

ارزیابی بررسی ریزساختار، چسبندگی و رفتار تریبولوژیکی پوشش اکسید

آلومینیوم آندی متخلخل بر روی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳

محمد علی کریمی، مسعود سلطانی، حسن حسن‌زاده، علی شفیعی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

علیرضا بهزادی

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

نسا زمانی بختیاروند

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۱۴ - پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۱۱)

چکیده

در این پژوهش، پوشش اکسید آلومینیوم با روش آندایزینگ سخت بر روی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ در محیط سولفوریک اسید ایجاد شد. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که فرآیند آندایزینگ باعث تشکیل پوشش آلومینای آمورف متخلخل بر روی سطح آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ می‌شود. افزایش ولتاژ آندایزینگ باعث افزایش تخلخل در سطح پوشش می‌شود که به تبع آن زبری سطح افزایش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش ولتاژ، به دلیل بیشتر شدن نرخ انحلال زیرلایه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ ضخامت و سختی پوشش افزایش یافت. بررسی‌های میکروسکوپی نشان دهنده چسبندگی مناسب پوشش اکسید آلومینیوم آندی بود. انجام فرآیند آندایزینگ موجب بهبود قابل توجه رفتار تریبولوژیکی (حداقل بیش از ۲۰ برابر) آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ شد. بررسی‌های میکروسکوپی نشان داد که مکانیزم غالب سایش در آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ سایش خراشان و سایش ورقه‌ای بوده و مکانیزم غالب سایش پوشش‌ها، سایش چسبان و ورقه‌ای می‌باشد. واژه‌های کلیدی: آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳، اکسید آلومینیوم آندی متخلخل، ریزسختی، چسبندگی، رفتار تریبولوژیکی.

Microstructural, Adhesion and Tribological behavior Investigation of Porous Anodic Aluminum Oxide Coating on 5083 Aluminum Alloy

Mohammadali Karimi, Masoud Soltani, Hassan Hassanzadeh, Ali Shafeyi

Department of Material Engineering, Isfahan University of Technology

Alireza Behzadi

Department of Chemical Engineering, University of Tehran

Nesa Zamani Bakhtiarvand

Department of Material Engineering, Shiraz University

(Received 5 July 2021, accepted 2 November 2021)

Abstract

In this study, the aluminum oxide coating was applied on 5083 Aluminum alloy by hard anodizing method in sulfuric acid. Microstructural investigations showed that anodizing process leads to the formation of porous amorphous alumina coating on the surface of 5083 aluminum alloy. The porosity of the coating surface increases by increasing the anodizing voltage, leading to an increment in the surface roughness. In addition, as the voltage increased, the thickness and hardness of the coating increased due to the higher dissolution rate of the 5083 Al alloy substrate. Microscopic examinations were indicative of appropriate adhesion of the aluminum oxide coatings. The anodizing process significantly improved the tribological behavior (at least more than 20 times) of 5083 aluminum alloy. Microscopic analysis showed that the main wear mechanisms of 5083 aluminum alloy were abrasion and delamination and the dominant wear mechanisms in aluminum oxide coatings were adhesive and delamination.

Key words: 5083 Aluminum Alloy, Porous Anodic Aluminum Oxide, Micro-hardness, Adhesion, Tribological behavior.**E-mail of Corresponding author:** ma.karimiut@gmail.com.

مقدمه

اکسیدی روی سطح فلز از خوردگی فلز در شرایط خوردنده جلوگیری خواهد کرد [۱۲-۱۰]. تشکیل لایه اکسیدی روی سطح آلومینیوم می‌تواند به صورت خود به خودی صورت بگیرد. اما می‌توان این فرآیند را با اعمال ولتاژ به یک الکترولیت اسیدی مانند اگزالیک اسید یا سولفوریک اسید نیز انجام داد که در این صورت لایه‌ی اکسیدی تشکیل شده بر روی سطح فلز، دارای سختی و مقاومت بیشتر در برابر سایش و خوردگی نسبت به شرایط معمولی خواهد بود [۱۳]. در این فرآیند عواملی چون ولتاژ آندایزینگ، دانسیته‌ی جریان، دمای محلول الکترولیک و سطح الکترودها، pH و زمان نقشی اساسی خواهند داشت [۱۶-۱۴]. از این رو، تحقیقات بسیاری بر روی متغیرهای ذکر شده و اثرات آن‌ها بر روی مقاومت لایه‌ی اکسیدی تشکیل شده در آندایزینگ در برابر سایش و خوردگی انجام شده است. که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به تحقیقات آرتس^۵ و همکاران [۱۷] اشاره داشت. آن‌ها نشان دادند با افزایش دمای فرآیند آندایزینگ در محلول الکترولیت سولفوریک اسید، میزان سایش لایه‌ی اکسیدی تشکیل شده بر روی سطح آلومینیوم در آزمون سایش، افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در تحقیقات انجام شده مشخص شد، با افزایش دمای آندایزینگ، مقاومت لایه‌ی اکسیدی در برابر سایش کمتر شد. مطالعات سلندری و همکاران [۱۸] حاکی از بهبود مقاومت سایش و رفتار خوردگی پوشش اکسیدی حاصل از آندایزینگ آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با افزایش جریان بوده است. آن‌ها دلیل اصلی بهبود خواص سطحی این پوشش را به کاهش تخلخل پوشش مربوط دانسته‌اند. چودهاری^۶ و همکاران نشان دادند با افزایش

در سال‌های گذشته استفاده از فلز آلومینیوم در زمینه‌های مختلف صنعتی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این امر به جهت محاسن این فلز، از جمله وزن سبک، دانسیته‌ی پایین و مقاومت مطلوب آن در برابر عوامل خوردگی می‌باشد [۱،۲]. اما این فلز دارای سختی و مقاومت مطلوب در برابر سایش نبوده و سطح آن اغلب به هنگام قرارگیری در مجاورت سطوح دیگر می‌تواند دچار آسیب‌های جدی شود [۳،۴]. جهت برطرف کردن نواقص یاد شده، از روش‌های مختلفی به منظور بهبود خواص سطحی استفاده می‌شود. از جمله این روش‌ها می‌توان به پلاسما اسپری^۱ [۵]، رسوب فیزیکی بخار^۲ [۶]، رسوب شیمیایی بخار^۳ [۷] و تخلیه‌ی قوس^۴ [۸] اشاره کرد. هر یک از روش‌های ذکر شده خود دارای نقاط قوت و ضعف می‌باشند. به‌عنوان مثال روش پلاسما اسپری از نظر اقتصادی، مقرون به صرفه بوده و دارای سرعت بالا می‌باشد اما به دلیل فرآیند انجام سریع در آن، احتمال به وجود آمدن ترک بر روی سطح فلز وجود دارد [۹]. با توجه به مطالب ذکر شده، و با توجه به قوت و ضعف هر یک از روش‌ها امروزه تحقیقات بسیاری جهت معرفی روش‌های جایگزین صورت گرفته که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به فرآیند آندایزینگ اشاره کرد. این روش از ۹۰ سال پیش تاکنون جهت حفاظت آلیاژهای آلومینیوم در برابر خوردگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در فرآیند آندایزینگ به دلیل تمایل زیاد فلزات به اکسید شدن در مجاورت اکسیژن، یک لایه اکسید فلز روی سطح تشکیل می‌گردد. تشکیل این لایه

1. plasma Spray

2. Physical vapor decomposition

3. Chemical vapor decomposition

4. Micro arc oxidation

5. Aerts

1. Chaudhary

برای انجام فرآیند آندایزینگ، نمونه‌ها به مدت ۱ دقیقه در حمام حاوی ۳۰ درصد اسید نیتریک دیسماته شدند. پس از انجام مراحل فوق، فرآیند آندایزینگ به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۰°C و در حمامی حاوی محلول اسیدسولفوریک ۱۶۵ گرم بر لیتر انجام شد. دلیل انتخاب این حمام کاربرد گستره آن در صنعت می‌باشد. فرآیند آندایزینگ در ولتاژهای ۲۰، ۲۷ و ۳۵ ولت انجام شد. در این فرآیند، زیرلایه‌ها به‌عنوان آند در نظر گرفته شدند و کاتدی از جنس فولاد زنگ‌نزن در فاصله ۵ سانتی‌متر از آند قرار داده شد.

