

ارزیابی تاثیر ولتاژ آندایزینگ بر رفتار تریبوخوردگی آلیاژ Ti-6Al-4V در شرایط آندایز شده

محمد رضا گرسبوزجزی*، محمد علی گل‌عذار و کیوان رئیسی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۱/۲۶ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۱۱/۱۳)

چکیده - در پژوهش حاضر، ترکیب شیمیایی، ضخامت و رفتار تریبوخوردگی لایه اکسیدی بر روی آلیاژ Ti-6Al-4V، ایجاد شده به روش آندایزینگ^۱ در محلول H_2SO_4/H_3PO_4 و ولتاژهای بالاتر از ولتاژ شکست دی‌الکتریک مورد بررسی قرار گرفت. اندازه‌گیری ضخامت لایه‌های اکسیدی نشان داد که ضخامت پوشش با افزایش ولتاژ آندایزینگ به صورت خطی افزایش می‌یابد. تحلیل طیف‌سنجی پراکنش انرژی (EDS^۲) از فیلم اکسیدی، حضور عناصر فسفر و گوگرد از الکترولیت را درون فیلم اکسیدی نشان داد. نتایج حاصل از آزمون‌های تریبوخوردگی^۳ مشخص کرد که فرایند آندایزینگ، باعث بهبود رفتار تریبو خوردگی نمونه‌ها می‌شود. به علاوه لایه‌های اکسیدی ایجاد شده در ولتاژهای بالاتر، رفتار تریبوخوردگی بهتری از خود نشان دادند. بررسی سطح سایش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی^۴ و تحلیل EDS نشان داد که لایه اکسیدی در نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای کم‌تر به طور کامل برداشته شده‌اند؛ اما در نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای بیش‌تر، تخریب لایه به صورت جزئی در سطح سایش رخ داده است. حجم ساییده شده نمونه‌ها پس از آزمون تریبوخوردگی نیز مقدار کم‌تری را برای نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای بالاتر نشان داد.

واژگان کلیدی: آندایزینگ، آلیاژ Ti-6Al-4V، ولتاژ شکست دی‌الکتریک، تریبوخوردگی

The Influence of Anodising Voltage on Tribocorrosion Behavior of Anodized Ti-6Al-4V Alloy

M.R. Garsivaz Jazi*, M.A. Golozar and K. Raeissi

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology

Abstract: In this study, the chemical composition, thickness and tribocorrosion behavior of oxide films prepared on Ti-6Al-4V alloy by anodising treatment in H_2SO_4/H_3PO_4 electrolyte at the potentials higher than the dielectric breakdown voltage were evaluated. The thickness measurement of the oxide layers showed a linear increase of thickness by increasing the anodizing voltage. The EDS analysis of oxide films demonstrated precipitation of sulfur and phosphor elements from electrolyte into the oxide layer. Tribocorrosion results indicated that the tribocorrosion behavior of samples was significantly improved by anodising

مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: fardin_garsivaz@yahoo.com

process. Furthermore, the tribocorrosion performance of the samples anodised at higher voltages was enhanced. SEM and EDS of worn surfaces indicated that the oxide layer on the samples anodised at lower voltages was totally removed, but for the samples anodised at higher voltages, the oxide layer was only locally removed within the wear track. Moreover, measurement of wear volume of the treated samples exhibited lower values on the samples anodised at higher voltages.

Keywords: Anodising, Ti-6Al-4V alloy, Dielectric breakdown voltage, Tribocorrosion.

۱- مقدمه

محلول خورنده نمی‌تواند رفتار فلز را در شرایطی که هر دو عامل سایش و خوردگی حضور دارند مورد ارزیابی قرار دهد. لذا در این شرایط انجام آزمون‌های تریبوخوردگی ضروری به نظر می‌رسد [۱۲]. اگر چه پژوهش‌های نسبتاً زیادی در زمینه خوردگی آلیاژهای تیتانیوم در شرایط آندایز شده صورت پذیرفته است، اما تا کنون مطالعات محدودی پیرامون رفتار تریبوخوردگی پوشش اکسیدی تیتانیوم انجام شده است و بر خلاف اهمیت زیاد موضوع، اطلاعات موجود در این زمینه محدود است [۱۱].

در پژوهش حاضر رفتار تریبوخوردگی آلیاژ Ti-6Al-4V در شرایط آندایز شده در ولتاژهای بالاتر از ولتاژ شکست دی الکتریک با استفاده از روش پتانسیل خوردگی- زمان مورد بررسی و با بهره‌گیری از مطالعات میکروسکوپی سطح ساییده شده، تحلیل XRD و هم‌چنین تعیین حجم سایش نمونه‌ها، تاثیر ولتاژ آندایزینگ بر رفتار تریبوخوردگی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش پژوهش

۲-۱- مواد

در پژوهش حاضر ورق Ti-6Al-4V مطابق با استاندارد ۴۹۱۱ AMS و با ابعاد $15 \times 15 \times 2$ میلی متر مکعب به عنوان زیرلایه استفاده شد. تحلیل کوانتومتری ورق مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است.

۲-۲- آماده سازی نمونه‌ها

ورق تیتانیوم به ابعاد مورد نظر برش داده شد و پس از پلیسه‌گیری، همراه با سیم مسی لحیم شده به پشت نمونه‌ها مانع سرد شدند. سپس سطح نمونه‌ها به ترتیب توسط

تیتانیوم و آلیاژهای آن به سبب خواص منحصر به فرد خود از جمله استحکام بالا و مقاومت به خوردگی عالی، به طور گسترده در زمینه‌های مختلف مانند صنایع هوافضا، دریایی، خودرو و پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. مقاومت به خوردگی بالای تیتانیوم به سبب لایه اکسیدی فشرده و یکنواختی است که در تماس سطح فلز با هوا به طور طبیعی شکل می‌گیرد [۲-۴]. این لایه اکسید طبیعی که بسیار نازک است و ضخامتی در حدود ۳-۵ میکرومتر دارد، علی‌رغم مقاومت به خوردگی بالا، استحکام و مقاومت لازم در مقابل صدمات مکانیکی ناشی از ضربه و سایش را ندارد و بسیار آسیب پذیر است [۱، ۵، ۶]. برای غلبه بر این محدودیت، روش‌های اصلاح سطح متنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرد که از آن جمله می‌توان به روش‌های اکسیداسیون گرمایی، کاشت یونی، پلاسما اسپری و آندایزینگ اشاره کرد [۱ و ۷]. فرایند آندایزینگ آلیاژهای تیتانیوم به ویژه در ولتاژهای بالاتر از ولتاژ شکست دی الکتریک لایه که به اسپارک آندایزینگ نیز موسوم است، رفتار خوردگی و مقاومت سایشی سطح فلز را به میزان چشم‌گیری افزایش می‌دهد [۸-۱۰].

