشین‌کاری و عمر ابزار بوده است. آنها بیان نمودند که با توجه به پارامترهای خروجی اندازه‌گیری‌شده، این ترکیب بین فلزی دارای قابلیت ماشین‌کاری بسیار پایین است، به همین دلیل انتخاب پارامترهای بهینه برای افزایش قابلیت ماشین‌کاری و کاهش هزینه‌ها بسیار پراهمیت است.

تاکنون و براساس آخرین اطلاع، هیچ‌گونه کار تحقیقاتی در زمینه ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی غوطه‌وری (اسپارک) بر روی ترکیب بین فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما γ -TiAl به غیر از انتشارات سابق^[12-18] گزارش نشده است که در ادامه اشاره‌ای به این تحقیقات می‌شود. جباری‌پور و همکاران^[12]، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به کمک پودر مخلوط‌شده در سیال دی‌الکتریک را بر روی ترکیب بین فلزی γ -TiAl با استفاده از انواع پودرهای آلومینیوم، گرافیت، سیلیکون کارباید، کروم و آهن انجام دادند. نتایج نشان داد که پودر آلومینیوم مخلوط در سیال نفت سفید، بهترین کیفیت سطح را نتیجه می‌دهد و پس از آن به‌ترتیب سیلیکون کارباید، گرافیت، کروم و آهن، بهترین صافی سطح را بر روی قطعه‌کار ایجاد می‌کنند. نتایج آنها نشان داد که تحت شرایط ماشین‌کاری مشخص، پودر آلومینیوم زبری سطح نمونه تیتانیوم آلومیناید را در حدود ۳۲٪ بهبود می‌بخشد. جباری‌پور و همکاران^[13]، در مطالعه‌ای تاثیر انواع الکترودهای ابزار گرافیت، مس و آلومینیوم را بر روی توپوگرافی سطح، آنالیز عنصری و آنالیز عنصری نگاره‌ای (EDS Mapping) در ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی γ -TiAl بررسی نمودند. نتایج نشان داد که عناصر غالب در ترکیب شیمیایی سطح ماشین‌کاری شامل تیتانیوم، آلومینیوم، کربن و اکسیژن هستند. در ماشین‌کاری به کمک ابزار گرافیت، آلومینیوم و مس، به‌ترتیب درصد قابل توجهی از عناصر کربن، آلومینیوم و مس روی سطح ماشین‌کاری‌شده قطعه‌کار رسوب می‌کند و تغییر

۲ آمده است، علاوه بر آن نقطه ذوب و مقاومت الکتریکی مربوط به جنس الکترودها در جدول ۲ افزوده شده است. بعد از آماده سازی تمام انواع الکترودهای ابزار و نمونه های قطعه کار γ -TiAl، به منظور داشتن زبری سطح اولیه یکسان، تمام سطوح آنها با استفاده از ورق های سمباده تا شماره ۶۰۰ سمباده زنی شد.

جدول ۱) خواص فیزیکی و مکانیکی ترکیب بین فلزی γ -TiAl [5,8]

مقدار	خواص
۳/۷۶-۳/۸۵	دانشیته (g/cm^3)
۴۶۳	تنش تسلیم (MPa)
۴۹۹	حداکثر استحکام کششی (MPa)
۱۴۴	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۵۵	افزایش طول (%)
۰/۲۴	نسبت پواسون
۱۵-۲۲	ضریب رسانش حرارتی (W/mK)

جدول ۲) چگالی اندازه گیری شده و سایر مشخصات فیزیکی الکترودهای ابزار

چگالی (g/cm^3)	مس	آلومینیوم	گرافیت
۸/۹۳	۲/۶۹	۱/۶۷	
نقطه ذوب $^{[20]}$ ($^{\circ}\text{C}$)	۱۰۸۳	۶۶۰	۳۳۰۰
مقاومت الکتریکی $^{[20]}$ ($\mu\Omega\text{cm}$)	۸/۹	۱۴/۲	۱۴۰۰

در طی آزمایشات ماشین کاری تخلیه الکتریکی غوطه وری (اسپارک) دو پارامتر جریان و زمان روشنی پالس تغییر داده می شوند و نتایج خروجی برای سه نوع مختلف جنس الکترودهای ابزار مس، آلومینیوم و گرافیت با یکدیگر مقایسه می شوند. سایر پارامترهای ورودی ماشین کاری در تمام مراحل آزمایشها ثابت نگه داشته می شوند. شرایط کاری در جدول ۳ آورده شده است. برای طراحی آزمایشها از روش عاملی کامل (Full Factorial) استفاده می شود و با توجه به پارامترهای ورودی ذکر شده و سطوح آنها، تعداد آزمایشها برای هر جنس الکترودهای ابزار عبارت است از ۹ حالت و از آنجا که ۳ جنس الکترودهای ابزار وجود دارد، تعداد کل آزمایشها برابر با ۲۷ حالت است. در شکل ۱ نحوه بستن الکترودهای ابزار و نمونه قطعه کار نشان داده شده است. جهت بالا آوردن سطح نمونه ها از یک میلگرد سنگ خورده فولادی استفاده شده است و برای اتصال نمونه های γ -TiAl به پایه (میلگرد) سنگ خورده و الکترودهای ابزار به ابزارگیر مسی متصل به کله گی دستگاه، از چسب مخصوص اسپارک استفاده شده است که پس از پایان ماشین کاری هر نمونه، چسب روی نمونه ها و الکترودها به کمک آستون کاملاً تمیز می شود.

به منظور انجام ماشین کاری تخلیه الکتریکی غوطه وری از ماشین اسپارک تهران اکرام مدل 204H (50 A) استفاده شده است. تمام آزمونها در حالت ایزوپالس دستگاه انجام شده است و سیال دی الکتریک مورد استفاده، نفت سفید Kerosene است. جهت بررسی توپوگرافی سطح ماشین کاری شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی با مدل Cam Scan2300 MV استفاده شده است. برای

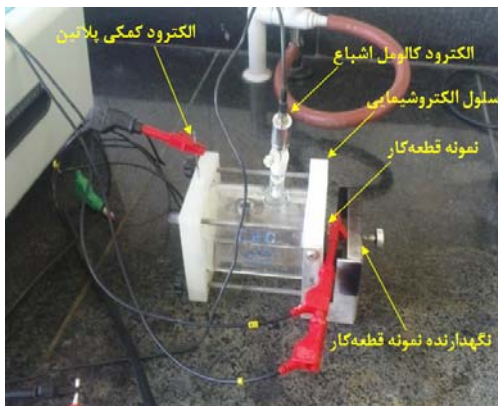
همچنین در این تحقیق، مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی سطوح ماشین کاری شده تحت اثر افزودن انواع پودرها به سیال دی الکتریک، نسبت به حالت ماشین کاری بدون کمک پودر، بررسی شد و مشاهده شد که مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی سطوح ماشین کاری شده تحت اثر پودرهای گرافیت و کروم به ترتیب حدود ۲ و ۳ برابر بیشتر از مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی سطوح ماشین کاری شده بدون کمک پودر است.

هیچ گونه جداول تکنولوژی و فنی برای ماشین کاری تخلیه الکتریکی غوطه وری چنین آلیاژ مهم و مدرنی در صنعت وجود ندارد. لذا ضروری است تا راهنمای فنی مناسبی را جهت ماشین کاری این نوع آلیاژ (ترکیب بین فلزی) معرفی نمود و توسعه داد. در تحقیق جاری، با استفاده از انواع مختلف الکترودهای ابزار گرافیت، مس و آلومینیوم به ماشین کاری تخلیه الکتریکی غوطه وری (اسپارک) نمونه های قطعه کار γ -TiAl (Ti-53 Al (at.%)) پرداخته می شود و مشخصات خروجی نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار، زبری و توپوگرافی سطح نمونه های ماشین کاری شده مورد بررسی قرار می گیرد و همچنین سطح نمونه های قطعه کار به کمک روش آنالیز فازی برای تعیین ترکیبات شیمیایی و فازهای متالوژیکی تشکیل شده در حین ماشین کاری آنالیز می شود و همچنین تغییرات میکروسختی در مقطع جانبی سطح نمونه های ماشین کاری شده توسط انواع الکترودهای ابزار، اندازه گیری می شود و در پایان نیز مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی چند نمونه از قطعات ماشین کاری شده، اندازه گیری و بررسی می شود. لازم به ذکر است، به غیر از تحقیق منتشر شده [18] از نویسنده مقاله جاری، تاکنون مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی قطعات ماشین کاری شده به روش تخلیه الکتریکی، توسط هیچ محقق دیگری بررسی و گزارش نشده است.

