

Research Paper

Investigating the effect of silicon content on structure and corrosion resistance by plasma electrolytic oxidation on aluminum-silicon alloys

Masoud Moshrefifar^{1*}

1. Assistant prof. Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, 8915818411, Yazd, Iran

Received:2024/01/28

Revised:2024/03/19

Accepted:2024/04/04

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.30495/jnm.2024.32998.2029](https://doi.org/10.30495/jnm.2024.32998.2029)

Keywords:

Aluminum-Silicon alloy, Coating, Plasma electrolytic oxidation, Corrosion resistance

Abstract

Introduction: Plasma electrolytic oxidation is a new and upgraded method of anodizing process to improve the corrosion resistance of aluminum alloys by creating a ceramic coating on their surface.

Methods: One of the parameters affecting of PEO process as well as the performance of the prepared coatings is the composition of the substrate. In this study, the effect of increasing the percentage silicon of substrate on the plasma electrolytic oxidation process with bipolar pulse current in a silicate-based electrolytic bath was investigated. Scanning electron microscopy was used to evaluate the morphology and structure of the coating and X-ray diffraction test was used for phase detection. Coating corrosion behavior was evaluated by electrochemical tests after 1 hour immersion in 3.5% NaCl solution with the adjustment of pH 4.

Findings: coatings had a pancake structure with craters with irregular micro-cracks and micro-porosity. Investigations showed that with an increase in the percentage of silicon in the substrate, the thickness and porosity of the coatings decreased, and the volcanic morphology prevailed over the pancake morphology in the growth of the coating. Analysis showed the coatings mainly contain a mixture of γ -Al₂O₃, η -Al₂O₃, δ -Al₂O₃, SiO₂, a small amount of mullite and some amorphous phases. Tafel polarization test revealed, in addition to reducing the corrosion current density up to 9% of the substrate silicon, we have seen an increase in the polarization resistance with the increase in the silicon percentage of the substrate after coating. The electrochemical spectroscopy test revealed that with the increase in the silicon percentage of the substrate, the coating forms a physical barrier against charge transfer substrate and the resistance of the outer layer decreases, but the resistance of the inner layer increases.

Citation: Masoud Moshrefifar, Investigating the effect of silicon content on structure and corrosion resistance by plasma electrolytic oxidation on aluminum-silicon alloys, Quarterly Journal of New Materials. 2023; 14 (53): 21-34.

Corresponding author: Masoud Moshrefifar

Address: Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, 8915818411, Yazd, Iran.

Tell: +989131582881

Email: moshrefifar@yazd.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Today, the transportation industry is looking for fuel-efficient vehicles with low pollution emissions. Therefore, the weight loss parameter has become an effective parameter in automotive design. Recently, aluminum alloys, as one of the light alloys, have been increasingly considered both technically and economically. Due to their good mechanical properties, suitable thermal conductivity, low coefficient of thermal expansion, great castability, and, in particular, high strength-to-weight ratio, cast Al–Si alloys are a promising material used in automobiles, such as engine blocks. Nevertheless, weak corrosion and wear resistance often reduce the lifetime and performance of cast Al–Si alloy parts. Combustion cylinders of reciprocating engines made of aluminum often use steel liners to protect against thermal stress and wear. However, significant studies have been dedicated to improving the wear performance of Al–Si parts via modifying their composition and surface structure. Electrochemical processes have been developed for the surface treatment of automotive components. The anodizing treatment is performed on cast Al–Si alloys with an oxide layer of low thickness and quality due to the presence of a high silicon content and other elements (e.g., Fe and Cu) that may lead to the nonhomogeneity of the components and corrosion attacks in these regions. PEO treatment is a plasma-assisted electrochemical surface process that produces an oxide base ceramic layer on the light alloys that have a higher life in the long term than the other coating. This coating has demonstrated high corrosion resistance, and thermal stability.

Findings and Discussion

The present study evaluates the effect of a substrate's silicon content on the coatings' morphology, structure, and properties in a silicate-based electrolytic bath on Al–xSi alloys and effect of presence of this element on the corrosion resistance behavior of PEO coating was investigated. Characterization of coatings

was done with the help of SEM, X-ray diffraction analysis, energy dispersive spectrometer (EDS) analysis and electrochemical tests.

coatings had a pancake structure with craters with irregular micro-cracks and micro-porosity. Investigations showed that with an increase in the percentage of silicon in the substrate, the thickness and porosity of the coatings decreased, and the volcanic morphology prevailed over the pancake morphology in the growth of the coating. Analysis showed the coatings mainly contain a mixture of γ -Al₂O₃, η -Al₂O₃, δ -Al₂O₃, SiO₂, a small amount of mullite and some amorphous phases. Tafel polarization test revealed a decrease that PEO coatings decreased the corrosion current density up to 9% of silicon in the substrate, and increased the charge-transfer resistance with an increase in the substrate silicon percentage. The electrochemical spectroscopy test revealed that with the increase in the silicon percentage of the substrate, the coating forms a physical barrier against charge transfer substrate and the resistance of the outer layer decreases, but the resistance of the inner layer increases.

Conclusion

The results indicated the coating forms a physical barrier against charge transfer substrate and the resistance of the outer layer decreases, but the resistance of the inner layer increases. The highest corrosion resistance was obtained for coating the 9 percentage of silicon in the substrate.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

This study was carried out in continuation of the previous researches and alone.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Design experiments and perform: Masoud

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

تأثیر درصد سیلیسیوم زیرلایه بر ساختار و رفتار خوردگی پوشش‌های اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیوم

مسعود مشرفی فر*

۱. استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد، ایران

چکیده

مقدمه: اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی یک روش نوین و ارتقاء یافته از فرایند آندایزینگ، برای بهبود مقاومت خوردگی آلیاژهای آلومینیوم از طریق ایجاد یک پوشش سرامیکی بر سطح آن‌ها می‌باشد.

روش: از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر روند این فرایند و عملکرد پوشش‌های حاصل، ترکیب شیمیایی زیرلایه است. در این پژوهش، تأثیر افزایش درصد سیلیسیوم زیرلایه بر ساختار و رفتار خوردگی پوشش‌های اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی با جریان پالسی دو قطبی در یک حمام الکترولیتی پایه سیلیکاتی بررسی شد. جهت بررسی مورفولوژی و ساختار پوشش‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آنالیز طیف نگار تفکیک انرژی پرتو ایکس، برای فازبندی از آنالیز پراش اشعه ایکس استفاده شد. رفتار خوردگی پوشش‌ها، توسط آزمون‌های الکتروشیمیایی پس از یک ساعت غوطه‌وری در محلول ۳/۵ درصد نمک طعام و pH برابر با ۴ ارزیابی شد.

یافته‌ها: نمونه‌های پوشش داده شده، ساختار پنکیکی و دهانه آتشفشانی با میکرو ترک‌ها و میکرو تخلخل‌های نامنظم را نشان دادند. بررسی‌ها نشان داد با افزایش درصد سیلیسیوم زیرلایه، ضخامت و تخلخل پوشش‌ها کاهش پیدا کرد، همچنین مورفولوژی آتشفشانی بر مورفولوژی پنکیکی در رشد پوشش غالب شد. پوشش‌ها عمدتاً حاوی مخلوط $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ، $\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$ ، $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ ، SiO_2 ، مقدار کمی مولایت و برخی از فازهای آمورف هستند. نتایج آزمون پلاریزاسیون تافل نشان داد، علاوه بر کاهش چگالی جریان خوردگی تا ۹ درصد سیلیسیوم زیرلایه، ما شاهد افزایش مقاومت پلاریزاسیون، با افزایش درصد سیلیسیوم زیرلایه پس از پوشش دهی هستیم. آزمون طیف‌سنجی الکتروشیمیایی مشخص نمود که پوشش، سدی فیزیکی در برابر انتقال بار تشکیل می‌دهد.

نتیجه‌گیری: نتایج حاکی از کاهش تخلخل و افزایش مقاومت خوردگی پوشش با افزایش درصد سیلیسیوم زیرلایه بود. پوشش‌های حاصل دولایه بوده و با افزایش درصد سیلیسیوم زیرلایه، مقاومت لایه خارجی کاهش، اما مقاومت لایه داخلی افزایش یافت.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۸

تاریخ داوری: ۱۴۰۲/۱۲/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۶

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.30495/jnm.2024.32998.2029](https://doi.org/10.30495/jnm.2024.32998.2029)

واژه‌های کلیدی:

آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم، پوشش دهی، اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی، رفتار خوردگی.