بسیاری از قطعات تیتانیومی مورد استفاده در صنایع مختلف از جمله صنایع دریایی، هوافضا، غذایی، شیمیایی و پزشکی در شرایط کاری خود در معرض آسیب‌های ناشی از خوردگی و سایش به طور هم‌زمان اند [۱۱]. در چنین شرایطی هر کدام از مکانیزم‌های خوردگی و سایش روی رفتار یکدیگر اثر متقابل دارد و شرایط را به نحوی تغییر می‌دهند که پیامدهای آن به طور غالب قابل پیش بینی نیست. از این رو بدیهی است که مطالعه رفتار خوردگی فلز در غیاب عامل سایش و هم‌چنین ارزیابی رفتار سایشی سطح در غیاب

جدول ۱ - ترکیب شیمیائی نمونه‌های مورد استفاده در پژوهش

عنصر	Al	V	Fe(max)	C(max)	Ti
درصد وزنی	۵/۸	۴/۲	۰/۱۵	۰/۰۳	بقیه

گر EDS، ترکیب شیمیائی لایه اکسیدی و احتمال نفوذ عناصر موجود در محلول آندایزینگ به پوشش بررسی شد.

۲-۵- آزمون‌های تریبوخوردگی

۲-۵-۱- رسم منحنی‌های پتانسیل مدار باز- زمان

این آزمون‌ها با استفاده از یک دستگاه تریبو خوردگی که متصل به یک دستگاه پتانسیو استات بود، انجام شد. ساینده مورد استفاده به شکل ساچمه از جنس آلومینا به قطر ۴ میلی‌متر و سختی Mohs ۹ - ۸/۵ انتخاب شد. در این آزمون‌ها با استفاده از سیستم سه الکترودی، اختلاف پتانسیل بین الکتروود کاری (نمونه) و الکتروود مرجع کالومل^۵ به شکل منحنی پتانسیل- زمان رسم شد. یک نمونه از گرافیت خالص نیز به عنوان الکتروود کمکی مورد استفاده قرار گرفت. محلول شامل NaCl (۰/۹٪) بود که در دمای محیط مورد استفاده قرار گرفت. سطح نمونه کاری که در تماس با محلول قرار داشت $1/21 \text{ cm}^2$ بود. زمان استراحت نمونه برای رسیدن به شرایط پایا قبل از شروع آزمون یک ساعت بود. پس از گذشت این زمان، ثبت پتانسیل به مدت ۲۰ دقیقه انجام و سپس سایش آغاز شد. بار اعمالی ۰/۰۲ نیوتون، طول خط سایش ۷/۵ میلی‌متر، فرکانس سایش ۱۵ میلی‌متر بر ثانیه و تعداد سیکل سایش ۱۶۰۰ سیکل انتخاب شد. پس از اتمام سایش ثبت پتانسیل به مدت ۲۰ دقیقه ادامه یافت.

۲-۵-۲- تعیین حجم سایش

برای تعیین حجم سایش نمونه‌ها در اثر تریبوخوردگی، پروفیل زبری سطح در راستای عرض خط سایش با استفاده از دستگاه پروفیلومتری با مشخصات Mitutoyo SurfTest SJ-301 به دست آمد. برای اطمینان از تکرار پذیری، از هر نمونه پنج پروفیل زبری تهیه شد. با محاسبه سطح مقطع سائیده شده روی پروفیل‌های مزبور و ضرب آن در طول خط سایش، حجم سایش نمونه‌ها تعیین شد.

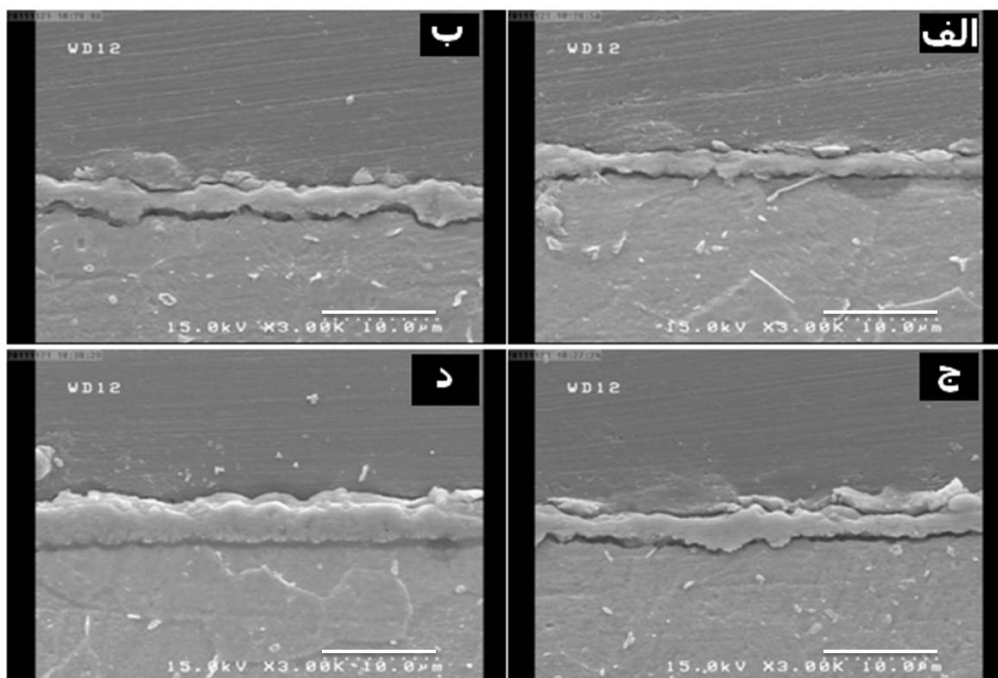
سمباده‌های ۴۰۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ سنباده زنی و با استفاده از نمد و پودر آلومینا تا رسیدن به زبری $0/004 \pm 0/09$ میکرومتر پولیش شد. در ادامه نمونه‌ها در حمام آلتراسونیک حاوی حلال متیل اتیل کتون به مدت ۵ دقیقه چربی‌گیری، سپس در محلولی با ترکیب $30 \text{ g/l HF} - 30 \text{ g/l HNO}_3$ در دمای محیط و به مدت یک دقیقه حکاکی و پس از شستشوی کامل وارد حمام آندایز شدند.

۲-۳- عملیات آندایزینگ

آندایز کردن نمونه‌ها با استفاده از یک منبع تغذیه جریان مستقیم با خروجی حداکثر ۲۲۰ ولت انجام شد. محلول مورد استفاده با غلظت $0/3 \text{ M H}_3\text{PO}_4 - 1/5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ انتخاب شد. نمونه‌های آماده سازی شده پس از غوطه‌وری در حمام آندایزینگ به عنوان آند به قطب مثبت و یک ورق خام از جنس تیتانیوم خالص تجاری به عنوان کاتد به قطب منفی منبع تغذیه متصل شدند. آندایزینگ نمونه‌ها در چهار ولتاژ ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ ولت و در دمای $25 \pm 0/5$ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه انجام شد.

۲-۴- مطالعات میکروسکوپی الکترونی

به منظور تعیین ضخامت و ترکیب شیمیائی لایه اکسیدی از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به تحلیل‌گر EDS (مدل Hitachi S۴۱۶۰) استفاده شد. نمونه‌های آندایز شده از وسط با وایرکات^۶ برش داده شدند و از سطح مقطع برش مانت شدند. ابتدا یک لایه نازک طلا به روش رسوب دهی فیزیکی بخار (PVD) روی نمونه‌ها ایجاد شد، سپس تصاویر میکروسکوپی در ولتاژ شتاب دهنده ۱۵ کیلوولت با استفاده از آشکارساز الکترون‌های ثانویه گرفته شدند. با استفاده از تحلیل-



شکل ۱ - سطح مقطع نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای (الف) ۱۴۰ (ب) ۱۶۰ (ج) ۱۸۰ و (د) ۲۰۰ ولت.

