



انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران

بررسی طول مدت پوشش دهی و آب بندی پوشش بر روی مقاومت خوردگی پوشش های ایجاد شده به روش PEO بر روی آلومینیم

مسعود عسگری، محمود علی اف خضرای، اشکان دانش مسلک، علیرضا صبور روح اقدم

دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مواد، گروه خوردگی و حفاظت از مواد

چکیده

در این مقاله به بررسی اثر زمان فرآیند پوشش دهی اکسیداسیون پلاسمایی الکترولیتی (PEO) بر روی مورفولوژی و خوردگی لایه اکسیدی ایجاد شده بر روی آلومینیم ۶۰۸۲ و سپس بررسی اثر آب بندی بر روی رفتار خوردگی پرداخته شده است. در این مقاله برای بررسی مورفولوژی و ترکیب لایه اکسیدی از میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیفسنجی اشعه X استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که زمان فرآیند اثر قابل توجهی بر روی لایه اکسیدی دارد و مقاومت به خوردگی لایه اکسیدی را افزایش می دهد. در مقابل آب بندی اثری نداشته و نتوانسته مقاومت به خوردگی را افزایش دهد.

واژه های کلیدی: آلومینیم؛ PEO؛ لایه اکسیدی؛ مقاومت به خوردگی؛ آب بندی.

* E-mail: khazraei@modares.ac.ir

مقدمه

به دلیل ملاحظات اقتصادی و فنی، آلیاژهای آلومینیم به شکل گسترده‌ای دارای اهمیت شده‌اند و به علت خواص عالی، همچون نسبت بالای استحکام به وزن، قابلیت بالای ریخته‌گری و ماشین‌کاری، استفاده‌های بسیار وسیع‌تر در صنایع صورت پذیرفته است [۱]. هرچند که به علت حضور عناصر غیر مقاوم در برابر خوردگی همچون Mg ، Si ، Cu و غیره و وجود عيوب ریزساختاری مانند حفرات، مقاومت خوردگی در این آلیاژها نسبتاً ضعیف می‌باشد [۳]. جهت بهبود مقاومت خوردگی آلیاژهای آلومینیم شیوه‌های مختلفی نظیر توسعه‌ی سامانه‌های آلیاژی جدید، استفاده از ممانعت‌کننده‌ها، استفاده از اصلاح‌کننده‌های سطحی^۱ به منظور تغییر شیمی سطح، ترکیب و خواص سطح آلیاژ صورت پذیرفته است. در این میان و طی چند دهه‌ی اخیر، فرآیندهای آندایز بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۴-۶]. به موازات تلاش‌های بسیار در جهت فرآیندهای آندایز پیشرفته، در دهه‌ی ۷۰ و ۸۰ میلادی در کشور شوروی، امکان ایجاد رسوب اکسیدی بر سطح فلزات مختلف با استفاده از تخلیه‌های الکتریکی سطحی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. روش اکسیداسیون پلاسمایی الکترولیتی (PEO) بر پایه‌ی پلاریزاسیون آندی مواد تحت فرآیند در بک محلول الکترولیت آبی در شرایط تخلیه‌ی پلاسمایی بر سطح آند، استوار می‌باشد. این فرآیند را می‌توان برای فلزاتی چون آلومینیم، تیتانیم، منیزیم و آلیاژهای آنها (فلزات ولو^۲)، به کاربرد. امروزه تمایل رو به افزایشی در زمینه‌ی کاربرد این پوشش‌ها وجود دارد؛ سرعت فرآیند نسبتاً بالا بوده و از لحاظ اقتصادی به صرفه است و این امکان وجود دارد که برای قطعاتی به هر شکل و هراندازه مورد استفاده قرار گیرد [۷]. محصولات فرآیند می‌توانند کاملاً متراکم و سخت باشند. بک ویژگی مهم این پوشش‌ها آن است که لایه‌ی اکسید سخت، از سطح زیرلایه به سمت داخل رشد می‌کند؛ بنابراین، امکان دست‌یابی به پوشش‌هایی با چسبندگی مناسب و همچنین پایداری ابعادی قطعه امکان‌پذیر می‌باشد. برخلاف پوشش‌های فوق سخت امکان دست‌یابی به پوشش‌هایی با ضخامت بیش از $100\ \mu m$ وجود دارد [۸، ۹]. این ویژگی‌ها موجب گسترش کاربرد این پوشش‌ها در زمینه‌های مختلفی چون مقاومت سایشی، مقاومت فرسایشی، مقاومت خوردگی، عایق الکتریکی، حفاظت حرارتی و غیره شده است. با توجه به فرآیند نسبتاً جدید PEO و قابلیت بالای آن در جهت ایجاد پوشش‌هایی با کیفیت بالا و خواص بسیار مطلوب، لزوم انجام پژوهشی در زمینه‌ی آن به شدت احساس می‌شد [۱۰]. پارامترهای زیادی در فرایند اکسیداسیون پلاسمایی الکترولیتی اثرگذار هستند و می‌توان بیان کرد که تقریباً تمامی پارامترهای مؤثر بر فرآیندهای الکترولیز شیمیایی در اینجا نیز صادق می‌باشند. یکی از پارامترهای الکتروشیمیایی که بر روی لایه اکسیدی تأثیر دارند، زمان فرآیند است که ما در این تحقیق به مطالعه این فرآیند می‌پردازیم همچنین از خصوصیات لایه‌های ایجاد شده در این روش تخلخل آن است که ما در این تحقیق به بررسی روش‌های مختلف آب‌بندی این پوشش‌ها پرداخته‌ایم.

