http://mechanics.journals.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک مدرس
دوره ۱۱ شماره ۲ تابستان ۱۳۹۰ ص ص ۱۳۵-۱۴۶

تاریخچه مقاله:
دریافت ۹۰/۴/۱۹
پذیرش ۹۰/۶/۲۲
ارائه در سایت ۹۰/۶/۲۲

اثرات انواع مختلف الکترود ابزار بر روی خواص ماشینکاری تخلیه الکتریکی ترکیب بین‌فلزی γ-TiAl

بهزاد جباری‌پور[۱]، محمد حسین صادقی[۲*]، محمدرضا شبگرد[۳]، شاهرخ فریدوند[۴]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز
۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
*تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵. sadeghim@modares.ac.ir

چکیده- به دلیل خواص برجسته ترکیب بین فلزی γ-TiAl مانند مقاومت بالا و مناسب در برابر خستگی، اکسیداسیون، خوردگی، خزش، ارتعاشات دینامیکی، دمای کاری بالا و کاربرد آن در صنعت هوافضا، خودروسازی، موتورهای توربوجت و ساخت و تولید پره، در این تحقیق به مطالعه بر روی ماشینکاری تخلیه الکتریکی (EDM) ترکیب بین‌فلزی γ–TiAl با استفاده از سه نوع متفاوت الکترود ابزار مسی، گرافیتی و آلومینیومی جهت بررسی مشخصات خروجی فرآیند مانند نرخ براده برداری ،نرخ سایش ابزار، زبری سطح، توپوگرافی سطح و آنالیز عنصری (EDS) سطح نمونه‌های ماشینکاری شده، پرداخته می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که عناصر غالب در ترکیب شیمیایی سطوح ماشینکاری شده γ-TiAl عبارتند از تیتانیوم، آلومینیوم، کربن و اکسیژن. تغییر جنس الکترود ابزار تاثیر خاصی بر روی تشکیل فازها و ترکیبات شیمیایی متفاوت روی سطح قطعه‌کار و به طور کلی بهسازی متالوژیکی سطح ماشینکاری شده ندارد، بلکه تاثیر اصلی و غالب آن بر روی سایر مشخصات خروجی فرآیند مانند نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح است.

کلیدواژگان: ماشینکاری تخلیه الکتریکی، ترکیب بین فلزی γ-TiAl، نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار، توپوگرافی سطح

Investigating the Effects of Tool Materials on the Properties of Electrical Discharge Machining of γ–TiAl Intermetallic

B. Jabbaripour[1], M. H. Sadeghi[2*], M. R. Shabgard[3], Sh. Faridvand[4]

1- Ph. D. student of mechanical engineering, Tarbiat Modares University, Tehran
2- Prof. of mechanical engineering, Tarbiat Modares University, Tehran
3- Assis. Prof. of mechanical engineering, University of Tabriz, Tabriz
4- M. Sc. student of mechanical engineering, Tarbiat Modares University, Tehran
*P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran. sadeghim@modares.ac.ir

Abstract- Due to outstanding properties of γ–TiAl intermetallic such as high resistance against fatigue, oxidation, corrosion, creep, dynamic vibration, high working temperature and also its application in aerospace and automotive industry, turbojet engines and blade manufacturing; in this paper, electrical discharge machining (EDM) of γ–TiAl intermetallic by means of three kinds of tool electrodes including copper, graphite and aluminum is investigated, to compare the output characteristics of the machining process such as material removal rate, tool wear ratio, surface roughness and topography and EDS elemental analysis of machined surfaces. The results indicate that major elements in chemical composition of γ–TiAl machined surfaces are including titanium, aluminum, carbon and oxygen. The variation of tool material has not significant effect on formation of different chemical compounds and phases or in other words surface modification of machined surface. While it mainly affects other aspects of output characteristics such as material removal rate, tool wear ratio and surface roughness.

Keywords: Electrical Discharge Machining, γ–TiAl Intermetallic, Material Removal Rate, Tool Wear Ratio, Surface Topography.

۱- مقدمه

ماشینکاری تخلیه الکتریکی[1] یک فرآیند براده‌برداری غیر سنتی متداول می‌باشد. این تکنیک و روش به‌صورت گسترده در صنعت مدرن شکل‌دهی فلزات جهت تولید حفره‌های پیچیده در قالبهایی که تولیدشان با سایر روشهای ماشینکاری سنتی مشکل می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفته است.

این فرآیند دارای مزیت براده‌برداری مواد سخت ماشینکاری شونده[2] می‌باشد. هر چند که راندمان ماشینکاری پایین و کیفیت سطح نامناسب به‌عنوان معایب اصلی این روش، استفاده از آن را با محدودیتهایی مواجه کرده است [۱]. ترکیبات بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید دارای مجموعه‌ای از خواص مطلوب مانند دانسیته پایین و مقاومت بالا در برابر اکسیداسیون و احتراق می‌باشند. علاوه بر آن خواص مکانیکی مناسبی مانند استحکام و مدول الاستیسیته بالا در دمای کاری زیاد را دارا می‌باشند [۲].

در سالهای اخیر تلاشهای قابل ملاحظه‌ای جهت توسعه آلیاژهای پایه γ-TiAl برای استفاده در کاربردهای سازه‌ای با دمای کاری بالا که دارای دانسیته پایین، مقاومت بالا و مدول یانگ مناسب هستند، انجام شده است. با توجه به این خواص ترکیبات بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید قابلیت به کارگیری بسیار مطلوب در کاربردهای نو مانند سیستمهای تبدیل انرژی پیشرفته را دارا هستند و جایگزین سوپر آلیاژهای پایه نیکل سنگین‌تر می‌گردند که باید در دماهای کاری نسبتا بالا، حدود ۷۰۰ درجه سانتیگراد ایفای نقش کنند[۲]. هرچند تردی[3] و شکل‌پذیری ضعیف ذاتی آن در دمای محیط، از معایب اصلی ترکیبات بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید می‌باشند [۳-۴].

علیرغم انتشارات گسترده در زمینه توسعه فرآیندهای ریخته‌گری، عملیات حرارتی، رفتار خستگی، ریزساختار، خواص مکانیکی، اکسیداسیون و مقاومت حرارتی این ترکیبات، گزارشات بسیار کمی در مورد فرآیندهای ماشینکاری این ترکیبات اعم از سنتی و غیرسنتی وجود دارد [۵].

تا کنون هیچ‌گونه کار تحقیقاتی جامعی در مورد فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی غوطه‌وری در سیال[4] این آلیاژ گزارش نشده است و هیچ‌گونه جداول و اطلاعات تکنولوژیکی برای فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی این ترکیب پر اهمیت و مدرن در صنعت وجود ندارد، بنابراین نیاز است تا اطلاعات تکنولوژیکی را برای ماشینکاری بهینه این ترکیب بین‌فلزی توسعه داد.