۲-۵-۳- بررسی میکروسکوپی سطح ساییده شده

برای بررسی دقیق تر سطح ساییده شده و مکانیزم حاکم بر سایش، سطوح نمونه‌ها به وسیله ی میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در دو بزرگ‌نمایی مختلف مورد مطالعه قرار گرفتند. هم‌چنین برای برآورد وضعیت لایه آندایز روی سطح سائیده شده و میزان تخریب آن، ترکیب کیفی سطح سایش مربوط به نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای ۱۴۰ و ۲۰۰ ولت با استفاده از تحلیل گر EDS تعیین شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ضخامت پوشش

شکل (۱) سطح مقطع نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای مختلف را در بزرگ‌نمایی یکسان نشان می‌دهد. از این تصاویر به خوبی مشهود است که افزایش ولتاژ آندایزینگ باعث افزایش ضخامت شده است. دلیل افزایش ضخامت را می‌توان بالاتر بودن شدت میدان الکتریکی به وجود آمده در عرض لایه اکسیدی دانست، چرا که بالا بودن میدان، امکان هدایت یونی و در نتیجه رشد لایه را فراهم می‌سازد. نمودار تغییرات ضخامت

لایه آندایز با افزایش ولتاژ در شکل (۲) آمده است. چنان که از شکل مشخص است، نمودار افزایش ضخامت با ولتاژ تقریباً به صورت خطی با شیب 35 nm/V است.

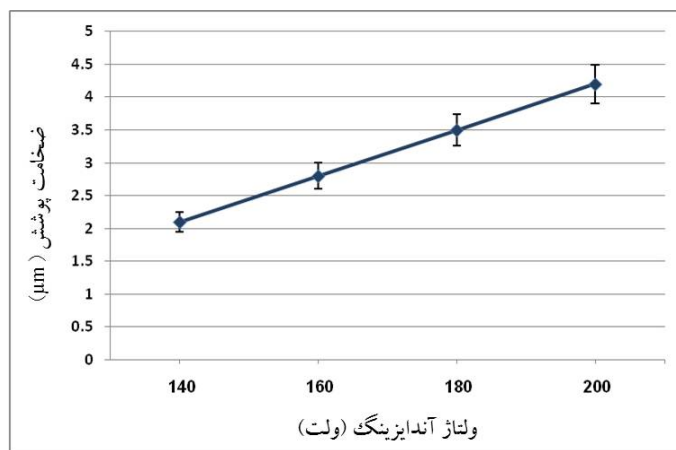
۳-۲- تحلیل EDS پوشش

تحلیل EDS پوشش مربوط به نمونه آندایز شده در ۲۰۰ ولت در شکل (۳) ارائه شده است. چنان که ملاحظه می‌شود علاوه بر عناصر تیتانیوم و اکسیژن که مربوط به ترکیب اکسید تیتانیوم است، عناصر فسفر و گوگرد نیز در لایه آندایز مشاهده می‌شود که از محلول آندایزینگ به داخل پوشش نفوذ کرده اند. نتایج مشابهی در تحقیقات انجام شده در زمینه اسپارک آندایزینگ گزارش شده است [۱، ۱۳، ۱۴].

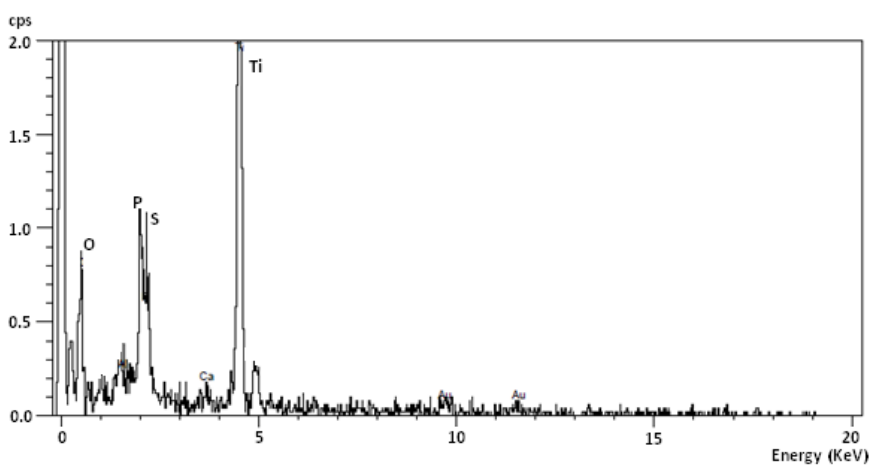
۳-۳- آزمون‌های تریبو خوردگی

۳-۳-۱- نمودارهای پتانسیل مدار باز- زمان

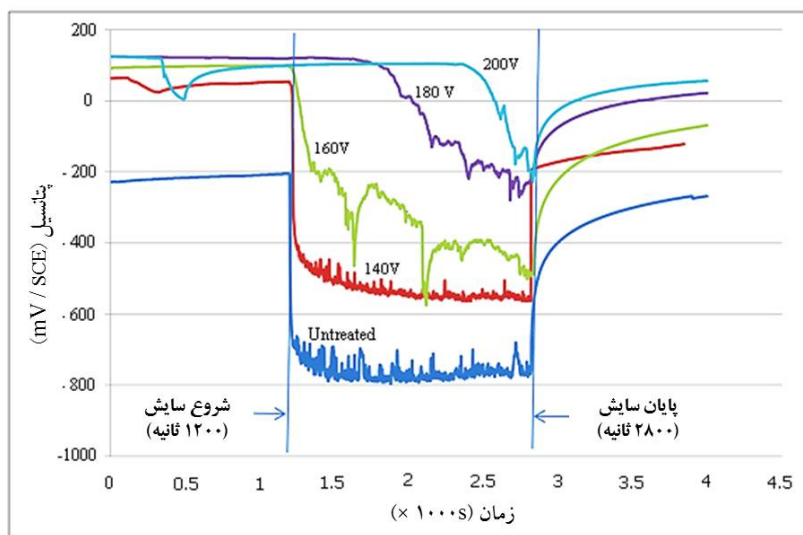
نمودارهای تریبو خوردگی نمونه آندایز نشده و نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای مختلف در شکل (۴) آمده است. چنان که دیده می‌شود افت پتانسیل در اثر پدیده سایش در تمامی



شکل ۲ - نمودار تغییرات ضخامت پوشش آندایز با افزایش ولتاژ.



شکل ۳ - تحلیل پوشش مربوط به نمونه‌های آندایز شده در ۲۰۰ ولت.



شکل ۴ - نمودارهای تریبوخوردگی نمونه بدون پوشش و نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای مختلف.