مواد و روش تحقیق

در این پژوهش ایجاد لایه‌های اکسیدی به روش اکسیداسیون پلاسمایی الکترولیتی با استفاده از جریان پالسی و درون الکترولیت قلیایی، بر سطح آلومینیم انجام شد. ساختار پوشش و مقاومت به خوردگی این لایه‌ها در محلول متداول کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی و تأثیر چرخه‌ی کار بر این مقاومت مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی‌های خوردگی از روش الکتروشیمیایی پلاریزاسیون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک سود جسته و نتایج به دست آمده، به وسیله‌ی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش، از جنس آلیاژ آلومینیم ۶۰۸۲ اسی می‌باشد که به صورت میله‌های اکستروژ شده با قطر ۲۰ میلی‌متر و بدون هیچ‌گونه عملیات حرارتی تهیه گردید. آماده‌سازی نمونه‌ها توسط سنباده‌زنی و سپس چربی‌گیری انجام گرفت. برای این منظور از کاغذهای سنباده‌ی زبر (۱۰۰) تا نرم (۱۵۰۰) استفاده گردید و محلول الکل ۹۶٪ جهت چربی‌گیری به کار برده شد. کاتد از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و به صورت صفحه‌ی مستطیل شکل با ابعاد 80×50 میلی‌متر

¹ - Surface Modification

² - Valve

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

انتخاب گردید. جهت انجام فرآیند، صرفاً از محلول‌های قلبایی رقیق استفاده گردید. ترکیب تفریسی الکترولیت مورد استفاده در آزمایش‌ها شامل آلومینات سدیم ($NaAlO_2$) به میزان 10 g/L ، کلرید پتاسیم (KOH) به میزان $1/5\text{ g/L}$ بود. pH محلول‌ها در حد $12/5$ و به وسیله pH سنج دیجیتال *Metrohm* مدل ۷۴۴ اندازه‌گیری گردید و با توجه به بررسی‌های قبل و بعد از انجام فرآیند، مشخص گردید که تفاوت pH در حد $0/1$ تا $0/2$ می‌باشد و تقریباً ثابت می‌ماند. برای این منظور سه چرخه‌ی کار 75% ، 50% و 25% در فرکانس جریان اعمالی 10000 هرتز و در مدت‌زمان‌های 5 ، 20 ، 60 و 100 دقیقه در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

۱- اثر زمان پوشش دهی بر ضخامت لایه‌ی *PEO*

در این قسمت اثر زمان بر ضخامت این لایه‌ها بیان می‌شود. برای این منظور چهار زمان 5 ، 20 ، 60 و 100 دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. چگالی جریان به مقدار $0/045$ آمپر بر سانتیمتر مربع تنظیم گردید و چرخه‌ی کاری 25% و فرکانس 10000 هرتز در نظر گرفته شد. با اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی تصاویر مقطع عرضی، برای این زمان‌ها به ترتیب ضخامت‌های تفریسی 4 ، 15 ، 20 و 77 میکرومتر را می‌توان به دست آورد. به منظور حصول اطمینان بیشتر، نتایج برای زمان 60 دقیقه مورد تکرار قرار گرفت. نتایج حاصل در نمودار شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که از نمودار مشاهده می‌شود، افزایش ضخامت با افزایش زمان، در ابتدا دارای شیب تندی می‌باشد و به سرعت افزایش می‌یابد. به مرور از شدت این شیب کاسته شده و به یک حالت نسبتاً پایدار می‌رسد. با استناد بر مکانیسم فرآیند، وقوع چنین حالتی قابل پیش‌بینی می‌باشد. با توجه به ضخیم‌تر شدن لایه‌ی اکسیدی که عایق الکتریکی نیز می‌باشد، مقاومت الکتریکی لایه افزایش می‌یابد و جرقه‌زنی دشوارتر می‌گردد. لذا با کاهش جرقه‌های مفید، نرخ رشد نیز کاهش خواهد یافت. چنین به نظر می‌رسد که اگر زمان انجام فرآیند به مقدار بیشتر میل کند، با ایجاد جرقه‌های تخریبی بر سطح نمونه، ضخامت این لایه سیر نزولی به خود بگیرد. اما نکته‌ی حائز اهمیت در این نمودار، جهش شدید در ضخامت لایه‌ی اکسیدی پس از یک ساعت از آغاز فرآیند تا زمان 100 دقیقه می‌باشد. لی و همکاران نیز اثر مشابهی را به ثبت رساندند [۱۱]. شکل ۲ تصاویری از سطح و مقطع عرضی نمونه‌ها را پس از زمان‌های مشخص شده نشان می‌دهد. در هر یک از این حالات، مورفولوژی سطحی پوشش نیز تحت بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سطح پوشش‌ها شامل تعداد زیادی از محصولات تخلیه‌ی پلاسمایی که به صورت دهانه‌ی آتش‌فشان ظاهر شده‌اند، می‌باشد [۱۲]. در دماها و فشارهای بالای تخلیه‌ی الکتریکی، محصولات فرآیند از طریق کانال‌های تخلیه به سطح قطعه خارج می‌شوند و سپس درون این کانال‌ها و سطح قطعه رسوب می‌کنند. انباشت این محصولات درون کانال‌های تخلیه منجر به کاهش ابعادی این کانال‌ها می‌شود [۱۳]. همان‌طور که در تصویر (الف) مشاهده می‌شود، پس از 5 دقیقه از شروع فرآیند، لایه‌ی اکسیدی در حین تشکیل خود بوده و دهانه‌های آتش‌فشانی در حال شکل‌گیری می‌باشند و ضخامت لایه‌ی *PEO* ایجاد شده بسیار نازک است. پس از 20 دقیقه از آغاز فرآیند، تصویر (ج) نشان‌دهنده‌ی حضور تعداد زیادی از دهانه‌های آتش‌فشانی بر سطح قطعه است که با توجه به مرحله‌ی پرشتاب فرآیند، حضور تعداد زیاد کانال‌های تخلیه طبیعی به نظر می‌رسد. اما در تصویر (ه)، پس از 60 دقیقه، از تراکم دهانه‌های آتش‌فشانی کاسته شده است. به همین ترتیب پس از 100 دقیقه از آغاز فرآیند، این روند ادامه یافته و اکثر این دهانه‌های آتش‌فشانی خاموش شده می‌باشند (تصویر ز). در این حالت ضخامت لایه‌ی اکسیدی ایجاد شده به روش مذکور، بیشینه می‌باشد. دهنوی و همکاران مورفولوژی پوشش را در زمان‌های مختلف بررسی کردند و نتایج یکسانی را به دست آوردند [۱۴].