در تحقیق موجود فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی ترکیب بین‌فلزی γ-TiAl (Ti-53 Al (at.%)) با استفاده از سه نوع مختلف الکترود ابزار مس، گرافیت و آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفته و مشخصات خروجی فرآیند، مانند نرخ براده‌برداری، زبری سطح، توپوگرافی سطح و آنالیز عنصری طیف‌نمایی تفرقی انرژی[5] روی سطح نمونه‌های ماشینکاری شده و همچنین نرخ سایش انواع ابزارها بررسی و با یکدیگر مقایسه شده‌اند و در مورد نتایج تجربی بحث شده است، از طرفی یکی دیگر از اهداف این تحقیق امکان‌سنجی تشکیل فازها و ترکیبات شیمیایی خاص و یا رسوب عناصر شیمیایی حاصل از فرسایش مواد ابزارهای سنتی (غیر از متالوژی پودر) مانند مس، گرافیت و آلومینیوم در هنگام ماشینکاری تخلیه الکتریکی روی سطح قطعه‌کار می‌باشد.

۲- شرایط تجربی آزمایشات

خواص مکانیکی و فیزیکی ترکیب بین فلزی تیتانیوم آلومیناید (Ti-53 Al (at.%)) در جدول ۱، آورده شده است. برای اینکه بتوان از شمش مورد نظر که با هزینه و عملیات زیادی به دست آمده است، حداکثر استفاده را کرد، با استفاده از فرآیند وایرکات نمونه هایی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ میلیمتر از هر شمش ریخته‌گری شده، بریده شدند.

جنس الکترودهای ابزار مورد استفاده مس، آلومینیوم و گرافیت می‌باشد. در حین آزمایشات دو پارامتر اصلی ورودی ماشینکاری مانند جریان و زمان روشنی پالس تغییر داده شدند و نتایج خروجی برای این سه نوع جنس الکترود ابزار با یکدیگر مقایسه گردیدند.

1. Electrical Discharge Machining (EDM)
2. Difficult to Cut
3. Brittleness
4. Die Sinking - EDM
5. Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)

جدول ۱ خواص مکانیکی و فیزیکی ترکیب بین فلزی γ-TiAl [۵، ۶]

خواص	مقدار
دانسیته (gr/cm^3)	۳/۷۶-۳/۸
مقاومت تسلیم (MPa)	۴۶۳
استحکام کششی نهایی (MPa)	۴۹۹
مدول الاستیسیته (GPa)	۱۴۴
افزایش طول (%)	۰/۵۵
ضریب پواسون	۰/۲۴
رسانش حرارتی (W/mk)	۲۲

الکترودهای مسی، از پروفیل مس کوبیده[1] و الکترودهای آلومینیومی از شمش آلومینیومی با درصد خلوص ۹۹/۵٪ به ابعاد ۱۵×۱۵×۲۰ میلیمتر توسط فرزکاری آماده شدند. الکترودهای گرافیتی نیز از جنس مرغوب با درصد خلوص بالا، سایش کم و صافی سطح بالا به روش متالوژی پودر با ابعاد ۱۵×۱۵×۲۰ میلیمتر تهیه شدند. جهت بررسی توپوگرافی سطح ماشینکاری شده از میکروسوپ الکترونی روبشی[2] با مدل TESCAN-VEGA استفاده گردیده است.

جهت انجام تستها از ماشین اسپارک تهران اکرام مدل TA-204H (مدل ۵۰ آمپری) استفاده گردید و سیال دی‌الکتریک مورد استفاده نفت سفید[3] می‌باشد. تمامی تست‌ها در حالت ایزوپالس دستگاه انجام شده است و در این مرحله جهت بررسی مشخصه‌های خروجی دو پارامتر ورودی اصلی جریان و زمان روشنی پالس در سطوح مختلف تغییر داده شدند و سایر پارامترها و شرایط کاری در تمام مراحل آزمایشات ثابت نگه داشته شدند، شرایط کاری در جدول شماره ۲، آورده شده است.

برای طراحی آزمایشات از روش عاملی کامل[4] استفاده شد و با توجه به پارامترهای ورودی ذکر شده و سطوح آنها، تعداد آزمایشات برای هر جنس الکترود ابزار ۹ عدد و برای سه نوع الکترود ابزار مجموعا ۲۷ عدد می‌باشد. زمان ماشینکاری هر نمونه ۲۰ دقیقه می‌باشد.

1. Electrolytic Copper
2. Scanning Electron Microscope (SEM)
3. Kerosene
4. Full Factorial

جدول ۲ پارامترهای ماشینکاری مورد استفاده در آزمایشات تجربی

پارامترهای ورودی	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
جریان (A)	۱۰	۱۵	۲۰
زمان روشنی پالس (µs)	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰
ولتاژ (V)	۸۰	------	------
زمان خاموشی پالس (µs)	۴۰	------	------
فاصله گپ (µm)	۴۰	------	------
قطبیت قطعه کار	منفی	------	------
نحوه شستشوی دی‌الکتریک	غوطه وری در سیال به همراه شستشوی جانبی[5] با فشار ثابت		

برای ارزیابی راندمان فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی، دو پارامتر نرخ براده برداری[6] و نرخ سایش ابزار[7] تعریف می‌گردند.

$$\mathrm{MRR}\left(\frac{\mathrm{mm}^3}{\mathrm{min}}\right)=\frac{\frac{\Delta m}{\rho_{TiAl}}}{t_{mach}} \qquad \text{رابطه (۱)}$$

$$\mathrm{TWR}\left(\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{min}}\right)=\frac{\Delta m}{t_{mach}}$$

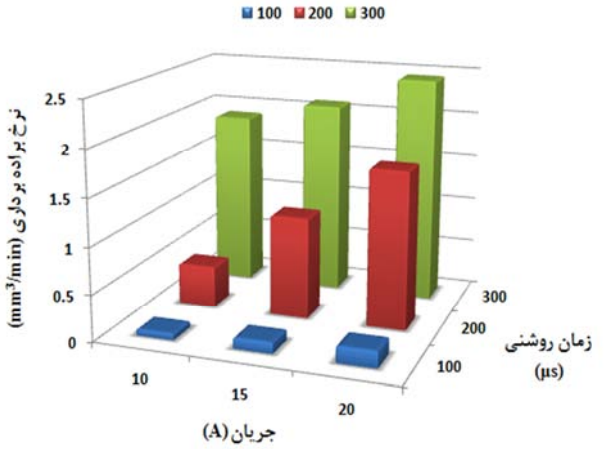
در رابطه (۱)، MRR نرخ براده برداری و TWR نرخ سایش ابزار می‌باشد، Δm اختلاف وزن نمونه قطعه‌کار و یا الکترود ابزار قبل و بعد از فرآیند ماشینکاری است، ρ_{TiAl} دانسیته ماده قطعه کار و t_{mach} زمان هر تست ماشینکاری می باشد.

