

اثرولتاژ اعمالی بر پوشش ایجاد شده به روش اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی (PEO) روی فولاد آلومینایز

محسن ساکت بجندی^{۱*}، چنگیز دهقانان^۲، سید محمد نوری^۳

^۱ کارشناس ارشد مهندسی مواد، خوردگی و حفاظت مواد، بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه تهران.

^۲ اسناد، بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه تهران

^۳ کارشناس ارشد مهندسی مواد، خوردگی و حفاظت مواد، بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه تهران.

* نویسنده مسئول: Msaket@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۳۰

چکیده

در این پژوهش، از روش غوطه‌وری گرم (دمای 750°C و زمان ۵ دقیقه) برای ایجاد پوشش آلومینیمی بر روی زیرلایه فولادی استفاده شد. سپس برای افزایش مقاومت به خوردگی پوشش آلومینیمی ایجاد شده، از روش اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی استفاده گردید. به منظور بررسی اثر ولتاژ اعمالی در فرایند PEO روی لایه‌های تولید شده، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای میکروساختار و آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) برای آنالیز فازهای پوشش استفاده شد. رفتار خوردگی نمونه‌ها نیز توسط آزمون‌های پلاریزاسیون در محلول ۳/۵٪ سدیم کلرید بررسی گردید. نتایج نشان دادند که برای نمونه پوشش دهی شده در ولتاژ ۴۰۰ ولت، با درصد تخلخل (۴/۸۶) و ضخامت پوشش ($30\ \mu\text{m}$)، دارای چگالی جریان خوردگی $2/88 \times 10^{-4}\ \text{A/cm}^2$ نسبت به نمونه‌های پوشش دهی شده در ولتاژهای اعمالی ۳۵۰۷ و ۴۵۰۷ به ترتیب با چگالی جریان‌های خوردگی $1/04 \times 10^{-4}\ \text{A/cm}^2$ و $2/18 \times 10^{-4}\ \text{A/cm}^2$ مقاومت به خوردگی را به ترتیب در حدود ۱/۹۸ و ۲/۵ برابر بهبود می‌دهد.

کلمات کلیدی: غوطه‌وری گرم، فولاد آلومینایز شده، اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی، مقاومت به خوردگی؛

The Effect of APplied Voltage on PEO Coatings on Aluminized Steel

M. Saket bejandi ^{1*}, CH. Dehghanian ², S. M. Noori ³

¹ M. Sc., Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Tehran University.

² Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Tehran University.

³ M. Sc., Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Tehran University.

* Corresponding Author: Msaket@ut.ac.ir

Submission: 2016, 12, 16 Acceptance: 2017, 02, 18

Abstract

Due to the formation of porous oxide on the steel surface it can't directly use by PEO procedure. Therefore, in this research, hot diPping process (at 750°C and 5 min) was used to deposit Al coating on steel substrate. Plasma electrolytic oxidation (PEO) was aPplied on the obtained aluminized coating to measure its resistance to corrosion attack. SEM was used to evaluate the microstructure of PEO coatings deposited on aluminized steel by different aPplied Voltages. XRD was also used to analyze the phases on PEO coatings generated by aPplied different Voltages. Corrosion behavior of the coatings was also investigated using polarization tests in 3.5% NaCl solution. Results in indicated that the coated samples prepared at 400 Volts developed a coatings with porosity of about 4.86% and a thickness of 30 μm had a corrosion current density of $2.88 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ which in comparison to that of coated samples produced at Voltages of 350 and 450 Volts with corrosion current densities of $1.04 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ and $2.18 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ respectively showed an improvement of 1.98 to 2.5 times in corrosion resistance .