* نویسنده مسئول: مسعود مشرفی فر

نشانی: دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد، ایران

تلفن: ۰۹۱۳۱۵۸۲۸۸۱

پست الکترونیکی: moshrefifar@yazd.ac.ir

مقدمه

در دهه‌های گذشته، افزایش مصرف مواد و انرژی توسط صنایع، نگرانی‌های گسترده‌ای را در مورد لزوم استفاده بهینه از آن‌ها ایجاد کرده است. از طرفی نیاز به توسعه پایدار، فشارهای زیست‌محیطی را برای بهبود کارایی استفاده از منابع و کاهش تولید ضایعات و انتشار آلاینده‌ها به طور قابل توجهی افزایش داده است. برای برآورده ساختن الزامات پایداری محیط‌زیست، رویکردهای متفاوتی در صنایع مختلف و روش‌های تولید اتخاذ شده است. عوامل زیادی می‌توانند بر میزان مصرف انرژی و میزان تولید گازهای گلخانه‌ای تأثیرگذار باشند. در این میان وزن خودرو و اصطکاک از عوامل اصلی هستند، از این رو کاهش وزن پارامتر اساسی در طراحی خودرو بوده است. امروزه کاربرد آلیاژهای ریختگی آلومینیوم-سیلیسیوم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، قابلیت ریخته‌گری عالی، ضریب انبساط حرارتی پایین، هدایت حرارتی و خواص مکانیکی خوب، قابلیت بازیافت و فراوانی به طور فزاینده در صنایع مختلف از جمله صنعت خودرو (بلوک‌های موتور) در حال افزایش است [۱، ۲]. با این حال، مقاومت در برابر سایش و خوردگی ضعیف، اغلب طول عمر اجزای آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیوم و گستره کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند [۳، ۴]. همواره یک لایه اکسیدی طبیعی روی سطح آلومینیوم شکل می‌گیرد ولی به علت نازکی و غیر یکنواخت بودن نمی‌تواند محافظت خوبی در برابر عوامل مخرب سطحی از خود نشان دهد. مطالعاتی برای تهیه پوشش‌های سرامیکی روی سطح آلیاژهای آلومینیوم توسط اسپری پلاسمای آندایزینگ [۵، ۶]، کروماته و یا حتی رنگ [۳، ۴، ۷] انجام شده است. به تازگی فرایند اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی^۱ به دلیل استفاده از الکترولیت غیر اسیدی و دوست‌دار محیط‌زیست مورد توجه قرار گرفته است [۸]، چرا که الکترولیت‌های مورد استفاده، محلول‌های آبی قلیایی هستند، بعلاوه، در طول فرایند حداقل مقدار بخار و سموم تولید می‌شود. این فرایند به‌طور هم‌زمان ترکیبی از سختی بالا، مقاومت به سایش و مقاومت به خوردگی بالا، استحکام مکانیکی، استحکام چسبندگی زیاد به زیر لایه و مقاومت به شوک حرارتی را برای آلومینیوم و آلیاژهای آن فراهم می‌کند [۹-۱۱]. این فرایند متأثر از پارامترهای الکترولیتی و الکتریکی [۱۲-۱۴]، دما [۸] و زمان اکسیداسیون [۱۵] است، که نه تنها بر روند انجام فرایند، بلکه بر مشخصه‌ها پوشش حاصل شده نیز تأثیر می‌گذارد. از جمله فاکتورهای مؤثر بر فرایند اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی ترکیب شیمیایی زیر لایه می‌باشد [۱۶-۱۹]. امروزه فرایند اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی روی آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیوم اعمال می‌شود [۲۰] ولی با توجه به اکسیداسیون سخت‌تر سیلیسیوم نسبت به آلومینیوم، دستیابی به لایه آندی یکنواخت، به واسطه شکل‌گیری اکسید سیلیسیوم در لایه آلومینای دشوار بوده و منجر به عملکرد ضعیف فیلم آندی می‌شود [۲۰، ۲۱]. این مطالعه به بررسی نقش سیلیسیوم، به عنوان یک عنصر آلیاژی منفرد، در آلیاژهای دو تایی آلومینیوم-سیلیسیوم، برای ارزیابی

عملکرد فرایند PEO متمرکز بود و شامل تجزیه و تحلیل اثر سیلیسیوم بر ساختار و رفتار خوردگی پوشش‌های حاصل می‌باشد.

مواد و روش‌ها

خواص آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیوم تحت تأثیر اصلاح‌سازی ساختار یوتکتیک است. در این تحقیق اصلاح‌سازی ساختار یوتکتیک در حین انجام، با اضافه کردن استرانسیم انجام شد. در نتیجه ساختار درشت و سوزنی شکل سیلیسیوم یوتکتیکی به لایه‌ها، ذرات یا رشته‌های ظریف تبدیل شد. سپس نمونه‌های دیسکی شکل با قطر ۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر از آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیوم با درصد‌های وزنی مختلف سیلیسیوم (۱، ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۱ و ۱۳)، به عنوان زیر لایه‌ی فلزی مورد استفاده شد. نمونه‌ها تا زبری متوسط $R_a=0.07\mu\text{m}$ آماده‌سازی سطحی شدند، سپس به مدت ۳ دقیقه در استون با استفاده از حمام فراصوت، چربی‌زدایی و در نهایت در هوای گرم خشک شدند. این کار به منظور جلوگیری از تأثیر آلودگی سطحی احتمالی نمونه‌ها در آلوده کردن الکترولیت یا تأثیرات نامطلوب در پوشش نهایی انجام شد. لازم به ذکر است که نمونه‌ها بر حسب درصد سیلیسیوم زیر لایه به نام‌های S1، S3، ... و S13 کد گذاری شدند.

جدول ۱- درصد وزنی عناصر آلیاژی موجود در آلیاژهای ریخته‌گری شده به عنوان زیر لایه فرایند پوشش‌دهی

کد نمونه	عناصر (درصد وزنی)		
	آلومینیوم	سیلیسیوم	سایر عناصر
S1	۹۸٫۶۲	۱٫۰۲	۰٫۳۶
S3	۹۶٫۵۰	۲٫۸۶	۰٫۶۴
S5	۹۴٫۴۲	۴٫۷۴	۰٫۸۴
S7	۹۲٫۲۰	۶٫۶۸	۱٫۱۲
S9	۸۹٫۴۷	۹٫۱۱	۱٫۴۲
S11	۸۷٫۳۷	۱۱٫۱	۱٫۵۳
S13	۸۵٫۶۷	۱۲٫۸۷	۱٫۴۶

در این پژوهش فرایند PEO در یک محلول ۱۰ gr/l سیلیکات سدیم به همراه ۲ gr/l هیدروکسید پتاسیم انجام شد. هیدروکسید پتاسیم به منظور اصلاح هدایت الکتریکی و pH محلول استفاده شد. pH محلول ۱۲٫۴۶ و هدایت الکتریکی محلول 18.5 mS/cm^2 تنظیم شدند.