۳- نتایج و بحث

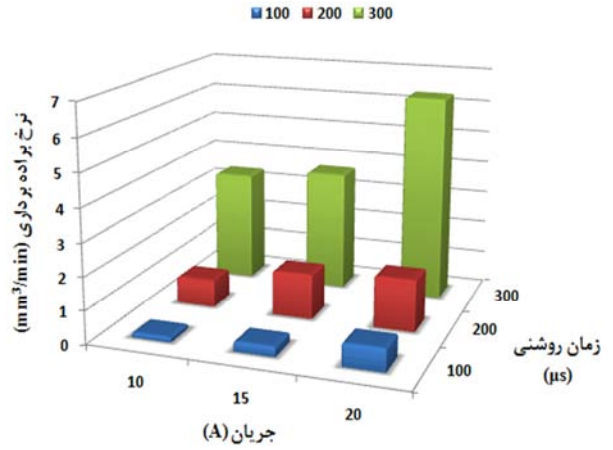
۳-۱- تاثیر جنس ابزار بر روی نرخ براده برداری

شکل ۱، مقدار نرخ براده‌برداری را برای ابزارهای مختلف در شدت جریانها و زمانهای روشنی پالس متفاوت نمایش می‌دهد، همان‌طوری که مشاهده می‌شود، افزایش جریان به طور چشمگیری نرخ براده‌برداری را افزایش می‌دهد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که در هنگام ماشینکاری با الکترود گرافیت نرخ براده‌برداری به طور متوسط ۵/۹ برابر بیشتر از نرخ براده‌برداری در هنگام ماشینکاری با الکترود مس و ۱۱ برابر بیشتر از نرخ براده‌برداری در هنگام ماشینکاری با الکترود آلومینیوم است.

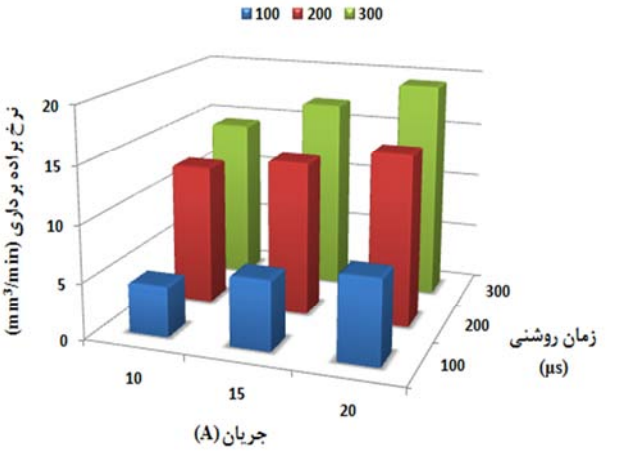
5. Side Flushing
6. Material Removal Rate (MRR)
7. Tool Wear Ratio (TWR)



الف) الکترودهای آلومینیومی



ب) الکترودهای مسی



ج) الکترودهای گرافیتی

شکل ۱ نرخ براده‌برداری در ماشینکاری نمونه های TiAl با استفاده از سه نوع الکترود ابزار

۳-۲- تاثیر جنس ابزار بر روی زبری سطح

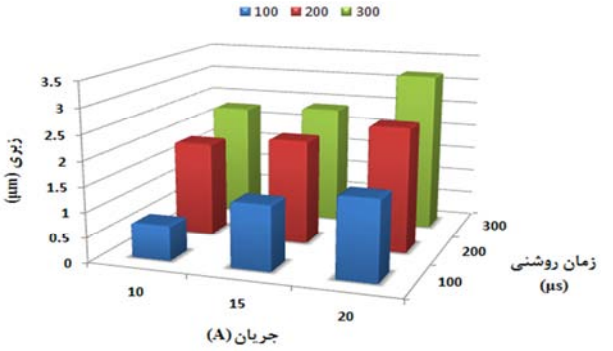
زبری سطح یک قطعه اسپارک شده می‌تواند مشابه زبری سطح حاصل از یک فرآیند براده‌برداری سنتی در نظر گرفته شود، ولی با این تفاوت که براده‌ها به‌صورت تقریبا کروی هستند که در اثر جرقه‌زنی در حین تخلیه الکتریکی از سطح قطعه‌کار جدا می‌گردند [۷]. شکل ۲، مقدار زبری سطح نمونه‌های ماشینکاری شده با استفاده از ابزارهای مختلف در شدت جریانها و زمانهای روشنی پالس متفاوت را نمایش می‌دهد، همان‌طوری که مشاهده می‌شود الکترود آلومینیوم از لحاظ زبری سطح ماشینکاری شده بهترین نتیجه و الکترود گرافیت زبرترین سطح ماشینکاری را نتیجه می‌دهد.

از آنجا که در حین ماشینکاری با الکترود گرافیت نسبت به حالت ماشینکاری با الکترود آلومینیوم نرخ براده‌برداری بیشتر است، حجم مواد بیشتری از قطعه‌کار ذوب و یا تبخیر می‌گردد و ابعاد و عمق حفره‌های[1] حاصل از تخلیه الکتریکی روی سطح قطعه‌کار افزایش می‌یابد و این امر منجر به افزایش زبری سطح در حین ماشینکاری با ابزار گرافیت و یا کاهش زبری سطح در حین ماشینکاری با ابزار آلومینیوم تحت شرایط یکسان جریان و زمان روشنی پالس می‌شود.

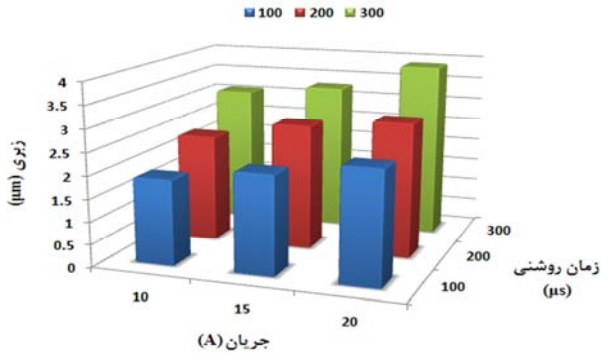
همچنین به دلیل تخلخل ذاتی گرافیت نیز انتظار می‌رفت که زبری سطح ناشی از آن بیشتر گردد. الکترود مس به طور متوسط زبری سطحی مابین الکترود آلومینیوم و گرافیت ایجاد می‌کند. برای تمام انواع الکترودها با افزایش جریان و زمان روشنی پالس، زبری سطح بیشتر می‌گردد. با افزایش جریان و زمان روشنی پالس، انرژی تخلیه الکتریکی بیشتر می‌شود و نیروهای ضربه‌ای[2] روی سطح ماشینکاری شده بیشتر می‌گردد و سبب می‌شود که مواد مذاب بیشتری خارج گردد که منجر به تولید حفره‌های عمیق‌تر و بزرگتر می‌گردد.

بعد از فوران مواد مذاب از درون حفره‌ها، در حین سرد شدن در اثر جریان سیال دی‌الکتریک، باقیمانده مواد مذاب پیرامون حفره‌ها، منجمد می‌شود و سطح زبر و ناهمواری تولید می‌کند. در جریان و زمان روشنی پالس پایین، عمق حفره‌ها کمتر است و در نتیجه زبری سطح پایین‌تر می‌باشد.