مشخصه‌یابی پوشش

به منظور بررسی تحولات فازی پوشش‌ها، آزمون پراش اشعه ایکس با زاویه کم روی سطح پوشش‌ها انجام شد. این آزمون با استفاده از دستگاه PANalytical-XPert PROMpd و با اشعه $Cu K\alpha$ ($1/\lambda 405 A^\circ$) در محدوده ۸۰-۱۰ درجه انجام شد. مورفولوژی سطح و آنالیز شیمیایی سطح پوشش‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Philips XL30 SERIES مجهز به طیف‌سنجی تفکیک انرژی اشعه ایکس مورد مطالعه قرار گرفت.

اندازه‌گیری ریزسختی، ضخامت و زبری سطح پوشش‌ها

ریزسختی پوشش‌ها با استفاده از دستگاه ریزسختی‌سنج Wilson مدل ۴۲۰MVD و با نیروی ۵۰ گرم اندازه‌گیری شد. ریزسختی‌سنجی روی هر نمونه ۵ بار انجام شده و میانگین آن‌ها به‌عنوان ریزسختی پوشش‌ها گزارش شد. ضخامت پوشش‌ها با استفاده از دستگاه ضخامت‌سنج پرتابل جریان گردابی مدل CEMDT-156 و با استفاده از تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح مقطع پوشش‌ها اندازه‌گیری شد. هم‌چنین زبری‌سنجی سطح

ولتاژ آندایزینگ آلومینیوم خالص در محلول اگزالیک اسید خواص چسبندگی و مقاومت در برابر سایش پوشش بهبود یافته است [۱۹]. بنابراین با توجه به پرکاربرد بودن فلز آلومینیوم در صنایع مختلف و از طرفی نبود تعداد زیادی از مطالعات بر روی خواص پوشش آندایزینگ آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ در محدوده ولتاژ ۲۰ تا ۴۰ ولت و دمای پایین، در این مطالعه سعی شد پوشش اکسید آلومینیوم آندی حاصل از آندایزینگ سخت آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ در حمام اسیدسولفوریک ۱۶۵ گرم بر لیتر و ولتاژهای متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته و رفتار تریبولژیکی و چسبندگی آن مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش تحقیق

آماده‌سازی زیرلایه و فرآیند آندایزینگ

در این پژوهش از زیرلایه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ با قطر ۵ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شد. آنالیز شیمیایی زیرلایه مورد استفاده با استفاده از دستگاه کوانتومتر مدل ARUN 2500 اندازه‌گیری شده و در جدول ۱ گزارش شده است. به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها برای فرآیند آندایزینگ، زیرلایه‌ها با استفاده از سنباده ۸۰ تا ۵۰۰۰ سنباده‌زنی شده و با استفاده از پودر آلومینای ۱ میکرونی پولیش شدند. سپس جهت حذف آلودگی‌های سطحی و چربی‌زدایی سطح زیرلایه، نمونه‌ها به مدت ۳ دقیقه در حمام حاوی ۵۰ g/l سود در دمای ۵۰°C قرار گرفتند. آلودگی‌های سطحی موجود در سطح نمونه‌ها می‌تواند باعث کاهش چسبندگی پوشش‌ها بشود [۲۰]. بنابراین، شستشوی نمونه‌ها در حمام حاوی سود و چربی‌زدایی ناشی از آن می‌تواند به بهبود کیفیت پوشش‌ها کمک ویژه‌ای کند. در ادامه به منظور فعال‌سازی سطح زیرلایه‌ها

راستا مشاهدات میکروسکوپی الکترونی روبشی اطلاعات کاربردی و عملی مناسبی جهت مقایسه چسبندگی نمونه‌های مختلف ارائه می‌کند [۲۱].

پس از انجام آزمون چسبندگی با روش فوق، چسبندگی پوشش‌ها بر اساس استاندارد VDI ۳۱۹۸ مطابق با کلاس بندی نشان داده شده در شکل ۲ مقایسه می‌شود.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ مورد استفاده در این

پژوهش

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
۰٫۳۹	۰٫۴۱	۰٫۱	۰٫۸۱	۴٫۹۱	۰٫۲۱	۰٫۱۵	۰٫۲	بقیه

نتایج و بحث

ریزساختار پوشش‌ها

الگوهای پراش اشعه ایکس با زاویه کم از نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای ۲۰، ۲۷ و ۳۵ ولت در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل نشان داده شده است، یک تپه پهن در محدوده بین ۲۰ تا ۳۰ درجه وجود دارد. این تپه نشان دهنده تشکیل پوشش با فاز آمورف می‌باشد. تشکیل پوشش آلومینای آمورف در پوشش‌های اکسیدی حاصل از آندایزینگ آلیاژهای آلومینیوم توسط سایر محققین نیز گزارش شده است [۲۳ و ۲۴]. علاوه بر این، همانطور که مشاهده می‌شود الگوهای پراش اشعه ایکس برای هر سه نمونه مورد مطالعه مشابه بوده و ولتاژ در فرآیند آندایزینگ تاثیری بر ماهیت ساختار نداشته و در هر سه نمونه پوشش اکسید آلومینیوم آمورف تشکیل شده است. گزارش شده است که ولتاژ در فرآیند آندایزینگ تنها باعث تغییر در ضخامت و تخلخل پوشش شده و بر ساختار کریستالی آن تاثیری نمی‌گذارد [۲۵].

پوشش‌ها با استفاده از دستگاه زبری سنج Mitotoyo انجام شد.

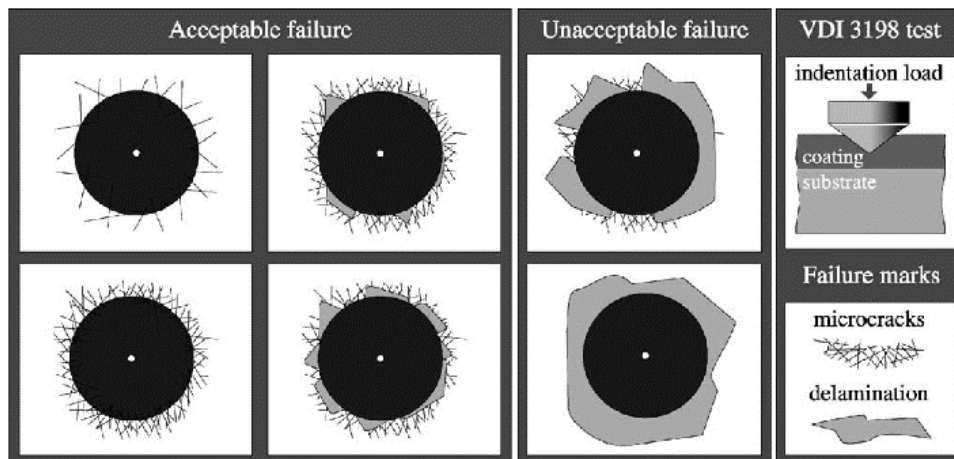
بررسی رفتار تریبولوژیکی

به منظور ارزیابی رفتار سایشی نمونه‌ها آزمون سایش با استفاده از دستگاه سایش پین روی دیسک ساخت ایران انجام شد. پس از انجام آزمون بارپذیری، آزمون اصلی با بارهای ۲، ۴ و ۶ کیلوگرم انجام شد. آزمون سایش با استفاده از پین فولادی AISI ۵۲۱۰۰ انجام شد. سرعت خطی حرکت پین سایش برابر با ۰/۱ m/s در نظر گرفته شد. میزان کاهش وزن و تغییرات ضریب اصطکاک برای نمونه‌های آندایز شده در مسافت ۱۰۰۰ متر اندازه‌گیری شد. در نمونه‌ی زیرلایه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به دلیل مقاومت به سایش خیلی ضعیف آن، امکان انجام آزمون تا مسافت ۱۰۰۰ متر نبوده و این آزمون برای زیرلایه در بار اعمالی ۲ کیلوگرم با مسافت ۳۰ متر و در بارهای ۴ و ۶ کیلوگرم با مسافت ۱۰ متر انجام شد. حین انجام آزمون سایش بر روی زیرلایه، تخریب شدید سطحی مانع ادامه انجام آزمون می‌شد. به همین دلیل جهت مقایسه بهتر میزان کاهش وزن نمونه‌های مختلف، از رابطه ۱ برای محاسبه نرخ کاهش وزن استفاده شد.