مواد اولیه، تجهیزات و طراحی آزمایشات

پس از تهیه شمش های ترکیب بین فلزی تیتانیوم آلومیناید گاما (γ -TiAl (Ti-53 Al (at.%)) به عنوان قطعه کار، با استفاده از فرآیند وایرکات نمونه هایی به ابعاد $10 \times 10 \times 10$ میلی متر از هر شمش، به دست آمد. قبل از ماشین کاری، دو طرف مقابل نمونه ها به مقدار 0.2 میلی متر سنگ زده می شود. خواص فیزیکی و مکانیکی γ -TiAl در جدول ۱ ارایه شده است. به منظور تهیه الکترودهای ابزار مسی، از مس کوبیده (Electrolytic Copper) استفاده شد که ۹ نمونه به ابعاد $15 \times 15 \times 20$ میلی متر توسط فرزکاری آماده شد و مجدداً به کمک عملیات فرزکاری از شمش آلومینیومی با درصد خلوص ۹۹/۵٪ تعداد ۹ نمونه به ابعاد $15 \times 15 \times 20$ میلی متر آماده شد. الکترودهای گرافیتی باید از جنس مرغوب با درجه خلوص بالا، سایش کم و صافی سطح بالا باشند. گرافیت با مشخصات فوق از شرکت الکترودهای گستر تهران تهیه شد و ساخت ۹ الکترودها به روش متالوژی پودر با ابعاد $15 \times 15 \times 20$ میلی متر انجام شد. سپس، آزمون چگالی سنجی روی آنها انجام شد که اطلاعات آن در جدول

برای تعیین خواص الکتروشیمیایی سطوح ماشین‌کاری‌شده، نمونه‌ها تحت آزمایش طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی قرار گرفتند. از محلول بافر بورات در $\text{pH}=8.4$ تهیه‌شده از 0.5M بوریک اسید (H_3BO_3) به علاوه 0.025M $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ برای انجام بررسی‌ها استفاده شده است. از سلول استاندارد دستگاه EG&G تحت عنوان Flat Cell به همراه الکترودهای مرجع کالومل اشباع، الکتروده کمکی پلاتین و نمونه مورد آزمایش، بنابر استاندارد ASTM G5 استفاده شده است که در شکل ۲ نشان داده شده است. دمای محلول برابر دمای آزمایشگاه است. طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی پس از ۲ ساعت غوطه‌وری در محلول برای رسیدن به پایداری با اعمال ولتاژ 10mV برای برهم‌زدن حالت پایدار سیستم انجام شد. محدوده فرکانس AC آزمایشات از 10mHz تا 100kHz متغیر بوده است. جهت اندازه‌گیری مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی از دستگاه پتانسیواستات اتولب مدل PGSTAT 302N (Metrohm Autolab؛ هلند) استفاده شده است. از نرم‌افزار Nova 1.6 برای اجرای آزمایش‌های امپدانس و از نرم‌افزار Zview برای تحلیل داده‌های امپدانس و ارزیابی مدار معادل استفاده شده است.



شکل ۲) تجهیزات مورد استفاده در اندازه‌گیری مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی قطعات ماشین‌کاری‌شده

برای ارزیابی راندمان فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی، دو پارامتر نرخ براده‌برداری و نرخ سایش ابزار تعریف می‌شوند. نرخ براده‌برداری بیانگر حجم مواد براده‌برداری‌شده از سطح قطعه کار و نرخ سایش ابزار، بیانگر حجم مواد براده‌برداری‌شده از الکتروده ابزار، در واحد زمان است. برای به‌دست آوردن نرخ براده‌برداری از قطعه کار و نرخ سایش ابزار، اختلاف وزن نمونه‌های قطعه کار و الکترودهای ابزار قبل و بعد از ماشین‌کاری با دقت 0.001g اندازه‌گیری می‌شود و سپس با توجه به زمان ماشین‌کاری و لحاظ نمودن چگالی $\gamma\text{-TiAl}$ که قبلاً اندازه‌گیری شده است و استفاده از رابطه [19]، نرخ براده‌برداری از قطعه کار و نرخ سایش ابزار تحت هر شرایط ماشین‌کاری به‌دست می‌آید.

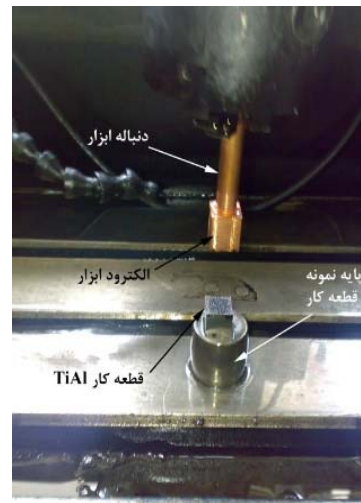
$$\text{MRR} \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{min}} \right) = \frac{\Delta m}{\rho_{\text{TiAl}} t_{\text{mach}}}, \text{ TWR} \left(\frac{\text{mg}}{\text{min}} \right) = \frac{\Delta m}{t_{\text{mach}}} \quad (1)$$

تشخیص و تعیین فازهای متالورژیکی و ترکیبات شیمیایی تشکیل‌شده بر روی سطوح ماشین‌کاری‌شده از دستگاه آنالیزور XRD مدل PANalytical- X'Pert استفاده شده است. زاویه پراش در تمام آنالیزها بین 10° تا 110° درجه بوده است و آنالیز XRD بر روی موضعی تقریباً در مرکز سطح ماشین‌کاری‌شده نمونه‌های مورد نظر انجام گرفته است.

جدول ۳) پارامترهای ماشین‌کاری مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی

پارامترهای ورودی	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
جریان پالس (A)	۵	۱۵	۲۵
زمان روشنی پالس (μs)	۵۰	۱۵۰	۲۵۰
ولتاژ مدار باز (V)	۸۰	-	-
ولتاژ ماشین‌کاری (V)	۲۰	-	-
زمان خاموشی پالس (μs)	۵۰	-	-
قطبیت قطعه کار	منفی	-	-
زمان ماشین‌کاری (min)	۱۵	-	-

نحوه شست‌وشوی دی‌الکترونیک به‌صورت غوطه‌وری در سیال به همراه شست‌وشوی جانبی (Side Flushing) با فشار ثابت انجام شد.



شکل ۳) نحوه بستن و به‌کارگیری الکتروده ابزار و قطعه کار

برای اندازه‌گیری میکروسختی در مقطع عرضی سطح نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده از دستگاه سختی‌سنج با مدل Bohler Micromet II و با استفاده از نفوذگر ویکرز (Vickers) تحت بار 500g نیرو برای مدت 20s استفاده شده است. برای اندازه‌گیری نرخ براده‌برداری از نمونه‌های قطعه کار $\gamma\text{-TiAl}$ و نرخ سایش الکترودهای ابزار، تغییرات وزن قطعه کار و ابزار، قبل و بعد از ماشین‌کاری به‌وسیله ترازوی دیجیتال CP224S-Surtorius با دقت 0.001g اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری زبری سطح نمونه‌های قطعه کار تحت حالات مختلف ماشین‌کاری، از دستگاه زبری‌سنج Mahr-Perthometer M2 استفاده شده است. برای تعیین زبری سطح هر نمونه، عملیات زبری‌سنجی ۳ مرتبه و در جهت طولی، عرضی و قطری سطح نمونه انجام می‌شود و میانگین این سه اندازه‌گیری به‌عنوان زبری متوسط سطح ماشین‌کاری شده (R_a) ارزیابی می‌شود.

دی الکتریک، باقی مانده مواد مذاب پیرامون حفره‌ها، منجمد می‌شود و سطح زبر و ناهمواری تولید می‌کند. در جریان و زمان روشنی پالس پایین، عمق حفره‌ها کمتر است و در نتیجه زبری سطح پایین‌تر است.

نرخ براده‌برداری و نرخ سایش ابزار

از اصلی‌ترین ویژگی‌های یک الکتروود ابزار این است که دارای هدایت الکتریکی بالا و نرخ سایش پایین باشد. اصولاً، بهترین جنس برای الکتروودهای ابزار باید دارای نقطه ذوب بالا و مقاومت کم در برابر جریان الکتریکی باشد^[20]. همان‌طور که در نمودار ۲ دیده می‌شود، برای هر سه نوع جنس الکتروود، با افزایش جریان، نرخ سایش ابزار افزایش می‌یابد. نرخ سایش ابزار وابسته به جنس الکتروود و انرژی تخلیه الکتریکی است. هر چه نقطه ذوب جنس الکتروودها بالاتر باشد، نرخ سایش ابزار پایین‌تر است. نقطه ذوب گرافیت ۳۳۰۰، نقطه ذوب مس ۱۰۸۳ و نقطه ذوب آلومینیوم ۶۶۰ درجه سانتی‌گراد است.

تاثیر پارامترهای زمان روشنی و جریان پالس بر روی نرخ براده‌برداری در نمودار ۳ نشان داده شده است. افزایش جریان به‌طور چشمگیری نرخ براده‌برداری را افزایش می‌دهد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که در هنگام ماشین‌کاری با الکتروود گرافیت نرخ براده‌برداری به‌طور متوسط ۴/۲ برابر بیشتر از نرخ براده‌برداری در هنگام ماشین‌کاری با الکتروود مس و همچنین در هنگام ماشین‌کاری با الکتروود آلومینیوم نرخ سایش ابزار به‌طور متوسط ۳/۲ برابر بیشتر از نرخ سایش ابزار در هنگام ماشین‌کاری با الکتروود مس و ۵/۸ برابر بیشتر از نرخ سایش ابزار در هنگام ماشین‌کاری با الکتروود گرافیت است.