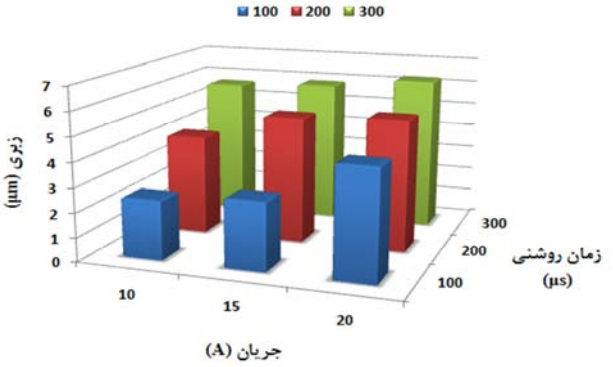
1. Crater
2. Impulsive



الف) الکترودهای آلومینیومی

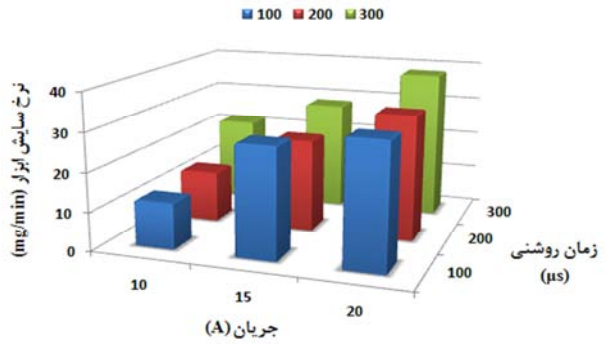


ب) الکترودهای مسی

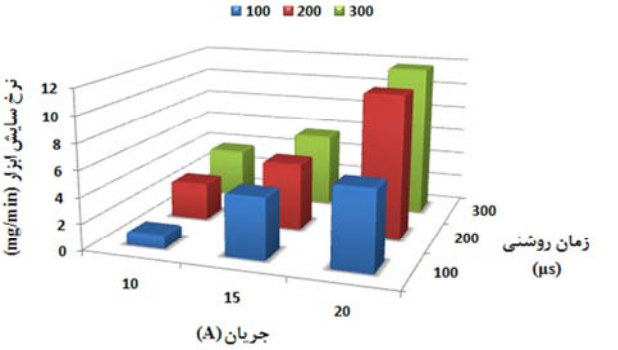


ج) الکترودهای گرافیتی

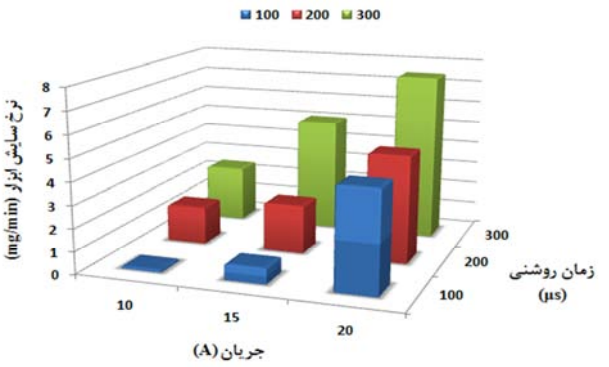
شکل ۲ زبری سطح نمونه های اسپارک شده TiAl با استفاده از سه نوع الکترود ابزار



الف) الکترودهای آلومینیومی



ب) الکترودهای مسی



ج) الکترودهای گرافیتی

شکل ۳ نرخ سایش ابزار در ماشینکاری نمونه‌های TiAl با استفاده از سه نوع الکترود ابزار

۳-۳- تاثیر جنس ابزار بر روی نرخ سایش ابزار

الکترود ابزار باید دارای هدایت الکتریکی بالا و نرخ سایش پایین باشد. اصولا، بهترین جنس برای الکترودهای ابزار دارای نقطه ذوب بالا و مقاومت کم در برابر جریان الکتریکی است[۷]. شکل ۳، مقدار نرخ سایش ابزار برای الکترودهای مختلف را در شدت جریانها و زمانهای روشنی پالس متفاوت نمایش می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای هر سه نوع جنس الکترود، با افزایش جریان، نرخ سایش ابزار افزایش می‌یابد. هر چه نقطه ذوب جنس الکترودها بالاتر باشد، نرخ سایش ابزار کمتر است. نقطه ذوب گرافیت ۳۳۰۰ درجه سانتیگراد، نقطه ذوب مس ۱۰۸۳ و نقطه ذوب آلومینیوم ۶۶۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که در هنگام ماشینکاری با

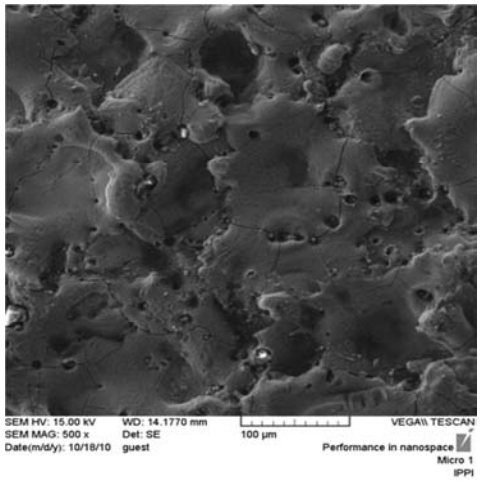
الکترود آلومینیوم نرخ سایش ابزار به طور متوسط ۴/۴ برابر بیشتر از نرخ سایش ابزار در هنگام ماشینکاری با الکترود مس و ۸ برابر بیشتر از نرخ سایش ابزار در هنگام ماشینکاری با الکترود گرافیت است.

۴- تاثیر جنس الکترود ابزار بر روی توپوگرافی سطح قطعه کار

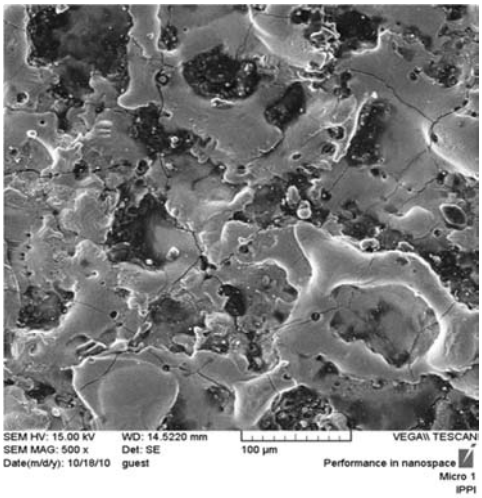
کیفیت سطح اسپارک شده در قالب سلامت سطح[1] ارزیابی می‌گردد که شاخص‌های مهم آن عبارتند از توپوگرافی سطح، زبری سطح، لایه سفید، شکل‌گیری ترکهای سطحی، توزیع سختی و همچنین تغییرات متالوژیکی در سطح و زیر سطح [۸].

در شکل ۴، جهت بررسی اثر جنس الکترودهای مس، آلومینیوم و گرافیت بر توپوگرافی سطح اسپارک شده، تصویر ۳ نمونه با بزرگنمایی X ۵۰۰ که دارای شرایط ماشینکاری یکسان می‌باشند، آورده شده است، برای نمونه های زیر زمان روشنی پالس برابر با ۱۰۰µs و جریان پالس ۱۵ A می‌باشد. لازم به ذکر است که این تصاویر تقریبا مربوط به منطقه مرکزی سطح نمونه ماشینکاری شده می‌باشند.