در فرایند پوشش‌دهی، نمونه‌های آلومینیومی آماده‌سازی شده نقش آند و دو ورق فولاد زنگ‌نزن 316 L نقش کاتد را ایفا کردند. دانسیته جریان آندی و کاتدی به ترتیب 10 A/dm^2 و ۸ بود که با استفاده از یک منبع قدرت جریان پالسی (۷۰۰ V و ۳۰ Amp) به همراه یک پالسر طراحی شده بر پایه IGBT^۲ برای پوشش‌دهی نمونه‌ها به کار گرفته شد. نمونه‌ها با استفاده از شکل موج دوقطبی با

^۱- Plasma Electrolytic Oxidation (PEO)

^۲- Isolated Gate Bipolar Transistor

مورفولوژی سطح پوشش‌ها با استفاده از تصاویر میکروسکوپی الکترونی تهیه شده با آشکارگر الکترون‌های بازگشتی^۲ در شکل ۱ نشان داده شده است. تصویر برداری با آشکارساز الکترون‌های برگشتی برای کنتراست فازی به کار می‌رود و برای بررسی پستی‌بلندی نیاز به آشکارساز الکترون‌های ثانویه است. سطح پوشش دارای ساختار پنکیک، کلوخه‌هایی از ترکیبات اکسیدی فوران کرده، میکروحفرات و میکرو ترک‌ها است که معمولاً در پوشش‌های PEO روی آلیاژهای آلومینیوم در الکترولیت مبتنی بر سیلیکات مشاهده می‌شود، وجود تخلخل ناشی از ماهیت ذاتی این فرایند بوده و غیر قابل اجتناب هستند [۲۲، ۲۳]. جالب توجه است، با افزایش درصد سیلیسیوم زیرلایه مورفولوژی شبیه به ساختار پنکیکی نسبت به ساختار آتش‌فشانی افزایش می‌یابد که سبب یکنواختی بیشتر پوشش و زبری کمتر آن می‌شود. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود در پوشش‌های تشکیل شده حفراتی با اندازه‌های مختلف توسط تخلیه پلاسما روی α -Al₂O₃ یوتکتیک ($\alpha+\beta$) و سیلیسیوم اولیه تشکیل و توزیع شد. اندازه حفرات در فاز α -Al بسیار بزرگ‌تر از فاز یوتکتیک و سیلیسیوم اولیه است [۱۷، ۲۴]. انرژی آزاد گیبس اکسیداسیون آلومینیوم ($326.8T - 1687200$) تا نزدیک 75000 درجه کلوین منفی‌تر از انرژی آزاد گیبس اکسیداسیون سیلیسیوم ($907100 + 175T$) است. بنابراین میزان انرژی آزاد مورد نیاز برای اکسیداسیون آلومینیوم کمتر از سیلیسیوم است و نرخ انجام واکنش اکسیداسیون برای بخش غنی از آلومینیوم سریعتر است که سبب افزایش نرخ رشد پوشش بر فاز α -Al می‌شود [۲۳، ۲۵]. لذا با کاهش درصد سیلیسیوم زیرلایه امکان تشکیل پوشش‌های ضخیم‌تری فراهم می‌گردد. از طرفی با افزایش ضخامت، انرژی بیشتری برای عبور جریان از پوشش لازم است، بنابراین باعث افزایش شدت میکروتخلیه و درصد تخلخل بر فاز α -Al می‌شود. از طرف دیگر تشکیل ترکیبات حاوی سیلیسیوم بر نمونه‌های با میزان سیلیسیوم بالا با ترکیب غالب اکسید سیلیسیوم و نسبت پلینگ بدورث بزرگتر این ترکیب (RPB ~ 2.22) در مقایسه با اکسید آلومینیوم (RPB ~ 1.3) سبب زیرتر شدن میکروحفرات و کاهش درصد آن‌ها شده است [۲۴]. لذا با افزایش فاز یوتکتیک، مورفولوژی ریزدانه‌تر و تا حدی متراکم‌تر را روی سطح مشاهده شد. از طرف دیگر حضور عنصر آلیاژی سیلیسیوم در زیرلایه میزان بالا سطح مؤثر برای تشکیل محصولات ناشی از فرایندهای تبدیلی را کاهش می‌دهد [۲۳، ۲۵]، بنابراین سرعت رشد پوشش با افزایش میزان سیلیسیوم زیرلایه کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۲، متوسط ضخامت پوشش‌ها تقریباً به صورت خطی از 29.8 میکرون به 13 میکرومتر کاهش پیدا می‌کند. بنابراین سرعت رشد پوشش با افزایش میزان سیلیسیوم زیرلایه از 1 به 0.43 میکرومتر بر دقیقه کاهش می‌یابد. درصد تخلخل پوشش‌های به دست آمده از فرایند اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح پوشش‌های تولید شده در الکترولیت بر پایه

نسبت جریان آندی به کاتدی $1/25$ و در فرکانس 1 کیلوهرتز پوشش داده شدند. زمان 30 دقیقه برای پوشش‌دهی تمام نمونه‌ها اعمال و سامانه کنترل کننده دما، با اتصال غیر مستقیم به یک سرد کننده کمپرسوری رفت و برگشتی صنعتی حرارت را دفع و الکترولیت را در محدوده دمایی 25 ± 2 °C ثابت نگه داشت. سرانجام، نمونه‌های پوشش‌دهی شده با آب مقطر شسته و در هوای گرم خشک شدند. در ادامه نیز ریزساختار، مورفولوژی سطح و ترکیب شیمیایی نمونه‌های پوشش‌دهی شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل FEI ESEM QUANTA 200) مجهز به طیف‌سنجی پراش انرژی (EDAX EDS Silicon Drift 2017) مورد ارزیابی قرار گرفت. قبل از بررسی‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی، پوشش‌های حاصل با یک لایه نازک از طلا پوشیده شدند. ضخامت پوشش‌های حاصل توسط دستگاه ضخامت‌سنج پرتابیل جریان گردابی (مدل CEM DT-156) و زبری سطح آن‌ها توسط رویه‌نگار سوزنی سطح (مدل MITUTOYO) اندازه‌گیری و مورد ارزیابی قرار گرفتند. ترکیب فازهای تشکیل‌دهنده پوشش و خصوصیات کریستالوگرافی آن‌ها توسط آزمون پراش پرتو ایکس گریزینگ^۱ بررسی گردید. برای انجام آنالیز XRD از دستگاه تفرق‌سنج اشعه ایکس (GIXRD, model ASENWARE AW-XDM300) با استفاده از تابش $K\alpha$ تولید شده از فیلامنت مسی با طول‌موج تابش $\lambda = 0.15406$ نانومتر در پتانسیل 40 کیلوولت و جریان 30 میلی‌آمپر در محدوده زاویه تفرق (2θ) $10-80$ درجه و زمان بر گام 3 ثانیه با زاویه برشی پرتو 10 درجه مورد بررسی قرار گرفت. از نرم‌افزار X'pert Highscore plus با استفاده از پایگاه داده PDF2 جهت تحلیل الگوهای اشعه ایکس و فازیابی استفاده گردید که در مقاله‌ای ارائه شده است. رفتار خوردگی پوشش و زیرلایه در محلول $3/5$ درصد وزنی کلرید سدیم با پی‌اچ 4 ± 0.1 ، توسط آزمون‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و پلاریزاسیون تافل ارزیابی گردید. آزمون‌ها توسط پتانسیواستات AMETEK (مدل PARSTAT 2273) با یک سل سه الکترودی استاندارد انجام گرفتند.

آزمون تافل در محدوده $1300-250$ mV نسبت به پتانسیل مدار باز با نرخ روبش 1 Mv/s صورت پذیرفت. برای اطمینان از نتایج، هر آزمون سه مرتبه تکرار گردید. داده‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در 36 نقطه در محدوده فرکانس 0.1 تا 100000 هرترتز در محدوده $10 \pm$ mV نسبت به پتانسیل مدار باز به دست آمدند و نتایج حاصل با نرم‌افزار Zview تحلیل شد.