نمونه‌ها اتفاق افتاده است، با این تفاوت که میزان این کاهش پتانسیل در نمونه‌های آندایز شده نسبت به نمونه بدون پوشش به نسبت کم‌تر بوده است. بعلاوه در نمونه‌های آندایز شده نیز با افزایش ولتاژ آندایزینگ مقدار افت پتانسیل کم‌تر شده است.

چنان که در این نمودارها دیده می‌شود، در نمونه بدون پوشش و هم‌چنین نمونه آندایز شده در ولتاژ ۱۴۰ ولت، افت ناگهانی پتانسیل بلافاصله پس از شروع سایش اتفاق می‌افتد. در حالی که در نمونه آندایز شده در ولتاژ ۱۶۰ ولت این کاهش پتانسیل با شیب ملایمی آغاز شده، در پایان زمان سایش به حداقل مقدار خود می‌رسد. در نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای ۱۸۰ و ۲۰۰ ولت، از زمان شروع سایش تا یک فاصله زمانی مشخص هیچ افت ولتاژی دیده نمی‌شود. این فاصله زمانی برای نمونه ۱۸۰ ولت حدود ۶۰۰ ثانیه و برای نمونه ۲۰۰ ولت حدود ۱۳۰۰ ثانیه است. این نتایج به خوبی نشان می‌دهد که افزایش ولتاژ آندایزینگ باعث بهبود رفتار تریبوخوردگی نمونه‌ها شده است. افزایش ولتاژ آندایزینگ باعث افزایش ضخامت و احتمالاً سختی پوشش می‌شود و لذا بار اعمالی در لحظات ابتدائی شروع سایش نتوانسته است به پوشش آسیب جدی وارد کند. با گذشت زمان و بالا رفتن تعداد سیکل سایشی به مرور از ضخامت لایه در ناحیه ساییده شده کاسته می‌شود. این سایش در نهایت در نقاط محدودی باعث حذف موضعی پوشش و ایجاد نقاط فعال شده که منجر به افت پتانسیل می‌شود. بدیهی است که هرچه ضخامت پوشش اکسیدی زیاده‌تر باشد، مدت طولانی‌تری در مقابل عامل ساینده مقاومت کرده، لذا افت پتانسیل دیرتر اتفاق می‌افتد.

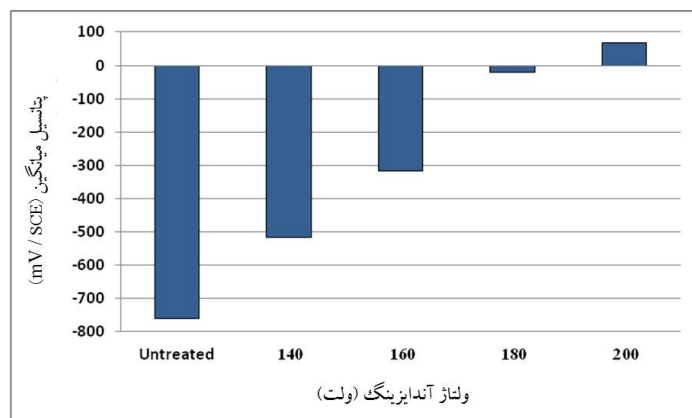
نوسان‌های مداوم ولتاژ در طول فرایند سایش برای نمونه بدون پوشش و تا حدودی نمونه آندایز شده در ولتاژ ۱۴۰ ولت نشان دهنده تخریب و تشکیل مجدد لایه روئین روی سطح فلز در تماس با محلول است که به طور متوالی تکرار می‌شود. این نوسانات منظم با دامنه تقریباً یکسان حاکی از وجود یک تعادل پایدار بین این دو فرایند است [۱۵]. اما چنان که دیده می‌شود نوسانات ولتاژ در طول سایش برای نمونه‌های آندایز شده در

ولتاژهای بالاتر (۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ ولت) بسیار کم‌تر است. دلیل این امر را نیز می‌توان در ضخامت بالای لایه اکسیدی دانست که موجب جلوگیری از حذف کامل لایه در اثر سایش شده است.

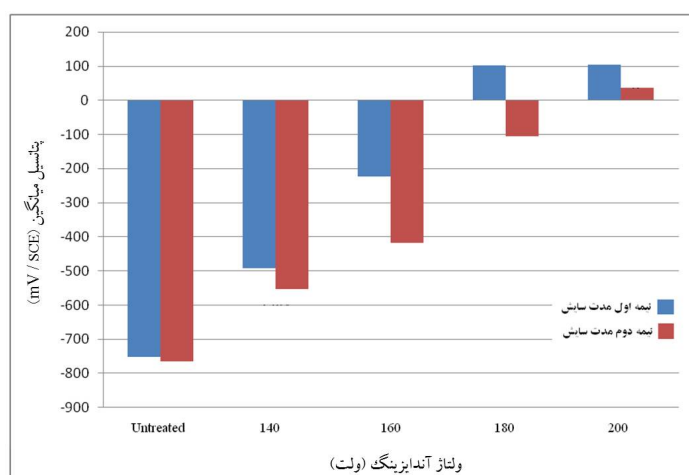
شکل (۵) مقادیر میانگین پتانسیل در طول مدت زمان سایش را برای نمونه بدون پوشش و نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای مختلف به صورت نمودار ستونی ارائه داده است. این نمودار به خوبی اثر لایه اکسیدی را روی مقدار پتانسیل مدار باز نمونه‌ها در طول سایش نشان می‌دهد. به علاوه افزایش چشم‌گیر مقدار متوسط پتانسیل در اثر افزایش ولتاژ آندایزینگ در این نمودارها به خوبی مشهود است، چنان که در نمونه آندایز شده در ولتاژ ۲۰۰ ولت این مقدار حتی مثبت شده است.

اگرکل مدت زمان سایش که ۱۶۰۰ ثانیه است، به دو قسمت نیمه اول و نیمه دوم مدت زمان سایش تقسیم شود، نتایج جالب توجهی حاصل خواهد شد. چنان که در شکل (۶) دیده می‌شود در کلیه نمونه‌ها مقدار متوسط پتانسیل در نیمه دوم سایش کم‌تر است که دلیل این امر به تشدید اثر سایش بر اثر افزایش تعداد سیکل سایشی باز می‌گردد. نکته مهم این است که در نمونه بدون پوشش اختلاف مقدار پتانسیل در دو نیمه سایش ناچیز است، در حالی که در نمونه‌های آندایز شده این اختلاف به طور مشهودی با افزایش ضخامت لایه آندایز افزایش می‌یابد. دلیل بوجود آمدن این اختلاف آن است که در نیمه اول سایش، لایه اکسیدی در مقابل عامل ساینده به خوبی مقاومت می‌کند و مانع از وارد آمدن آسیب جدی به سطح زیر لایه می‌شود، لذا افت پتانسیل در این محدوده ناچیز است. اما در نیمه دوم زمان سایش با حذف لایه آندایز و وارد آمدن آسیب به زیر لایه، شرایط سطحی تغییرات بیش‌تری می‌کند و منجر به افت شدیدتر پتانسیل می‌شود.

