



# اثرات انواع مختلف الکتروود ابزار بر روی خواص ماشینکاری تخلیه الکتریکی ترکیب بین فلزی $\gamma$ -TiAl

بهزاد جباری پور<sup>۱</sup>، محمد حسین صادقی<sup>۲\*</sup>، محمدرضا شباگرد<sup>۳</sup>، شاهرخ فریدوند<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استادیار 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  $\gamma$ -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 بین فلزی  $\gamma$ -TiAl با استفاده از سه نوع متفاوت الکتروود 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  $\gamma$ -TiAl عبارتند از تیتانیوم، آلومینیوم، کربن و اکسیژن. تغییر جنس الکتروود ابزار تاثیر خاصی بر روی تشکیل فازها و ترکیبات شیمیایی متفاوت روی سطح قطعه کار و به طور کلی بهسازی متالورژیکی سطح ماشینکاری شده ندارد، بلکه تاثیر اصلی و غالب آن بر روی سایر مشخصات خروجی فرآیند مانند نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار و زبری سطح است.

**کلیدواژگان:** ماشینکاری تخلیه الکتریکی، ترکیب بین فلزی  $\gamma$ -TiAl، نرخ براده برداری، نرخ سایش ابزار، توپوگرافی سطح

## Investigating the Effects of Tool Materials on the Properties of Electrical Discharge Machining of $\gamma$ -TiAl Intermetallic

B. Jabbaripour<sup>1</sup>, M. H. Sadeghi<sup>2\*</sup>, M. R. Shabgard<sup>3</sup>, Sh. Faridvand<sup>4</sup>

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  $\gamma$ -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  $\gamma$ -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  $\gamma$ -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,  $\gamma$ -TiAl Intermetallic, Material Removal Rate, Tool Wear Ratio, Surface Topography.

## ۱- مقدمه

ماشینکاری تخلیه الکتریکی<sup>۱</sup> یک فرآیند براده‌برداری غیر سنتی متداول می‌باشد. این تکنیک و روش به صورت 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<sup>۲</sup> می‌باشد. هر چند که راندمان ماشینکاری پایین و کیفیت سطح نامناسب به عنوان 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  $\gamma$ -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 سنگین تر می‌گردند که باید در دماهای کاری نسبتا بالا، حدود ۷۰۰ درجه سانتیگراد ایفای نقش کنند [۲]. هرچند تردی<sup>۳</sup> 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<sup>۴</sup> 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 ( $\gamma$ -TiAl (Ti-53 Al (at.%)) با استفاده از سه نوع مختلف الکتروود 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<sup>۵</sup> 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 قطعه کار می‌باشد.

## ۲- شرایط تجربی آزمایشات

خواص مکانیکی و فیزیکی ترکیب بین‌فلزی تیتانیوم آلومیناید ( $\gamma$ -TiAl (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 نمونه‌هایی به ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  میلی‌متر از هر شمش ریخته‌گری شده، بریده شدند.

جنس الکتروودهای 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 الکتروود 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  $\gamma$ -TiAl [۵، ۶]

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

جدول ۲ پارامترهای ماشینکاری مورد استفاده در آزمایشات تجربی

سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	پارامترهای ورودی
۲۰	۱۵	۱۰	جریان (A)
۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰	زمان روشنی پالس ( $\mu\text{s}$ )
-----	-----	۸۰	ولتاژ (V)
-----	-----	۴۰	زمان خاموشی پالس ( $\mu\text{s}$ )
-----	-----	۴۰	فاصله گپ ( $\mu\text{m}$ )
-----	-----	منفی	قطبیت قطعه کار
غوطه وری در سیال به همراه شستشوی جانبی <sup>۵</sup> با فشار ثابت			نحوه شستشوی دی الکتریک

برای ارزیابی راندمان فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی، دو پارامتر نرخ براده برداری<sup>۶</sup> و نرخ سایش ابزار<sup>۷</sup> تعریف می گردند.

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

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

در رابطه (۱)، MRR نرخ براده برداری و TWR نرخ سایش ابزار می باشد،  $\Delta m$  اختلاف وزن نمونه قطعه کار و یا الکترو د ابزار قبل و بعد از فرآیند ماشینکاری است،  $\rho_{\text{TiAl}}$  دانسیته ماده قطعه کار و  $t_{\text{mach}}$  زمان هر تست ماشینکاری می باشد.

### ۳- نتایج و بحث

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

شکل ۱، مقدار نرخ براده برداری را برای ابزارهای مختلف در شدت جریانها و زمانهای روشنی پالس متفاوت نمایش می دهد، همان طوری که مشاهده می شود، افزایش جریان به طور چشمگیری نرخ براده برداری را افزایش می دهد. نتایج تجربی نشان می دهد که در هنگام ماشینکاری با الکترو د گرافیت نرخ براده برداری به طور متوسط ۵/۹ برابر بیشتر از نرخ براده برداری در هنگام ماشینکاری با الکترو د مس و ۱۱ برابر بیشتر از نرخ براده برداری در هنگام ماشینکاری با الکترو د آلومینیوم است.