۲- ترکیب فازی پوشش

آنالیز تفرق اشعه‌ی X از سطح نمونه انجام گرفته و نتیجه‌ی آن در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که از پیک‌ها مشخص است آلومینیوم، اصلی‌ترین فاز تشخیص داده شده می‌باشد. بعد از آن قوی‌ترین پیک‌ها مربوط به فاز $\gamma\text{-}Al_2O_3$ می‌باشد. پس از آن هم

درصد کمی مربوط به وجود فاز $\alpha-Al_2O_3$ است. مهم ترین نکته در این نتایج آن است که آلومینیوم فاز اصلی است درحالی که با توجه به شرایط عملیاتی موجود و تئوری‌های بیان شده، سطح نمونه باید با لایه‌های اکسیدی پوشیده شده باشد. شاید بتوان دلیل این امر را حضور خلل و فرج موجود بر سطح پوشش دانست که سبب نفوذ اشعه‌ی تابیده شده تا عمق زیرلایه‌ی آلومینیومی می‌شود. این استدلال در برخی منابع نیز ذکر گردیده است [۱۵]. از طرف دیگر و به احتمال زیاد، حضور مفادیری از آلومینیوم زیرلایه درون پوشش، می‌تواند به دلیل تشکیل پوششی با کیفیت نامناسب باشد. یعنی هنوز شرایط ایجاد پوششی ابدانال فراهم نمی‌باشد و همین امر دلیل آن است که فناوری ایجاد این پوشش‌ها به‌طور عام گسترش پیدا نکرده است. دهنوی و همکاران در مقاله‌ای دیگر به بررسی ساختار پوشش پرداختند و نتایج این پژوهشگران وجود آلفا آلومینا را بیشتر نمایان می‌کرد [۱۶].

۳- بررسی اثر زمان پوشش دهی بر مقاومت خوردگی پوشش‌های PEO

در این مرحله از کار، پوشش‌های ایجاد شده در چگالی جریان ۰/۰۴۵ آمپر بر سانتیمتر مربع در فرکانس جریان اعمالی ۱۰۰۰۰ هرتز و چرخه‌ی کاری ۲۵٪ برای زمان‌های مختلف پوشش دهی تحت بررسی پتانسیل متحرک قرار گرفته‌اند. زمان‌های پوشش دهی تحت بررسی به ترتیب ۵، ۱۰، ۲۰، ۶۰ و ۱۰۰ دقیقه بوده‌اند. جهت مقایسه‌ی بهتر، نمودار پلاریزاسیون قطعه‌ی بدون پوشش نیز آورده شده است. نتایج آزمایش پس از ۳ ساعت غوطه‌وری در محلول $NaCl$ ۳/۵٪ وزنی در نمودار شکل ۴ و جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به چگالی جریان خوردگی، به‌طور کل می‌توان بیان داشت که در تمامی موارد اعمال پوشش PEO منجر به کاهش جریان خوردگی و لذا افزایش مقاومت قطعه در برابر خوردگی شده است، ولی باید دقت شود که چگالی جریان در پتانسیل خوردگی، تنها یک فاکتور نسبی است و کاهش آن به‌هیچ‌عنوان نمی‌تواند دلیل محکمی بر افزایش مقاومت خوردگی باشد. در این پژوهش رفتار شاخه‌ی آندی به‌عنوان اثر پوشش PEO بر مقاومت خوردگی مدنظر قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هرچه زمان پوشش دهی افزایش یافته است، مقاومت خوردگی بهبود داشته و قطعه بیشتر محافظت شده است. با توجه به تصاویر SEM نشان داده شده در شکل ۱، هرچه زمان عملیات افزایش یابد، ضخامت پوشش نیز بیشتر گردیده است؛ اما باید توجه داشت که این شرط لازم ولی ناکافی جهت افزایش مقاومت خوردگی می‌باشد. مهم ترین دلیلی که بتوان جهت این افزایش بیان داشت، باید متراکم شدن لایه‌ی اکسیدی و کاهش چگالی تخلخل‌ها بر روی سطح پوشش و همچنین بسته شدن کانال‌های تخلیه در عرض ضخامت پوشش باشند. آرونلایان و همکاران نیز رفتار خوردگی پوشش‌های ایجاد شده در زمان‌های مختلف را بررسی کردند و نتایج آن‌ها مشابهت به نتایج ما دارد [۱۷].