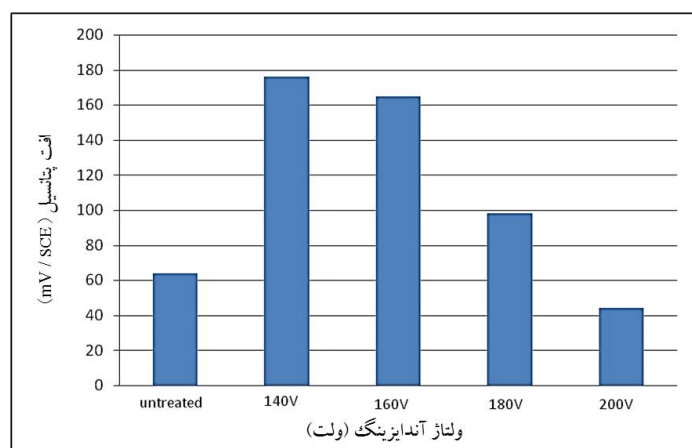
با قطع فرایند سایش، پتانسیل به مقادیر آندی تر جابه جا می‌شود که این امر به دلیل تشکیل فیلم روئین پایدار روی سطح سائیده شده (عریان) است. پتانسیل مدار باز پس از قطع سایش به مرور افزایش می‌یابد و به یک حالت نسبتاً پایدار می‌رسد. اما



شکل ۵ - مقادیر میانگین پتانسیل در طول مدت سایش برای نمونه بدون پوشش و نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای مختلف.



شکل ۶ - مقادیر میانگین پتانسیل در نیمه اول و دوم مدت سایش برای نمونه خام و نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای مختلف.



شکل ۷ - اختلاف پتانسیل مدار باز بلافاصله قبل از آغاز سایش و پس از رسیدن به حالت پایدار پس از سایش

مدار باز بلافاصله قبل از آغاز سایش (در لحظه ۱۲۰۰ ثانیه) و پس از رسیدن به حالت پایدار پس از سایش (در لحظه ۴۰۰۰)

چنان که در شکل (۴) دیده می‌شود این پتانسیل به مقدار پتانسیل حالت پایدار قبل از سایش نمی‌رسد. اختلاف پتانسیل

ثانیه) نشان می‌دهد که شرایط سطح نمونه پس از سایش دچار تغییر عمده‌ای شده است.

میزان انحراف از پتانسیل اولیه در شکل (۷) آمده است. چنان که در این شکل دیده می‌شود این اختلاف برای نمونه بدون پوشش ناچیز است. دلیل این امر آن است که اختلاف چندانی بین سطح عاری از پوشش اولیه نمونه با سطح بعد از پوشش وجود ندارد، اما این اختلاف در مورد نمونه آندایز شده در ولتاژ ۱۴۰ و ۱۶۰ ولت بسیار زیاد است. دلیل این امر آن است که قبل از شروع سایش سطح نمونه به طور کامل توسط یک لایه اکسیدی ضخیم و یکنواخت پوشیده می‌شود و پتانسیل مدار باز در چنین شرایطی نجیب است، اما پس از اتمام سایش این پوشش بطور کامل از روی سطح سایش حذف می‌شود و این سطح در معرض محلول قرار می‌گیرد و پتانسیل بسیار منفی تری را نسبت به قبل نشان می‌دهد. با افزایش ولتاژ آندایزینگ، اختلاف بین دو پتانسیل ابتدایی و انتهایی آزمون برای نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای ۱۸۰ و ۲۰۰ ولت به نسبت کاهش می‌یابد که دلیل این امر نیز به عدم حذف کامل لایه اکسیدی در اثر سایش باز می‌گردد.

۳-۳-۲- بررسی میکروسکوپی سطح سایش

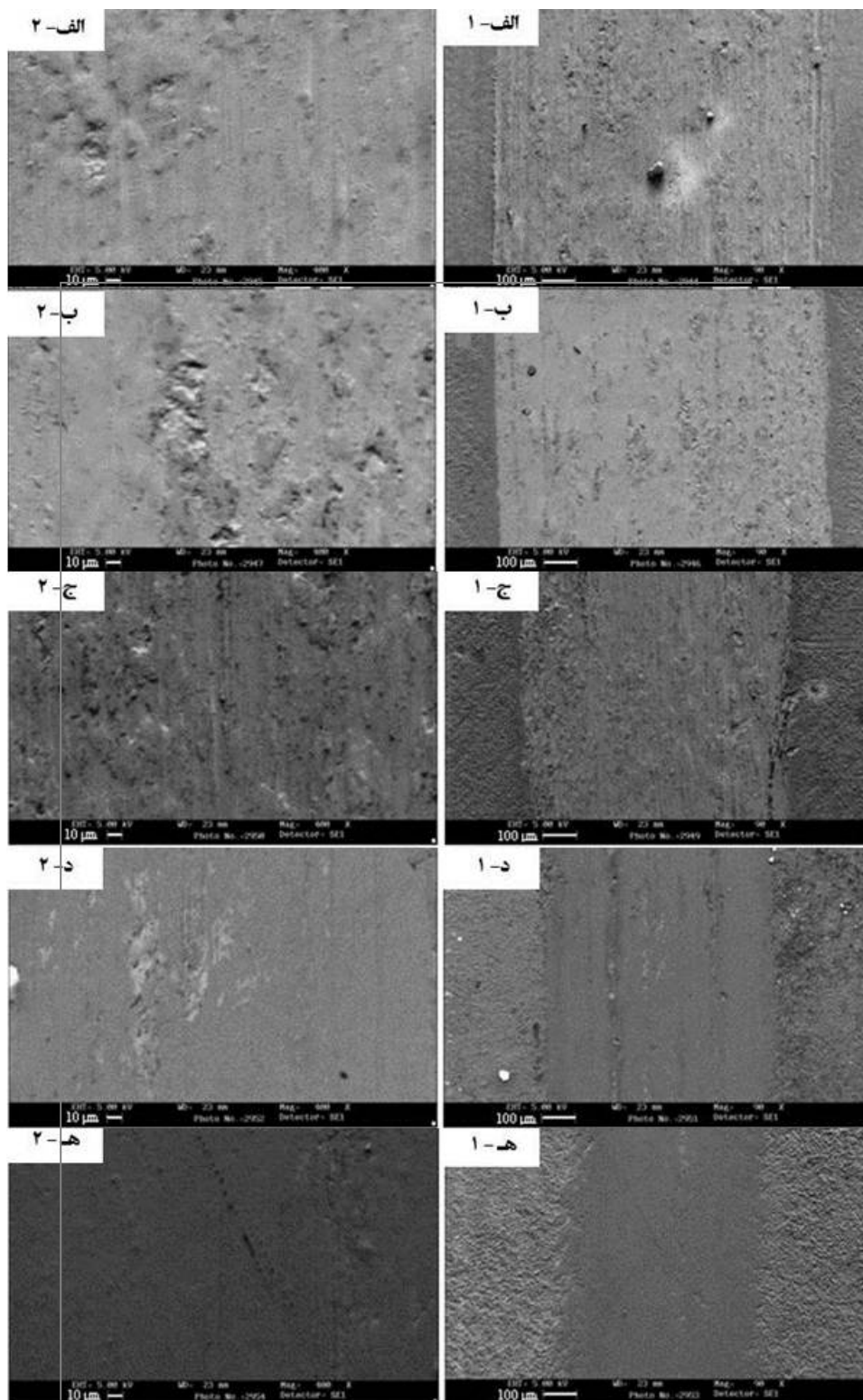
تصاویر SEM مربوط به سطوح سایش نمونه خام و نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای مختلف در دو بزرگ‌نمایی ۹۰ و ۴۰۰ برابر در شکل (۸) آمده است. وجود آثار کندگی و خراش‌های عمیق در سطح سایش مربوط به نمونه خام و نمونه آندایز شده در ۱۴۰ ولت، نشان دهنده حاکم بودن مکانیزم سایش خراشان است. در نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای ۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ ولت، سطح سایش نسبتاً صاف و عاری از کندگی و خراش‌های عمیق است و نشان می‌دهد که وجود لایه اکسیدی همانند یک لایه محافظت‌کننده میانی مانع از تماس مستقیم ساییده با سطح زیرلایه شده و از رسیدن آسیب جلدی به سطح محافظت کرده است. در این شرایط لایه اکسیدی که بیش‌تر سطح را پوشانده می‌تواند به عنوان یک روان کار جامد