الکترودهای مسی، از پروفیل مس کوبیده<sup>۱</sup> و الکترودهای آلومینیومی از شمش آلومینیومی با درصد خلوص ۹۹/۵٪ به ابعاد  $20 \times 15 \times 15$  میلیمتر توسط فرزندکاری آماده شدند. الکترودهای گرافیتی نیز از جنس مرغوب با درصد خلوص بالا، سایش کم و صافی سطح بالا به روش متالوژی پودر با ابعاد  $20 \times 15 \times 15$  میلیمتر تهیه شدند. جهت بررسی توپوگرافی سطح ماشینکاری شده از میکروسوپ الکترونی روبشی<sup>۲</sup> 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 دی الکتریک مورد استفاده نفت سفید<sup>۳</sup> می باشد. تمامی تستها در حالت ایزوپالس دستگاه انجام شده است و در این مرحله جهت بررسی مشخصه های خروجی دو پارامتر ورودی اصلی جریان و زمان روشنی پالس در سطوح مختلف تغییر داده شدند و سایر پارامترها و شرایط کاری در تمام مراحل آزمایشات ثابت نگه داشته شدند، شرایط کاری در جدول شماره ۲، آورده شده است.

برای طراحی آزمایشات از روش عاملی کامل<sup>۴</sup> استفاده شد و با توجه به پارامترهای ورودی ذکر شده و سطوح آنها، تعداد آزمایشات برای هر جنس الکترو د ابزار ۹ عدد و برای سه نوع الکترو د ابزار مجموعاً ۲۷ عدد می باشد. زمان ماشینکاری هر نمونه ۲۰ دقیقه می باشد.

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

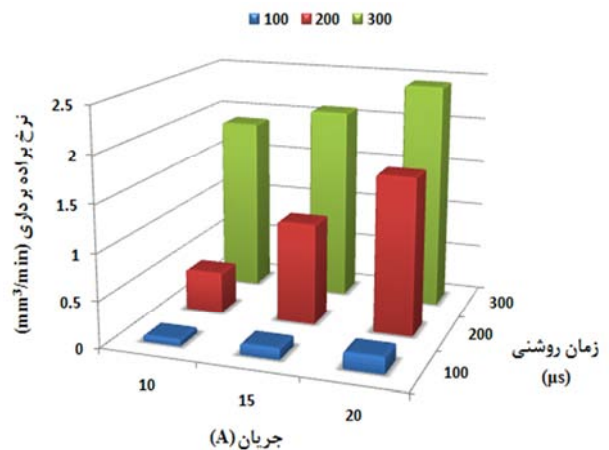
5. Side Flushing  
6. Material Removal Rate (MRR)  
7. Tool Wear Ratio (TWR)

### ۳-۲- تاثیر جنس ابزار بر روی زبری سطح

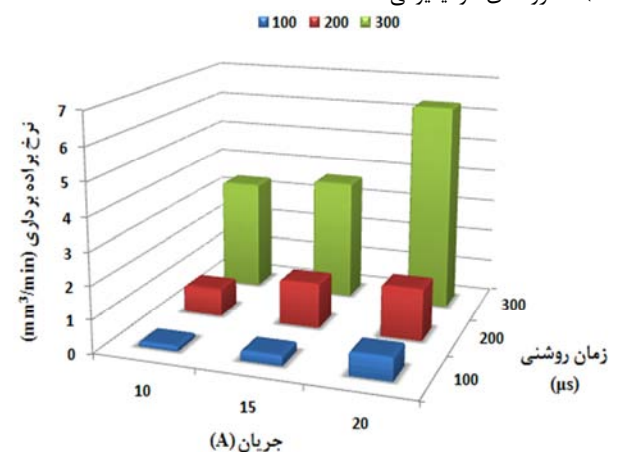
زبری سطح یک قطعه اسپارک شده می‌تواند مشابه زبری سطح حاصل از یک فرآیند براده‌برداری سنتی در نظر گرفته شود، ولی با این تفاوت که براده‌ها به صورت تقریباً کروی هستند که در اثر جرقه‌زنی در حین تخلیه الکتریکی از سطح قطعه کار جدا می‌گردند [۷]. شکل ۲، مقدار زبری سطح نمونه‌های ماشینکاری شده با استفاده از ابزارهای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

از آنجا که در حین ماشینکاری با الکتروود گرافیت نسبت به حالت ماشینکاری با الکتروود آلومینیوم نرخ براده‌برداری بیشتر است، حجم مواد بیشتری از قطعه کار ذوب و یا تبخیر می‌گردد و ابعاد و عمق حفره‌های<sup>۱</sup> حاصل از تخلیه الکتریکی روی سطح قطعه کار 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. الکتروود مس به طور متوسط زبری سطحی مابین الکتروود آلومینیوم و گرافیت ایجاد می‌کند. برای تمام انواع الکتروودها 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<sup>۲</sup> روی سطح ماشینکاری شده بیشتر می‌گردد و سبب می‌شود که مواد مذاب بیشتری خارج گردد که منجر به تولید حفره‌های عمیق‌تر و بزرگ‌تر می‌گردد.