اصلی ترین مدل خوردگی برای آلومینیوم در این شرایط، خوردگی حفره دار شدن می‌باشد. مشاهده‌ی نمودار پلاریزاسیون نمونه‌ی بدون پوشش مؤید این مطلب است که سطح قطعه به سرعت تحت تهاجم قرار گرفته و نمودار با شیبی تند به سمت چگالی جریان‌های خوردگی بالا حرکت کرده است. در مورد نمونه‌های پوشش داده شده مشاهده می‌گردد که اولین اثر در تمامی موارد، آن است که شاخه‌ی آندی به سمت چپ کشیده شده، اما به دلیل وجود حفرات، ترک‌ها و سایر عیوب دیگر، پس از حدود ۳۰۰ میلی ولت پلاریزاسیون آندی نسبت به پتانسیل مدار باز (OCP)، این شاخه‌ها دچار شکست شده و به سمت چگالی جریان‌های خوردگی بالا متمایل می‌شوند. البته در این موارد، شیب سیر شاخه‌ی آندی کمتر از نمونه‌ی بدون پوشش می‌باشد. این حالت برای تمامی زمان‌های پوشش دهی اتفاق افتاده است، اما در زمان ۱۰۰ دقیقه پوشش دهی که ضخامتی در حدود ۷۷ میکرون حاصل شده بود این شیب، کمتر دیده می‌شود.

در مورد این پوشش‌ها بحث روئین شدن و ایجاد لایه‌ی روئین را نمی‌توان به صورت گسترده به کاربرد، زیرا با توجه به منحنی‌های به دست آمده، اکثراً یا ناحیه‌ی پسیو دیده نمی‌شود و یا بسیار کوچک است، در حقیقت خود این پوشش‌ها به‌عنوان سدی در برابر خوردگی قرار دارند. تصاویر SEM از سطح مقطع خوردگی این پوشش‌ها، نشانگر وجود حفرات بزرگ بر روی سطح در کنار بافت سطحی پوشش می‌باشد (شکل ۵).

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

گمان بر این است که علاوه بر وجود برخی از کانال‌های تخلیه و خلل و فرج سطحی و ترک‌های حرارتی ایجاد شده که سبب آن می‌شوند که تا حدودی محلول خورنده با سطح قطعه در تماس فرار گیرد، وجود برخی ناخالصی‌ها و ترکیبات دیگر که نسبت به خوردگی ضعیف می‌باشند، منجر به خوردگی شدید در این نواحی و ایجاد این حفرات بزرگ می‌شوند. نتایج *XRD* حضور مفادیری از آلومینیوم زیر لایه را درون پوشش گزارش نموده‌اند، لذا این مناطق در مقایسه با مناطقی که از آلومینا تشکیل یافته‌اند، نسبت به خوردگی ضعیف عمل خواهند کرد.

۴- آب‌بندی

جهت بررسی اثر آب‌بندی حفرات پوشش بر مقاومت خوردگی آن، از سه محیط مختلف که جهت آب‌بندی پوشش‌های آنداپز معمول به کار می‌روند، استفاده گردید. برای این منظور پوشش‌های به دست آمده در چگالی جریان ۰/۰۴۵ آمپر بر سانتیمتر مربع، فرکانس جریان اعمالی ۱۰۰۰۰ هرتز و چرخه کاری ۲۵٪ در مدت زمان عملیات ۶۰ دقیقه تحت مطالعه فرار گرفتند. محیط‌های آب‌بندی استفاده شده عبارتند از آب داغ 90°C به مدت ۱ ساعت، سیلیکات سدیم ۱۰۰ گرم بر لیتر در دمای 90°C و مدت ۱۵ دقیقه و حمام دی‌کرمات سدیم ۵۰ گرم بر لیتر و دمای 90°C به مدت ۱ ساعت. نمودار پلاریزاسیون پتانسیل متحرک آن‌ها در شکل ۶ و نتایج آن در ۲ آورده شده است.

با توجه به نتایج حاصل، به نظر می‌آید که آب‌بندی پوشش‌های *PEO* چندان مفید نبوده و برخلاف فرآیند آنداپزینگ، با توجه به حمام مورد استفاده، آب‌بندی نسبتاً بی‌تأثیر می‌باشد. در مورد دو نمونه‌ی آب‌بندی نقش کوچکی در بهبود مقاومت خوردگی داشته است. حمام دی‌کرمات سدیم منجر به کاهش بیشتر چگالی جریان در پتانسیل خوردگی شده است اما در ادامه رفتاری تقریباً مشابه با نمونه‌ی که آب‌بندی نشده است دارد. حمام آب داغ در ابتدا اثر چندانی نداشته ولی با افزایش پتانسیل، شاخه‌ی آندی را کمی به سمت چپ کشیده است و در بازه‌ی ۲۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌ولت بالاتر از پتانسیل خوردگی، مقاومت را اندکی افزایش داده است. برخلاف این دو، حمام سیلیکات سدیم داغ دارای اثری مضر بوده و نه تنها مقاومت خوردگی را افزایش نداده، بلکه منجر به افزایش میزان خوردگی و خوردگی موضعی سطح قطعه شده است. واکنش‌های آندی ناشی از خورده شدن با تصاعد شدید اکسیژن از درون حفرات همراه است. شکل ۷ تصویر *SEM* از سطح پوشش‌ها قبل و بعد از آب‌بندی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هیچ تفاوت مشتی بر سطح رخ نداده و ساختار ظاهری سطح بدون تغییر باقی مانده است.