نیز عمل کند و از بروز سایش خراشان جلوگیری نماید [۱]. به همین دلیل در این نمونه‌ها یک سطح سایش ملایم‌تر مشاهده می‌شود.

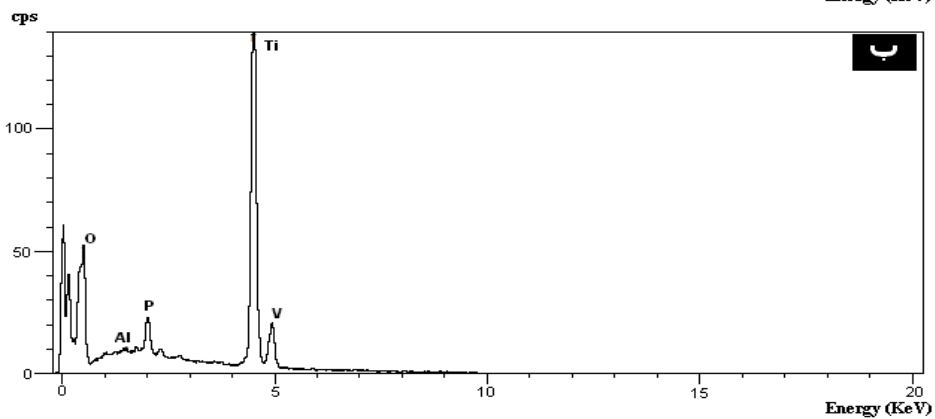
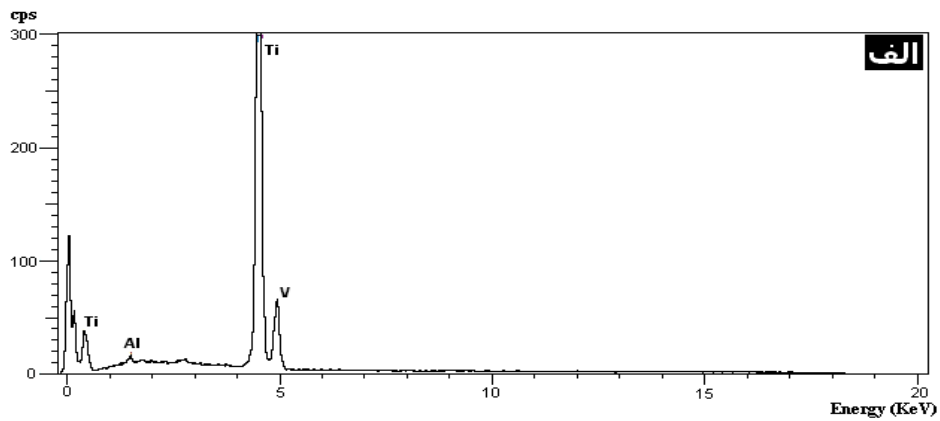
تحلیل EDS انجام شده روی سطوح سایش مربوط به نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای ۱۴۰ و ۲۰۰ ولت در شکل (۹) ارائه شده است. وجود اکسیژن و فسفر در سطح نمونه آندایز شده در ۲۰۰ ولت حاکی از حضور لایه اکسیدی روی سطح ساییده شده است، در حالی که در نمونه آندایز شده در ۱۴۰ ولت هیچ اثری از اکسید در سطح سایش وجود ندارد. دلیل این امر آن است که در نمونه آندایز شده در ۱۴۰ ولت کل لایه آندایز در اثر سایش از بین رفته است و سطح نهایی در واقع سطح فلز پایه است. ذرات کنده شده از سطح این نمونه نیز تکه‌هایی از فلز زیر لایه است که بر اثر سایش شدید از سطح جدا شده است (شکل (۱۰))، اما در نمونه آندایز شده در ۲۰۰ ولت به سبب ضخامت و سختی بالاتر لایه آندایز، سایش قادر به حذف کامل این لایه نیست و سطح نهایی نیز با یک لایه اکسیدی پوشیده شده است. تحلیل EDS نقطه ای انجام شده روی نقاطی از سطح نمونه آندایز شده در ۲۰۰ ولت که به نظر می‌رسد پوشش آندایز به طور کامل تخریب شده است، نشان داد که در این نقاط فلز زیر لایه ظاهر شده و لایه اکسیدی به طور کامل از بین رفته است (شکل (۱۱)). در واقع وجود همین نقاط پراکنده موجب افت پتانسیل مدار باز در مراحل پایانی سایش شده است.

۳-۳-۳- محاسبه حجم ساییده شده نمونه‌ها

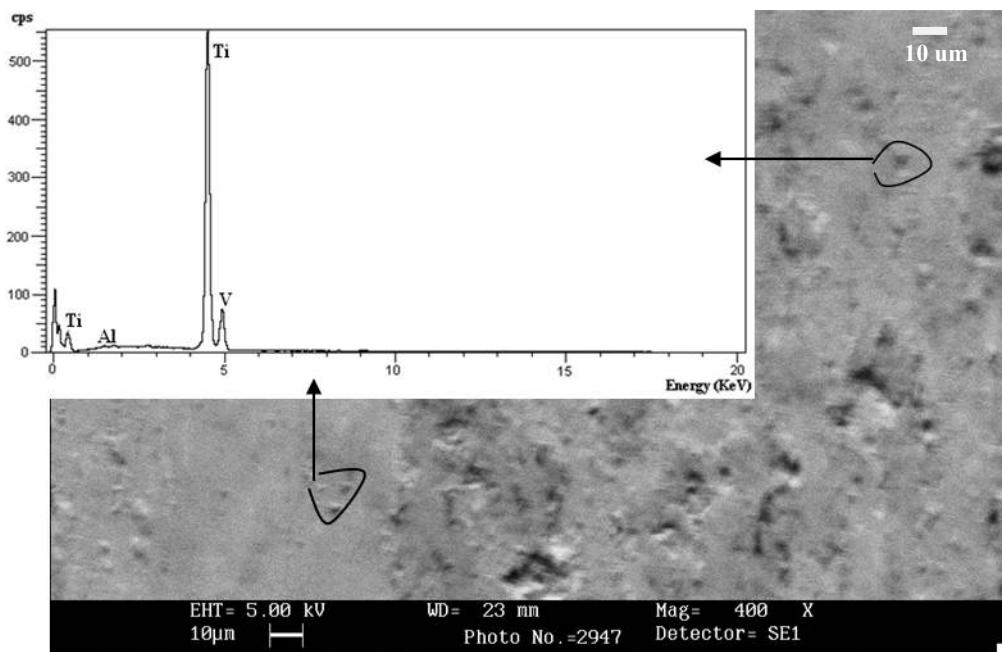
نمودارهای پروفیلومتری عرض منطقه سایش برای نمونه خام و نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای مختلف در شکل (۱۲) و حجم ساییده شده مربوط به نمونه‌ها در شکل (۱۳) ارائه شده است. چنان که دیده می‌شود با افزایش ولتاژ آندایزینگ، عرض سایش و هم‌چنین حجم سایش نمونه‌ها به میزان قابل توجهی کاهش یافته است که این کاهش نشان دهنده بهبود مقاومت تریبوخوردگی نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای بالا است.