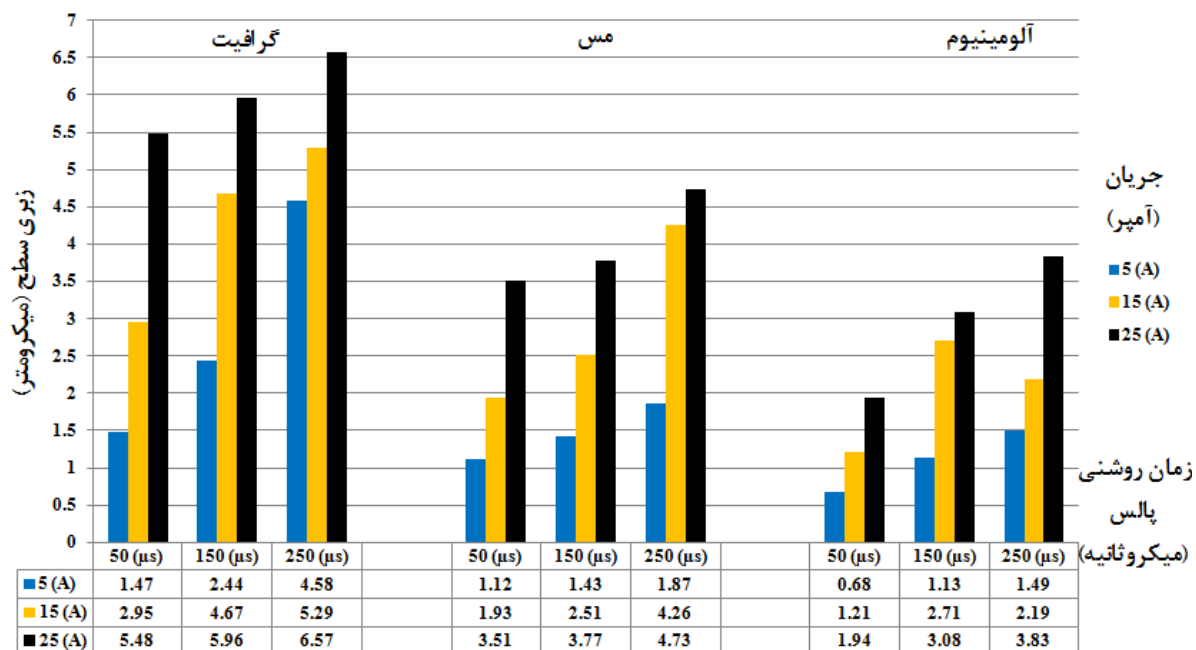
در رابطه فوق MRR نرخ براده‌برداری برحسب میلی‌متر مکعب بر دقیقه، TWR نرخ سایش ابزار برحسب میلی‌گرم بر دقیقه، Δm اختلاف جرم هر نمونه، γ -TiAl و یا هر الکتروود ابزار قبل و بعد از هر آزمون ماشین‌کاری برحسب گرم، ρ_{TiAl} چگالی قطعه کار γ -TiAl برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب و t_{mach} زمان ماشین‌کاری در هر آزمون طراحی شده بر حسب دقیقه است.

نتایج تجربی و بحث

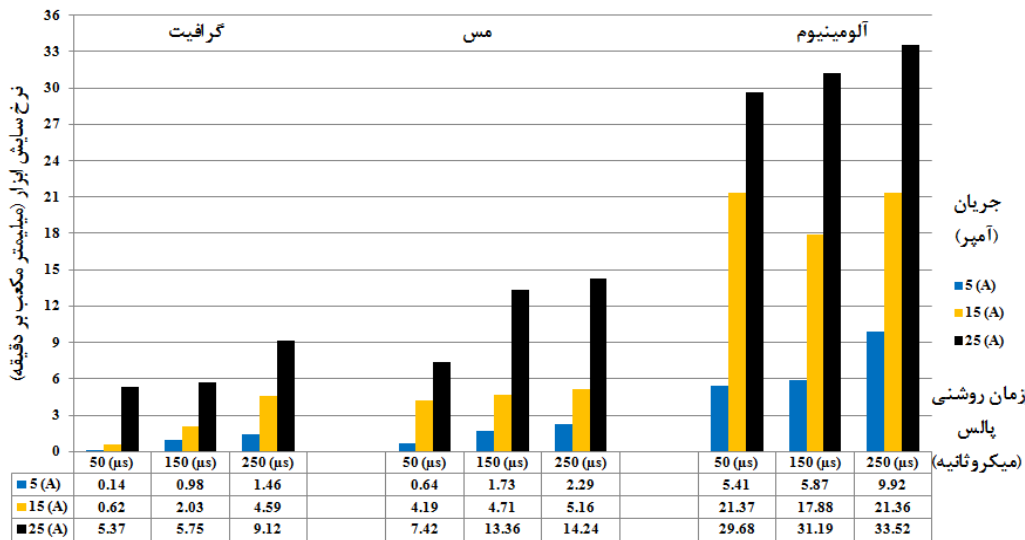
زبری سطح

زبری سطح یک قطعه اسپارک شده می‌تواند مشابه زبری سطح حاصل از یک فرآیند براده‌برداری سنتی در نظر گرفته شود، ولی با این تفاوت که براده‌ها به‌صورت تقریباً کروی هستند که در اثر جرقه‌زنی در حین تخلیه الکتریکی از سطح قطعه کار جدا می‌شوند^[20]. در نمودار ۱ اثر پارامترهای ورودی جریان و زمان روشنی پالس، بر روی زبری سطح نمونه‌های γ -TiAl ماشین‌کاری شده نشان داده شده است.

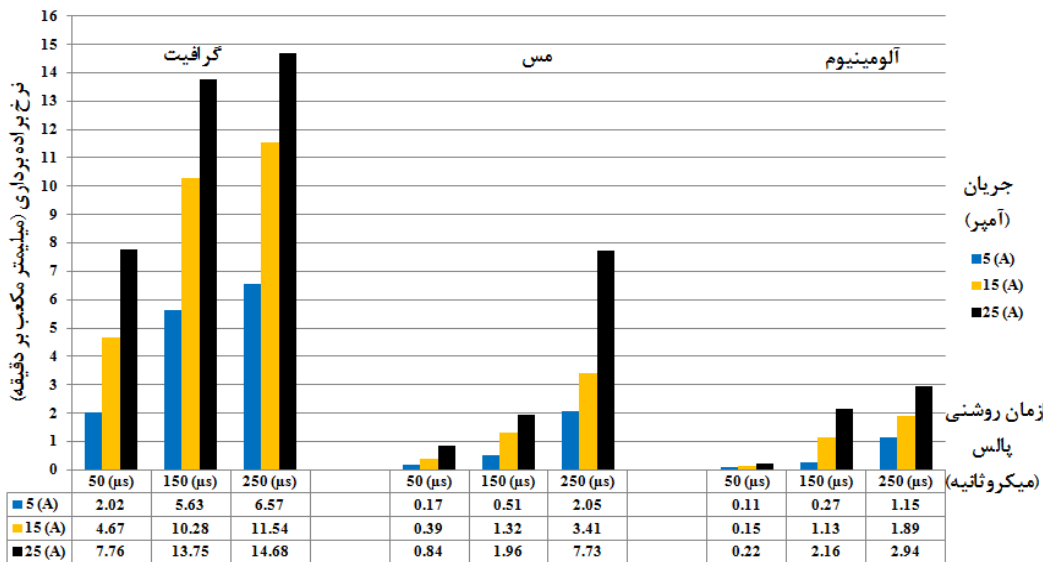
الکتروود آلومینیوم از لحاظ صافی سطح ماشین‌کاری شده بهترین و الکتروود گرافیت زبرترین سطح ماشین‌کاری را نتیجه می‌دهد. الکتروود مس به‌طور متوسط تولید زبری سطحی مابین الکتروود آلومینیوم و گرافیت می‌کند. برای تمام الکتروودها با افزایش جریان و زمان روشنی پالس، زبری سطح بیشتر می‌شود. با افزایش جریان و زمان روشنی پالس، انرژی تخلیه الکتریکی بیشتر می‌شود و نیروهای ضربه‌ای روی سطح ماشین‌کاری شده بیشتر می‌شود و سبب می‌شود که مواد مذاب بیشتری خارج شود که منجر به تولید حفره‌های عمیق‌تر و بزرگ‌تر می‌شود^[21, 20]. بعد از فوران مواد مذاب از درون حفره‌ها، در حین سرد شدن در اثر جریان سیال



نمودار ۱) زبری سطح نمونه‌های ماشین‌کاری شده TiAl با استفاده از سه نوع الکتروود ابزار



نمودار ۲) نرخ سایش ابزار در ماشین کاری نمونه های TiAl با استفاده از سه نوع الکترود ابزار



نمودار ۳) نرخ براده برداری در ماشین کاری نمونه های TiAl با استفاده از سه نوع الکترود ابزار

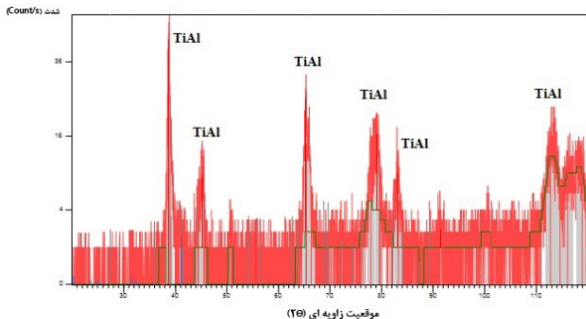
برای توپوگرافی سطح نمونه های ماشین کاری شده، زبری سطح اندازه گیری شده نیز ارایه شده است. همان طور که دیده می شود، توپوگرافی سطح نمونه قطعه کار ماشین کاری شده با استفاده از الکترود آلومینیوم، دارای غیریکنواختی کمتری است، در حالی که سطح ماشین کاری شده با استفاده از الکترود گرافیت، بیشترین غیریکنواختی و ناهمواری سطحی را دارا است. همچنین سطح ماشین کاری شده با الکترود مس با در نظر گرفتن غیریکنواختی و ناهمواری های سطحی، مابین ابزارهای آلومینیوم و گرافیت قرار دارد. در سطح قطعه کار ماشین کاری شده با الکترود گرافیت، ترک های سطحی طول تر و با عرض (پهنای ترک) بیشتری وجود دارند و حفره های سطحی در نمونه ماشین کاری شده با الکترود ابزار گرافیت در مقایسه با الکترودهای مس و آلومینیوم عمیق تر هستند و اختلاف ارتفاع مشهودی بین پستی و بلندی های سطحی وجود دارند. این موضوع با زبری سطح اندازه گیری شده و درج شده برای هر نمونه نیز مطابقت و تناسب دارد. چرا که زبری سطح

توپوگرافی سطح

کیفیت سطح ماشین کاری شده به روش تخلیه الکتریکی در قالب مفهوم یکپارچگی سطح مورد ارزیابی قرار می گیرد. مشخصات اصلی یکپارچگی سطح شامل توپوگرافی سطح، زبری سطح، ضخامت لایه انجماد مجدد، شکل گیری ترک های سطحی، توزیع سختی، تغییرات متالورژیکی و ریزساختاری بر روی سطح و یا زیر سطح ماشین کاری شده است [22].