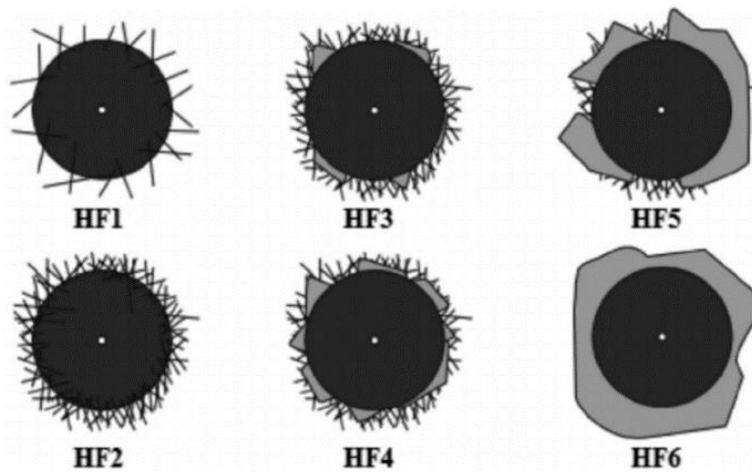
$$(1) \quad \text{نرخ کاهش وزن} = \frac{1000 * \text{میزان کاهش وزن بر حسب میلی گرم}}{\text{مسافت سایش حسب بر متر}}$$

آزمون چسبندگی

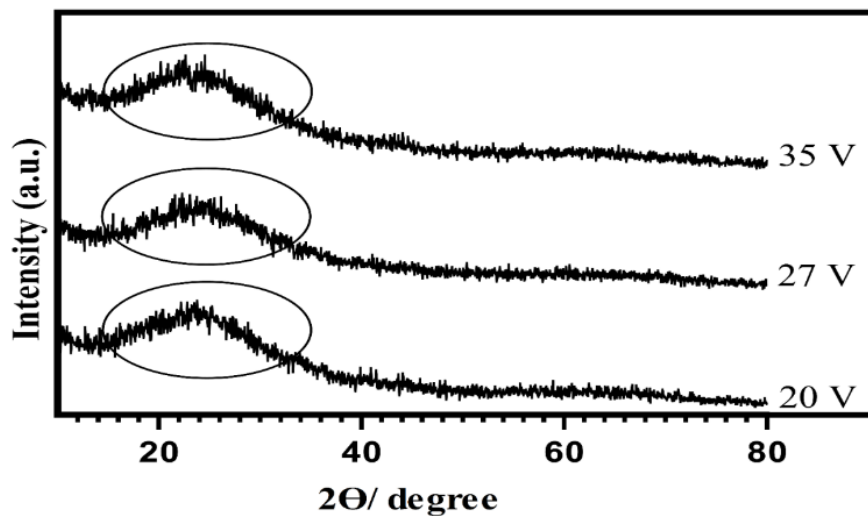
بررسی چسبندگی پوشش‌ها بر اساس استاندارد ۳۱۹۸ VDI و با ایجاد نقطه اثر فرورونده راکول C با استفاده از دستگاه آزمون سختی سنجی راکول مدل کوپا ساخت ایران انجام شد. در این راستا، پس از ایجاد نقطه اثر در بارهای ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ کیلوگرم، تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نقاط اثر فرورونده تهیه شده و با کلاس بندی استاندارد VDI ۳۱۹۸ مقایسه شد. حالت‌های محتمل برای پوشش پس از ایجاد نقطه اثر و همچنین نحوه‌ی انجام آن در شکل ۱ نشان داده شده است. در این



شکل ۱. اصول انجام آزمون فروروندگی VDI ۳۱۹۸ و حالت‌های محتمل برای پوشش [۲۱].



شکل ۲. کلاس‌بندی چسبندگی پوشش مطابق با استاندارد VDI ۳۱۹۸ [۲۲].

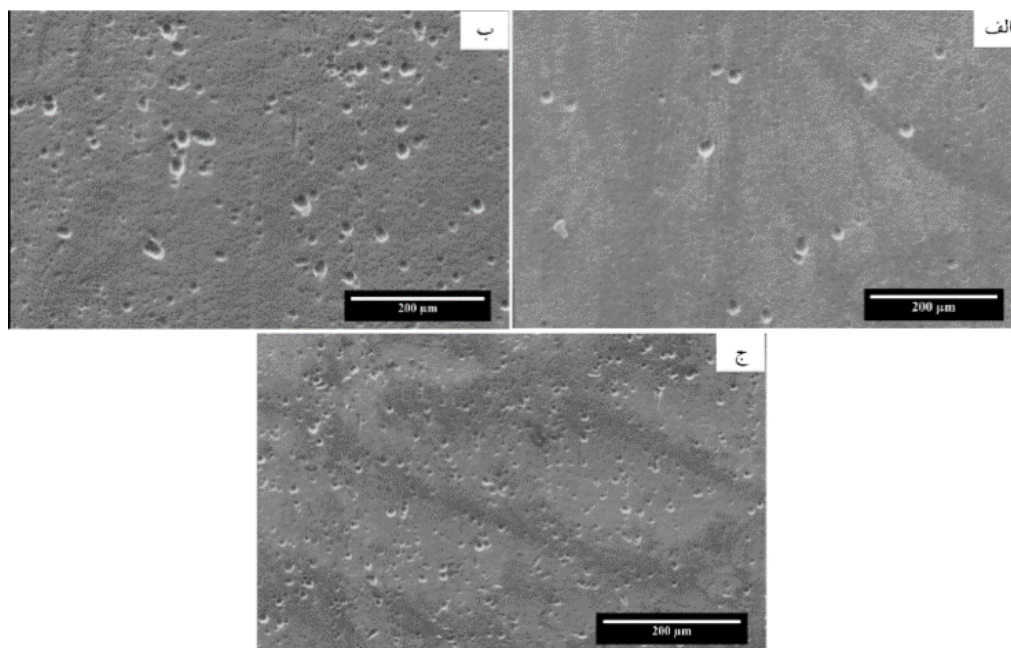


شکل ۳. الگوهای پراش اشعه ایکس با زاویه کم از پوشش‌های اکسید آلومینیوم آندی ایجاد شده در ولتاژهای مختلف.

سطح پوشش‌ها ایجاد می‌شوند [۲۶]. شکل، اندازه و توزیع حفرات در سطح پوشش اکسید آلومینیوم آندی به پارامترهای فرآیند آندایزینگ بستگی دارد. در رابطه با تاثیر ولتاژ فرآیند آندایزینگ بر ساختار پوشش اکسید آلومینیوم آندی، همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش ولتاژ آندایزینگ، تخلخل‌ها بزرگتر و نامنظم‌تر شده‌اند. در واقع با افزایش ولتاژ به دلیل بیشتر شدن میدان الکتریکی، نرخ انحلال لایه اکسیدی بیشتر شده و باعث بزرگتر و نامنظم‌تر شدن این تخلخل‌ها می‌شود. افزایش تعداد و ابعاد تخلخل‌ها با افزایش ولتاژ در فرآیند آندایزینگ توسط سایر محققین نیز گزارش شده است [۲۶ و ۲۷].

جهت ارزیابی مورفولوژی سطح پوشش‌ها، تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح این پوشش‌ها گرفته شد که در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پوشش‌های اکسیدی ایجاد شده روی سطح آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ متخلخل می‌باشند. تشکیل پوشش آمورف متخلخل از مشخصه‌های اصلی این نوع پوشش‌ها می‌باشد.

تشکیل این تخلخل‌ها در سطح نمونه‌ها به دلیل واکنش‌های الکتروشیمیایی ناشی از فرآیند آندایزینگ می‌باشد. در واقع این تخلخل‌ها به دلیل انحلال اکسید آلومینیوم در حضور میدان الکتریکی حین انجام واکنش‌های الکتروشیمیایی در



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح پوشش‌های اکسید آلومینیوم آندی ایجاد شده در ولتاژهای الف) ۲۰ ولت، ب) ۲۷ ولت و ج) ۳۵ ولت.