نتایج

۱- بررسی ریزساختار زیرلایه‌ها

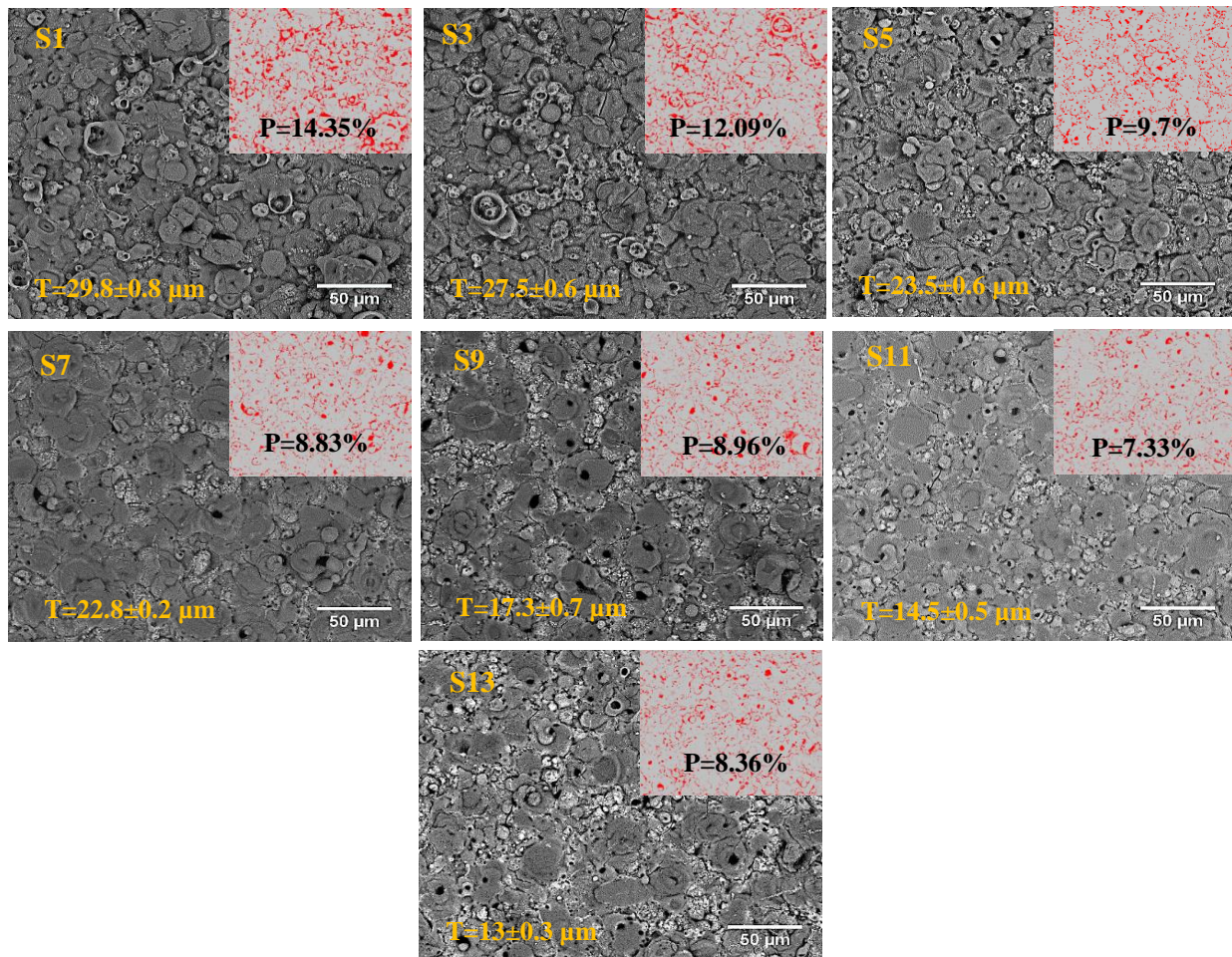
² -Back Scattered Electron

¹ -Grazing Angle X-Ray Diffraction (GAXRD)

شکل ۳ درصد تخلخل اندازه‌گیری شده از تصویر سطح مقطع پوشش با درصد سیلیسیوم زیرلایه ۹٪ را نشان می‌دهد. به طور کلی، افزایش ریز تخلیه‌های نو A (در فصل مشترک اکسید/الکترولیت که باعث شکل‌گیری مورفولوژی دهانه آتشفشانی در سطح پوشش می‌شود) و C (در فصل مشترک اکسید/الکترولیت درون حفرات و ترک‌های پوشش رخ می‌دهد و منجر به تشکیل مورفولوژی کلوخه‌ای می‌شود) و حذف ریز تخلیه‌های قوی درصد تخلخل را کاهش می‌دهد [۲۳].

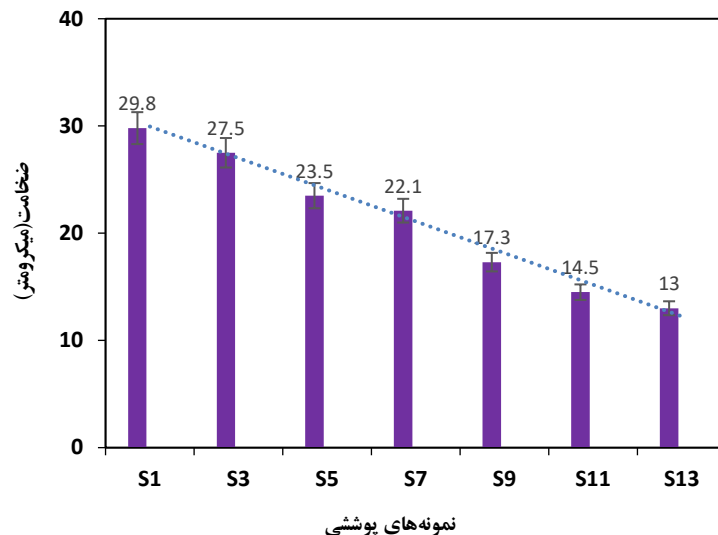
سیلیکات بر روی آلیاژهای مختلف آلومینیوم-سیلیسیوم با استفاده از نرم‌افزار MIP تخمین زده شد که در شکل ۱ ارائه شده است. اساس اندازه‌گیری درصد تخلخل در این نرم‌افزار تضاد در رنگ می‌باشد، بنابراین تخلخل‌ها به‌عنوان یک فاز و پوشش به‌عنوان فاز دوم در نظر گرفته می‌شود، لذا اندازه‌گیری میزان تخلخل و امکان گزارش به صورت درصد وجود دارد.

نتایج نشان داد با افزایش درصد سیلیسیوم زیرلایه، درصد تخلخل به صورت تدریجی کاهش می‌یابد. در تصاویر سطح مقطع پوشش‌ها نیز شواهدی از میکرو حفرات و میکرو ترک‌ها وجود دارد که ناشی از انواع مختلفی از تخلیه‌ها و تنش‌های گرمایی است. به عنوان مثال در



شکل ۱- مورفولوژی سطح پوشش‌های حاصل در الکترولیت سیلیکاتی با درصدهای مختلف سیلیسیوم زیرلایه

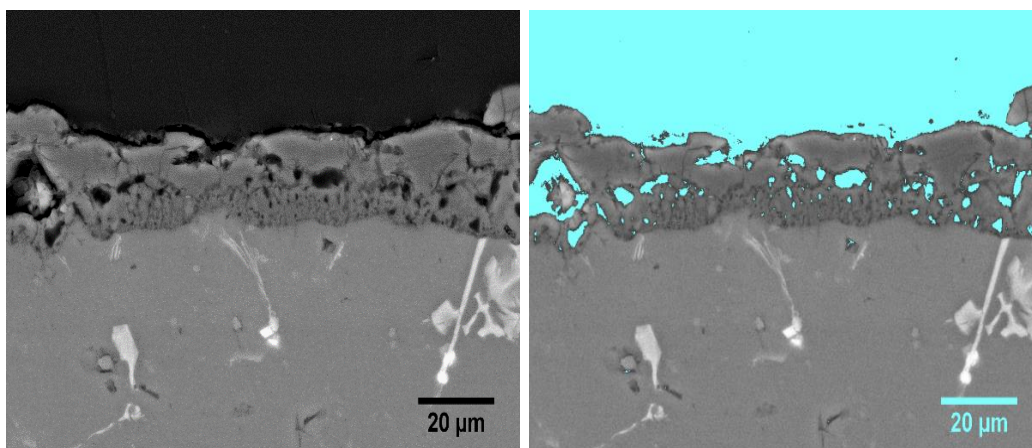
(P: Porosity, T: Thickness)



شکل ۲- متوسط ضخامت پوشش‌های حاصل در الکترولیت سیلیکاتی با درصد‌های مختلف سیلیسیوم زیرلایه

نوع تخلیه در حرقات بزرگ در فصل مشترک لایه داخلی و خارجی رخ می‌دهد) است. لازم به ذکر این‌که، نیم چرخه‌های کاتدی نیز می‌توانند منجر به شکل‌گیری پوشش با تخلخل کمتر شوند [۲۲، ۲۵].