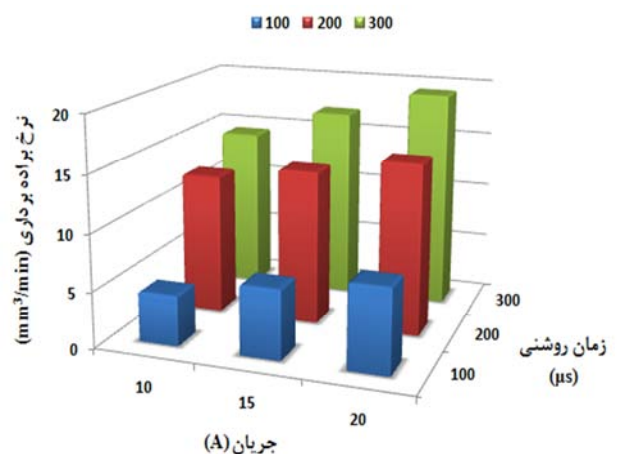
بعد از فوران مواد مذاب از درون حفره‌ها، در حین سرد شدن در اثر جریان سیال دی‌الکتریک، باقیمانده مواد مذاب پیرامون حفره‌ها، منجمد می‌شود و سطح زبر و ناهمواری تولید می‌کند. در جریان و زمان روشنی پالس پایین، عمق حفره‌ها کمتر است و در نتیجه زبری سطح پایین‌تر می‌باشد.