است. عناصر اکسیژن و آلومینیوم موجود در سطح پوشش بیانگر تشکیل پوشش اکسید آلومینیوم بر روی سطح آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ می‌باشد. منیزیم به‌عنوان یکی از عناصر آلیاژی زیرلایه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ در پوشش اکسیدی

به منظور بررسی ترکیب شیمیایی پوشش‌های اکسید آلومینیوم آندی ایجاد شده در ولتاژهای مختلف، آنالیز طیف‌سنجی تفکیک انرژی اشعه ایکس بر روی سطح نمونه‌ها انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ گزارش شده

مشاهده شده و حضور گوگرد به دلیل به دام افتادن یون - های سولفات، حین انجام فرآیند آندایزینگ در الکترولیت

جدول ۲. نتایج آنالیز طیفسنجی تفکیک انرژی اشعه ایکس (درصد وزنی) سطح پوشش های اکسید آلومینیوم آندی ایجاد شده در ولتاژهای مختلف

	Mg	S	O	Al	
۲۰ ولت	۱٫۷	۵٫۵	۵۴٫۸	۳۸	
۲۷ ولت	۲	۶٫۸	۴۸٫۲	۴۳	
۳۵ ولت	۱٫۹	۵٫۴	۵۳٫۹	۳۸٫۸	

پیوسته و حفرات موجود در سطح پوشش اکسیدی رشد قابل توجهی پیدا کنند [۲۶].

جدول ۳. نتایج ریزسختی سنجی و زبری سنجی نمونه های آندایز شده

در ولتاژهای مختلف.

۳۵ ولت	۲۷ ولت	۲۰ ولت	
۴۹۲	۳۷۳	۲۹۶	ریز سختی (ویکرز)
۱٫۶۱۱	۱٫۱۸۹	۰٫۸۵۴	زبری (میکرومتر)
۹۳	۶۹	۳۷	ضخامت (میکرومتر)

زبری سطح یکی از مهم ترین پارامترهای تریبوسیستم بوده و تاثیر قابل توجهی بر رفتار تریبولوژیکی مواد دارد. بنابراین اندازه گیری و در صورت امکان بهینه سازی زبری متوسط سطح می تواند باعث بهبود رفتار سایشی مواد شود. علاوه بر این پوشش اکسید آلومینیوم آندی متخلخل، دارای سختی بالایی بوده و تغییر شکل پلاستیک آن محدود می - باشد و تغییر شکل این پوشش عمدتاً به صورت الاستیک می باشد. به همین دلیل می توان گفت که حین بارگذاری روی این پوشش ها، زبری می تواند تاثیر ویژه ای در توزیع تنش های اعمالی بر روی پوشش و زیرلایه داشته باشد. در واقع زبری سطح نشان دهنده اندازه و توزیع پستی و بلندی های موجود در سطوح می باشد که بر اصطکاک بین سطوح نیز تاثیر زیادی خواهد داشت. بنابراین زبری متوسط سطح یکی از مهم ترین پارامترهای موثر بر خواص این پوشش ها می باشد.

ریزسختی، زبری و ضخامت پوشش ها

نتایج اندازه گیری ریزسختی، زبری سطح و ضخامت پوشش ها در جدول ۳ گزارش شده است. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش ولتاژ فرآیند آندایزینگ سختی پوشش اکسیدی حاصله افزایش یافته است و بیشترین سختی (۴۹۲ ویکرز) در پوشش ایجاد شده با ولتاژ ۳۵ ولت حاصل شده است. لازم به ذکر است که در این پژوهش تاثیر زمان فرآیند آندایزینگ بر ریزسختی پوشش هم مورد بررسی قرار گرفت. زیرا ریزسختی یکی از مهم ترین پارامترهای موثر بر رفتار سایشی پوشش می باشد و دستیابی به ریزسختی بهینه می تواند تاثیر قابل توجهی در بهبود رفتار سایشی پوشش داشته باشد. نتایج اندازه گیری سختی در نمونه های با زمان های آندایزینگ متفاوت (۱۵ تا ۱۲۰ دقیقه) نشان داد که در نمونه با زمان آندایزینگ ۶۰ دقیقه مقدار سختی بیشینه بوده است. کاهش سختی پوشش اکسیدی حاصل از فرآیند آندایزینگ در نمونه های با زمان آندایزینگ بیشتر از ۶۰ دقیقه با نتایج سایر پژوهش ها همسو می باشد [۲۶-۲۸]. دلیل کاهش سختی با افزایش بیش از حد زمان انجام فرآیند آندایزینگ، رشد قابل توجه حفرات با افزایش زمان انجام فرآیند آندایزینگ می باشد. حضور نمونه به مدت طولانی تر در میدان الکتریکی می - تواند موجب شود که تخلخل های موجود در سطح به هم

ارزیابی چسبندگی پوشش‌ها

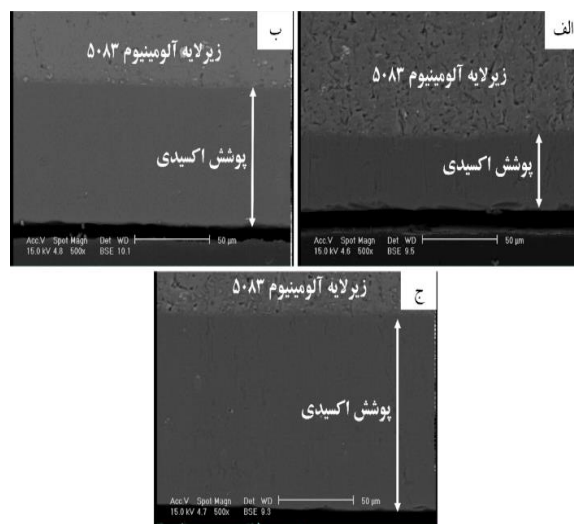
چسبندگی یکی از فاکتورهای مهم تاثیرگذار بر کیفیت پوشش می‌باشد. همانطور که بیان شد با استفاده از فرورونده مخروط الماسی در روش سختی‌سنجی راکول C می‌توان چسبندگی پوشش‌ها را به صورت کیفی ارزیابی کرد. سختی، ضخامت و میزان تخلخل پوشش از پارامترهای موثر بر چسبندگی پوشش می‌باشند [۲۱].

در روش ارزیابی چسبندگی پوشش بر اساس استاندارد VDI ۳۱۹۸، نوع تخریب سطحی ایجاد شده توسط فرورونده راکول C و همچنین میزان آن در ناحیه تخریب می‌تواند نشان‌دهنده چسبندگی و تردی پوشش باشد. در اثر تماس فرورونده با سطح پوشش، تنش‌های برشی شدیدی در فصل مشترک بوجود می‌آید. پوشش‌های با چسبندگی بالا در برابر این تنش‌های برشی مقاومت می‌کنند و ورقه‌ای شدن پوشش اتفاق نمی‌افتد. در صورتی که نقطه اثر مشابه با چهار تصویر سمت چپ شکل ۱ باشد، پیوند فصل مشترکی با استحکام بالایی بین پوشش و زیرلایه وجود دارد. ورقه‌ای شدن گسترده در همسایگی نقطه اثر نشان‌دهنده چسبندگی ضعیف در فصل مشترک پوشش و زیرلایه می‌باشد. لازم به ذکر است که ترک‌های شعاعی و ورقه‌ای شدن علاوه بر چسبندگی قوی، نشان‌دهنده ترد بودن پوشش است. مولفه‌ی برشی تانسور تنش در بارگذاری ایجاد شده روی سطح پوشش می‌تواند منجر به ورقه‌ای شدن میکروسکوپی یا ماکروسکوپی در پوشش شود [۲۱]. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، تخریب شدید ایجاد شده به دلیل تغییر شکل پلاستیک شدید در همسایگی نقطه اثر نشان‌دهنده چسبندگی ضعیف پوشش بوده و قابل قبول نمی‌باشد.

تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی بعد از ایجاد نقطه اثر راکول C روی سطح پوشش‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مطابق با استاندارد VDI ۳۱۹۸ میزان تغییر شکل ایجاد شده و ترک‌های

نتایج اندازه‌گیری زبری متوسط سطح پوشش (جدول ۲) نشان‌دهنده افزایش زبری سطح با افزایش ولتاژ آندایزینگ می‌باشد. این افزایش زبری با افزایش ولتاژ آندایزینگ به دلیل تغییرات در مورفولوژی سطح پوشش می‌باشد. همانطور که در بخش ریزساختار گفته شد، افزایش ولتاژ فرآیند آندایزینگ باعث افزایش تخلخل در سطح پوشش می‌شود. بنابراین با افزایش ولتاژ، پستی‌ها و بلندی‌های موجود در سطح افزایش یافته و زبری سطح افزایش پیدا می‌کند.