از طرفی، اگرچه ریز منافذ ریز زیادی تشکیل شده است ولی به یکدیگر متصل نیستند و بیشتر در وسط لایه اکسیدی وجود دارند، لذا نوع رایج ریز تخلیه در پوشش‌های تشکیل شده، ریز تخلیه نوع D (این

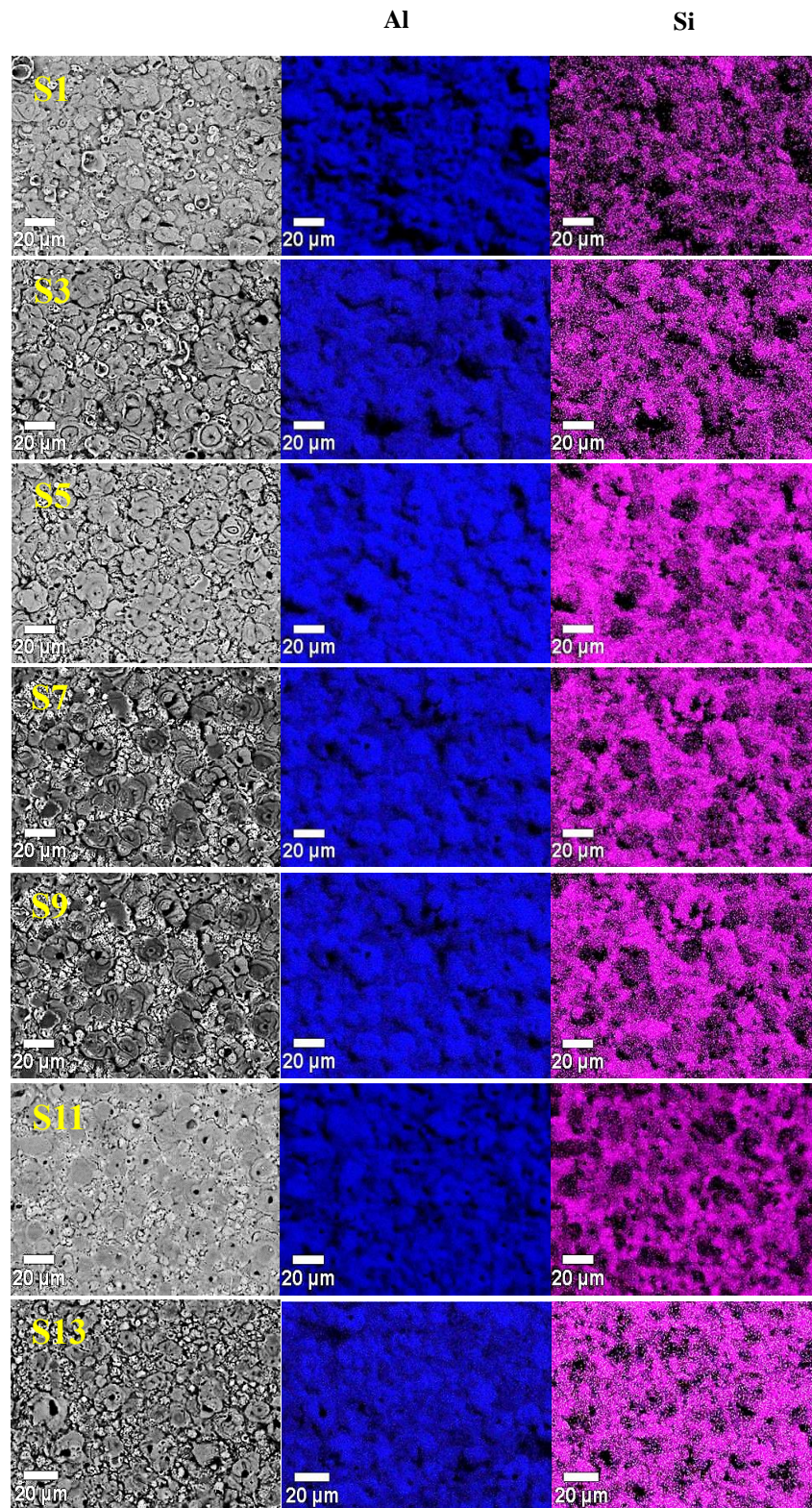


شکل ۳- میزان تخلخل سطح مقطع پوشش با ۹٪ درصد سیلیسیوم زیرلایه

دلیل شکست دی‌الکتریک در یک میدان الکتریکی قوی رخ می‌دهد و سبب تشکیل کانال‌های عمیق مرتبط به زیرلایه و مورفولوژی پنکیکی بر سطح پوشش می‌شود) نشأت گرفته‌اند و امکان دسترسی به زیرلایه را نشان می‌دهند، قابل مشاهده هستند [۲۶]. متقابلاً ترکیبات سیلیسیوم‌دار در نواحی با مورفولوژی تجمعی که حاصل جرقه‌های نوع A و C هستند بیشتر می‌باشند. لذا گرانول‌های اکسیدی با ساختار کلوخ‌های به واسطه غنی بودن از سیلیسیوم بر مناطق یوتکتیکی بیشتر دیده می‌شود [۲۷].

۳- آنالیز نقشه‌ای توزیع عناصر

آنالیز نقشه‌ای که توزیع عناصر را در سطح پوشش‌ها گزارش می‌کند، در شکل ۴ نشان داده شده است. عنصر آلومینیوم از زیرلایه نشأت می‌گیرد و عنصر سیلیسیوم ناشی از مشارکت زیرلایه و الکترولیت در پوشش می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود، توزیع عناصر وابسته به مورفولوژی و نوع تخلیه‌های تشکیل شده، می‌باشد. فازهای غنی از آلومینیوم در مناطق صاف که حاصل از مورفولوژی پنکیکی، که از تخلیه‌های نوع B (در فصل مشترک پوشش/ زیرلایه به



شکل ۴- آنالیز نقشه‌ای توزیع عناصر در سطح پوشش‌های PEO حاصل از الکترولیت سیلیکاتی که از عناصر آلومینیوم و

سیلیسیوم تشکیل شده است

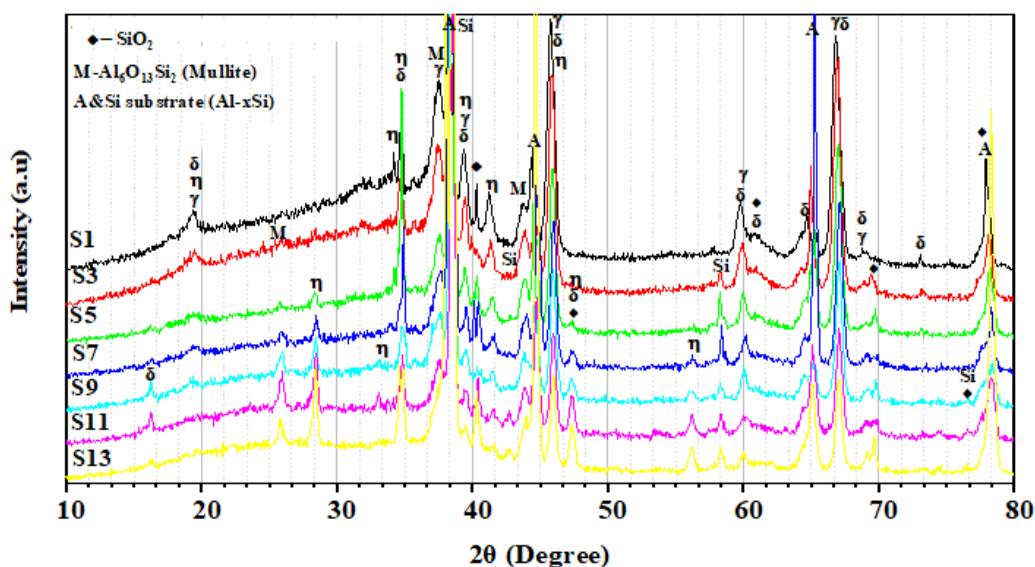
۴- آنالیز فازی پوشش‌های PEO

الگوی پراش اشعه ایکس به روش گریزینگ پوشش‌های تشکیل شده بر آلیاژها با درصدهای مختلف سیلیسیوم زیرلایه در الکترولیت سیلیکاتی در شکل ۵ نشان داده شده است. با بررسی الگوهای حاصل، پیک‌های قوی مربوط به زیرلایه به صورت پیک‌های آلومینیوم فلزی و سیلیسیوم نمایان شدند. در کنار پیک‌های مرتبط به زیرلایه، پوشش‌ها عمدتاً حاوی فازهای دیگری نظیر آلومینای گاما- γ (Al_2O_3)، آلومینای اتا ($\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$)، آلومینای دلتا ($\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$)، مولایت (Mullite) و سیلیس (SiO_2) به صورت فازهای کریستالی و آمورف است. در طول فرایند PEO، انجماد سریع آلومینیوم مذاب، به تشکیل $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ و آلومینای آمورف کمک می‌کند [۲۸، ۱۳]. برای تشکیل آلومینای α به دمای بالا نیاز داریم که با استفاده از منابع تغذیه جریان مستقیم قابل دستیابی نیست [۲۹، ۲۳]. علاوه بر کمبود انرژی تأمین شده توسط پلاسما، عناصر زیرلایه نیز می‌توانند در جلوگیری از تبدیل آلومینای گاما به آلفا تأثیرگذار باشند [۲۳]. فاز آلومینای γ نسبت به آلومینای α دارای چگالی کمتر و یا تخلخل بیشتری است و طبیعتاً مقاومت خوردگی کمتری را ارائه می‌دهد.