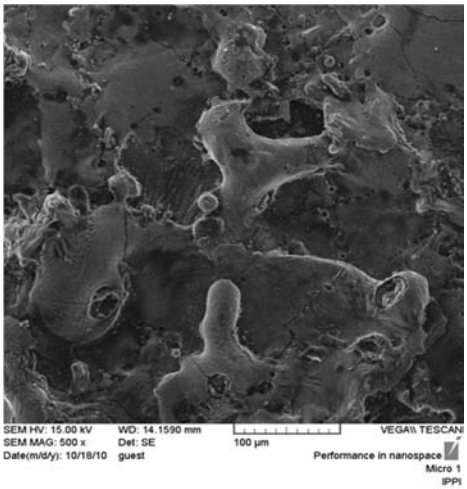
برای نمونه‌های ماشینکاری شده با هر نوع ابزار، زبری سطح اندازه‌گیری شده نیز آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توپوگرافی سطح ماشینکاری شده با الکترود آلومینیوم دارای ناهمواریهای کمتری است، در حالی که سطح ماشینکاری شده با الکترود گرافیت بیشترین ناهمواری سطحی را دارا می‌باشد و همچنین سطح ماشینکاری شده با الکترود مس، از لحاظ یکنواختی و میزان ناهمواریهای سطحی مابین آلومینیوم و گرافیت قرار دارد.



الف) الکترود آلومینیوم، Ra= 1.34 µm



ب) الکترود مس، Ra= 2.15 µm



ج) الکترود گرافیت، Ra= 3.28 µm

شکل ۴ اثر جنس ابزار بر روی توپوگرافی سطح اسپارک شده TiAl

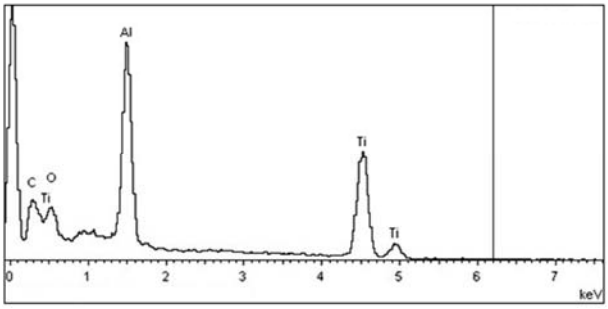
1. Surface Integrity

مشاهده می‌شود که در نمونه ماشینکاری شده با گرافیت، حفره‌های ایجاد شده نسبت به نمونه ماشینکاری شده با الکترود مس و آلومینیوم عمیق‌تر می‌باشند و این امر با توجه به زبری سطح مربوط به هر حالت نیز قابل تایید است، چرا که زبری سطح میانگین (Ra) ، متوسط فاصله بین قله‌ها و دره‌های سطحی ایجاد شده بر روی نمونه مورد نظر در حین فرآیند ماشینکاری می‌باشد.

۵- تاثیر جنس الکترود ابزار بر روی نوع عناصر تشکیل شده روی سطح قطعه کار

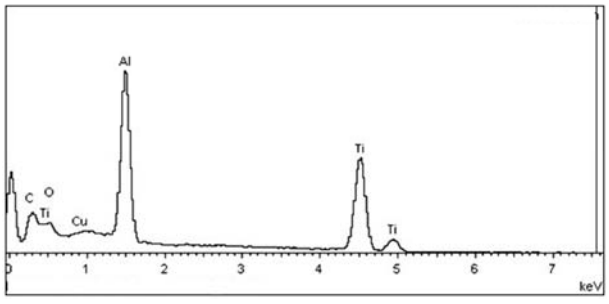
شکل ۵، آنالیز عنصری EDS سطح ماشینکاری شده توسط الکترود آلومینیومی را که در شکل ۴-الف، نمایش داده شده است، نشان می‌دهد.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود و انتظار نیز می‌رفت عناصر غالب در ترکیب شیمیایی سطح ماشینکاری شده تیتانیوم و آلومینیوم هستند، که همان اجزای سازنده ترکیب بین‌فلزی γ-TiAl می‌باشند، علاوه بر این دو عنصر اصلی، عناصر دیگری مانند کربن و اکسیژن نیز روی سطح ماشینکاری شده وجود دارند، عنصر کربن عمدتا به دلیل تجزیه سیال دی‌الکتریک می‌باشد. از طرف دیگر به دلیل اینکه تیتانیوم عنصری با قابلیت واکنش‌پذیری شیمیایی بسیار بالا می‌باشد، در حین فرآیند ماشینکاری در محیط دی‌الکتریک، اکسید می‌شود و بر روی سطح ماشینکاری شده ترکیبات مختلف اکسیدی تیتانیوم نیز به وجود می‌آیند. لازم به ذکر است، چون ابزار مورد استفاده در این حالت ماشینکاری، آلومینیوم می‌باشد، مقدار بسیار کمی از آلومینیوم که به‌صورت ذوب و یا تبخیر از الکترود ابزار جدا می‌شود و بخشی از آن پس از سرد شدن توسط سیال دی‌الکتریک، بر روی سطح نمونه TiAl منجمد می‌شود و به عبارتی رسوب می‌کند، به‌صورت مجزا قابل تشخیص نیست و پراکندگی ترکیب شیمیایی آلومینیوم بر روی سطح آنالیز شده در برگیرنده آلومینیوم حاصل از عنصر اصلی تشکیل دهنده ترکیب بین فلزی γ-TiAl و همچنین آلومینیوم حاصل از رسوبات الکترود آلومینیومی می‌باشد.



شکل ۵ آنالیز EDS بر روی سطح ماشینکاری شده با استفاده از الکترود آلومینیوم

شکل ۶، آنالیز EDS سطح ماشینکاری شده توسط الکترود مس را که در شکل ۴-ب، نمایش داده شده است، نشان می‌دهد. در این حالت نیز مشابه سطح ماشینکاری شده با الکترود آلومینیوم که قبلا توضیح داده شد، ترکیبات شیمیایی تیتانیوم، آلومینیوم، کربن و اکسیژن نیز وجود دارند، ولی تفاوتی که با حالت قبلی وجود دارد، این است که در این وضعیت ماشینکاری به دلیل استفاده از ابزار مسی و این امر که شار حرارتی منجر به ذوب و تبخیر موضعی از الکترود مس می‌شود، در حین فرآیند سرد شدن با سیال دی‌الکتریک، بخش بسیار کمی از این مواد مذاب مسی بر روی سطح نمونه TiAl مجددا منجمد می‌شود و می‌توان ترکیب شیمیایی مس را با درصد وزنی کم بر روی سطح آنالیز شده یافت. از جدول ۳، قابل مشاهد است که درصد وزنی بسیار کمی (۱/۰۸٪) از عنصر مس به‌صورت پراکنده بر روی سطح ماشینکاری شده وجود دارد.