Keywords: Hot diPping, Aluminized steel, Plasma electrolytic oxidation, Corrosion resistance;

۱- مقدمه

اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی (PEO) فرایند نسبتاً جدیدی است که برای ایجاد پوشش سرامیکی روی فلزات سبک با خاصیت پیوستندگی مانند: آلومینیوم [۱]، منیزیم [۲]، تیتانیوم [۳] و آلیاژهایشان بکار می‌رود. خواص عالی سایشی، سختی، خوردگی، الکتریکی، چسبندگی و حرارتی این پوشش‌ها موجب به کارگیری آن‌ها در اجزای ماشین‌های نساجی، شاتل‌های فضایی، تجهیزات موتورها و برخی وسایل پزشکی شده است [۴-۷]. به کمک این روش می‌توان فیلم‌های اکسیدی با مورفولوژی‌ها و میزان تخلخل متفاوت (از یک پوشش متخلخل تا یک پوشش متراکم) روی سطح آلومینیوم ایجاد نمود [۷-۹]. خواص پوشش‌های تولید شده در این روش، به نوع، غلظت و pH الکترولیت، نوع و دانسیته جریان/ولتاژ و پارامترهای پالسی (فرکانس و دوره کاری) بستگی دارند [۱۰-۱۲]. متداول‌ترین الکترولیت‌های مورد استفاده در این روش شامل نمک‌های آلومیناتی [۱۳، ۱۴]، سیلیکاتی [۱۵]، فسفاتی [۱۶] و ... هستند که گاهی به صورت ترکیبی [۱۷] نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در تحقیقات پیشین نشان داده شده که پوشش‌های PEO روی زیرلایه آلومینیومی عمدتاً شامل فازهای $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ و $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ هستند که سختی حداکثری در حدود ۲۵۰۰ ویکرز دارند [۱۸].

فولادها به‌طور گسترده‌ای در صنایع مختلف به کار می‌روند ولی بخاطر عملکرد پایین سایشی و خوردگی آن‌ها در همه موارد کاملاً مطلوب و بهینه نیستند. از آنجایی که فولادها قابلیت پیوستن اندکی در الکترولیت‌های PEO دارند، لذا ولتاژ آندی با گذشت زمان افزایش نمی‌یابد و تخلیه‌های آندی رخ نمی‌دهند. اخیراً محققان توانسته‌اند به کمک فرایند PEO و یک روش واسط، پوشش سرامیکی با چسبندگی خوبی را روی فولاد اعمال کنند. تاکنون با روش‌های متعددی مانند اسپری قوسی [۱۹]، غوطه‌وری گرم [۲۰-۲۴]، پلاسمای اسپری [۲۵]، یک لایه آلومینیومی بعنوان لایه واسط روی فولادها اعمال شده است. در تحقیق حاضر به بررسی اثر ولتاژ اعمالی روی میکروساختار و خواص پوشش‌های تولید شده به روش اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی (PEO) روی فولاد آلومینایز شده پرداخته می‌شود.

۲- روش تحقیق

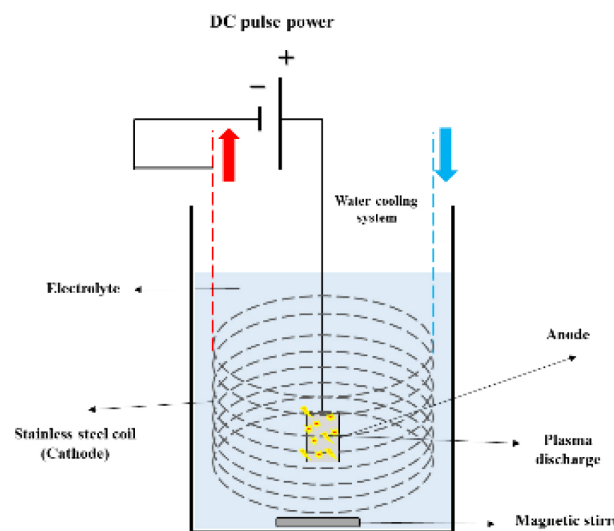
نمونه‌های فولاد ساده کربنی با ترکیب شیمیایی نمایش داده شده در جدول ۱ و ابعاد $30 \times 20 \times 5$ mm بعنوان زیرلایه انتخاب شدند. لبه‌های تیز تا حد امکان ماشین‌کاری شدند و سطوح نمونه‌ها تا سمباده ۱۰۰۰ پرداخت گردید. برای تهیه فولاد آلومینایز شده به روش غوطه‌وری گرم (Hot diPping) از شمش آلومینیومی (با خلوص ۹۵٪) استفاده گردید. نمونه‌ها پس از قلیایی شویی