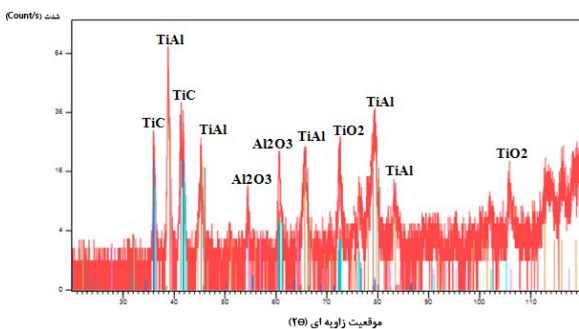
به منظور بررسی اثر جنس الکترودهای ابزار مس، آلومینیوم و گرافیت بر روی توپوگرافی سطح، تصاویر توپوگرافی سطح سه نمونه از قطعه کار تحت بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر و تحت شرایط ماشین کاری یکسان، در شکل ۳ ارایه شده است. برای این نمونه های قطعه کار، جریان روشنی پالس برابر ۲۵ آمپر و زمان روشنی پالس برابر ۵۰ میکروثانیه است. لازم به ذکر است که این تصاویر تقریباً مربوط به منطقه مرکزی سطح هر نمونه ماشین کاری شده هستند.

نشده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. پروفیل XRD سطح ماشین‌کاری‌نشده در نمودار ۴ آرایه شده است. با مشاهده نمودار ۴ می‌توان دید که تمام پیک‌های قابل توجه در نمودار XRD معرف ترکیب بین فلزی γ -TiAl هستند و البته همین امر نیز انتظار می‌رفت.



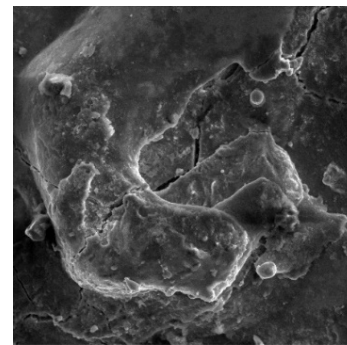
نمودار ۴) آنالیز XRD بر روی سطح ماشین‌کاری‌نشده نمونه TiAl

پروفیل XRD مربوط به نمونه γ -TiAl ماشین‌کاری‌شده توسط ابزار آلومینیومی در نمودار ۵ آرایه شده است. مشخص است که علاوه بر γ -TiAl که ترکیب پایه نمونه قطعه‌کار است، ترکیب کاربیدی TiC بر روی سطح به وجود می‌آید. از آنجا که سیال دی‌الکتریک مورد استفاده نفت سفید است، به دلیل تخلیه‌های الکتریکی در حین فرآیند ماشین‌کاری، نفت سفید به عناصر سازنده اصلی‌اش یعنی کربن و هیدروژن تجزیه می‌شود، این امر منجر به رسوب کربن بر روی سطح ماشین‌کاری‌شده می‌شود. واکنش کربن و نفوذ آن به داخل سطح ماشین‌کاری‌شده وابسته به پارامترهای ماشین‌کاری مانند جریان، زمان روشنی و غیره است. به دلیل میل واکنش‌پذیری شدید تیتانیوم، سطح نمونه γ -TiAl در حین تخلیه‌های الکتریکی با اکسیژن محلول در سیال دی‌الکتریک واکنش می‌دهد و فاز شیمیایی تیتانیوم‌اکسید (TiO_2) بر روی سطح قطعه‌کار تشکیل می‌شود. همچنین جدا شدن ذرات آلومینیوم از الکترود ابزار آلومینیومی در حین فرآیند ماشین‌کاری تحت شرایط دمای بسیار زیاد ایجاد شده توسط کانال پلاسما و رسوب آن بر روی سطح قطعه‌کار، منجر به تشکیل فاز شیمیایی آلومینیوم‌اکسید بر روی سطح γ -TiAl ماشین‌کاری‌شده توسط ابزار آلومینیومی می‌شود.

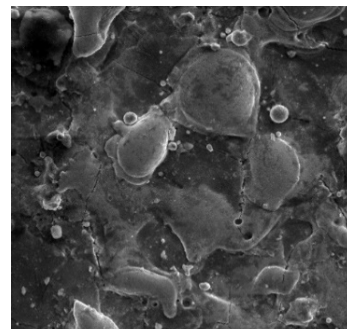


نمودار ۵) آنالیز XRD بر روی سطح ماشین‌کاری‌شده TiAl توسط ابزار آلومینیومی

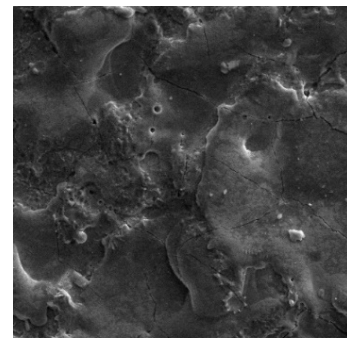
متوسط (R_a) در حقیقت همان میانگین فاصله بین قله‌ها و دره‌های سطحی بر روی هر نمونه ماشین‌کاری‌شده است.



الف) الکترود ابزار گرافیت؛ ۵/۴۸ میکرومتر-Ra



ب) الکترود ابزار مس؛ ۳/۵۱ میکرومتر-Ra



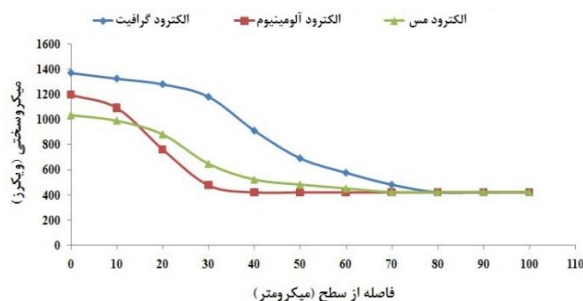
ج) الکترود ابزار آلومینیوم؛ ۱/۹۴ میکرومتر-Ra

شکل ۳) توپوگرافی سطح نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده TiAl با استفاده از سه نوع الکترود ابزار تحت شرایط جریان روشنی پالس ۲۵ آمپر و زمان روشنی پالس ۵۰ میکرو ثانیه

آنالیز فازی XRD

بعد از فرآیند ماشین‌کاری بر روی نمونه‌های γ -TiAl توسط الکترودهای آلومینیوم، گرافیت و مس، به‌منظور بررسی و تعیین فازهای متالورژیکی و ترکیبات شیمیایی تشکیل‌شده بر روی سطح قطعه‌کار، از آنالیز فازی XRD استفاده می‌شود. در ماشین‌کاری این نمونه‌ها جریان روشنی پالس برابر ۲۵ آمپر و زمان روشنی پالس برابر ۵۰ میکروثانیه بوده است و سایر پارامترهای ماشین‌کاری مطابق جدول ۳ به‌صورت ثابت تنظیم می‌شود. به‌منظور داشتن یک معیار جهت مقایسه نتایج XRD برای سطوح ماشین‌کاری‌شده، در ابتدا سطح نمونه γ -TiAl که ماشین‌کاری