شکل ۶ آنالیز EDS بر روی سطح ماشینکاری شده با استفاده از الکترود مس

جدول ۳ عناصر شیمیایی اصلی در سطح ماشینکاری شده با الکترود مس

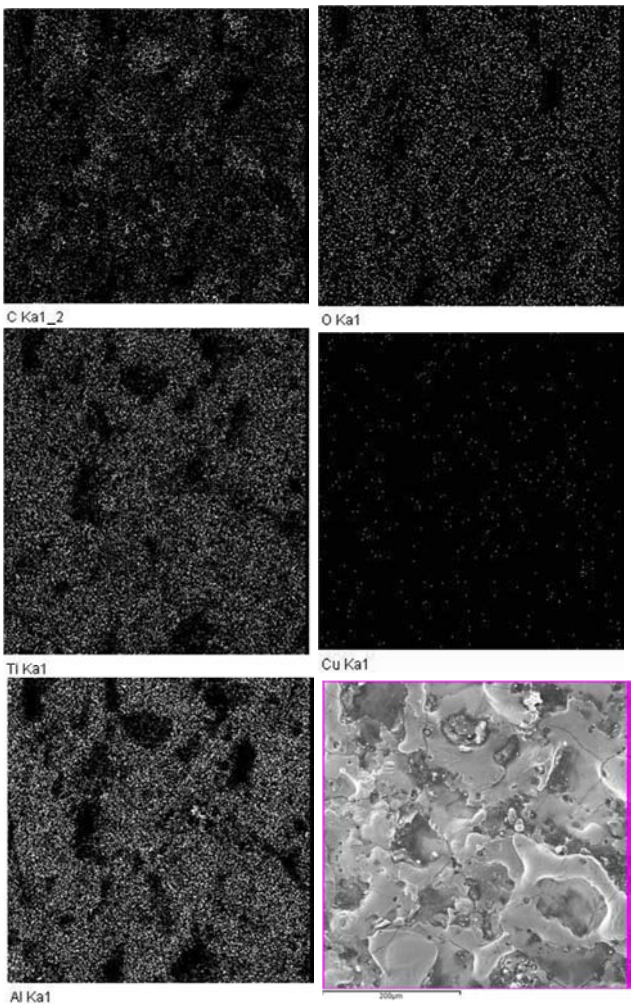
عنصر	درصد وزنی (%)	درصد وزنی سیگما (%)	درصد اتمی (%)
کربن	۲۴/۴۲	۱/۰۶	۴۵/۸۴
اکسیژن	۱۰/۷۵	۱/۰۸	۱۵/۱۴
آلومینیوم	۲۳/۶۹	۰/۴۷	۱۹/۷۹
تیتانیوم	۴۰/۰۶	۰/۷۸	۱۸/۸۵
مس	۱/۰۸	۰/۴۸	۰/۳۸
مجموع	۱۰۰/۰۰		

برای نمایش چگونگی پراکندگی ترکیبات شیمیایی عناصر تیتانیوم، آلومینیوم، کربن، اکسیژن و مس بر روی کل سطح ماشینکاری شده نمونه TiAl با استفاده از الکترود مسی، آنالیز EDS-Map روی سطح مورد نظر انجام گردید، که نتیجه آن در شکل ۷، آورده شده است.

همان‌گونه که در این شکل قابل مشاهده است، علاوه بر توپوگرافی سطح ماشینکاری شده به روش تخلیه الکتریکی، پنج تصویر دیگر نیز آورده شده است، که بیانگر پراکندگی و غلظت عناصر تیتانیوم، آلومینیوم، مس، کربن و اکسیژن در مطابقت با کل سطح ماشینکاری شده می‌باشند.

همان‌طوری که دیده می‌شود، در تصویر مربوط به پراکندگی مس، که همان نقاط روشن در زمینه تیره می‌باشد، دانسیته سطحی عنصر مس نسبت به دیگر عناصر مانند تیتانیوم و آلومینیوم بسیار کم می‌باشد و این تا حدی تایید کننده جدول ۳، می‌باشد چرا که بر اساس نتایج این جدول درصد وزنی ترکیب شیمیایی مس بسیار ناچیز (در حدود ۱/۰۸٪) است.

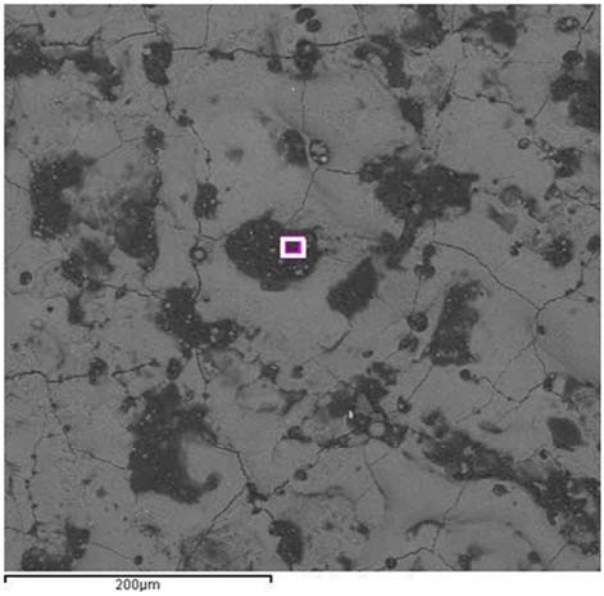
می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط ماشینکاری مورد نظر یعنی زمان روشنی پالس برابر با ۱۰۰µs و جریان پالس A ۱۵، مقدار ترکیبات مسی که در اثر ذوب و تبخیر الکترود، بر روی سطح نمونه TiAl رسوب می‌کند، در حدود ۱ درصد وزنی از کل ترکیبات شیمیایی موجود بر روی سطح نمونه ماشینکاری شده می‌باشد.



شکل ۷ آنالیز EDS-Map بر روی سطح ماشینکاری شده با استفاده از الکترود مس

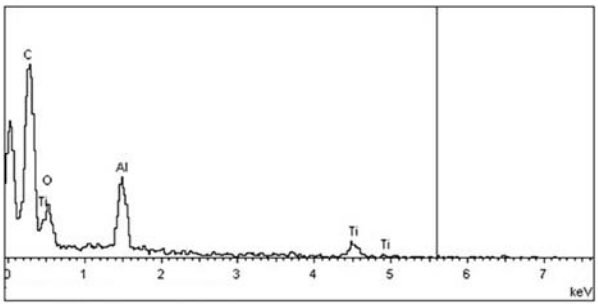
همان‌طور که در شکل ۴-ب، از توپوگرافی سطح ماشینکاری شده با استفاده از الکترود مس قابل مشاهده است، برخی مناطق روشن و برخی مناطق دیگر تیره‌تر می‌باشند، برای اینکه بتوان تشخیص داد که مناطق تیره‌رنگ در تصویر، مربوط به دره‌ها و حفره‌های حاصل از ناهمواری سطحی می‌باشند و یا مربوط به ترکیب شیمیایی متفاوتی نسبت به ترکیب شیمیایی زمینه سطح ماشینکاری شده می‌باشند، آنالیز EDS به‌صورت موضعی بر روی دو بخش تیره و روشن موجود در سطح نمونه ماشینکاری شده انجام گردید .