(۱۰٪ - NaOH) و اسیدشویی (۳۰٪ - HCl)، فرایند غوطه‌وری گرم در مذاب آلومینیم حاوی ۵٪ سیلیسیم و در دمای 750°C به مدت ۵ دقیقه انجام شد. ضخامت لایه آلومینیومی و لایه بین فلزی FeAl پس از فرایند غوطه‌وری گرم به ترتیب ۷۵ و $15 \mu\text{m}$ بود که ضخامت لایه آلومینیومی ایجاد شده، برای بخش پوشش نهایی به روش PEO مناسب می‌باشد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در این تحقیق

Fe	C	Si	Mn	P	S
Base	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۶۸	۰/۰۰۸	۰/۰۲۷

حجم الکترولیت مورد استفاده ۵۰۰ ml و شامل محلول آبی 10 gL^{-1} سدیم فسفات (Na_3PO_4)، 8 gL^{-1} سدیم سیلیکات (NaSiO_3) و 2 gL^{-1} پتاسیم هیدروکسید (KOH) بود. pH الکترولیت تهیه شده $13/06$ و سرعت چرخش مگنت در محلول نیز 500 rpm بود. از یک منبع تغذیه با توان ۲۰ KW و یک تولیدکننده پالس (رکتیفایر) برای تبدیل جریان مستقیم به پالسی استفاده گردید. برای کنترل دمای الکترولیت حین فرایند، سیستم آبگرد بصورت یک لوله به شکل مارپیچ از جنس فولاد زنگ‌نزن 316 L طراحی شد که با عبور جریان آب، دمای الکترولیت در حین فرایند کمتر از ۳۵ درجه سانتیگراد نگه داشته شد (شکل ۱). نمونه‌های فولاد آلومینایز شده بعنوان آند و لوله مارپیچ آبگرد به‌عنوان کاتد قرار گرفت. نمونه‌ها در سه ولتاژ ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ ولت (به ترتیب با کدهای ۳۵۷، ۴۰۷ و ۴۵۷) تحت فرایند قرار گرفتند. سایر پارامترها مانند زمان پوشش‌دهی ۵ دقیقه، فرکانس ۱۰۰۰ هرتز و دوره کاری ۴۰٪ برای تمام نمونه‌ها یکسان انتخاب شد.



شکل ۱- شماتیک سیستم پوشش‌دهی و سیستم آبگرد طراحی شده برای فرایند PEO.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آنالیز فازی