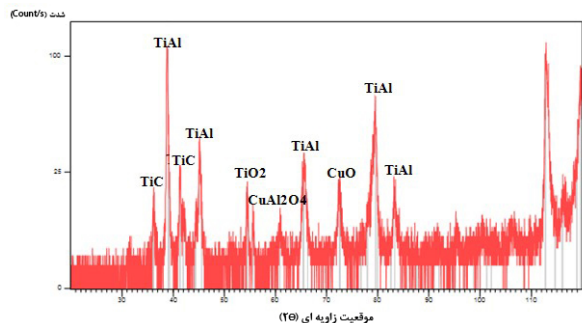
گرافیت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در ماشین‌کاری این نمونه‌ها جریان روشنی پالس برابر ۲۵ آمپر و زمان روشنی پالس برابر ۵۰ میکروثانیه بوده است و سایر پارامترهای ماشین‌کاری مطابق جدول ۳ به صورت ثابت تنظیم می‌شود. پروفیل میکروسختی نمونه‌های ماشین‌کاری شده توسط ابزارهای مختلف در نمودار ۸ نشان داده شده است. محل سختی‌سنجی نمونه‌های ماشین‌کاری شده γ -TiAl در سطح مقطع عرضی (جانبی) آنها و از سطح تا عمق ۱۰۰ میکرومتر و به فواصل ۱۰ میکرونی است. با توجه به منحنی‌های سختی مشاهده می‌شود که هر سه منحنی به سه قسمت متفاوت قابل تقسیم هستند. برای منحنی سختی مربوط به نمونه ماشین‌کاری شده توسط ابزار گرافیتی ناحیه اول از سطح تا عمق حدود ۳۰ میکرومتر از سطح، ناحیه دوم از آن موضع تا عمق حدود ۸۰ میکرومتر زیر سطح ماشین‌کاری شده و ناحیه سوم از آن محل تا نقطه انتهایی منحنی توزیع سختی است. در منحنی سختی مربوط به نمونه ماشین‌کاری شده توسط ابزار آلومینیومی ناحیه اول، از سطح ماشین‌کاری شده تا عمق حدود ۱۰ میکرومتر، ناحیه دوم از آن موضع تا عمق حدود ۳۰ میکرومتر زیر سطح ماشین‌کاری شده و ناحیه سوم از آن محل تا نقطه انتهایی منحنی توزیع سختی است و همچنین در منحنی سختی مربوط به نمونه ماشین‌کاری شده توسط ابزار مسی ناحیه اول از سطح ماشین‌کاری شده تا عمق حدود ۲۰ میکرومتر، ناحیه دوم از آن موضع تا عمق حدود ۶۰ میکرومتر زیر سطح ماشین‌کاری شده و ناحیه سوم از آن محل تا انتهای منحنی توزیع سختی است. شیب تقریبی منحنی‌های توزیع سختی، معیاری برای تقسیم آنها به این سه ناحیه مختلف بوده است. به طور آشکار برای هر سه منحنی توزیع سختی در مورد ابزارهای مختلف، قسمت‌های اول، دوم و سوم منحنی‌ها دارای شیب و نرخ تغییرات مختلف بوده‌اند. قسمت اول در این منحنی‌ها مربوط به سختی لایه انجماد مجدد (Recast Layer)، قسمت دوم در این منحنی‌ها مربوط به سختی لایه متأثر از حرارت (Heat Affected Zone) و قسمت سوم مربوط به سختی ناحیه ماده اصلی قطعه کار (Bulk) است.



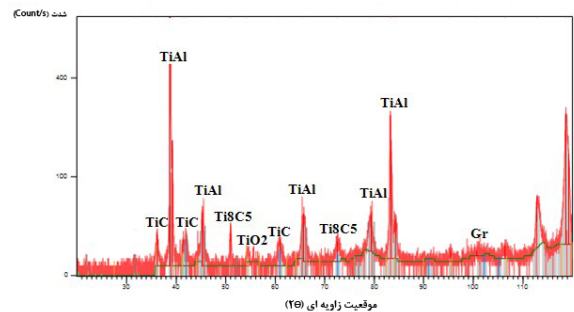
نمودار ۸) منحنی‌های میکروسختی برای مقطع عرضی سطح نمونه‌های ماشین‌کاری شده توسط ابزارهای مختلف

ناحیه سوم منحنی‌ها برای هر سه نوع ابزار تحت تاثیر حرارت قرار نگرفته است و به همین دلیل در نمونه‌های ماشین‌کاری شده با هر

پروفیل XRD برای نمونه γ -TiAl ماشین‌کاری شده توسط الکتروگرافیت در نمودار ۶ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، علاوه بر فازهای TiAl، TiO₂، TiC و کارباید تیتانیوم (TiC)، ترکیبات CuO و CuAl₂O₄ بر روی سطح ماشین‌کاری شده ایجاد می‌شوند. در حین فرآیند ماشین‌کاری و به واسطه تخلیه‌های الکتریکی متوالی مابین سطوح ابزار و قطعه کار، ذراتی از الکتروگرافیت به صورت عنصر مس بر روی سطح نمونه γ -TiAl رسوب کرده‌اند. عنصر مس رسوبی بر روی سطح قطعه کار، با اکسیژن و آلومینیوم موجود روی نمونه ماشین‌کاری شده واکنش می‌دهند و فازهای CuO و CuAl₂O₄ در حین ماشین‌کاری به وجود می‌آیند. پروفیل XRD سطح ماشین‌کاری شده توسط الکتروگرافیت در نمودار ۷ نشان داده شده است. همان طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، علاوه بر ترکیبات TiAl، TiC و TiO₂، فازهای شیمیایی Ti₈C₅ و گرافیت بر روی سطح نمونه ماشین‌کاری شده توسط ابزار گرافیتی شکل می‌گیرند. قاعدتاً در حین ماشین‌کاری قطعه کار γ -TiAl توسط ابزار گرافیتی و در اثر تخلیه‌های الکتریکی متوالی مابین سطوح ابزار و قطعه کار، بیشترین مقدار ذرات کربن در مقایسه با شرایط ماشین‌کاری توسط ابزارهای آلومینیومی و مسی، بر روی سطح ماشین‌کاری شده به کمک الکتروگرافیتی رسوب کرده است. مقدار بالای عنصر کربن بر روی سطح، منجر به شکل‌گیری فازهای کاربیدی بیشتر مانند TiC و Ti₈C₅ بر روی سطح ماشین‌کاری شده به وسیله ابزار گرافیتی شده است.



نمودار ۶) آنالیز XRD بر روی سطح ماشین‌کاری شده TiAl توسط ابزار مسی



نمودار ۷) آنالیز XRD بر روی سطح ماشین‌کاری شده TiAl توسط ابزار گرافیتی

سختی‌سنجی

در این بخش میکروسختی در مقطع عرضی سطح نمونه‌های γ -TiAl ماشین‌کاری شده توسط الکتروگرافیت، مس و

اول منحنی است، مقادیر سختی اندازه‌گیری شده در محدوده ۱۱۸۵ تا ۱۳۷۷ ویکرز است و بیشتر از سختی سطح و لایه انجماد مجدد در نمونه ماشین‌کاری شده توسط ابزار آلومینیومی است که ترکیبات اکسیدی مانند اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم بر روی نمونه ماشین‌کاری شده وجود دارند و محدوده مقادیر سختی اندازه‌گیری شده این لایه بین ۱۰۹۲ تا ۱۱۹۵ ویکرز است و نهایتاً، سختی سطح و لایه انجماد مجدد در نمونه ماشین‌کاری شده با ابزار مسی کمتر از دو ابزار دیگر است و دلیل آن وجود فازهایی با سختی کمتر همچون اکسید مس است و مقادیر سختی اندازه‌گیری شده این لایه در محدوده ۸۸۷ تا ۱۰۳۴ ویکرز است.

مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی

به‌طور کلی مقاومت به خوردگی نمونه ماشین‌کاری شده، به عواملی همچون ترکیب شیمیایی سطح ماشین‌کاری شده، ضخامت لایه سطحی، وجود ترک‌های ریز و درشت، حفره‌ها و ناهمواری‌های سطحی و همچنین زبری سطح نمونه ماشین‌کاری شده بستگی دارد. پارامتر مقاومت به خوردگی عاملی کلیدی و مهم در کارکرد قطعه صنعتی تحت شرایط بارهای استاتیکی و دینامیکی در طی چرخه عمر محصول است. مقاومت به خوردگی دارای جنبه‌های مختلفی مانند مقاومت به خوردگی داغ، مقاومت به خوردگی شیمیایی، مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی و غیره است [24].

در این بخش مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی نمونه‌های ماشین‌کاری شده γ -TiAl توسط الکترودهای ابزار گرافیت، مس و آلومینیوم به روش طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که نمونه‌های مورد نظر برای اندازه‌گیری مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی همان نمونه‌هایی هستند که در تحلیل‌های توپوگرافی سطح، XRD و سختی‌سنجی (جریان روشنی پالس برابر ۲۵ آمپر و زمان روشنی پالس برابر ۵۰ میکروثانیه) مورد بررسی قرار گرفته بودند.

طیف امپدانس الکتروشیمیایی حاصل از سطح ماشین‌کاری شده توسط الکترودهای ابزار مس در محلول بافر بورات در نمودار ۹ نشان داده شده است. سایر نمونه‌های ماشین‌کاری شده توسط الکترودهای گرافیت و آلومینیوم نیز نمودارهای مشابهی به دست می‌دهند. در این تصویر دو پیک وجود دارد. پیک اول (فرکانس بالاتر) مربوط به لایه غیرفعال (Passive) (فیلم غیرفعال) و پیک دوم (فرکانس پایین‌تر) مربوط به فصل مشترک لایه غیرفعال-محلول است.

برای سازگار کردن نتایج امپدانس، مدار نشان‌داده‌شده در شکل ۴ پیشنهاد می‌شود که از دو حلقه RC به صورت سری همراه با مقاومت محلول (R1) تشکیل شده است. البته مدارهای متعدد دیگر نیز جهت حصول اطمینان مورد ارزیابی قرار گرفتند که مدار ارائه شده علاوه بر توجیه‌پذیری بودن، حداکثر تطابق را حاصل می‌کند. همان گونه که در نمودار ۹ مشاهده می‌شود نتایج اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده (سازگار شده) دارای تطابق بسیار خوبی هستند.