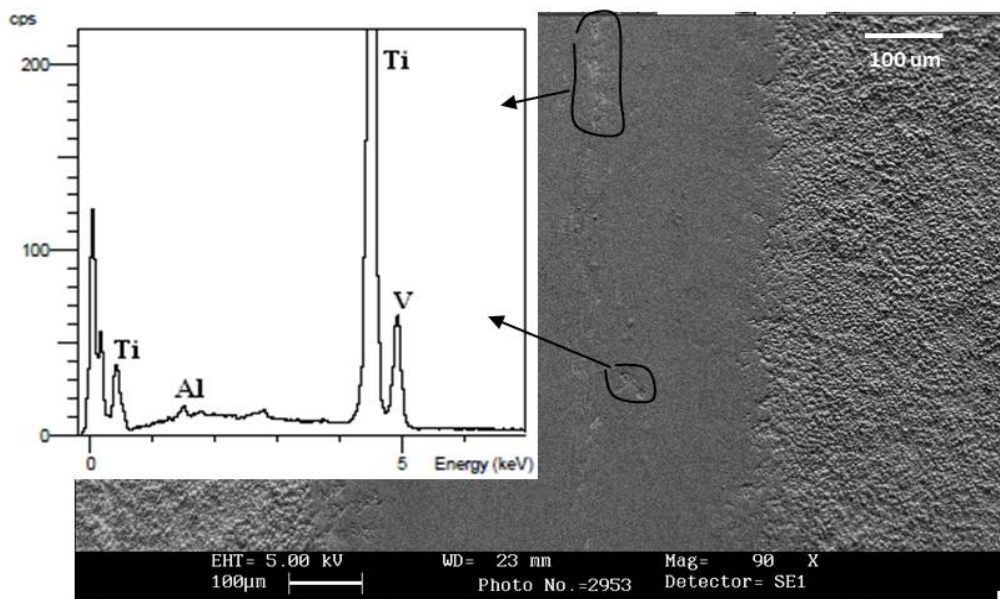
شکل ۸ - تصاویر SEM مربوط به سطوح ساییده شده (الف) نمونه خام، و نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای (ب) ۱۴۰ (ج) ۱۶۰ (د) ۱۸۰ (ه) ۲۰۰ ولت در دو بزرگ‌نمایی مختلف.



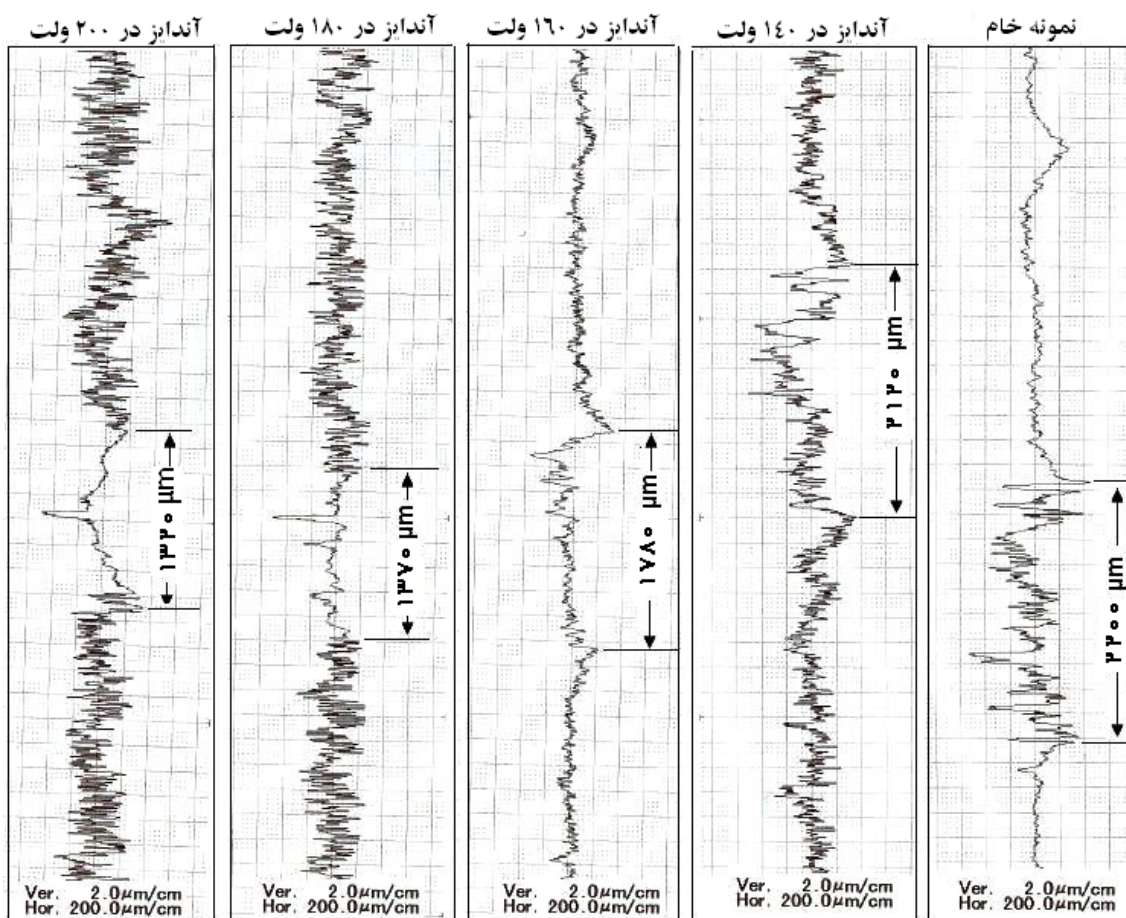
شکل ۹ - تحلیل EDS مربوط به سطح ساییده شده نمونه‌های آندایز شده در (الف) ۱۴۰ و (ب) ۲۰۰ ولت.