نتایج اندازه‌گیری ضخامت پوشش‌ها با استفاده از ضخامت - سنج پرتابل و با استفاده از تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح مقطع پوشش‌ها (شکل ۵) مشابه بود. همانطور که از جدول ۲ و شکل ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش ولتاژ ضخامت پوشش افزایش یافته است که به دلیل بیشتر شدن نرخ انحلال زیرلایه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ با افزایش ولتاژ می‌باشد. در واقع با افزایش ولتاژ میدان الکتریکی بیشتر می‌شود و این افزایش میدان الکتریکی منجر به بیشتر شدن نرخ انحلال زیرلایه می‌شود [۲۶].



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح مقطع

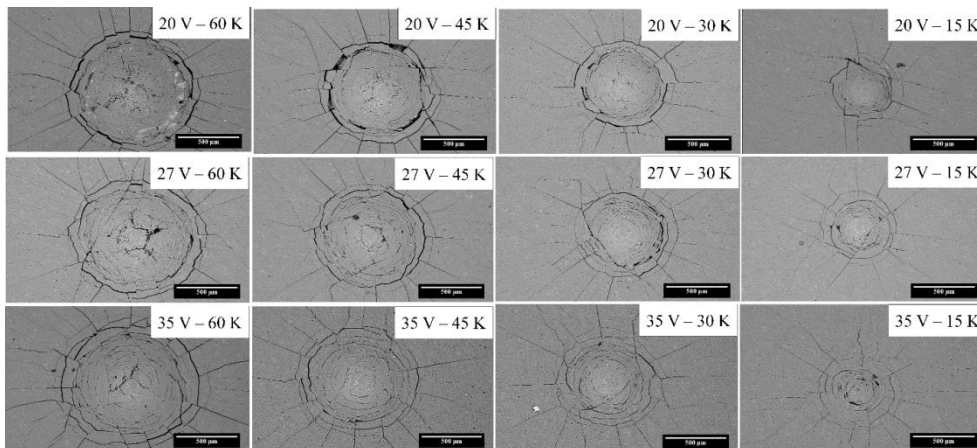
پوشش‌های اکسید آلومینیوم آندی ایجاد شده در ولتاژهای الف) ۲۰ ولت، ب) ۲۷ ولت و ج) ۳۵ ولت.

پوشش در محل نقطه اثر فرورونده و اطراف آن در نمونه با ولتاژ آندایزینگ ۲۰ ولت بیشتر بوده است. کمتر بودن ضخامت و سختی در نمونه با ولتاژ ۲۰ ولت دلیل ضعیف‌تر بودن چسبندگی این نمونه در مقایسه با سایر نمونه‌ها می‌باشد. با مقایسه ترک‌های تشکیل شده در اطراف نقطه اثر و ترک‌های شعاعی در محل نقطه اثر می‌توان گفت چسبندگی نمونه‌های با ولتاژ آندایزینگ ۲۷ و ۳۵ ولت تقریباً مشابه بوده است. در رابطه با این مشاهدات می‌توان گفت که در نمونه با ولتاژ آندایزینگ ۳۵ ولت، اثر مثبت افزایش سختی و ضخامت با افزایش ولتاژ توسط افزایش میزان تخلخل سطح خنثی شده و افزایش ولتاژ تاثیر چندانی بر بهبود چسبندگی نسبت به نمونه با ولتاژ آندایزینگ ۲۷ ولت نداشته است.

در رابطه با تاثیر بار اعمالی در آزمون چسبندگی، همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش بار میزان تخریب سطح نمونه‌ها افزایش پیدا کرده، نقطه اثر فرورونده بزرگتر شده و تعداد و اندازه ترک‌های طولی و شعاعی افزایش پیدا کرده است. افزایش تنش فشاری وارد بر پوشش با افزایش بار عامل چنین رفتاری می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان گفت که پوشش‌های آندایزینگ ایجاد شده بر روی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ در ولتاژهای ۲۰، ۲۷ و ۳۵ ولت که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند، در بارهای ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ کیلوگرم مقاومت به چسبندگی مناسبی را از خود نشان می‌دهند و بنابراین می‌توان بارپذیری و خواص تریبولوژیکی مناسبی نیز از این پوشش‌ها انتظار داشت.

تشکیل شده در اطراف نقطه اثر قابل قبول بوده است و مشابه با حالت HF1 و HF2 نشان داده شده در شکل ۱ می‌باشد. علاوه بر این هیچ گونه اثری از تغییر شکل پلاستیک شدید و ورقه‌ای شدن دایره‌ای شکل ناشی از آن در نواحی اطراف نقطه اثر مشاهده نمی‌شود. لذا می‌توان گفت چسبندگی پوشش‌های ایجاد شده مناسب بوده است. تشکیل قابل توجه ترک‌های شعاعی در سطح پوشش‌ها و در محل نقطه اثر به دلیل ماهیت ترد پوشش سرامیکی اکسید آلومینیوم می‌باشد. تنها تفاوت نقاط اثر ایجاد شده بر روی پوشش‌های اکسیدی در مقایسه با کلاس‌بندی نشان داده شده در شکل ۲، همین ترک‌های شعاعی تشکیل شده در محل نقاط اثر می‌باشد. تشکیل این ترک‌های شعاعی در سطح پوشش‌ها می‌تواند منجر به جدا شدن پوشش به صورت ورقه‌ای شود. جدا شدن ورقه‌ای ذرات از پوشش پس از اعمال بار در نمونه پوشش اکسید آلومینیوم آندی ایجاد شده با ولتاژ آندایزینگ ۲۰ ولت و تحت بارهای اعمالی ۴۵ و ۶۰ کیلوگرم به‌وضوح قابل مشاهده می‌باشد.

به‌طور کلی ضخامت پوشش به‌عنوان یکی از پارامترهای موثر بر چسبندگی پوشش گزارش شده است. ولی همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش ضخامت پوشش ناشی از افزایش ولتاژ تاثیر کمی بر میزان چسبندگی در نمونه‌های مختلف پوشش آندایزینگ ایجاد شده بر روی زیرلایه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ داشته است. این موضوع می‌تواند به دلیل ترد بودن و ماهیت سرامیکی این پوشش‌ها باشد. البته همانطور که مشاهده می‌شود تخریب سطح



شکل ۶: تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نقطه اثر فرورونده راکول C بر روی پوشش‌های اکسید آلومینیوم آندی ایجاد شده در ولتاژهای ۲۰، ۲۷ و ۳۵ ولت و تحت بارهای ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ کیلوگرم جهت ارزیابی کیفی چسبندگی پوشش‌ها.

زیرلایه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ شده است. ایجاد لایه مقاوم آلومینا با سختی بالا روی سطح نمونه‌ها باعث بهبود مقاومت به سایش در اثر انجام فرآیند آندایزینگ شده است. علاوه بر سختی، همانطور که بیان شد چسبندگی پوشش یکی از مهم‌ترین پارامترهای موثر بر رفتار سایشی می‌باشد و با توجه به چسبندگی مناسب پوشش اکسید آلومینیوم آندی بر روی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳، بهبود قابل توجه مقاومت به سایش این آلیاژ پس از انجام فرآیند آندایزینگ قابل توجیه است. با مقایسه مقادیر کاهش وزن می‌توان گفت که مقاومت به سایش نمونه‌های آندایز شده در ولتاژهای مختلف با هم اختلاف قابل توجهی نداشته است. هر چند که در بین نمونه‌های مختلف بالاترین بهبود مقاومت به سایش مربوط به آلومینیوم آندایز شده در ولتاژ ۲۷ ولت می‌باشد. دلیل این موضوع بهینه بودن پارامترهای زبری، سختی، ضخامت و چسبندگی پوشش در نمونه با ولتاژ آندایزینگ ۲۷ ولت می‌باشد. سختی و ضخامت بالاتر و چسبندگی بهتر نمونه با ولتاژ آندایزینگ ۲۷ ولت در مقایسه با نمونه با ولتاژ آندایزینگ ۲۰ ولت می‌تواند دلیل بهتر بودن مقاومت به سایش آن باشد. در مقایسه با نمونه با