در شکل ۸، تصویر BS-SEM[1] مربوط به نمونه ماشینکاری شده با الکترود مس آورده شده است، در این تصویر بخش تیره رنگی از سطح ماشینکاری شده برای آنالیز موضعی EDS در نظر گرفته می‌شود که در شکل پایین با استفاده از یک علامت مربع مشخص گردیده است.



شکل ۸ آنالیز EDS موضعی بر روی قسمت تیره رنگ مشخص شده در تصویر BS-SEM

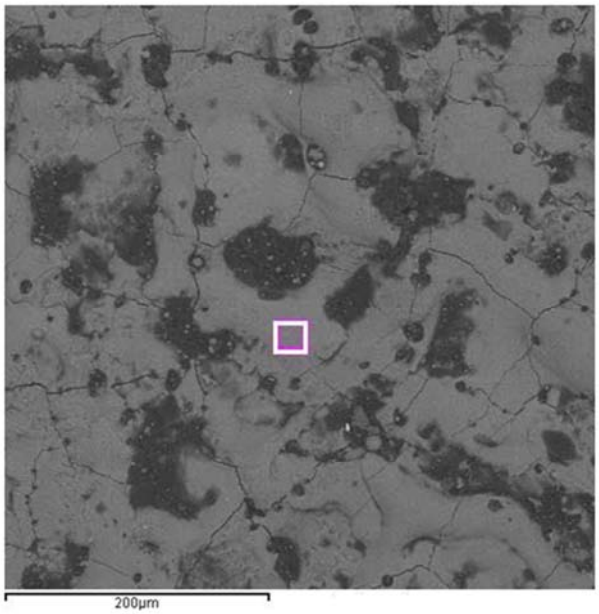
پس از انجام آنالیز مورد نظر، نتیجه در شکل ۹، آورده شده است.



شکل ۹ آنالیز EDS موضعی مربوط به قسمت تیره رنگ در نمونه ماشینکاری شده با الکترود مس

همان‌طور که در شکل ۹، نیز قابل مشاهده است، در بخش تیره رنگ مشخص شده، غلظت عنصر کربن بسیار بالا می‌باشد و نتایج دقیق‌تر نشان می‌دهد که درصد وزنی ترکیب شیمیایی کربن نسبت به سایر عناصر (تیتانیوم، آلومینیوم و اکسیژن) بیشتر می‌باشد، به گونه‌ای که درصد وزنی کربن را در این منطقه حدود ۶۸/۰۵٪ وزنی می‌باشد، در حالی که سایر عناصر مجموعا دارای درصد وزنی ۳۱/۹۵٪ می‌باشند و بیانگر این است که این زمینه تیره رنگ عمدتا دارای فازها و ترکیبات مختلف شیمیایی کاربیدی می‌باشد.

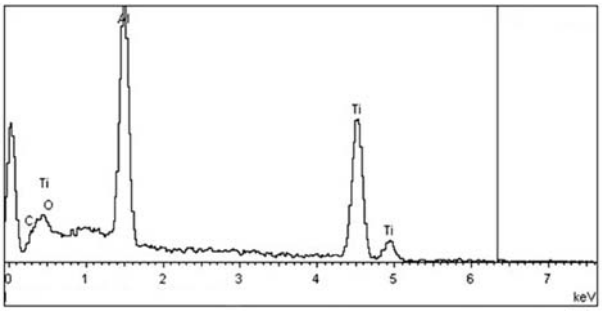
اکنون در شکل ۱۰، تصویر BS-SEM مربوط به نمونه ماشینکاری شده با الکترود مس آورده شده است، در این تصویر بخش روشن‌تر سطح ماشینکاری شده برای آنالیز موضعی EDS در نظر گرفته می‌شود که در شکل پایین با استفاده از یک علامت مربع مشخص گردیده است.



شکل ۱۰ آنالیز EDS موضعی بر روی قسمت روشن‌تر مشخص شده در تصویر BS-SEM

پس از انجام آنالیز مورد نظر، نتیجه در شکل ۱۱، آورده شده است.

1. Back Secondary- SEM



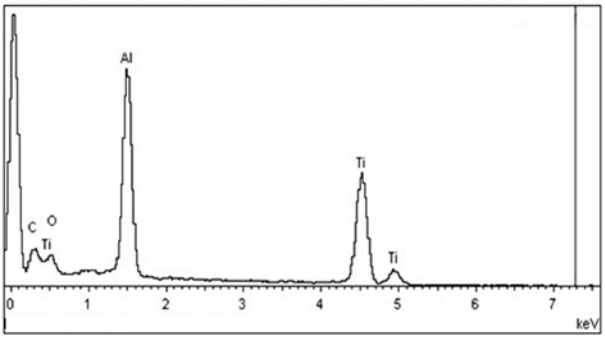
شکل ۱۱ آنالیز EDS موضعی مربوط به قسمت روشن‌تر در نمونه ماشینکاری شده با الکترود مس

همان‌طور که در شکل ۱۱، نیز قابل مشاهده است، در بخش روشن‌تر مشخص شده، غلظت عنصر کربن بسیار کمتر می‌باشد، به گونه‌ای که نتایج دقیق‌تر، درصد وزنی عنصر کربن را در این منطقه حدود ۱۳/۸۲٪ نشان می‌دهد، در حالی که سایر عناصر مجموعا دارای درصد وزنی ۸۶/۱۸٪ می‌باشند و بیانگر این است که این زمینه روشن عمدتا دارای فازها و ترکیبات مختلف شیمیایی غیرکاربیدی می‌باشد.

دلیل دیگری که برای اختلاف رنگ بین این دو بخش مشخص شده در تصویر Back-SEM وجود دارد این است که در تصاویر Back-SEM ترکیبات شیمیایی و عناصر سبکتر نسبت به ترکیبات شیمیایی و عناصر سنگین‌تر به دلیل تفاوت مقدار بازتاب پرتوهای الکترونی در هنگام آنالیز با میکروسکوپ الکترونی روبشی، به رنگ تیره دیده می‌شوند [۹]. از آنجایی که در آنالیزهای EDS مربوط به نمونه TiAl ماشینکاری شده با الکترود مس، عناصر اصلی تیتانیوم، آلومینیوم، اکسیژن و کربن می‌باشند و وزن اتمی نسبی این عناصر به ترتیب برابر با ۴۸، ۲۷، ۱۶ و ۱۲ می‌باشد، به دلیل اینکه کربن نسبت به سایر عناصر سبکتر می‌باشد، در تصاویر SEM مربوطه، مناطقی که عمدتا کاربیدی می‌باشند، به رنگ تیره‌تر دیده می‌شوند و سایر بخشها به دلیل دارا بودن عناصر سنگین‌تر به رنگ روشن دیده می‌شوند.

با انجام آنالیز EDS بر روی کل سطح نمونه ماشینکاری شده با الکترود گرافیت که در شکل ۴- ج، نشان داده شده است، ترکیب شیمیایی سطح ماشینکاری شده به روش تخلیه الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت. نمودار مربوطه در شکل ۱۲، آورده شده است، همان‌گونه که مشاهده می‌شود دو عنصر غالب در ترکیب شیمیایی سطح ماشینکاری شده تیتانیوم و آلومینیوم هستند، که همان اجزای سازنده ترکیب بین‌فلزی γ-TiAl می‌باشند، ولی علاوه بر این دو عنصر اصلی، عناصر دیگری مانند کربن و اکسیژن نیز روی سطح ماشینکاری شده وجود دارند.