الف) الکتروودهای آلومینیومی



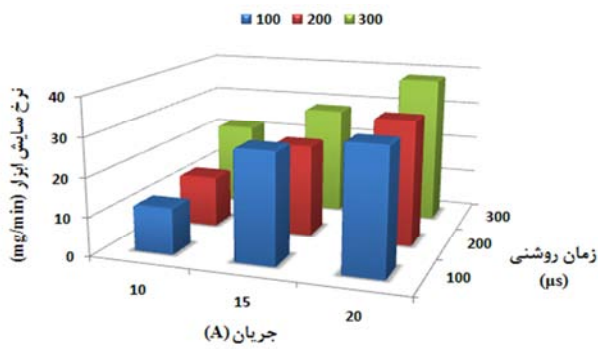
ب) الکتروودهای مسی



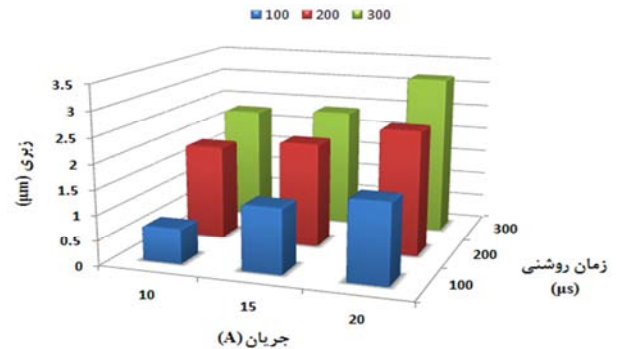
ج) الکتروودهای گرافیتی

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

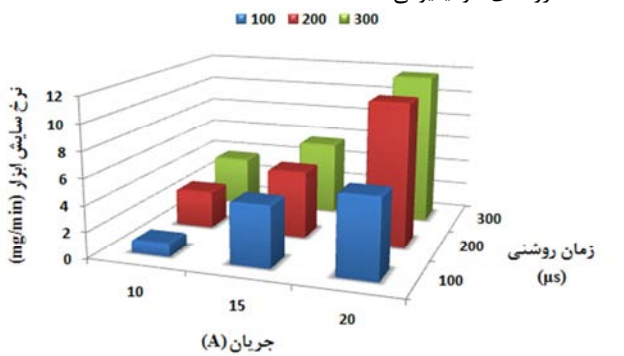
1. Crater  
2. Impulsive



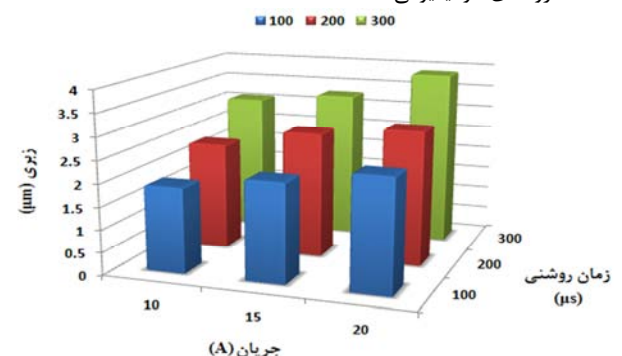
الف) الکترودهای آلومینیومی



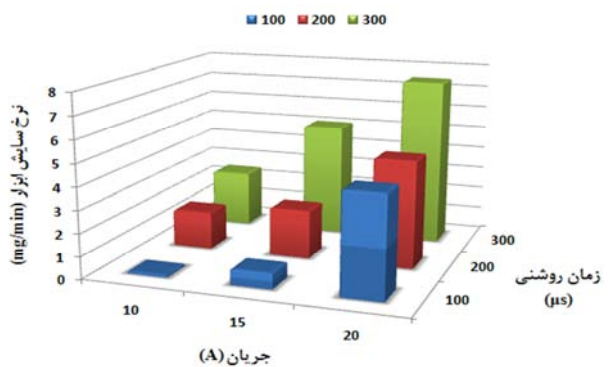
الف) الکترودهای آلومینیومی



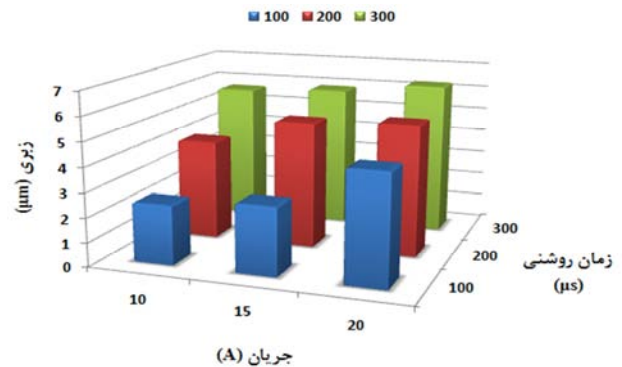
ب) الکترودهای مسی



ب) الکترودهای مسی



ج) الکترودهای گرافیتی



ج) الکترودهای گرافیتی

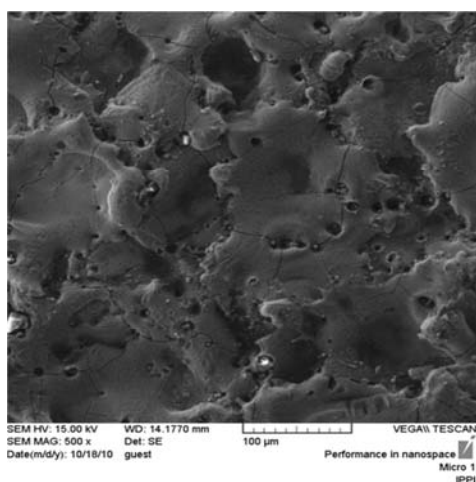
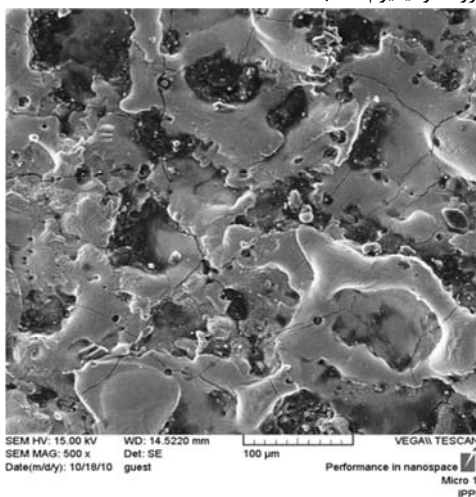
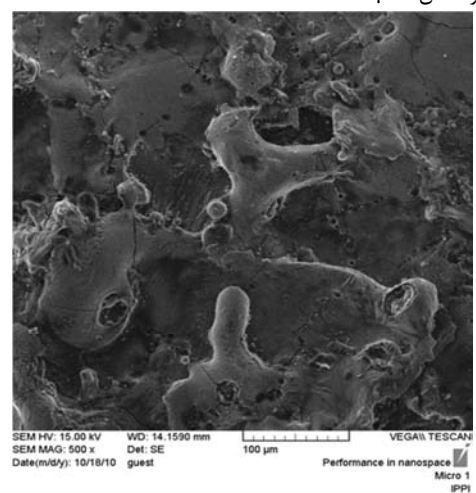
شکل ۳ نرخ سایش ابزار در ماشینکاری نمونه‌های TiAl با استفاده از سه نوع الکترود ابزار

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

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

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

الکترود ابزار باید دارای هدایت الکتریکی بالا و نرخ سایش پایین باشد. اصولاً، 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.

الف) الکتروود آلومینیوم،  $Ra = 1.34 \mu m$ ب) الکتروود مس،  $Ra = 2.15 \mu m$ ج) الکتروود گرافیت،  $Ra = 3.28 \mu m$ 

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

الکتروود آلومینیوم نرخ سایش ابزار به طور متوسط  $4/4$  برابر بیشتر از نرخ سایش ابزار در هنگام ماشینکاری با الکتروود مس و  $8$  برابر بیشتر از نرخ سایش ابزار در هنگام ماشینکاری با الکتروود گرافیت است.