ارزیابی خواص تریبولوژیکی پوشش‌ها

در این پژوهش، به منظور بررسی تاثیر پوشش آندایزینگ و افزایش ولتاژ اعمالی بر رفتار تریبولوژیکی، میزان کاهش وزن نسبت به مسافت آزمون سایش در بارهای ۲، ۴ و ۶ کیلوگرم پس از آزمون سایش بر روی نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ بدون پوشش و با پوشش آندایزینگ در سه ولتاژ اعمالی، با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شده و در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: نرخ کاهش وزن نمونه‌های مختلف پس از آزمون سایش بر

$$\text{حسب } \frac{mg \cdot 1000}{m} \text{ در بارهای اعمالی ۲، ۴ و ۶ کیلوگرم}$$

ولتاژ آندایزینگ بار اعمالی	ولت ۲۰	ولت ۲۷	ولت ۳۵	زیرلایه
۲ کیلوگرم	۱٫۶	۱٫۷	۵٫۶	۱۳۰
۴ کیلوگرم	۲٫۲	۱٫۹	۲٫۲	۲۰۷
۶ کیلوگرم	۱٫۹	۰٫۸	۲٫۳	۳۲۷

همانطور که از نتایج جدول ۴ مشاهده می‌شود، انجام فرآیند آندایزینگ در هر سه نمونه موجب بهبود قابل توجه (حداقل بیش از ۲۰ برابر) مقاومت به سایش در مقایسه با

در مقابل پوشش‌های اکسیدی ایجاد شده بر روی آلیاژهای آلومینیوم بارپذیری بالایی ایجاد می‌کنند. نتایج و مشاهدات مربوط به بررسی چسبندگی و رفتار تریبولوژیکی پوشش‌های آندایز نشان‌دهنده ظرفیت بارپذیری بالای پوشش‌های اکسید آلومینیوم آندی می‌باشد.

جهت بررسی مکانیزم غالب سایش، تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطوح سایش و ذرات سایشی پس از انجام آزمون سایش در بار ۴ کیلوگرم در شکل ۷ و شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان تخریب سطح در نمونه‌های آندایز شده بسیار کم بوده است که نشان‌دهنده مقاومت به سایش بالای پوشش آندایز می‌باشد. جدا شدن ماده از سطح فقط در نقاط محدودی از سطح صورت گرفته است. با مقایسه سطوح سایش نمونه‌های آندایز شده، مشاهده می‌شود که میزان تخریب سطح در نمونه با ولتاژ آندایزینگ ۲۰ ولت بیشتر از دو نمونه دیگر بوده است که دلیل آن می‌تواند سختی پایین‌تر این نمونه باشد. عدم شکست کامل پوشش و تخریب کم آن تایید کننده ظرفیت بارپذیری بالای این پوشش‌ها می‌باشد. با توجه به ماهیت ترد پوشش آندایزینگ، شکست ترد پوشش می‌تواند عامل تخریب سطح در اثر سایش باشد. اما همانطور که مشاهده می‌شود، تخریب سطح پوشش تحت بار ۴ کیلوگرم به صورت موضعی اتفاق افتاده است.

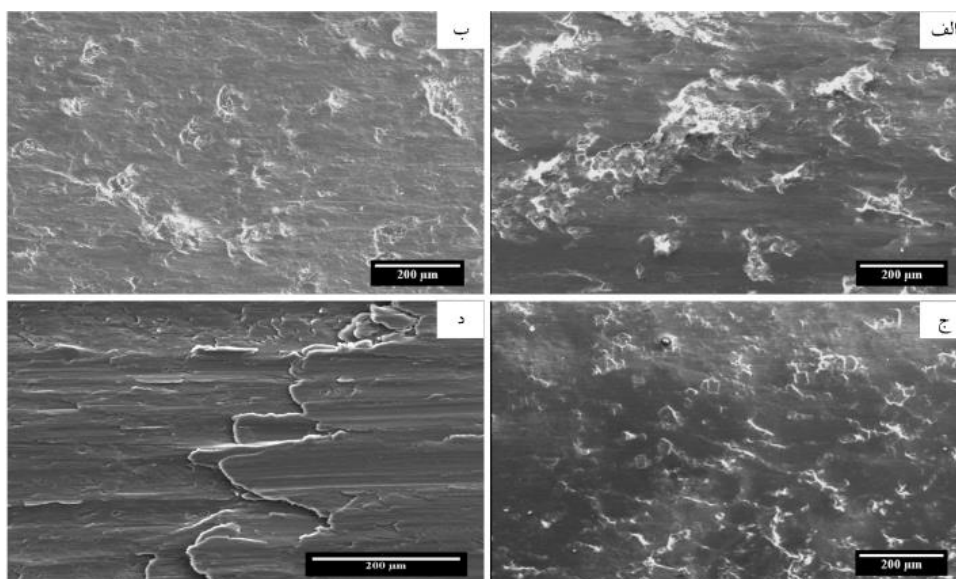
در سطح سایش نمونه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ (شکل ۷-د) شیارهای موازی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده غالب بودن سایش خراشان می‌باشد. اختلاف قابل توجه در سختی جسم ساینده (پین فولادی AISI ۵۲۱۰۰) و زیرلایه آلومینیومی دلیل رخ دادن سایش با این مکانیزم می‌باشد.

ولتاژ آندایزینگ ۳۵ ولت، زبری متوسط و تخلخل نمونه با ولتاژ آندایزینگ ۲۷ ولت کمتر بوده که می‌تواند دلیل بهتر بودن مقاومت به سایش آن باشد. در واقع با افزایش زبری سطح در نمونه با ولتاژ آندایزینگ ۳۵ ولت، درگیری‌های مکانیکی بین جسم ساینده و زیرلایه بیشتر شده که این موضوع می‌تواند منجر به افزایش نرخ کاهش وزن شود.

لازم به ذکر است که تغییر بار اعمالی آزمون سایش تاثیر قابل توجهی بر نرخ کاهش وزن نمونه‌های آندایز شده نداشته است. این موضوع نشان‌دهنده قابلیت تحمل بار بالای پوشش آندایز اعمال شده بر روی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ می‌باشد. در زیرلایه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳، افزایش بار اعمالی آزمون سایش منجر افزایش قابل ملاحظه میزان کاهش وزن شده است و افت مقاومت به سایش با افزایش بار اعمالی در نمونه زیرلایه قابل ملاحظه می‌باشد. پوشش‌هایی مانند CrN و TiN که با روش‌های رسوب فیزیکی بخار و رسوب شیمیایی بخار بر روی زیرلایه‌های فلزی ایجاد می‌شوند، ضخامت کمی داشته و بارپذیری آن‌ها کم می‌باشد. به همین دلیل پوشش‌های ایجاد شده با این دو روش در شرایطی که تحت بارهای مکانیکی قرار می‌گیرند، زیرلایه دچار تغییر فرم الاستیک و پلاستیک شده و خواص تریبولوژیکی ضعیفی ارائه می‌کنند. از طرفی در صورتی که این پوشش‌ها با ضخامت‌های بیشتر از ۱۰ میکرون بر روی سطح ایجاد شوند، تنش‌های پسماند شدیدی در پوشش ایجاد می‌شود که چسبندگی پوشش‌ها را کاهش می‌دهد. ایجاد تنش‌های پسماند ناشی از فرآیندهای پوشش‌دهی رسوب فیزیکی بخار و رسوب شیمیایی بخار در فلزات با سختی و استحکام پایین مانند آلومینیوم شدیدتر می‌باشد.