همان‌طور که قبلا نیز اشاره شد، عنصر کربن عمدتا به دلیل تجزیه سیال دی‌الکتریک مورد استفاده در این آزمایشات یعنی نفت سفید می‌باشد. از طرف دیگر ابزار مورد استفاده در این حالت ماشینکاری گرافیت می‌باشد و گرافیت ترکیب شیمیایی بر پایه کربن است و به همین دلیل هم، مقدار بسیار کمی از گرافیت (کربن) که به‌صورت ذوب و یا تبخیر از الکترود ابزار جدا می‌شود و بخشی از آن پس از سرد شدن توسط سیال دی‌الکتریک، بر روی سطح نمونه TiAl منجمد می‌شود و به عبارتی رسوب می‌کند، به‌صورت مجزا قابل تشخیص نیست و پراکندگی ترکیب شیمیایی کربن بر روی سطح آنالیز شده در برگیرنده کربن حاصل از تجزیه دی‌الکتریک و همچنین کربن حاصل از رسوبات الکترود گرافیتی می‌باشد.



شکل ۱۲ آنالیز EDS بر روی سطح ماشینکاری شده با استفاده از الکترود گرافیت

۶- نتیجه‌گیری

در تحقیق موجود، بعد از مراحل آماده سازی شمش ترکیب بین‌فلزی γ-TiAl و همچنین آماده‌سازی الکترودهای ابزار مس، گرافیت و آلومینیوم، فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی با توجه به آزمایشات طراحی شده، انجام گردید. بعد از

ماشینکاری نرخ براده‌برداری، زبری سطح، توپوگرافی سطح و آنالیز عنصری EDS سطح نمونه‌های ماشینکاری شده و همچنین نرخ سایش انواع ابزارها مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به‌دست آمده در زیر ارائه می‌شوند:

(۱) از لحاظ زبری سطح، الکترودهای آلومینیومی بهترین سطح و الکترودهای گرافیتی بدترین سطح را تولید می‌کنند. الکترودهای مسی به طور متوسط زبری سطحی مابین الکترودهای گرافیتی و آلومینیومی بر روی سطح نمونه‌های TiAl ایجاد می‌کنند. برای تمام الکترودها با افزایش جریان و زمان روشنی پالس، زبری سطح افزایش می‌یابد.

(۲) برای هر سه نوع الکترود، با افزایش جریان پالس، نرخ سایش ابزار افزایش می‌یابد. نرخ سایش ابزار وابسته به جنس الکترود و انرژی تخلیه الکتریکی می‌باشد. هرچه دمای ذوب الکترود ابزار بالاتر باشد، نرخ سایش ابزار کمتر می‌باشد. در هنگام استفاده از الکترودهای آلومینیوم، نرخ سایش ابزار به طور متوسط ۴/۴ برابر بیشتر از نرخ سایش ابزار با استفاده از ابزارهای مسی و ۸ برابر بیشتر از نرخ سایش ابزار با استفاده از الکترودهای گرافیتی است.

(۳) افزایش جریان منجر به افزایش نرخ براده‌برداری می‌گردد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که در هنگام ماشینکاری با الکترودهای گرافیت، نرخ براده برداری به طور متوسط ۵/۹ برابر بیشتر از نرخ براده‌برداری با الکترودهای مسی و ۱۱ برابر بیشتر از نرخ براده برداری با استفاده از الکترودهای آلومینیومی است.

(۴) با توجه به آنالیزهای عنصری EDS، عناصر غالب در ترکیب شیمیایی سطوح ماشینکاری شده γ-TiAl عبارتند از تیتانیوم، آلومینیوم، کربن و اکسیژن. کربن، حاصل از تجزیه سیال دی‌الکتریک هیدروکربنی نفت سفید و اکسیژن، حاصل از فرآیند اکسیداسیون سطح قطعه‌کار در محیط دی‌الکتریک در حین فرآیند تخلیه الکتریکی است.

(۵) درصد وزنی عناصر رسوب کرده حاصل از تبخیر و ذوب مواد الکترود ابزار بر روی سطح قطعه‌کار به حدی ناچیز است که نمی‌تواند به طور موثری منجر به بهبود خواص سطحی قطعه‌کار گردد، در حالی که با توجه به آنالیزهای EDS انجام شده، سیال دی‌الکتریک اهمیت بسیار زیادی در تشکیل انواع فازها و ترکیبات شیمیایی مختلف بر روی سطح قطعه‌کار دارد و قابل پیش‌بینی است که با کنترل و تغییر آن بتوان به بهسازی سطح ماشینکاری شده کمک قابل ملاحظه‌ای کرد.

(۶) مناطق تیره رنگ بر روی سطح نمونه‌های TiAl در تصاویر BS-SEM، نشان دهنده افزایش غلظت کربن و تشکیل فازهای کاربیدی در آن نواحی می‌باشند.

(۷) با توجه به آنالیزهای EDS مربوط به انواع ابزارها و تصاویر EDS-Map، می‌توان بیان داشت که تغییر جنس الکترود ابزار تاثیر خاصی بر روی تشکیل فازها و ترکیبات شیمیایی متفاوت روی سطح قطعه کار ندارد، بلکه تاثیر اصلی و غالب آن بر روی سایر مشخصات خروجی فرآیند مانند نرخ براده‌برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح است.

۷- مراجع

[1] Kansal H.K., Singh S., Kumar P.; "Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining by response surface methodology"; Materials Processing Technology Journal, vol. 169, 1993, pp 427-436.

[2] Appel F., Brossmann U., Christoph U., Eggert S., Janschek P., Lorenz U.; "Recent Progress in the Development of Gamma Titanium Aluminide Alloys; Advanced engineering materials, vol. 2, No. 11, 2000, PP 699-720.

[3] Hsiung L.M., Nieh T.G.; "Microstructures and properties of powder metallurgy TiAl alloys; Materials science and engineering, vol. 364, 2004, PP 1-10.

[4] Tetsui T.; "Application of TiAl in a Turbocharger for Passenger Vehicles; Advanced engineering materials, vol. 3, No. 5, 2001, PP. 307-310.

[5] Aspinwall D., Dewes R.C., Mantle A.L.; "The machining of γ-TiAl intermetallic alloys; School of Engineering (Mechanical & Manufacturing), University of Birmingham, 2005.

[6] Sarkar S., Mitra S., Bhattacharyya B.; "Parametric analysis and optimization of wire electrical discharge machining of γ-TiAl; Journal of Materials

Processing Technology, vol. 159, 2005, PP 286-294.
[7] Hasclik A., Caydas U.; "Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V); Journal of applied surface science, Vol. 253, 2007, PP 9007-9016.
[8] Modgil A., Effects of high speed machining on surface topography of titanium alloy, M.S thesis, university of Florida, 2003.
[9] Davim J.P.; "Surface integrity in machining; Springer London publication, 2010, pp 127-140.