#### ۴- تاثیر جنس الکتروود ابزار بر روی توپوگرافی

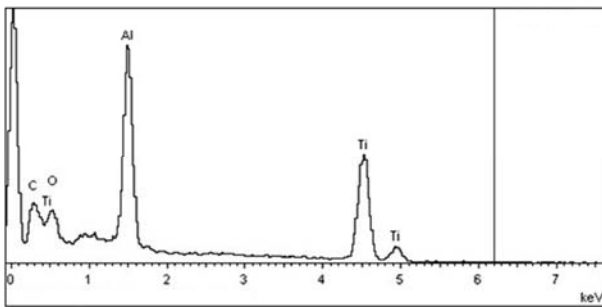
##### سطح قطعه کار

کیفیت سطح اسپارک شده در قالب سلامت سطح<sup>۱</sup> ارزیابی می گردد که شاخص های مهم آن عبارتند از توپوگرافی سطح، زبری سطح، لایه سفید، شکل گیری ترکهای سطحی، توزیع سختی و همچنین تغییرات متالوژیکی در سطح و زیر سطح [۸].

در شکل ۴، جهت بررسی اثر جنس الکتروودهای مس، آلومینیوم و گرافیت بر توپوگرافی سطح اسپارک شده، تصویر ۳ نمونه با بزرگنمایی  $500 \times$  که دارای شرایط ماشینکاری یکسان می باشند، آورده شده است، برای نمونه های زیر زمان روشنی پالس برابر با  $100 \mu s$  و جریان پالس  $15 A$  می باشد. لازم به ذکر است که این تصاویر تقریباً مربوط به منطقه مرکزی سطح نمونه ماشینکاری شده می باشند.

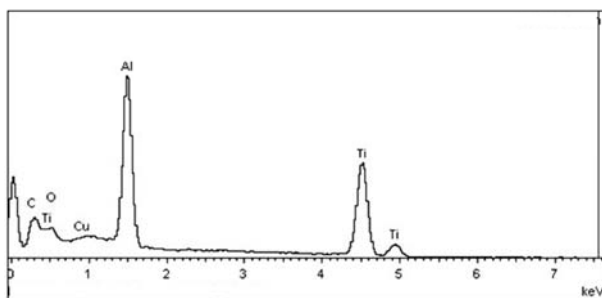
برای نمونه های ماشینکاری شده با هر نوع ابزار، زبری سطح اندازه گیری شده نیز آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود، توپوگرافی سطح ماشینکاری شده با الکتروود آلومینیوم دارای ناهمواریهای کمتری است، در حالی که سطح ماشینکاری شده با الکتروود گرافیت بیشترین ناهمواری سطحی را دارا می باشد و همچنین سطح ماشینکاری شده با الکتروود مس، از لحاظ یکنواختی و میزان ناهمواریهای سطحی مابین آلومینیوم و گرافیت قرار دارد.

#### 1. Surface Integrity



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

شکل ۶، آنالیز EDS سطح ماشینکاری شده توسط الکتروند مس را که در شکل ۴-ب، نمایش داده شده است، نشان می‌دهد. در این حالت نیز مشابه سطح ماشینکاری شده با الکتروند آلومینیوم که قبلاً 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 الکتروند مس می‌شود، در حین فرآیند سرد شدن با سیال دی‌الکتریک، بخش بسیار کمی از این مواد مذاب مسی بر روی سطح نمونه TiAl مجدداً منجمد می‌شود و می‌توان ترکیب شیمیایی مس را با درصد وزنی کم بر روی سطح آنالیز شده یافت. از جدول ۳، قابل مشاهده است که درصد وزنی بسیار کمی (۰/۱۰۸٪) از عنصر مس به‌صورت پراکنده بر روی سطح ماشینکاری شده وجود دارد.



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

مشاهده می‌شود که در نمونه ماشینکاری شده با گرافیت، حفره‌های ایجاد شده نسبت به نمونه ماشینکاری شده با الکتروند 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 الکتروند ابزار بر روی نوع عناصر