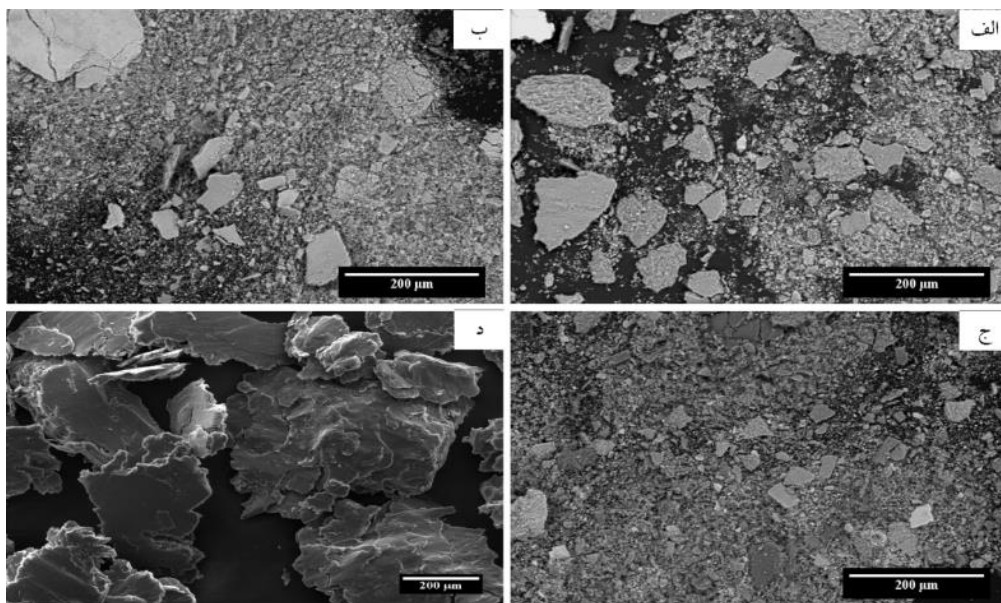
همانطور که از تصاویر ذرات سایشی نمونه‌های آندایز شده (شکل ۸) مشاهده می‌شود، ذرات سایشی در این نمونه‌ها بسیار ریز می‌باشند. دلیل این موضوع سختی بالای این پوشش و مقاومت به سایش مناسب آن می‌باشد. در واقع نیروی مورد نیاز برای جدا شدن ذرات از سطح زیاد بوده و امکان جدا شدن ذرات با ابعاد بزرگ وجود ندارد. در مقابل ذرات سایشی زیرلایه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به صورت ورقه - ای و بسیار بزرگ می‌باشند که به دلیل سختی پایین این آلیاژ می‌باشد. این موضوع تایید کننده اتفاق افتادن سایش ورقه‌ای در آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ می‌باشد.

علاوه بر این، با توجه به سطح سایش می‌توان تشخیص داد که جدا شدن ذرات از سطح به صورت ورقه‌ای بوده است. بنابراین، مکانیزم سایش در نمونه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ ترکیبی از سایش خراشان و سایش ورقه‌ای بوده است. لازم به ذکر است که میزان تخریب سطح در زیرلایه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به مقدار قابل توجهی بیشتر از نمونه‌های آندایز شده است. در مقابل در نمونه‌های با پوشش اکسیدی در تماس دو جسم به دلیل سختی بالای پوشش اکسیدی، پین فولادی ساییده شده و پوشش اکسیدی آسیب چندانی ندیده است. قابلیت بالای تحمل بار توسط نمونه‌های آندایز شده حین آزمون سایش بیانگر عمر سایشی بسیار بالای این پوشش‌ها می‌باشد و یک مزیت ویژه برای این پوشش‌ها محسوب می‌شود.



شکل ۷. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح سایش نمونه‌های آندایز شده در ولتاژ الف) ۲۰ ولت، ب) ۲۷ ولت، ج) ۳۵ ولت و د) نمونه

زیرلایه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ پس از انجام آزمون سایش در بار ۴ کیلوگرم.



شکل ۸. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ذرات سایشی مربوط به نمونه‌های آندایز شده در ولتاژ الف) ۲۰ ولت، ب) ۲۷ ولت، ج) ۳۵ ولت و د) نمونه زیرلایه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ پس از انجام آزمون سایش در بار ۴ کیلوگرم.

متوسط ضریب اصطکاک بین نمونه‌های مختلف و بین فولادی تحت بارهای مختلف آزمون سایش در جدول ۶ گزارش شده است. ضریب اصطکاک نمونه‌های آندایز شده در مقایسه با نمونه زیرلایه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ افزایش قابل توجهی نداشته است. این موضوع یک مزیت برای این پوشش‌ها محسوب می‌شود. زیرا با انجام فرآیند آندایزینگ، با وجود افزایش قابل توجه مقاومت به سایش ضریب اصطکاک افزایش قابل توجهی نداشته است. پیش‌بینی می‌شد که ساختار متخلخل پوشش اکسید آلومینیوم آندی و افزایش زبری متوسط سطح باعث افزایش ضریب اصطکاک شود، اما این افزایش قابل توجه نبوده است. همانطور که در بخش قبل اشاره شد، ذرات آهن از بین فولادی جدا شده و در مسیر سایش قرار می‌گیرند. این ذرات می‌توانند داخل تخلخل‌ها قرار گرفته و نقش روانکار را ایفا کنند.

نتایج آنالیز طیف‌سنجی تفکیک انرژی اشعه ایکس سطوح سایش و ذرات سایشی نمونه‌های مختلف در جدول ۵ نشان داده است. در مقایسه با نتایج آنالیز طیف‌سنجی تفکیک انرژی اشعه ایکس سطح پوشش‌ها (جدول ۲)، در سطح سایش عنصر آهن حضور داشته است. حضور آهن در سطح سایش و ذرات سایشی نشان‌دهنده انتقال ماده از بین فولادی به سطح پوشش آندایز می‌باشد. این مشاهدات ادعای مطرح شده در بخش قبل مبنی بر ساییده شدن بین فولادی را تایید می‌کند. همانطور که بیان شد، دلیل این موضوع سختی بالای پوشش اکسید آلومینیوم آندی می‌باشد. حضور آهن در سطح سایش و انتقال ماده از بین فولادی به سطح پوشش می‌تواند نشان‌دهنده سایش چسبان باشد.

جدول ۵. نتایج آنالیز طیف سنجی تفکیک انرژی اشعه ایکس (درصد وزنی) سطوح سایش و ذرات سایشی پس از انجام آزمون سایش تحت بار ۴

کیلوگرم

عنصر	Al	O	S	Fe	Mg	نمونه
سطح سایش نمونه آندایز شده با ولتاژ ۲۰ ولت	۳۵٫۵	۵۰٫۴	۵	۷٫۱	۱٫۹	
سطح سایش نمونه آندایز شده با ولتاژ ۲۷ ولت	۳۳٫۳	۴۹٫۲	۵٫۱	۱۰٫۶	۱٫۸	
سطح سایش نمونه آندایز شده با ولتاژ ۳۵ ولت	۳۳٫۴	۵۳٫۵	۴٫۹	۶٫۴	۱٫۸	
سطح سایش نمونه زیرلایه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳	۹۶٫۲	۳٫۸	۰	۰	۰	
ذرات سایشی نمونه آندایز شده با ولتاژ ۲۰ ولت	۳۳٫۴	۵۴٫۵	۰	۹٫۸	۲٫۳	
ذرات سایشی نمونه آندایز شده با ولتاژ ۲۷ ولت	۱۵٫۷	۴۳٫۸	۰	۳۹٫۵	۱	
ذرات سایشی نمونه آندایز شده با ولتاژ ۳۵ ولت	۳۰٫۵	۵۰٫۹	۰	۱۵٫۹	۲٫۷	
ذرات سایشی نمونه زیرلایه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳	۹۵٫۷	$\frac{3}{4}$	۰	۰	۰	

۱- مطالعات ریزساختاری نشان داد که پس از انجام فرآیند آندایزینگ در ولتاژهای مختلف، پوشش آلومینای آمورف با ساختار متخلخل بر روی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ تشکیل می‌شود.

۲- نتایج نشان داد که با افزایش ولتاژ فرآیند آندایزینگ، ریزسختی، ضخامت و زبری سطح پوشش اکسیدی ایجاد شده بر روی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ افزایش پیدا می‌کند.

۳- بررسی کیفی چسبندگی پوشش نشان داد که چسبندگی پوشش اکسید آلومینیوم آندی ایجاد شده بر روی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ در ولتاژهای مختلف مناسب می‌باشد.

۴- نتایج آزمون سایش تحت بارهای مختلف نشان‌دهنده بهبود قابل توجه رفتار تریبولوژیکی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ پس از انجام فرآیند آندایزینگ بوده و قابلیت تحمل بار این پوشش‌ها بسیار مناسب می‌باشد.

۵- بررسی‌های میکروسکوپی الکترونی روبشی نشان داد که مکانیزم غالب سایش در زیرلایه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳، سایش خراشان و سایش ورقه‌ای بود که با اعمال فرآیند

بنابراین، پیش‌بینی می‌شود که به دام افتادن ذرات سایشی جدا شده از سطح پین فولادی در تخلخل‌های پوشش اکسید آلومینیوم آندی، از افزایش ضریب اصطکاک جلوگیری کرده است. لازم به ذکر است که ولتاژ آندایزینگ و بار اعمالی آزمون سایش تاثیر قابل توجهی بر ضریب اصطکاک نداشته است.