نتیجه‌گیری

- ۱ برای پوشش دهی و ادامه‌ی فرآیند در چگالی جریان‌های بالا (مثلاً ۰/۳ آمپر بر سانتیمتر مربع) به علت رشد سریع پوشش عایق، نیاز به منابع قدرت قوی با ولتاژ خروجی بیش از ۶۰۰ ولت (حداقل ۱۰۰۰ ولت) می‌باشد.
- ۲ لایه‌ی ایجاد شده مقاوم به خوردگی می‌باشد ولی در نقاطی که عیوب وجود دارند خوردگی حفره‌ای مشاهده گردید. عیوب مشاهده شده شامل حفرات دهان باز و ترک‌های موجود بر سطح پوشش می‌باشند.
- ۳ با افزایش زمان فرآیند و افزایش ضخامت پوشش و در نتیجه چگال‌تر شدن لایه‌های میانی، مقاومت خوردگی این پوشش‌ها افزایش یافت.
- ۴ آب‌بندی سطح پوشش اثر چندانی بر خواص خوردگی آن نداشته و بهترین محیط جهت آب‌بندی می‌تواند حمام آب داغ باشد.

مراجع

- ۱) Matykina, E., et al., *Plasma electrolytic oxidation of pre-anodized aluminium*. Corrosion Science, 2009. **51**(12): p. 2897-2905.
- ۲) Vargel, C., *Corrosion of aluminium*. 2004: Elsevier.
- ۳) Matykina, E., et al., *Investigation of the mechanism of plasma electrolytic oxidation of aluminium using ^{18}O tracer*. Corrosion Science, 2010. **52**(3): p. 1070-1076.
- ۴) Boinet, M., et al., *Application of acoustic emission technique for in situ study of plasma anodising*. NDT and E International, 2004. **37**(3): p. 213-219.
- ۵) Lampke, T., et al., *Alumina coatings obtained by thermal spraying and plasma anodising - A comparison*. Surface and Coatings Technology, 2011. **206**(7): p. 2012-2016.
- ۶) Shrestha, S. and B.D. Dunn, *Plasma electrolytic oxidation and anodising of aluminium alloys for spacecraft applications*, in *Surface Engineering of Light Alloys: Aluminium, Magnesium and Titanium Alloys*. 2010. p. 603-641.
- ۷) Aliofkhaezrai, M., A.S. Rouhaghdam, and P. Gupta, *Nano-fabrication by cathodic plasma electrolysis*. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2011. **36**(3): p. 174-190.
- ۸) Gheyhani, M., et al., *Effect of SMAT preprocessing on MAO fabricated nanocomposite coating*. Surface Engineering, 2014. **30**(4): p. 244-255.
- ۹) Masiha, H.R., et al., *Effect of surface nanostructuring of aluminum alloy on post plasma electrolytic oxidation*. Applied Surface Science, 2014. **317**: p. 962-969.
- ۱۰) Asquith, D.T., et al., *Effect of combined shot-peening and PEO treatment on fatigue life of 2024 Al alloy*. Thin Solid Films, 2006. **515**(3): p. 1191-1197.
- ۱۱) Lee, D.H., B.S. Kim, and S.Y. Chang, *Characteristics of plasma electrolytic oxide coatings on Mg-Al alloy with coating time*. Korean Journal of Materials Research, 2008. **18**(5): p. 241-246.
- ۱۲) Kim, Y.M., et al., *Surface modification of high Si content Al alloy by plasma electrolytic oxidation*. Journal of Korean Institute of Metals and Materials, 2010. **48**(1): p. 49-56.
- ۱۳) Cui, S., et al., *Study on wear behavior of plasma electrolytic oxidation coatings on aluminum alloy*. Rare Metals, 2006 **۲۵**. SUPPL. 2): p. 141-145.
- ۱۴) Dehnavi, V., et al., *Corrosion properties of plasma electrolytic oxidation coatings on an aluminium alloy - The effect of the PEO process stage*. Materials Chemistry and Physics, 2015. **161**: p. 49-58.
- ۱۵) Wang, L., *Formation and Properties of the PEO Coatings on Al-Si Alloys*, in *Department of Materials Science and Metallurgy*. 2005, Windsor. p. 148.