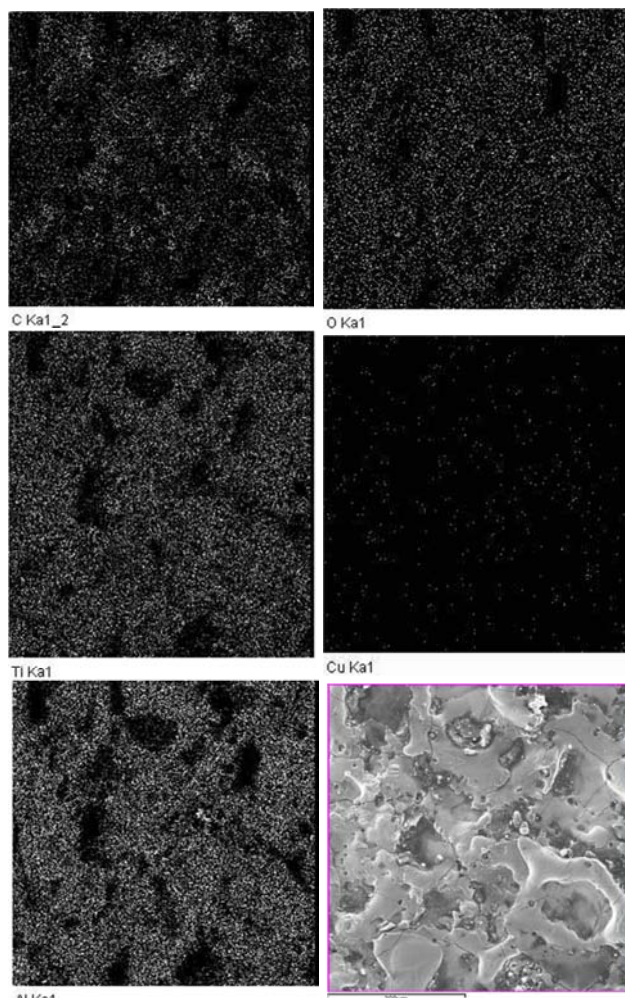
### تشکیل شده روی سطح قطعه کار

شکل ۵، آنالیز عنصری EDS سطح ماشینکاری شده توسط الکتروند 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  $\gamma$ -TiAl می‌باشند، علاوه بر این دو عنصر اصلی، عناصر دیگری مانند کربن و اکسیژن نیز روی سطح ماشینکاری شده وجود دارند، عنصر کربن عمدتاً 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 الکتروند 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 برگزیده آلومینیوم حاصل از عنصر اصلی تشکیل دهنده ترکیب بین‌فلزی  $\gamma$ -TiAl و همچنین آلومینیوم حاصل از رسوبات الکتروند آلومینیومی می‌باشد.

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

عناصر	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		



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

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

همان گونه 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.

همان طوری 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.

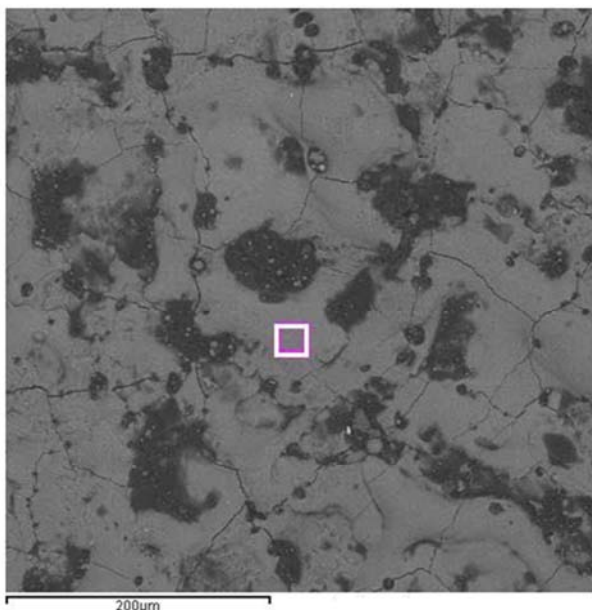
می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط ماشینکاری مورد نظر یعنی زمان روشنی پالس برابر با  $100 \mu s$  و جریان پالس  $15 A$ ، مقدار ترکیبات مسی که در اثر ذوب و تبخیر الکتروود، بر روی سطح نمونه TiAl رسوب می‌کند، در حدود ۱ درصد وزنی از کل ترکیبات شیمیایی موجود بر روی سطح نمونه ماشینکاری شده می‌باشد.

همان طور که در شکل ۴-ب، از توپوگرافی سطح ماشینکاری شده با استفاده از الکتروود 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 به صورت موضعی بر روی دو بخش تیره و روشن موجود در سطح نمونه ماشینکاری شده انجام گردید.



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 مجموعاً دارای درصد وزنی ۳۱/۹۵٪ می‌باشند و بیانگر این است که این زمینه تیره رنگ عمدتاً دارای فازها و ترکیبات مختلف شیمیایی کاربردی می‌باشد.