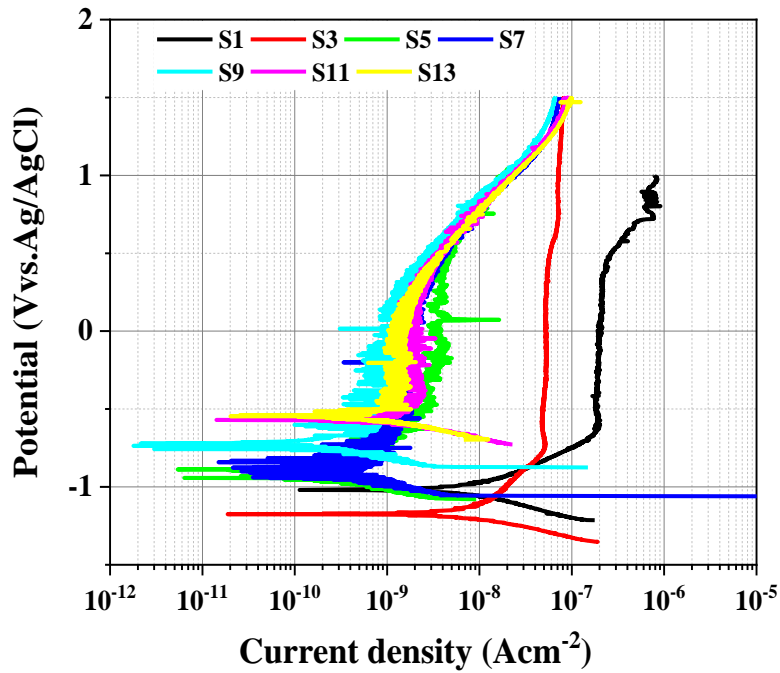
۵- آزمون پلاریزاسیون تافل

آزمون پلاریزاسیون تافل برای بررسی رفتار خوردگی نمونه‌ها در محلول ۳/۵ درصد نمک طعام و pH 4 ± 0.1 و پس از یک ساعت غوطه‌وری انجام شد. شکل ۶ نمودارهای پلاریزاسیون نمونه‌های پوشش‌دهی شده را نشان می‌دهد. شاخه کاتدی ناشی از احیای اکسیژن است، درحالی‌که شاخه آندی ناشی از واکنش‌های رویین شونده‌ی مجددی است که در پوشش اکسیدی رخ می‌دهد و یا ناشی از انحلال آندی زیرلایه که به‌طور مستقیم در تماس با محلول خورنده است.

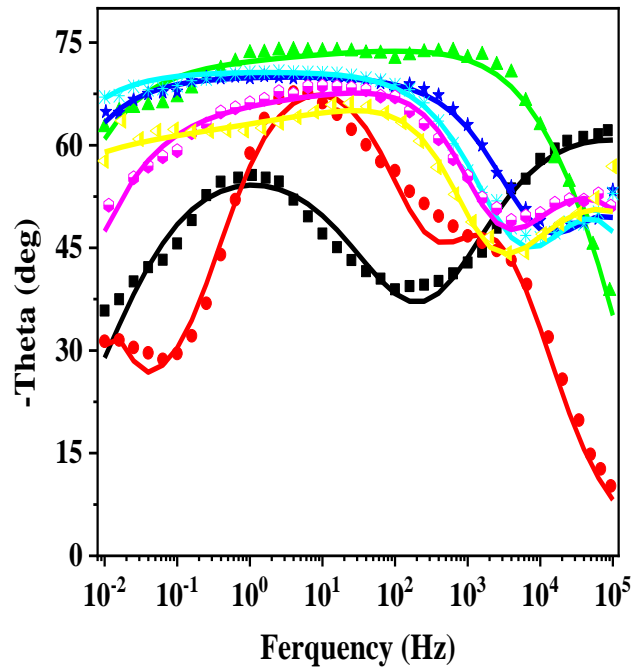
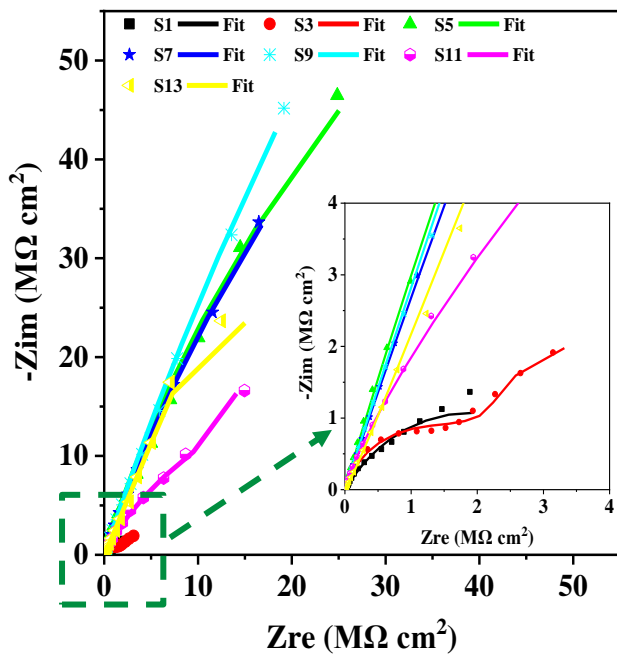
براساس شکل ۶، استنباط می‌شود که افزایش درصد سیلیسیوم زیرلایه منجر به شیفت دادن نمودارهای پلاریزاسیون تافل به سمت پتانسیل‌های مثبت‌تر به استثناء نمونه S3 شده است. روند تغییرات دانسیته جریان با افزایش درصد سیلیسیوم تا میزان ۹ درصد به سمت دانسیته جریان‌های کمتر (شیفت به سمت چپ) و سپس به سمت دانسیته جریان‌های بیشتر (شیفت به سمت راست) می‌باشد. به‌منظور بررسی دقیق‌تر کارایی خوردگی پوشش‌ها قبل از آزمون پلاریزاسیون در محلول ۳/۵ درصد نمک طعام و pH 4 ± 0.1 بعد از یک ساعت غوطه‌وری با استفاده از آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی بررسی شد. شکل ۷ نمودار نایکوئیست و باد-فاز نمونه‌های پوشش‌دهی شده بر زیرلایه‌های Al-Si با درصد سیلیسیوم مختلف را نشان می‌دهد. بر اساس نمودارهای باد-فاز تمامی نمونه‌ها دارای دو شانه هستند در حقیقت دو ثابت زمانی در این نمودارها قابل تعریف است؛ که نشان‌دهنده دو لایه بودن پوشش‌های حاصل شده است [۳۰]. و با افزایش درصد سیلیسیوم زیرلایه برآمدگی‌های موجود در نمودار باد-فاز در یکدیگر ادغام شده‌اند و سبب پهن‌شدگی نمودارها می‌گردد. براین اساس نمودارهای نایکوئیست، دارای یک حلقه در فرکانس بالا که نشان‌دهنده پاسخ لایه متخلخل بیرونی است و یک حلقه در فرکانس پایین پاسخ لایه فشرده درونی است. بالا رفتن پتانسیل خوردگی نشانه‌ای از ثبات شیمیایی بیشتر و تمایل ترمودینامیکی کمتر برای خوردگی گزارش شده است [۱۴، ۳۱]. به علاوه، ثابت شده است که شیب آندی بیشتر در منحنی‌های پلاریزاسیون نشانه‌ای از پوشش ضخیم‌تر یا با ساختار فشرده‌تر است که ممکن است برای ممانعت در برابر مهاجرت یون مهاجم کلر منفی سودمند باشد [۳۲].