سه ابزار سختی این ناحیه یکسان و حدود ۴۲۰ ویکرز است. هر کدام از سه لایه انجماد مجدد، متاثر از حرارت و ماده اصلی قطعه‌کار دارای نرخ گرمایش و سرمایش متفاوت در حین فرآیند تخلیه الکتریکی و شستشو توسط سیال دی‌الکتریک هستند که منجر به تغییرات سختی در این سه لایه می‌شود.

همان طور که در نمودار ۳ مشاهده شد تحت شرایط یکسان جریان و زمان روشنی پالس، نرخ براده‌برداری توسط ابزار گرافیتی بیشتر از حالت ابزار مسی و بسیار بیشتر از نرخ براده‌برداری توسط الکترودهای ابزار آلومینیومی است، به همین خاطر در نمودار ۸ مشاهده می‌شود که در مورد نمونه ماشین‌کاری شده توسط ابزار گرافیتی به نسبت دو ابزار دیگر تا عمق بیشتری از سطح قطعه کار سخت می‌شود و ناحیه سخت‌شده یعنی مجموع لایه انجماد مجدد و متاثر از حرارت برای ابزار مسی عمیق‌تر از ناحیه سخت‌شده برای ابزار آلومینیومی است. چرا که به‌طور مثال در ماشین‌کاری با ابزار گرافیتی به دلیل نرخ براده‌برداری بالاتر، حجم ماده بیشتری از قطعه‌کار ذوب، شسته و منجمد می‌شود و عمق نفوذ نواحی سخت‌شده گسترده‌تر از حالت ابزار مسی و آن هم بیشتر از ابزار آلومینیومی است که کمترین نرخ براده‌برداری از قطعه‌کار تحت شرایط جریان و زمان روشنی یکسان را دارا است.

همان طور که در نمودار ۸ مشاهده می‌شود، میکروسختی ناحیه اول منحنی‌ها که مربوط به لایه انجماد مجدد است برای ابزار گرافیتی بیشتر از ابزار آلومینیومی و آن نیز بیشتر از سختی لایه انجماد مجدد در نمونه ماشین‌کاری شده توسط ابزار مسی است. با توجه به نمودارهای XRD مربوط به قطعات ماشین‌کاری شده توسط ابزارهای مختلف در نمودارهای ۵ و ۶ و ۷، می‌توان دید که به‌طور کلی در حالت ماشین‌کاری شده با ابزار آلومینیومی فازهای شیمیایی Al_2O_3 و TiO_2 ، در حالت ماشین‌کاری شده توسط ابزار مسی فازهای شیمیایی CuO و CuAl_2O_4 و در حالت ماشین‌کاری شده توسط ابزار گرافیتی فازهای TiC و Ti_8O_5 و گرافیت، یا به‌طور خاص تشکیل می‌شوند و یا نسبت به دیگر حالات، فازهای عمده‌تر و غالب هستند. در جدول ۴ سختی برخی فازهای شیمیایی مرتبط، برحسب نوپ ارائه شده است.

جدول ۴) سختی بعضی فازها و ترکیبات شیمیایی [23]

ردیف	فاز شیمیایی	سختی نوپ تحت بار ۱۰۰ گرم نیرو
۱	Al_2O_3	۲۰۲۵
۲	TiO_2	۷۵۰
۳	TiC	۲۴۷۰
۴	CuO	۸۴۰
۵	Gr	۴۵۰
۶	Ti_8C_5	۲۶۵۰

در هنگام ماشین‌کاری نمونه γ -TiAl با استفاده از الکترودهای گرافیتی به دلیل شکل‌گیری ترکیبات سخت کاربیدی همچون TiC و Ti_8O_5 بر روی سطح و در لایه انجماد مجدد که همان ناحیه

پارامتر تنظیم‌کننده است که بین ۰ و ۱ می‌تواند باشد. برای $n=0$ ، CPE یک مقاومت ایده‌آل و برای $n=1$ ، CPE توصیف‌کننده یک خازن ایده‌آل که Y_0 برابر ظرفیت خازنی آن است. اطلاعات حاصل از سازگار کردن با مدار شکل ۴ برای نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده توسط ابزارهای مختلف، در جدول ۵ آمده است. پارامترهای امپدانس مستقیماً به شار الکترون‌ها در سیستم الکتروشیمیایی مربوط می‌شود. بنابراین به‌طور ایده‌آل مقادیر کم برای مقاومت الکترولیت و مقادیر بالا برای مقاومت عبور جریان از الکترولیت به داخل فیلم اکسیدی و از آنجا به داخل الکتروُد رسانا، مطلوب است [28].

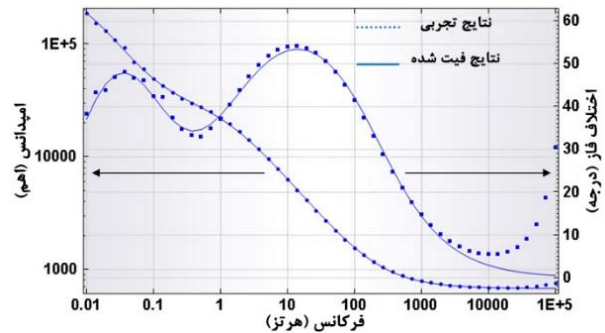
جدول ۵) پارامترهای حاصل از سازگار کردن نمودارهای امپدانس با استفاده از مدار پیشنهادشده

مقاومت‌های مربوط به هر الکتروُد ابزار	گرافیت	مس	آلومینیوم
$R_1 (\Omega cm^2)$	۱۷۴/۹۱	۵۷۵/۶۱	۶۲۸/۰۶
$R_2 (\Omega cm^2)$	۵۴۳/۸	۲۶۸۱۸/۶	۱۱۹۵۷/۴
$R_3 (\Omega cm^2)$	$۸/۶۴E+۰۰$	$۴/۵۳E+۰۰$	$۲/۱۱E+۰۰$
$R_{total} (\Omega cm^2)$	$۸/۶۵E+۰۰$	$۴/۸۱E+۰۰$	$۲/۲۴E+۰۰$

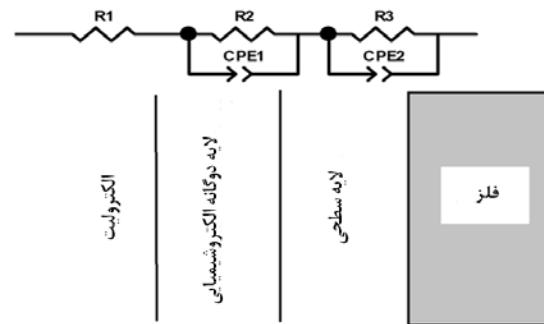
همان‌طور که در جدول ۵ ملاحظه می‌شود مقادیر R_1 در محدوده ۱۵۰-۶۵۰ اهم سانتی‌متر مربع است که نشان‌دهنده مقاومت پایین محلول است. البته این مقادیر تا حدودی از مقادیر بالای مقاومت لایه اکسیدی نیز تاثیر می‌پذیرد. مقادیر R_2 در محدوده چند کیلو اهم سانتی‌متر مربع قرار دارد. مقادیر R_3 نیز در حد چند صد کیلو اهم سانتی‌متر مربع قرار می‌گیرد. تغییرات در مقادیر پارامترهای امپدانس مرتبط با تغییر در شرایط ماشین‌کاری است که منجر به اختلاف و تغییر مقادیر در سیستم الکتروشیمیایی برای نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده γ -TiAl توسط الکترودهای ابزار مختلف شده است.

برای مقایسه بهتر، پارامترهای اندازه‌گیری‌شده (مقاومت‌های اندازه‌گیری‌شده) و مندرج در جدول ۵، به‌صورت نمودارهای میله‌ای در نمودار ۱۰ نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است که مجموع مقاومت‌های R_1 ، R_2 و R_3 بیانگر مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی کلی (R_{total}) نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده تخلیه الکترولیتی توسط الکترودهای ابزار گرافیت، مس و آلومینیوم است.

پیش از بررسی علل تغییرات در پارامترهای امپدانس با تغییر شرایط ماشین‌کاری، توضیحات بیشتر درباره مدار ارائه‌شده، داده می‌شود. ملاحظه می‌شود که R_3 و CPE_2 در شکل ۴ مربوط به انتقال بار در داخل فیلم اکسیدی است و R_2 و CPE_1 در شکل ۴ مربوط به انتقال بار از داخل محلول به داخل فیلم اکسیدی است. بنابراین افزایش R_3 به منزله افزایش مقاومت انتقال بار در فیلم اکسیدی است. افزایش مقاومت می‌تواند به دو دلیل باشد یکی افزایش ضخامت فیلم با تغییر شرایط ماشین‌کاری و دیگری تغییر ساختار یا ترکیب شیمیایی فیلم اکسیدی و کاهش آن نشان‌دهنده



نمودار ۹) منحنی امپدانس نمونه ماشین‌کاری‌شده توسط الکتروُد ابزار مس پس از ۲ ساعت غوطه‌وری در محلول بافر بورات



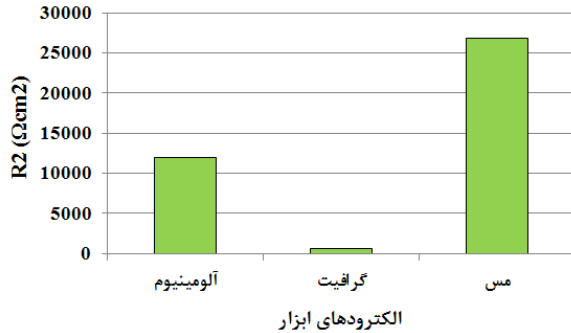
شکل ۴) مدار معادل پیشنهادشده برای سازگاری نمودارهای امپدانس حاصل در این تحقیق