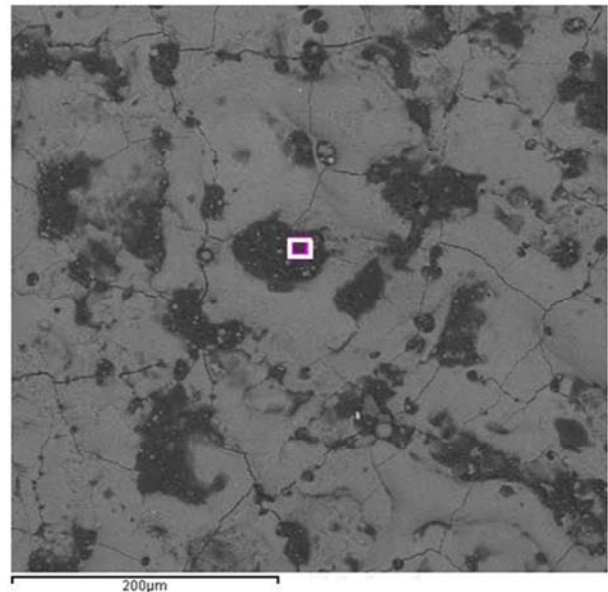
اکنون در شکل ۱۰، تصویر BS-SEM مربوط به نمونه ماشینکاری شده با الکتروود مس آورده شده است، در این تصویر بخش روشن‌تر سطح ماشینکاری شده برای آنالیز موضعی EDS در نظر گرفته می‌شود که در شکل پایین با استفاده از یک علامت مربع مشخص گردیده است.



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

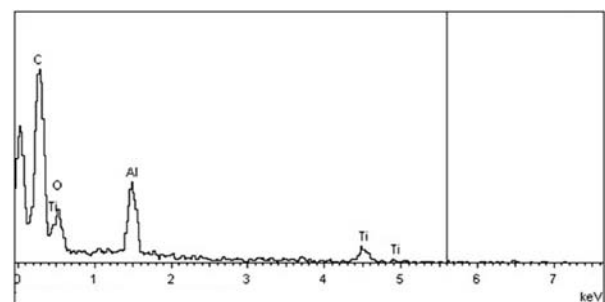
پس از انجام آنالیز مورد نظر، نتیجه در شکل ۱۱، آورده شده است.

در شکل ۸، تصویر BS-SEM<sup>۱</sup> مربوط به نمونه ماشینکاری شده با الکتروود 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.

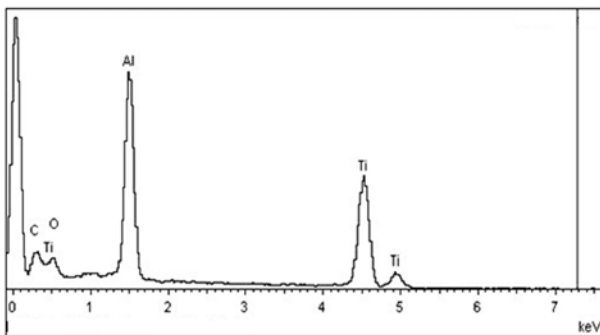


شکل ۹ آنالیز EDS موضعی مربوط به قسمت تیره رنگ در نمونه ماشینکاری شده با الکتروود مس

1. Back Secondary- SEM

آورده شده است، همان گونه که مشاهده می شود دو عنصر غالب در ترکیب شیمیایی سطح ماشینکاری شده تیتانیوم و آلومینیوم هستند، که همان اجزای سازنده ترکیب بین فلزی  $\gamma$ -TiAl می باشند، ولی علاوه بر این دو عنصر اصلی، عناصر دیگری مانند کربن و اکسیژن نیز روی سطح ماشینکاری شده وجود دارند.

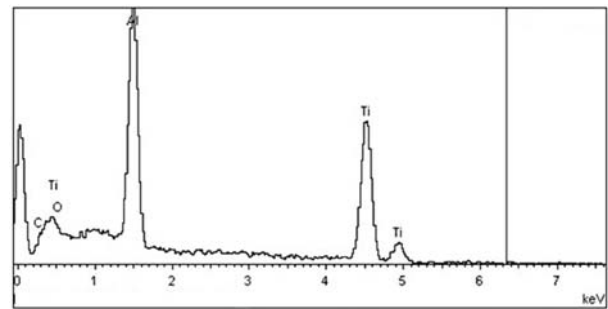
همان طور که قبلا نیز اشاره شد، عنصر کربن عمدتا به دلیل تجزیه سیال دی الکتريک مورد استفاده در این آزمایشات یعنی نفت سفید می باشد. از طرف دیگر ابزار مورد استفاده در این حالت ماشینکاری گرافیت می باشد و گرافیت ترکیب شیمیایی بر پایه کربن است و به همین دلیل هم، مقدار بسیار کمی از گرافیت (کربن) که به صورت ذوب و یا تبخیر از الکتروود ابزار جدا می شود و بخشی از آن پس از سرد شدن توسط سیال دی الکتريک، بر روی سطح نمونه TiAl منجمد می شود و به عبارتی رسوب می کند، به صورت مجزا قابل تشخیص نیست و پراکندگی ترکیب شیمیایی کربن بر روی سطح آنالیز شده در برگرفته کربن حاصل از تجزیه دی الکتريک و همچنین کربن حاصل از رسوبات الکتروود گرافیتی می باشد.