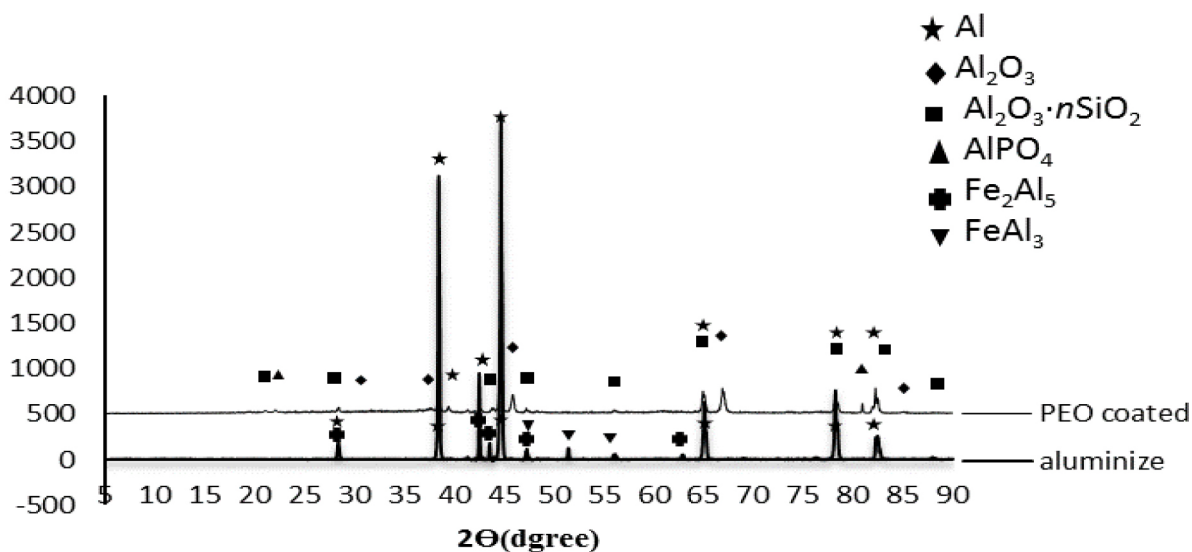
شکل ۲ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های آلومینایز و پوشش دهی شده در ولتاژهای مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نمونه آلومینایز دارای فاز Al می‌باشد که مربوط به لایه بالایی پوشش آلومینیمی است و همچنین فازهای $FeAl_3$ و Fe_2Al_5 که مربوط به لایه میانی فولاد آلومینایز (لایه اینترمتالیک) می‌شود. به دلیل تخلخل در پوشش وجود قله‌های Al مربوط به لایه‌های زیرین سطح است که در اثر نفوذ پرتو ایکس حاصل شده است. همچنین فازهای Al_2O_3 ، $Al_2O_3 \cdot nSiO_2$ و $AlPO_4$ شناسایی شدند. لایه‌های اکسیدی در حین پرتاب شدن از کانال تخلیه به سمت بیرون در تماس با الکترولیت واکنش داده و ترکیبات مختلفی را پدید می‌آورند. در واقع انجماد سریع آلومینای مذاب، موجب جوانه‌زنی فاز Al_2O_3 می‌گردد. همچنین فاز مولیت ($Al_2O_3 \cdot nSiO_2$) در نتیجه واکنش بین آلومینای مذاب و کاتیون‌های سیلیکاتی و فاز $AlPO_4$ نیز از واکنش بین آلومینای مذاب در کانال تخلیه و کاتیون‌های فسفاتی است. در واقع پوشش PEO، پوشش کامپوزیتی شامل فازهای اکسیدی (اکسید آلومینیم)، سیلیکاتی (مولایت یا سیلیکات آلومینیم)، فسفاتی (فسفات آلومینیم) می‌باشد.

۳-۲- مورفولوژی و میکروساختار پوشش

شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) همراه

آنالیز فازی پوشش ایجاد شده با دستگاه پراش پرتو ایکس مدل Philips X'Pert Pro X-ray diffractometer و به کمک نرم‌افزار X Pert HighScore Plus تعیین شد. مورفولوژی سطحی و مقطع عرضی پوشش اعمالی با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Camson MV2300 Oxford model 7538 بررسی گردید. اندازه حفرات و ضخامت پوشش به کمک نرم‌افزار Digimizer از روی تصویر SEM محاسبه گردید. رفتار خوردگی این پوشش‌ها در یک سل سه الکتروده شامل: الکتروده کالومل اشباع بعنوان الکتروده مرجع، ورق پلاتینی بعنوان الکتروده شمارنده و نمونه پوشش دهی شده نیز بعنوان الکتروده کاری مورد ارزیابی قرار گرفتند. در تمامی نمونه‌ها به منظور حصول اطمینان از نفوذ الکترولیت، قسمتی از سطح نمونه با دقت نسبی و ثابت 1 cm^2 بوسیله یک روکش عایق جدا شدند و سپس در معرض محلول خوردنده (محلول ۳/۵٪ سدیم کلرید) قرار گرفتند. نمونه‌ها به مدت یکساعت برای پایداری و ثابت شدن پتانسیل قبل از آزمون پلاریزاسیون در محلول سدیم کلرید غوطه‌ور شدند. آزمون پلاریزاسیون از ۰/۳ تا ۱ ولت نسبت به OCP و با نرخ رویش 1 mV/s انجام شد و سپس با استفاده از معادله ۱ مقاومت پلاریزاسیون پوشش محاسبه شد. آزمون امپدانس الکتروشیمیایی نیز در دامنه اغتشاش $\pm 10 \text{ mV}$ و محدوده فرکانس 100 kHz تا 10 mHz با استفاده از دستگاه Solarton SI-1260 انجام شد.

$$R_p = \frac{\beta_a \times \beta_c}{i_{corr} \times (\beta_a + \beta_c) \times 2.303} \quad (1)$$



شکل ۲- الگوی پراش پرتو ایکس پوشش سرامیکی PEO روی فولاد آلومینایز.