در این مدار R_1 مربوط به مقاومت الکترولیت ناشی از افت پتانسیل بین نوک لاگین و سطح الکتروُدکاری است، به‌عبارتی می‌توان آن را مقاومت محلول دانست [25]. R_2 مقاومت الکترولیتی مربوط به انتقال بار الکترولیتی از داخل الکترولیت به داخل فیلم اکسیدی شکل‌گرفته بر روی لایه سطحی است. بار الکترولیتی هدایت‌کننده جریان می‌تواند الکترون یا یون باشد [26]. انتقال بار از درون الکترولیت علاوه بر ایجاد مقاومت حقیقی در برابر عبور جریان در جریان‌های متناوب، به‌دلیل وجود یک اختلاف پتانسیل بین سطح الکتروُد و الکترولیت و وجود میدان الکترولیتی، ایجاد یک خاصیت خازنی می‌کند که باعث یک اختلاف فاز در جریان نسبت به ولتاژ یا به عبارتی مقاومت موهومی می‌شود که در اینجا با عنصر فاز ثابت CPE_1 نشان داده شده است [27]. R_3 نیز مقاومت انتقال بار درون فیلم اکسیدی تشکیل‌شده روی لایه سطحی است. در اینجا به‌دلیل ماهیت اکسیدی فیلم و نیمه‌هادی بودن آن انتقال جریان با یک مقاومت بیشتر مواجه است. CPE_2 نیز به اثر خازنی همین فیلم مربوط می‌شود. برای سازگار کردن بهتر مدار معادل، به جای خازن ایده‌آل از عنصر فاز ثابت (Constant Phase Element; CPE) استفاده شده است. در عمل CPE عبارتی عمومی برای بسیاری از عناصر مدار است. امپدانس CPE از رابطه زیر به‌دست می‌آید [26]:

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Y_0(j\omega)^n} \quad (2)$$

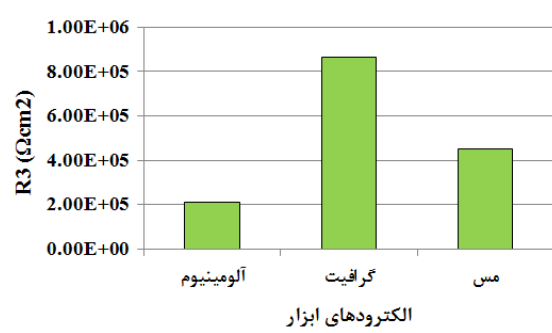
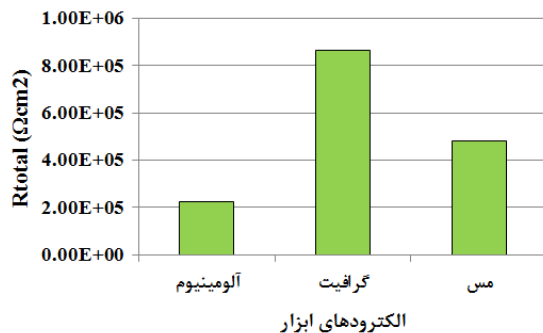
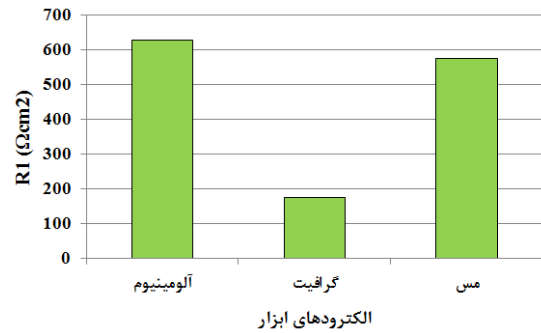
که Y_0 و n پارامترهای مستقل از فرکانس سازگار و $(\omega = 2\pi f)$ فرکانس زاویه ای و Z برابر $\sqrt{-1}$ است. فاکتور n به‌عنوان توان یک

برای نمونه‌های مختلف تفاوت چشمگیری با یکدیگر دارند. مقدار R_2 از حدود ۰/۵ کیلوهاگم سانتی‌متر مربع برای نمونه ماشین‌کاری‌شده توسط الکتروُد گرافیت تا حدود ۲۷ کیلوهاگم سانتی‌متر مربع برای نمونه ماشین‌کاری‌شده توسط الکتروُد مس متغیر است.



تخریب یا تضعیف فیلم است. افزایش و کاهش R_2 نیز از تسهیل یا مشکل‌شدن عبور بار یا همان تغییر سینتیک انتقال بار حکایت دارد. با ارایه این توضیحات کمکی، به توجیه تغییرات در پارامترهای امیدانس پرداخته می‌شود.

ملاحظه می‌شود که در نمودار ۱۰ و جدول ۵ مقدار مقاومت R_2



نمودار ۱۰) تاثیر انواع الکترودهای ابزار بر روی مقادیر R_1 ، R_2 ، R_3 و R_{total} برای نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده حاصل از آزمایش‌های امیدانس

برابر بیشتر از مقاومت نمونه ماشین‌کاری‌شده توسط ابزار آلومینیومی است و این موضوع، تاثیر قابل توجه انواع مختلف الکترودهای ابزار را بر روی مقاومت به خوردگی سطح نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده نشان می‌دهد.

با توجه به مقادیر R_3 و نتایج XRD برای نمونه‌های مختلف ماشین‌کاری‌شده، مشاهده می‌شود که نمونه‌های با مقاومت زیاد الکتروشیمیایی، دارای مقادیر کمتری از آلومینیوم و اکسیژن هستند و در مقابل دارای مقادیر بیشتری از کربن هستند. برای نمونه‌هایی که دارای مقادیر R_3 بیشتری هستند، مشخص است که در حین فرآیند ماشین‌کاری، محتوای آلومینیوم و اکسیژن بر روی سطح ماشین‌کاری‌شده کاهش یافته است و در مقابل عنصر کربن به شکل انواع مختلف کاربیدهای تیتانیوم بر روی لایه سطحی نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده، ظاهر شده است و باید توجه کرد که بعد از فرآیند ماشین‌کاری، لایه سطحی دارای خواص سلامیکی است که علتش حضور انواع مختلف کاربیدها و اکسیدها است.

همان طور که در قبل نیز اشاره شد، مجموع مقاومت‌های R_1 ، R_2 و R_3 بیانگر مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی کلی (R_{total}) نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده است. با مشاهده نمودار ۱۰-د واضح

همان طور که عنوان شد، میزان R_2 به میزان سختی و مقاومت در نقل و انتقال الکترون و یون بین سطح خارجی نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده (لایه سطحی) و الکترولیت مربوط می‌شود. در سطح تمامی نمونه‌ها مقداری از کربن ناشی از تجزیه سیال مورد استفاده در ماشین‌کاری (نفت سفید) وجود دارد و همچنین در حالت ماشین‌کاری با استفاده از الکتروُد ابزار گرافیت، مقدار درصد کربن رسوب کرده بر روی سطح ماشین‌کاری‌شده قطعه کار نسبت به سایر نمونه‌ها افزایش می‌یابد. عنصر کربن نقشی کلیدی در تغییر این مقاومت دارد. به دلیل وجود درصد بیشتری از کربن بر روی سطح ماشین‌کاری‌شده با ابزار گرافیتی، مقدار R_2 به شدت کاهش پیدا کرده است. همان طور که در آنالیز XRD برای سطح ماشین‌کاری‌شده توسط ابزار گرافیتی در نمودار ۷ مشاهده شد، بخشی از این محتوای کربن به شکل فاز گرافیت بر روی سطح قطعه کار ماشین‌کاری‌شده رسوب کرده است که رسانش الکتریکی بالایی دارد. در نمودار ۱۰ و جدول ۵ تغییرات مقاومت R_3 برای نمونه‌های مختلف نشان داده شده است. این میزان از ۲۱۱ کیلوهاگم سانتی‌متر مربع برای الکتروُد ابزار آلومینیومی تا ۸۶۴ کیلوهاگم سانتی‌متر مربع برای الکتروُد ابزار گرافیتی تغییر کرده است. یعنی مقاومت R_3 برای نمونه ماشین‌کاری‌شده توسط ابزار گرافیت ۴/۱

سختی کمتر همچون اکسید مس است و سختی این لایه در محدوده ۸۸۷ تا ۱۰۳۴ ویکرز است.

۵- با توجه به نتایج آنالیز طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی، بیشترین مقادیر مقاومت به خوردگی (R_{Total}) متعلق به نمونه γ -TiAl ماشین‌کاری شده توسط الکتروود ابزار گرافیتی و کمترین مقدار مقاومت به خوردگی برای نمونه γ -TiAl ماشین‌کاری شده توسط ابزار آلومینیومی است. نمونه اول دارای کمترین مقادیر آلومینیوم و اکسیژن است، در حالی که نمونه دوم دارای بیشترین مقادیر آلومینیوم و اکسیژن است. لذا کاهش ترکیبات اکسیدی و آلومینیومی و افزایش فازهای کاربیدی منجر به افزایش مقاومت به خوردگی نمونه‌های ماشین‌کاری شده γ -TiAl می‌شود.