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

## ۶- نتیجه گیری

در تحقیق موجود، بعد از مراحل آماده سازی شمش ترکیب بین فلزی  $\gamma$ -TiAl و همچنین آماده سازی الکترودهای ابزار مس، گرافیت و آلومینیوم، فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتريکی با توجه به آزمایشات طراحی شده، انجام گردید. بعد از



شکل ۱۱ آنالیز EDS موضعی مربوط به قسمت روشن تر در نمونه ماشینکاری شده با الکتروود مس

همان طور که در شکل ۱۱، نیز قابل مشاهده است، در بخش روشن تر مشخص شده، غلظت عنصر کربن بسیار کمتر می باشد، به گونه ای که نتایج دقیق تر، درصد وزنی عنصر کربن را در این منطقه حدود ۱۳/۸۲٪ نشان می دهد، در حالی که سایر عناصر مجموعا دارای درصد وزنی ۸۶/۱۸٪ می باشند و بیانگر این است که این زمینه روشن عمدتا دارای فازها و ترکیبات مختلف شیمیایی غیر کاربیدی می باشد.

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 سنگین تر به دلیل تفاوت مقدار بازتاب پرتوهای الکترونی در هنگام آنالیز با میکروسکوپ الکترونی روبشی، به رنگ تیره دیده می شوند [۹]. از آنجایی که در آنالیزهای EDS مربوط به نمونه TiAl ماشینکاری شده با الکتروود مس، عناصر اصلی تیتانیوم، آلومینیوم، اکسیژن و کربن می باشند و وزن اتمی نسبی این عناصر به ترتیب برابر با ۴۸، ۲۷، ۱۶ و ۱۲ می باشد، به دلیل اینکه کربن نسبت به سایر عناصر سبکتر می باشد، در تصاویر SEM مربوطه، مناطقی که عمدتا کاربیدی می باشند، به رنگ تیره تر دیده می شوند و سایر بخشها به دلیل دارا بودن عناصر سنگین تر به رنگ روشن دیده می شوند.

با انجام آنالیز EDS بر روی کل سطح نمونه ماشینکاری شده با الکتروود گرافیت که در شکل ۴-ج، نشان داده شده است، ترکیب شیمیایی سطح ماشینکاری شده به روش تخلیه الکتريکی مورد بررسی قرار گرفت. نمودار مربوطه در شکل ۱۲،

سطحی قطعه کار گردد، در حالی که با توجه به آنالیزهای EDS انجام شده، سیال دی الکتریک اهمیت بسیار زیادی در تشکیل انواع فازها و ترکیبات شیمیایی مختلف بر روی سطح قطعه کار دارد و قابل پیش بینی است که با کنترل و تغییر آن بتوان به بهسازی سطح ماشینکاری شده کمک قابل ملاحظه ای کرد.

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

(۷) با توجه به آنالیزهای EDS مربوط به انواع ابزارها و تصاویر EDS-Map، می توان بیان داشت که تغییر جنس الکترو د 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 براده برداری، 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  $\gamma$ -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  $\gamma$ -TiAl; Journal of Materials

ماشینکاری نرخ براده برداری، زبری سطح، توپوگرافی سطح و آنالیز عنصری EDS سطح نمونه های ماشینکاری شده و همچنین نرخ سایش انواع ابزارها مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به دست آمده در زیر ارائه می شوند:

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

(۲) برای هر سه نوع الکترو د، با افزایش جریان پالس، نرخ سایش ابزار افزایش می یابد. نرخ سایش ابزار وابسته به جنس الکترو د و انرژی تخلیه الکتریکی می باشد. هر چه دمای ذوب الکترو د ابزار بالاتر باشد، نرخ سایش ابزار کمتر می باشد. در هنگام استفاده از الکترودهای آلومینیوم، نرخ سایش ابزار به طور متوسط  $4/4$  برابر بیشتر از نرخ سایش ابزار با استفاده از ابزارهای مسی و  $8$  برابر بیشتر از نرخ سایش ابزار با استفاده از الکترودهای گرافیتی است.

(۳) افزایش جریان منجر به افزایش نرخ براده برداری می گردد. نتایج تجربی نشان می دهد که در هنگام ماشینکاری با الکترودهای گرافیت، نرخ براده برداری به طور متوسط  $5/9$  برابر بیشتر از نرخ براده برداری با الکترودهای مسی و  $11$  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  $\gamma$ -TiAl عبارتند از تیتانیوم، آلومینیوم، کربن و اکسیژن. کربن، حاصل از تجزیه سیال دی الکتریک هیدروکربنی نفت سفید و اکسیژن، حاصل از فرآیند اکسیداسیون سطح قطعه کار در محیط دی الکتریک در حین فرآیند تخلیه الکتریکی است.

(۵) درصد وزنی عناصر رسوب کرده حاصل از تبخیر و ذوب مواد الکترو د ابزار بر روی سطح قطعه کار به حدی ناچیز است که نمی تواند به طور موثری منجر به بهبود خواص

- [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.
- 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.