شکل ۵- الگوهای پراش اشعه ایکس پوشش‌های ایجاد شده بر نمونه‌هایی با درصدهای متفاوت سیلیسیوم زیرلایه



شکل ۶- نمودار پلاریزاسیون تافل برای نمونه‌های پوشش داده شده با درصد‌های مختلف سیلیسیوم زیرلایه

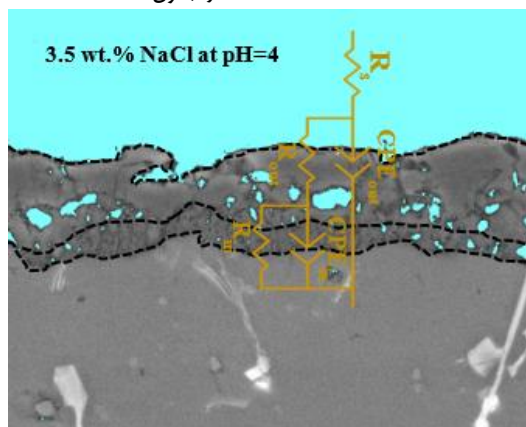


شکل ۷- نمودارهای نایکوئیست و باد-فاز حاصل از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی برای نمونه‌های پوشش داده شده با درصد‌های مختلف سیلیسیوم زیرلایه

که شامل دو ثابت زمانی است. در این مدار معادل، R_s مقاومت جبران نشده محلول، المان‌های CPE_{out} و R_{out} مربوط به پاسخ ثابت زمانی فرکانس بالا متعلق به لایه متخلخل خارجی و CPE_{in} و R_{in} مربوط به پاسخ ثابت زمانی مشاهده شده در فرکانس‌های پایین‌تر مربوط به لایه متراکم داخلی است.

در نمونه S3 علاوه بر دو ثابت زمانی معادل با دو لایه یک المان وارپورگ نیز در نمودار نایکوئیست قابل مشاهده است. باجات و همکاران حضور این المان را به نفوذ محصولات خوردگی در فصل مشترک پوشش / زیرلایه نسبت داده‌اند [۹]. نمودارهای خطی پُر نتایج برازش با مدار الکتریکی توسط نرم‌افزار Zview را نشان می‌دهند و همچنین مناسب‌ترین المان‌های برازش شده با خطای مدل‌سازی کمتر از ۰.۰۳ در جدول ۲ خلاصه شده است.

شاخه کاتدی ناشی از احیای اکسیژن است، در حالیکه شاخه آندی می‌تواند ناشی از واکنش‌های روئین‌شوندگی مجددی است که در پوشش اکسیدی رخ می‌دهد و یا ناشی از انحلال آندی زیرلایه که به طور مستقیم در تماس با محلول خورنده است. شرایط این شاخه به مورفولوژی و ضخامت پوشش وابسته است. همچنین در پوشش‌های PEO حضور تخلخل امری لاینفک می‌باشد، در نتیجه با افزایش درصد سیلیسیوم زیرلایه، درصد تخلخل پوشش افزایش می‌یابد که این امر سبب ایجاد نویز در شاخه آندی می‌گردد. شکل ۸ نیز وابستگی مدول امپدانس و زاویه- فاز به فرکانس نشان می‌دهد که مداری با دو ثابت زمانی برای شبیه‌سازی طیف‌های حاصل، مورد نیاز است. این مدل مناسب‌ترین و رایج‌ترین مدار برای منطبق کردن داده‌های EIS



شکل ۸- مدار معادل پیشنهادی برای نمونه‌های پوشش‌داده شده با درصدهای مختلف سیلیسیوم زیرلایه

جدول ۲- مقادیر پارامترهای الکتریکی استخراج شده با برازش طیف EIS با استفاده از مدار معادل ارائه شده در شکل ۸

نمونه	لایه خارجی		لایه داخلی		R_{in} ($M\Omega\ cm^2$)	RW ($M\Omega\ cm^2$)
	CPE_{out} ($\mu F\ cm^{-2}\ S^{n-1}$)	n_{out}	R_{out} ($k\Omega\ cm^2$)	CPE_{in} ($\mu F\ cm^{-2}\ S^{n-1}$)		
S1	۰.۲۳	۰.۷۱	۱۳.۷۹	۱.۳۴	۳.۸۱	-
S3	۰.۱۴	۰.۷۹	۱۶.۴۹	۰.۱۷	۱.۹۸	۳.۴۶
S5	۰.۰۶	۰.۸۸	۱.۰۵	۰.۰۹	۲۷۹.۶۲	-
S7	۰.۱	۰.۷۶	۱.۹۸	۰.۱۲	۳۰۲.۵۴	-
S9	۰.۰۸	۰.۷۶	۳.۷۰	۰.۱۱	۴۷۷.۹۰	-
S11	۰.۲۲	۰.۶۹	۶.۸۱	۰.۰۵	۶۸.۱۶	-
S13	۰.۱۹	۰.۶۵	۱۱.۳۷	۰.۰۴	۱۸۰.۵۰	-

۵- بررسی مقاطع سطحی نمونه‌ها نشان داد، نوع رایج ریز تخلیه در پوشش‌های تشکیل شده، ریز تخلیه نوع D است.

۶- پوشش از جنس اکسید آلومینیوم و ترکیبات سیلیکاتی به صورت اکسید سیلیسیوم و ترکیبات اسپینلی آلومینیوم و سیلیسیوم است.

۷- در بررسی مقاومت به خوردگی پوشش‌ها در آزمون پلاریزاسیون مشخص شد، افزایش درصد سیلیسیوم زیرلایه، منجر به شیفت داده شدن نمودارهای تافل به سمت پتانسیل‌های مثبت‌تر به استثناء نمونه S3 شده است.

۸- براساس تغییرات دانسیته جریان با افزایش درصد سیلیسیوم تا میزان ۹ درصد، سبب شیفت نمودار به سمت دانسیته جریان‌های کمتر و سپس با افزایش سیلیسیوم تا ۱۳ درصد نمودارها به سمت دانسیته جریان‌های بیشتر شیفت می‌یابد.

۹- پس از یک ساعت غوطه‌وری، نتایج آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی برای هر پوشش، دو حلقه خازنی را نشان داد که مؤید دولایه بودن پوشش بود.

۱۰- با افزایش درصد سیلیسیوم زیرلایه مقاومت لایه خارجی کاهش، اما مقاومت لایه داخلی افزایش می‌یابد و مقاومت لایه داخلی به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از مقاومت لایه خارجی است. که مؤید افزایش مقاومت به خوردگی نمونه‌های پوشش‌دهی شده بر بستر با درصد سیلیسیوم بالاتر است.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسنده مقاله تامین شده است.

مشارکت نویسندگان

انجام آزمایش‌ها:

تحلیل داده‌ها و نتایج:

نگارش نهایی:

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسنده، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

بر اساس داده‌های شبیه‌سازی شده، با افزایش درصد سیلیسیوم زیرلایه مقاومت لایه خارجی کاهش، اما مقاومت لایه داخلی افزایش می‌یابد و مقاومت لایه داخلی به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از مقاومت لایه خارجی است. براساس مطالعات ضخامت لایه بیرونی برای پوشش‌هایی که دارای محتوای سیلیسیوم پایینی در بستر هستند از سایر پوشش‌ها بیشتر است. در مقابل در پوشش‌های تشکیل شده بر بستر با سیلیسیوم بالاتر ضخامت لایه متراکم داخلی بیشتر می‌باشد. حسین و همکارانش گزارش کرده‌اند که ضخامت پوشش، ترکیب شیمیایی، مورفولوژی سطح و ساختار پوشش پارامترهای مؤثر بر مقاومت به خوردگی هستند [۳۳]. از طرف دیگر دهنوی نقش مورفولوژی سطح و ساختار پوشش را مهم‌تر از ضخامت و ترکیب فاز در تعیین مقاومت در برابر خوردگی می‌داند [۳۴]. تخلخل‌های پوشش اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی نقشی حیاتی را در هدایت محلول خورنده به فصل مشترک پوشش / زیرلایه بازی می‌کنند. در مورد پوشش‌های اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی، از آنجایی که متشکل از لایه متخلخل بیرونی و لایه چگال داخلی هستند و مقاومت به خوردگی توسط لایه چگال داخلی تعیین می‌شود، تشخیص مقاومت به خوردگی بر اساس مشاهده مورفولوژی سطح آن‌ها صحیح نیست.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر سیلیسیوم بر رفتار خوردگی پوشش‌های PEO تشکیل شده بر آلیاژهای Al-Si ارزیابی شد. مهمترین نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

۱- پوشش‌های حاصل شده بر بستر آلومینیوم - سیلیسیوم با درصد سیلیسیوم مختلف از یک حمام قلیایی پایه سیلیکاتی با مورفولوژی میکروحفرات دهانه باز و دهانه آتشفشانی، گرانول‌های اکسیدی و ساختار پنکیکی شکل می‌باشد.