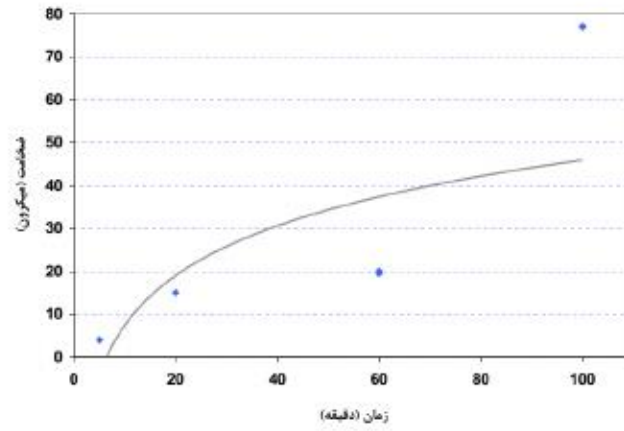
- ۱۶ Dehnavi, V., et al., *Phase transformation in plasma electrolytic oxidation coatings on 6061 aluminum alloy*. Surface and Coatings Technology, 2014. **251**: p. 106-114.
- ۱۷ Arunnellaiappan, T., et al., *Influence of frequency and duty cycle on microstructure of plasma electrolytic oxidized AA7075 and the correlation to its corrosion behavior*. Surface and Coatings Technology, 2015. **28**: p. 136-147.

جدول ۱: نتایج آزمون پتانسیل متحرک در زمان‌های مختلف

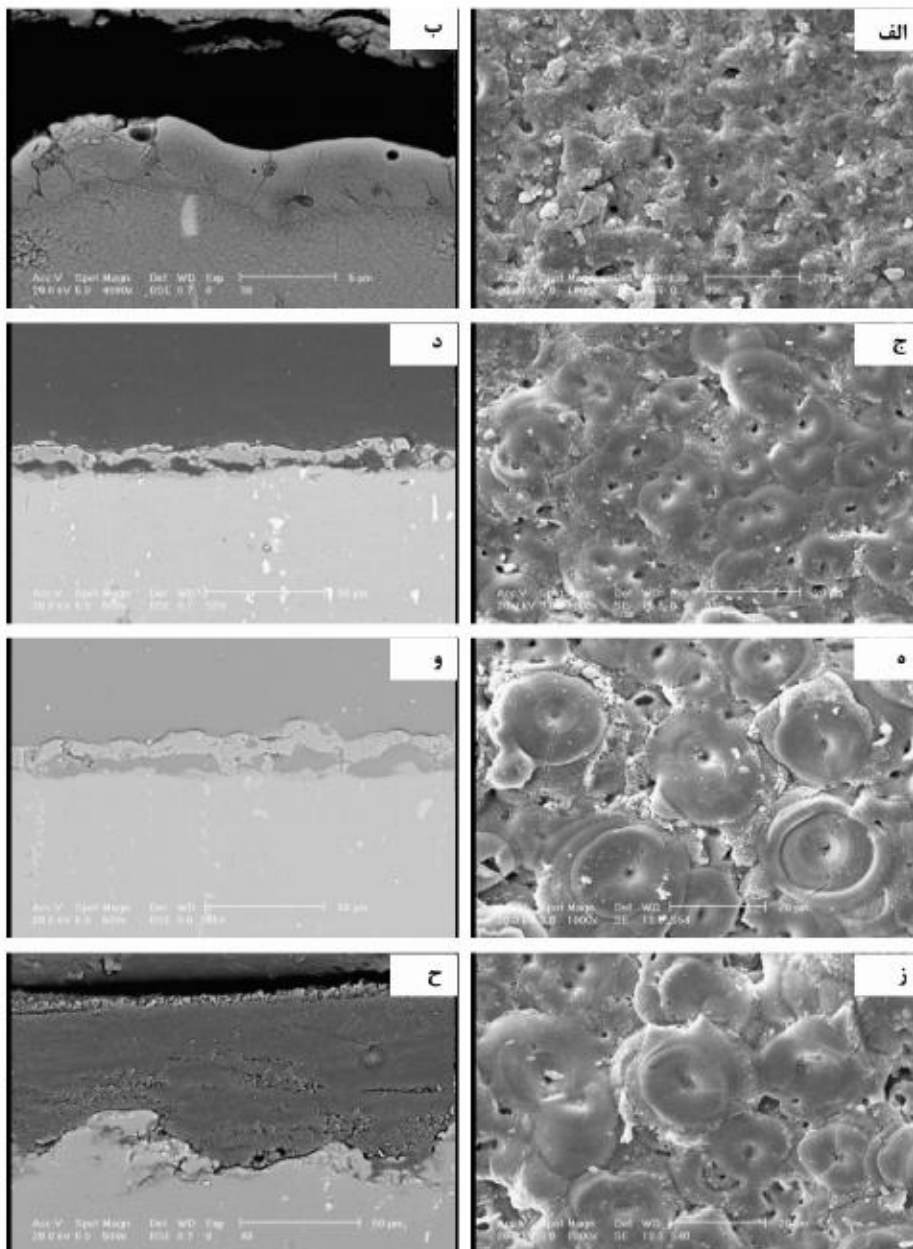
شماره نمونه	زمان پوشش‌دهی (دقیقه)	E_{corr} (mV)	I_{corr} $\times 10^{-7}$ A/cm ²	β_a $\times 10^{-1}$ V/decade	β_c $\times 10^{-1}$ V/decade
۰۰	۰	-۷۳۱/۳	۳۱/۶۲۳	۰/۸۸۰۶	۷/۱۱۸
۰۴	۵	-۷۳۵/۶	۱/۱۴۳	۱/۴۵۸	۶/۸۵۴
۰۵	۱۰	-۷۰۰/۷	۰/۳۶۶	۱/۶۷۱	۱۰/۲۹
۰۶	۲۰	-۷۶۴/۴	۳/۳۵۷	۱/۶۹۶	۴/۸۵۸
۰۷	۶۰	-۷۲۴/۷	۲/۹۷۸	۲/۶۱۶	۸/۴۰۰
۱۱	۱۰۰	-۷۱۰/۶	۱/۰۷۶	۳/۴۳۷	۶/۵۷۶