جدول ۶. متوسط ضریب اصطکاک نمونه‌های مختلف پس از انجام

آزمون سایش در بارهای اعمالی ۲، ۴ و ۶ کیلوگرم

ولتاژ آندایزینگ بار اعمالی	۲۰ ولت	۲۷ ولت	۳۵ ولت	زیرلایه
۲ کیلوگرم	۰/۶۶	۰/۶۷	۰/۶۴	۰/۵۳
۴ کیلوگرم	۰/۵۵	۰/۵۷	۰/۵۶	۰/۴۶
۶ کیلوگرم	۰/۵۷	۰/۵۲	۰/۶۳	۰/۴۴

نتیجه‌گیری

در این پژوهش پوشش اکسید آلومینیوم آندی متخلخل با استفاده از فرآیند آندایزینگ، بر روی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ ایجاد شده و ریزساختار، ریزسختی، چسبندگی و خواص تریبولوژیکی آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

Ti-based implant materials, Ph.D thesis, RMIT university, Australia, (2020).

10. Poinern, Gerrard Eddy Jai, Nurshahidah Ali, and Derek Fawcett. *Progress in nano-engineered anodic aluminum oxide membrane development*, Materials, 4 (2011) 487-526.

11. Xia, Z., L. Riester, B. W. Sheldon, W. A. Curtin, J. Liang, A. Yin, and J. M. Xu. *Mechanical properties of highly ordered nanoporous anodic alumina membranes*, Rev. Adv. Mater. Sci, 6(2004) 131-139.

12. Beri, Rajesh, Manoj Kumar Kushwaha, and Neelkanth Grover. *A review on studies of mechanical properties of anodized alumina oxide*, Int. J. Res. Eng. Technol.4 (2017) 778-782.

13. Lee, Woo, Kathrin Schwirn, Martin Steinhart, Eckhard Pippel, Roland Scholz, and Ulrich Gösele, *Structural engineering of nanoporous anodic aluminium oxide by pulse anodization of aluminium*, Nature nanotechnology,4 (2008) 234-239.

14. Y.Ma, , X. Zhou, Y. Liao, X. Chen, C. Zhang, H. Wu, Z. Wang, W. Huang. *Effect of anodizing parameters on film morphology and corrosion resistance of AA2099 aluminum-lithium alloy*, Journal of The Electrochemical Society, 163 (2016) 369.

15. Lee, S.Jun, S. J. Kim. *Effect of Applied Current Density on Cavitation-Erosion Characteristics for Anodized Al Alloy*, Journal of nanoscience and nanotechnology 18 (2018) 1365-1368.

16. M.V. Paz, Mariana, S. T. Abrahami, T. Hack, Malte Burchardt, and Herman Terryn. *A Review on Anodizing of Aerospace Aluminum Alloys for Corrosion Protection*, *Coatings 10* (2020) 1106.

17. Aerts, Tom, T. Dimogerontakis, I. D. Graeve, J. Fransaer, and H. Terryn. *Influence of the anodizing temperature on the porosity and the mechanical properties of the porous anodic oxide film*, Surface and Coatings Technology, 201(2007) 7310-7317.

[۱۸] الف. سلندری، ق. براتی، م. احتشام زاده، تاثیر دانسیته جریان آندایزینگ بر خواص مکانیکی و خوردگی آلیاژ آلومینیوم ۶۱، نشریه علمی - پژوهشی علوم و مهندسی خوردگی، ۷(۱۳۹۶)، ۴۵-۵۴.

19. R. K. Choudhary, P. Mishra, V. Kain, K. Singh, S. Kumar, and J. K. Chakravartty. *Scratch behavior of aluminum anodized in*

آندایزینگ مکانیزم سایش به سایش چسبان و ورقه‌ای تغییر کرد.

مراجع

1. Nam, Jaehyeon, and Jaeyoung Kang. *Effect of anodized coating on friction noise in aluminum*, Journal of Mechanical Science and Technology, 33 (2019) 1545-1554.

2. Bozza, Andrea, Roberto Giovanardi, Tiziano Manfredini, and Paolo Mattioli. *Pulsed current effect on hard anodizing process of 7075-T6 aluminium alloy*. Surface and Coatings Technology, 270 (2015) 139-144.

3. Sheasby, P. G., S. Wernick, and R. Pinner. *Surface treatment and finishing of aluminum and its alloys*, (1987).

4. A.Gawad, A. Soha, M.Walid. Osman, A. M. Fekry. *Characterization and corrosion behavior of anodized aluminum alloys for military industries applications in artificial seawater*. Surfaces and Interfaces, 14 (2019) 314-323.

5. Vetrivendan, E., J. Jayaraj, S. Ningshen, C. Mallika, and U. Kamachi Mudali. *Argon Shrouded Plasma Spraying of Tantalum over Titanium for Corrosion Protection in Fluorinated Nitric Acid Media*, Journal of Thermal Spray Technology, 27 (2018) 512-523.

6. Mehran, Q. M., M. A. Fazal, A. R. Bushroa, and Saeed Rubaiee. *A critical review on physical vapor deposition coatings applied on different engine components*, Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 432 (2018) 158-175.

7. Sun, Wen, Lida Wang, Zhengqing Yang, Sijia Li, Tingting Wu, and Guichang Liu. *Fabrication of polydimethylsiloxane-derived superhydrophobic surface on aluminium via chemical vapour deposition technique for corrosion protection*. Corrosion Science, 128 (2017) 176-185.

8. Cui, Lan-Yue, Shang-Dong Gao, Ping-Ping Li, Rong-Chang Zeng, Fen Zhang, Shuo-Qi Li, and En-Hou Han. *Corrosion resistance of a self-healing micro-arc oxidation/polymethyltrimethoxysilane composite coating on magnesium alloy AZ31*. Corrosion Science, 118 (2017) 84-95.

9. M.M. Qadir, *Nanostructured surface modification for enhanced biocompatibility of*

- oxalic acid: effect of anodizing potential*, Surface and Coatings Technology, 283 (2015)135-147.
20. R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, A. Najafizadeh. *Application of anodizing and CAR processes for manufacturing Al/Al₂O₃ composite*, Materials Science and Engineering: A 527 (2010), 3857-3863.
21. N. Vidakis. A. Antoniadis, and N. Bilalis. *The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds*, Journal of materials processing technology, 143 (2003) 481-485.
22. J. E. O. M. Sánchez, L. Sánchez, W. Ipaz, J.C. Aperador, C. Caicedo, M. Amaya, H. Landaverde, F. E. Beltran, J. Muñoz-Saldaña, and G. Zambrano. *Mechanical, tribological, and electrochemical behavior of Cr1-xAlxN coatings deposited by rf reactive magnetron co-sputtering method*, Applied Surface Science, 256 (2010) 2380-2387.
23. L. U. O Peng, Z. Hai-hui, F. U. Chao-peng, and Ya-fei KUANG. *Preparation of anodic films on 2024 aluminum alloy in boric acid-containing mixed electrolyte*, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 18 (2008), 825-830.
24. H. Saffari, B. Sohrabi, M. R. Noori, H. R. Talesh Bahrami. *Optimal condition for fabricating superhydrophobic Aluminum surfaces with controlled anodizing processes*, Applied Surface Science, 435 (2018) 1322-1328.
25. T.T.Kao, Y.Chung Chang. *Influence of anodization parameters on the volume expansion of anodic aluminum oxide formed in mixed solution of phosphoric and oxalic acids*, Applied surface science, 288 (2014) 654-659.
26. R. Beri, M. K. Kushwaha, N. Grover. *A review on studies of mechanical properties of anodized alumina oxide*, Int. J. Res. Eng. Technol, 4(2017) 778-782.
27. G. Patermarakis. *The origin of nucleation and development of porous nanostructure of anodic alumina films*, Journal of Electroanalytical Chemistry, 635 (2009) 39-50.
28. S.Theohari, C. Kontogeorgou. *Effect of temperature on the anodizing process of aluminum alloy AA 5052*, Applied Surface Science, 284 (2013) 611-618.