۲- اندازه میکروحفرات در فاز α -Al بزرگ‌تر از فاز یوتکتیک و سیلیسیوم اولیه است. بنابراین با افزایش درصد سیلیسیوم زیرلایه مورفولوژی با ساختار پنکیکی نسبت به ساختار آتش‌فشانی افزایش می‌یابد که این امر سبب یکنواختی بیشتر پوشش می‌شود.

۳- با افزایش درصد سیلیسیوم زیرلایه، متوسط ضخامت پوشش‌ها تقریباً به صورت خطی از ۲۹/۸ میکرون به ۱۳ میکرومتر کاهش پیدا کرد.

۴- سرعت رشد پوشش با افزایش درصد سیلیسیوم زیرلایه، از ۱ به ۰/۴۳ میکرومتر بر دقیقه کاهش یافت.

Transactions A, 2003. 34: p. 2887-2899.

References

- Dahle, A., et al., Eutectic modification and microstructure development in Al-Si Alloys. Materials Science and Engineering: A, 2005. 413: p. 243-248.
- Wang, Q., Microstructural effects on the tensile and fracture behavior of aluminum casting alloys A356/357. Metallurgical and materials
- Dai, L., et al. Anti-corrosion and wear properties of plasma electrolytic oxidation coating formed on high Si content Al alloy by sectionalized oxidation mode. in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. IOP Publishing.

4. Dong, H., Surface engineering of light alloys: Aluminium, magnesium and titanium alloys. 2010.
5. Picas, J.A., et al., HVOF thermal sprayed coatings on aluminium alloys and aluminium matrix composites. Surface and Coatings Technology, 2005. 200(1-4): p. 1178-1181.
6. Revilla, R.I., H. Terryn, and I. De Graeve, Role of Si in the anodizing behavior of Al-Si alloys: additive manufactured and cast Al-Si10-Mg. Journal of The Electrochemical Society, 2018. 165(9): p. C532.
7. Hakimizad, A., K. Raeissi, and F. Ashrafizadeh, A comparative study of corrosion performance of sealed anodized layers of conventionally colored and interference-colored aluminium. Surface and Coatings Technology, 2012. 206(22): p. 4628-4633.
8. Raj, V. and M.M. Ali, Formation of ceramic alumina nanocomposite coatings on aluminium for enhanced corrosion resistance. Journal of Materials Processing Technology, 2009. 209(12-13): p. 5341-5352.
9. Bajat, J., et al., Corrosion stability of oxide coatings formed by plasma electrolytic oxidation of aluminum: optimization of process time. Corrosion, 2013. 69(7): p. 693-702.
10. Gu, W.-C., et al., Characterisation of ceramic coatings produced by plasma electrolytic oxidation of aluminum alloy. Materials Science and Engineering: A, 2007. 447(1-2): p. 158-162.
11. Hussein, R., et al., Spectroscopic study of electrolytic plasma and discharging behaviour during the plasma electrolytic oxidation (PEO) process. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010. 43(10): p. 105203.
12. Hussein, R., X. Nie, and D. Northwood, Influence of process parameters on electrolytic plasma discharging behaviour and aluminum oxide coating microstructure. Surface and Coatings Technology, 2010. 205(6): p. 1659-1667.
13. Li, Q., et al., Effects of cathodic voltages on structure and wear resistance of plasma electrolytic oxidation coatings formed on aluminium alloy. Applied Surface Science, 2014. 297: p. 176-181.
14. Montazeri, M., et al., Investigation of the voltage and time effects on the formation of hydroxyapatite-containing titania prepared by plasma electrolytic oxidation on Ti-6Al-4V alloy and its corrosion behavior. Applied Surface Science, 2011. 257(16): p. 7268-7275.
15. Tillous, K., et al., Microstructure and phase composition of microarc oxidation surface layers formed on aluminium and its alloys 2214-T6 and 7050-T74. Surface and Coatings Technology, 2009. 203(19): p. 2969-2973.
16. Gencer, Y. and A.E. Gulec, The effect of Zn on the microarc oxidation coating behavior of synthetic Al-Zn binary alloys. Journal of alloys and compounds, 2012. 525: p. 159-165.
17. He, J., et al., Influence of silicon on growth process of plasma electrolytic oxidation coating on Al-Si alloy. Journal of alloys and compounds, 2009. 471(1-2): p. 395-399.
18. Tarakci, M., Plasma electrolytic oxidation coating of synthetic Al-Mg binary alloys. Materials characterization, 2011. 62(12): p. 1214-1221.
19. Mehri Ghahfarokhi, N., et al., Plasma electrolytic oxidation (PEO) coating to enhance in vitro corrosion resistance of AZ91 magnesium alloy coated with polydimethylsiloxane (PDMS). Applied Physics A, 2022. 128(2): p. 112.

20. Li, K., et al., Effects of Si phase refinement on the plasma electrolytic oxidation of eutectic Al-Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019. 790: p. 650-656.
21. Forn, A., et al., Microstructure and tribological properties of anodic oxide layer formed on Al-Si alloy produced by semisolid processing. *Surface and Coatings Technology*, 2007. 202(4-7): p. 1139-1143.
22. Warmuzek, M., Aluminum-silicon casting alloys: an atlas of microfractographs. 2004: ASM international.
23. مشرفی فر، م. et al., بررسی اثر درصد سیلیسیوم زیرلایه بر ریزساختار و ترکیب پوشش‌های اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیوم. نشریه علوم و مهندسی سطح، ۲۰۲۱. ۱۷. ۱-۱۷. (49): p. 1-17.
24. Wu, T., C. Blawert, and M.L. Zheludkevich, Influence of secondary phases of AlSi9Cu3 alloy on the plasma electrolytic oxidation coating formation process. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020. 50: p. 75-85.
25. Moshrefifar, M., H. Ebrahimifar, and A. Hakimizad, Systematic Investigation of Silicon Content Effects on the PEO Coatings' Properties on Al-Si Binary Alloys in Silicate-Based and Tungstate-Containing Electrolytes. *Coatings*, 2022. 12(10): p. 1438.
26. Alves, S., et al., Enhanced tribological performance of cylinder liners made of cast aluminum alloy with high silicon content through plasma electrolytic oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 2022. 433: p. 128146.
27. Wang, P., et al., Ceramic coating formation on high Si containing Al alloy by PEO process. *Surface Engineering*, 2016. 32(6): p. 428-434.
28. Stojadinovic, S., et al., Characterization of the plasma electrolytic oxidation of aluminium in sodium tungstate. *Corrosion Science*, 2010. 52(10): p. 3258-3265.
29. Matykina, E., et al., Investigation of the growth processes of coatings formed by AC plasma electrolytic oxidation of aluminium. *Electrochimica acta*, 2009. 54(27): p. 6767-6778.
30. بروجنی، ر. et al., ارزیابی رفتار تریبولوژیکی پوشش کامپوزیتی اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی حاوی ذرات اکسید سیلیسیم روی زیرلایه آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵. فصلنامه علمی-پژوهشی مواد نوین، ۲۰۲۲. ۱۳. 72-85. (49): p. 72-85.
31. Li, Z., et al., Composite coatings on a Mg-Li alloy prepared by combined plasma electrolytic oxidation and sol-gel techniques. *Corrosion science*, 2012. 63: p. 358-366.
32. Duan, H., C. Yan, and F. Wang, Effect of electrolyte additives on performance of plasma electrolytic oxidation films formed on magnesium alloy AZ91D. *Electrochimica Acta*, 2007. 52(11): p. 3785-3793.
33. Hussein, R., X. Nie, and D. Northwood, Plasma electrolytic oxidation coatings on Mg-alloys for improved wear and corrosion resistance. *Corrosion: Material Performance and Cathodic Protection*, 2017. 99: p. 133-134.
34. 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.