۶- ترتیب افزایش یا کاهش مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی (R_{Total}) برای نمونه‌های γ -TiAl ماشین‌کاری شده توسط انواع مختلف الکتروود ابزار به صورت $R_{Copper} > R_{Graphite} > R_{Aluminum}$ است. با مشاهده نتایج خوردگی، مشخص است که مقاومت به خوردگی برای نمونه‌های ماشین‌کاری شده توسط ابزارهای گرافیتی و مسی به ترتیب $3/9$ و $2/1$ برابر بیشتر از مقاومت به خوردگی نمونه ماشین‌کاری شده توسط الکتروود ابزار آلومینیومی است.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشده است.

تأییدیه اخلاقی: تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده و همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری فرستاده نشده است.

تعارض منافع: مقاله حاضر، هیچ گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: سعید دیناروند (نویسنده اول)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ بهزاد جباری‌پور (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۵۰٪).

منابع مالی: توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

منابع

- Bernd M. After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004;149(1-3):376-381.
- Leyens C, Peters M. Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications. Weinheim: Wiley-VCH; 2003.
- Lütjering G, Williams JC. Titanium. 2nd Edition. Heidelberg: Springer; 2007.
- Weinert K, Bergmann S, Kempmann C. Machining sequence to manufacture a γ -TiAl-Conrod for application in combustion engines. *Advanced Engineering Materials*. 2006;1:1-8.
- Sarkar S, Mitra S, Bhattacharyya B. Parametric analysis and optimization of wire electrical discharge machining of γ -titanium aluminide alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005;159(3):286-294.
- Sarkar S, Mitra S, Bhattacharyya B. Parametric optimisation of wire electrical discharge machining of γ -titanium aluminide alloy through an artificial neural network model. *International Journal of Advanced*

است که بیشترین میزان مقاومت به خوردگی برای نمونه ماشین‌کاری شده توسط ابزار گرافیتی و کمترین مقدار مقاومت به خوردگی برای نمونه ماشین‌کاری شده توسط ابزار آلومینیومی به دست می‌آید. این دو نمونه ماشین‌کاری شده، به ترتیب کمترین و بیشترین مقادیر آلومینیوم و نیز اکسیژن را دارند. به این عبارت که سطح ماشین‌کاری شده‌ای که دارای بیشترین فازهای آلومینیومی و اکسیدی هستند، مقاومت به خوردگی کمتری دارند و در مقابل کاهش فازهای آلومینیومی و اکسیدی و افزایش انواع مختلف ترکیبات کاربیدی بر روی سطح ماشین‌کاری شده، منجر به افزایش مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی نمونه‌های ماشین‌کاری شده γ -TiAl می‌شود.

نتایج

۱- در هنگام استفاده از الکترودهای آلومینیومی، نرخ سایش ابزار به طور متوسط $3/2$ برابر بیشتر از نرخ سایش ابزارهای مسی و $5/8$ برابر بیشتر از نرخ سایش ابزارهای گرافیتی است و همچنین در هنگام استفاده از الکترودهای گرافیتی، نرخ براده‌برداری به طور متوسط $4/2$ برابر بیشتر از نرخ براده‌برداری با ابزارهای مسی و $7/7$ برابر بیشتر از ابزارهای آلومینیومی است.

۲- در ماشین‌کاری نمونه‌های γ -TiAl، الکترودهای آلومینیومی، بهترین و الکترودهای گرافیتی بدترین صافی سطح را به دست می‌دهند. الکترودهای مسی، به طور متوسط زبری سطحی مابین الکترودهای گرافیتی و آلومینیومی به وجود می‌آورند. گرافیت برای خشن‌کاری نمونه‌های γ -TiAl دارای راندمان بالایی است، در حالی که ابزارهای آلومینیومی به دلیل ایجاد بیشترین صافی سطح ماشین‌کاری، فقط برای پرداخت‌کاری نمونه‌های γ -TiAl مناسب هستند.

۳- با توجه به نتایج آنالیز فازی XRD، حضور بیشتر عناصر آلومینیوم و اکسیژن در حالت ماشین‌کاری به کمک ابزار آلومینیومی منجر به شکل‌گیری ترکیبات اکسیدی بیشتر مانند TiO_2 و Al_2O_3 بر روی سطح قطعه کار می‌شود، در حالی که در هنگام ماشین‌کاری به کمک ابزار گرافیتی، فازهای کاربیدی بیشتری مانند TiC و Ti_8C_5 و گرافیت بر روی سطح ماشین‌کاری شده به وجود می‌آید.

۴- در هنگام ماشین‌کاری با استفاده از الکتروود گرافیتی به دلیل شکل‌گیری ترکیبات سخت کاربیدی همچون TiC و Ti_8C_5 در لایه انجماد مجدد تشکیل شده روی سطح قطعه کار، میکروسختی در محدوده ۱۱۸۵ تا ۱۳۷۷ ویکرز است و بیشتر از سختی لایه انجماد مجدد در نمونه ماشین‌کاری شده توسط ابزار آلومینیومی است که ترکیبات اکسیدی همچون TiO_2 و Al_2O_3 بر روی سطح وجود دارند و محدوده سختی این لایه بین ۱۰۹۲ تا ۱۱۹۵ ویکرز است و نهایتاً سختی لایه انجماد مجدد در نمونه ماشین‌کاری شده با ابزار مسی کمتر از دو ابزار دیگر است و دلیل آن وجود فازهایی با

- compound. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2017;4(1):25-37.
- 17- Jabbaripour B, Motallebpouralishahi M. Experimental investigation of metal removal efficiency and machined surface texture in EDM of titanium aluminide compound. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;17(12):47-55.
- 18- Jabbaripour B, Sadeghi MH, Shabgard MR, Faraji H. Investigating surface roughness, material removal rate and corrosion resistance in PMEDM of γ -TiAl intermetallic. *Journal of Manufacturing Processes*. 2013;15(1):56-68.
- 19- Kung K, Horng J, Chiang K. Material removal rate and electrode wear ratio study on the powder mixed electrical discharge machining of cobalt-bonded tungsten carbide. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009;40:95-104.
- 20- Hasclik A, Caydas U. Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V). *Journal of Applied Surface Science*. 2007;253(22):9007-9016.
- 21- Yan BH, Tsai HC, Huang FY. The effect in EDM of a dielectric of urea solution in water on modifying the surface of titanium. *Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005;45(2):194-200.
- 22- Davim JP. *Surface integrity in machining*. London: Springer; 2010.
- 23- Lide DR. *CRC Handbook of chemistry and physics*. 90th Edition. New York; Francis and Taylor group; 2010.
- 24- Fontana MG. *Corrosion engineering*. New York: McGraw-Hill; 1986.
- 25- Ningshen S, Mudali UK, Mukherjee P. Oxygen ion irradiation effect on corrosion behavior of titanium in nitric acid medium. *Journal of Nuclear Materials*. 2011;408(1):1-6.
- 26- Orazem ME, Tribollet B. *Electrical circuits in electrochemical impedance spectroscopy*. New York: John Wiley & Sons; 2008.
- 27- Orazem ME, Tribollet B. *Electrochemical Impedance Spectroscopy*. New York: John Wiley & Sons; 2008.
- 28- Bard AJ, Faulkner LR. *Electrochemical methods: fundamentals and applications*. New York: John Wiley & Sons; 2001.
- 7- Sarkar S, Sekh M, Mitra S, Bhattacharyya B. Modeling and optimization of wire electrical discharge machining of γ -TiAl in trim cutting operation. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;205(1-3):376-387.
- 8- Aspinwall DK, Dewes RC, Mantle AL. The Machining of γ -TiAl Intermetallic alloys. *CIRP Annals*. 2005;54(1):99-104.
- 9- Hood R, Aspinwall DK, Sage C, Voice W. High speed ball nose end milling of γ -TiAl alloys. *Journal of Intermetallics*. 2013;32:284-291.
- 10- Beranoagirre A, Olvera D, López de Lacalle LN. Milling of gamma titanium-aluminum alloys. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012;62:83-88.
- 11- Klocke F, Lung D, Arft M, Priarone PC, Settineri L. On high-speed turning of a third-generation gamma titanium aluminide. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011;63:1-9.
- 12- Jabbaripour B, Sadeghi MH, Shabgard MR, Shajari SH, Hasanpour H. Investigating the effects of powder mixed electrical discharge machining on the surface quality of γ -TiAl intermetallic. *Advanced Materials Research*. 2012;488:396-401.
- 13- Jabbaripour B, Sadeghi MH, Shabgard MR, Faridvand Sh. Investigating the effects of tool materials on the properties of electrical discharge machining of γ -TiAl intermetallic. *Modares Mechanical Engineering*. 2011;11(2):135-146.
- 14- Jabbaripour B, Sadeghi MH, Shabgard MR, Faraji H. Investigating output characteristics in powder mixed electrical discharge machining of γ -TiAl intermetallic. *Modares Mechanical Engineering*. 2013;12(5):74-86.
- 15- Jabbaripour B, Motallebpouralishahi M. Experimental study of material removal rate, surface roughness and topography in electrical discharge machining of Titanium Aluminide intermetallic compound. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2016;3(3):29-39.
- 16- Jabbaripour B, Motallebpouralishahi M. The comparison of output characteristics in electrical discharge machining and aluminum powder mixed EDM processes on Titanium Aluminide intermetallic