جدول ۲: نتایج آزمون پتانسیل متحرک نمونه‌های آب‌بندی شده در محیط‌های مختلف

شماره نمونه	محیط آب‌بندی	E_{corr} (mV)	I_{corr} $\times 10^{-7}$ A/cm ²	β_a $\times 10^{-1}$ V/decade	β_c $\times 10^{-1}$ V/decade
۰۰	-	-۷۳۱/۳	۳۱/۶۲۳	۰/۸۸۰۶	۷/۱۱۸
۰۷	-	-۷۲۴/۷	۲/۹۷۸	۲/۶۱۶	۸/۴۰۰
۰۸	آب داغ	-۷۵۵/۵	۰/۵۴۱	۲/۸۳۰	۲/۶۰۴
۰۹	سیلیکات سدیم داغ	-۹۸۹	۲/۱۴۳	۵/۴۵۱	۱/۷۳۶
۱۰	دی‌کرمات سدیم داغ	-۷۰۱/۶	۰/۱۵۸	۱/۷۱۲	۵/۴۱۱

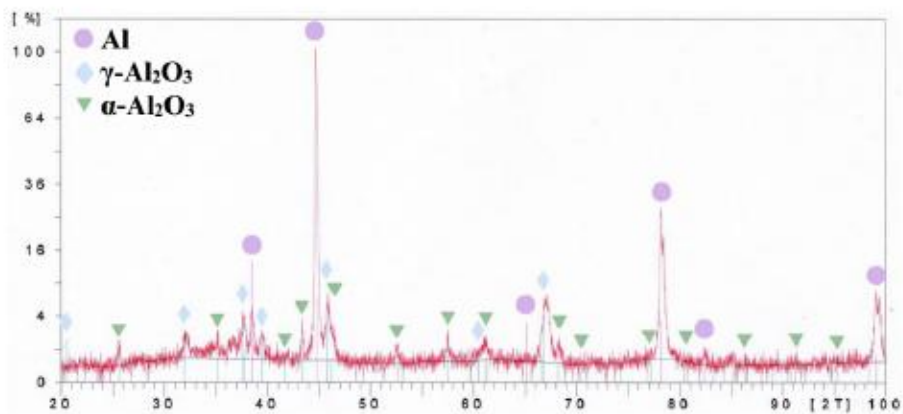


شکل ۱: تغییرات ضخامت پوشش با زمان انجام فرآیند.

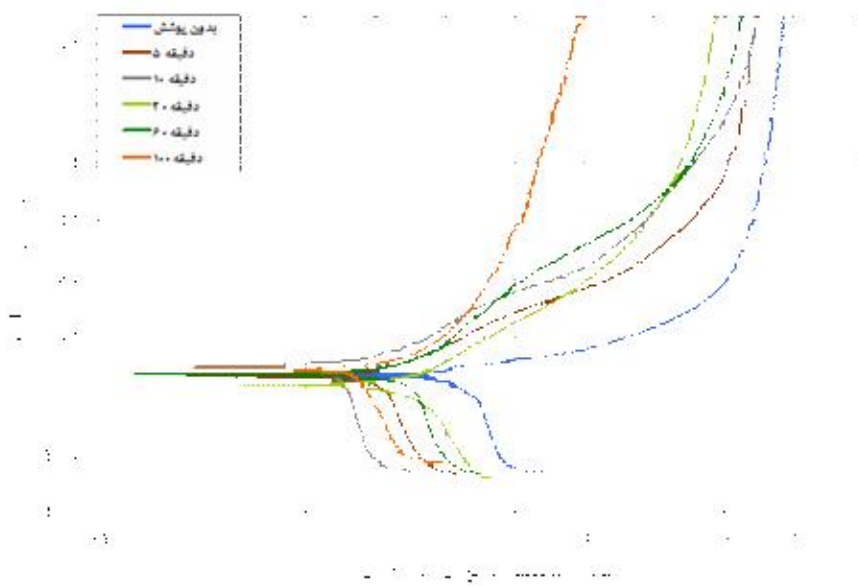


شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

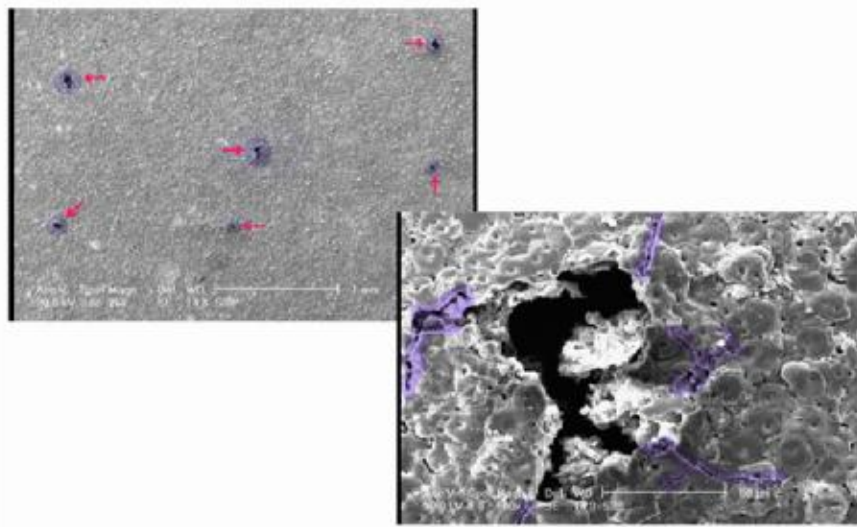
شکل ۲: اثر زمان بر ضخامت و مورفولوژی سطحی پوشش؛ (الف، ب) پس از ۵ دقیقه؛ (ج، د) پس از ۲۰ دقیقه؛ (ه، و) پس از ۶۰ دقیقه و (ز، ح) پس از ۱۰۰ دقیقه از آغاز فرآیند.