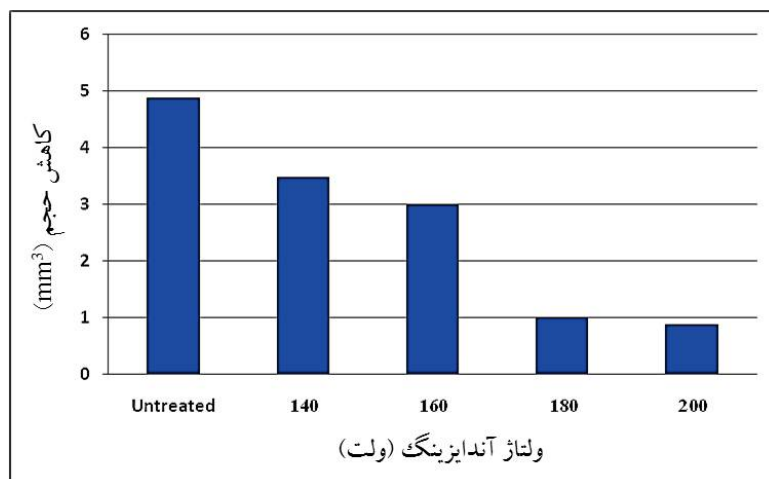
شکل ۱۰ - سطح ساییده شده مربوط به نمونه آندایز شده در ۱۴۰ ولت و تحلیل EDS از سه ذره کنده شده.



شکل ۱۱ - سطح سایش مربوط به نمونه آندایز شده در ۲۰۰ ولت و تحلیل EDS از نقاط عاری از پوشش.



شکل ۱۲ - نمودارهای پروفیلومتری عرض منطقه سایش نمونه خام و نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای مختلف.



شکل ۱۳ - کاهش حجم بر اثر سایش در نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای مختلف.

مربوط به نمونه خام و نمونه آندایز شده در ۱۴۰ ولت، نشان دهنده حاکم بودن مکانیزم سایش خراشان است. در نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای ۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ ولت، سطح سایش نسبتاً صاف و عاری از کندگی و خراش‌های عمیق بوده که نشان دهنده افزایش مقاومت سطح به سایش با افزایش ولتاژ است.

۵- با افزایش ولتاژ آندایزینگ، حجم ساییده شده نمونه‌های در معرض تریبوخوردگی به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. این کاهش حجم نشان دهنده بهبود قابل توجه مقاومت تریبوخوردگی سطح نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای بالا است.

۴- نتیجه‌گیری

۱- افزایش ولتاژ آندایزینگ باعث افزایش ضخامت پوشش به صورت خطی می‌شود.

۲- در محدوده بالاتر از ولتاژ شکست دی الکتریک، به دلیل تخلخل و نفوذپذیری بالای پوشش، عناصر موجود در محلول به داخل لایه اکسیدی نفوذ کرده است.

۳- آندایزینگ، رفتار تریبوخوردگی سطح را اصلاح کرده است. به علاوه افت پتانسیل مدار باز در حین سایش برای نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای بالاتر کم‌تر بود که این امر حاکی از افزایش مقاومت تریبوخوردگی با افزایش ولتاژ آندایزینگ است.

۴- در تصاویر SEM مربوط به سطح ساییده شده نمونه‌ها، وجود آثار کندگی و خراش‌های عمیق در سطح ساییده شده

واژه‌نامه

1. anodising
2. electron dispersive spectroscopy
3. tribocorrosion
4. scanning electron microscope
5. standard Calomel electrode (SCE)
6. wire cut

مراجع

1. Yetim, A.F., "Investigation of Wear Behavior of Titanium Oxide Films, Produced by Anodic Oxidation, on Commercially Pure Titanium in Vacuum Conditions", *Surface & Coating Technology*, Vol. 205, pp.1757-1763, 2010.
2. Bloyce, A., Qi, P.Y., Dong, H. and Bell, T., "Surface Modification of Titanium Alloys for Combined Improvements in Corrosion and Wear Resistance", *Surface and Technology*, Vol. 107, pp. 125-132, 1998.
3. Narayanan, R. and Seshadri, S.K., "Point Defect Model and Corrosion of Anodic Oxide Coatings on

- Ti-6Al-4V", *Corrosion Science*, Vol. pp.50, 1521-1529, 2008.
4. Capek, D., Gigandet, M.P., Masmoudi, M., Wery, M. and Banakh, O., "Long-time Anodisation of Titanium in Sulphuric Acid", *Surface & Coating Technology*, Vol. 202, pp. 1379-1384, 2008.
 5. Chrzanowski, W., "Corrosion Study of Ti6Al7Nb Alloy after Thermal, Anodic and Alkali Surface Treatments", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 31, pp. 203-211, 2008.
 6. Vieira, A.C., Ribeiro, A.R., Rocha, L.A. and Celis, J.P., "Influence of pH and Corrosion Inhibitors on the Tribocorrosion of Titanium in Artificial Saliva", *Wear*, Vol. 261, pp. 994-1001, 2006.
 7. Oh, H.J., Lee, J.H., Kim, Y.J. Suh, S.J., Lee, J.H. and Chi, C.S., "Surface Characteristics of Porous Anodic TiO₂ Layer for Biomedical Applications", *Material Chemistry and Physics*, Vol. 109, pp. 10-14, 2008.
 8. Fadel-Allah, S.A., El-Sherief, R.M. and Badawy, W. A. "Electrochemical formation and Characterization of Porous Titania (TiO₂) Films on Ti", *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 38, pp. 1459-1466, 2008.
 9. Habazaki, H., Onodera, T., Fushimi, K., Konno, H. and Toyotake, K., "Spark Anodizing of β -Ti Alloy for Wear Resistant Coating", Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Sapporo 060-8628, 2008, Japan.
 10. Song, H.J., Kim, M.K., Jung, G.C., Vang, M.S. and Park, Y.J., "The Effects of Spark Anodizing Treatment of Pure Titanium Metals and Titanium Alloys on Corrosion Characteristics", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, pp. 8738-8745, 2007.
 11. Mischler, S., "Triboelectrochemical Techniques and Interpretation Methods in Tribocorrosion: A Comparative Evaluation", *Tribology International*, Vol. 41, pp. 573-583, 2008.
 12. Chen, J., Yan, F.Y., Chen, B.B. and Wang, J.Z., "Assessing the Tribocorrosion Performance of Ti-6Al-4V, 316 Stainless Steel and Monel K500 Alloys in Artificial Seawater", *Materials and Corrosion*, Vol. 62, No. 9999, 2011.
 13. Oh, H.J., Lee, J.H., Jeong, Y., Kim, Y.J., and Chi, C.S., "Microstructural Characterization of Biomedical Titanium Oxide Film Fabricated by Electrochemical Method", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 198, pp. 247-252, 2005.
 14. Lukacova, H., Plesingerova, B., Vojtko, M., Ban, G., "Electrochemical Treatment of Ti-6Al-4V", *Acta Metallurgica Slovaca*, Vol. 16 pp. 186-193, 2010.
 15. Kumar, S., Sankara Narayanan, T.S.N., Sundara Raman, S.G. and Seshadri, S.K.: "Surface Modification of CP-Ti to Improve the Fretting-Corrosion Resistance: Thermal Oxidation vs. Anodizing", *Materials Science and Engineering*, Vol. 201 30, pp. 921-927, 2010.