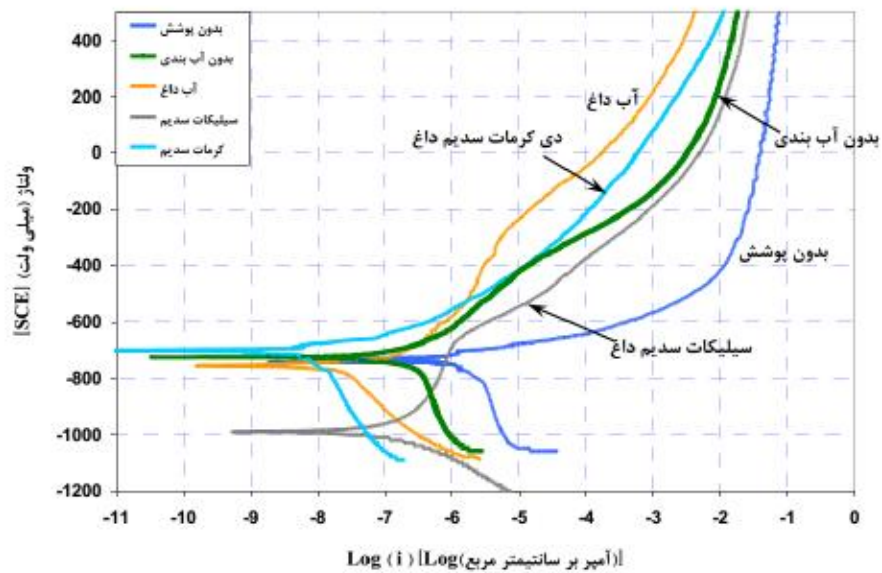
شکل ۳: تصویر XRD از سطح پوشش.



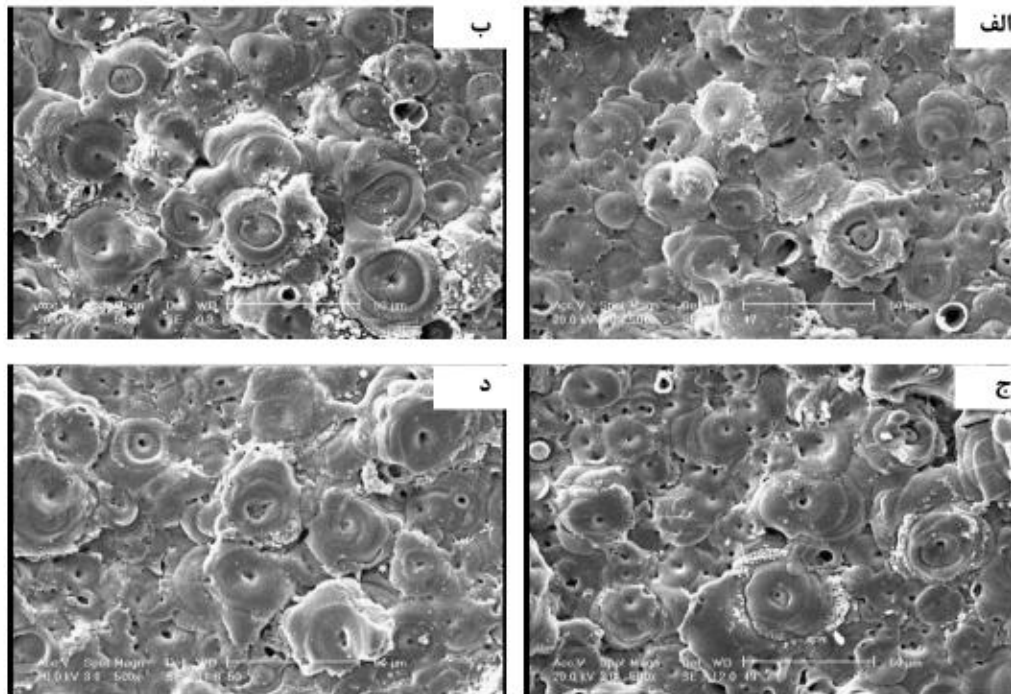
شکل ۴: نمودار پلاریزاسیون پتانسیل متحرک برای نمونه‌های پوشش داده‌شده به روش PEO در زمان‌های مختلف.



شکل ۵: تصویر SEM از سطح پوشش و حفرات ایجاد شده در اثر خوردگی.



شکل ۶: نمودار پلاریزاسیون پتانسیل متحرک برای نمونه‌های پوشش داده شده به روش PEO و آب بندی شده در محیط‌های مختلف.



شکل ۷: تصویر SEM از سطح پوشش (الف) پیش از آب‌بندی؛ (ب) حمام آب داغ؛ (ج) حمام سیلیکات سدیم؛ (د) حمام دی‌کرمات سدیم.