هر دو عنصر P و Si در لایه سرامیکی کاهش یافته و در لایه‌های درونی افزایش می‌یابد. در لایه رویی نیز عمدتاً مقدار Al و اکسید آن مشاهده می‌شود. عنصر O برای هر سه نمونه روی سطح بصورت تقریباً یکنواخت توزیع شده و Fe نیز از سطح بطرف زیر لایه افزایش یافته است.

با افزایش ولتاژ اعمالی از ۳۵۰ تا ۴۵۰ ولت، اندازه حفرات سطحی تا $8/5 \mu\text{m}$ افزایش یافته است که مربوط به افزایش انرژی در کانال‌های تخلیه است. از طرفی این افزایش در ولتاژ سبب افزایش در ضخامت پوشش اعمالی از ۲۱ تا $42 \mu\text{m}$ می‌شود. به نظر می‌رسد که افزایش ولتاژ اعمالی دو اثر معکوس هم دارد:

- با افزایش ولتاژ اعمالی، فرایند اکسیداسیون فلز سریع‌تر رخ داده و ضخامت لایه اکسیدی افزایش می‌یابد. این افزایش در واکنش‌پذیری منجر به بهبود استحکام چسبندگی فصل مشترک اکسید/زیر لایه می‌شود.

- از طرف دیگر با افزایش ولتاژ اعمالی، بعلاوه افزایش انرژی ورودی در کانال‌های تخلیه، جرقه‌ها درشت‌تر شده و حفرات بزرگتری روی سطح تشکیل می‌شوند و میزان تخلخل پوشش بدست آمده نیز افزایش می‌یابد. افزایش بیش از حد ولتاژ از یک مقدار بحرانی باعث افزایش تخلخل لایه بیرونی شده و زبری پوشش نهایی را افزایش می‌دهد.

با مقایسه تصاویر مربوط به نمونه‌های ۳۵۷، ۴۰۷ و ۴۵۷ مشاهده گردید که اندازه حفرات پس از ۴۰۰ ولت به یکباره افزایش یافته است. در این حالت کانال‌های تخلیه دارای اشکال نامنظم و اندازه‌های بسیار متنوعی هستند. لذا در یک ولتاژ بهینه (در اینجا ۴۰۰ ولت) تعادلی بین دو اثر فوق وجود خواهد داشت بصورتی که ضخامت لایه حداکثر و اندازه حفرات در حداقل باشد.

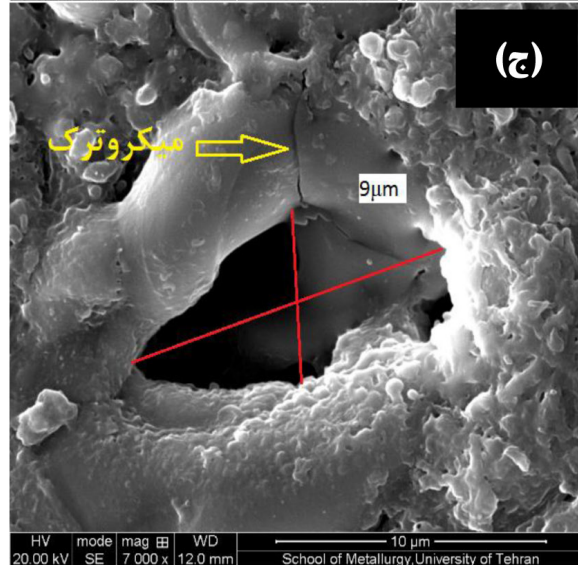
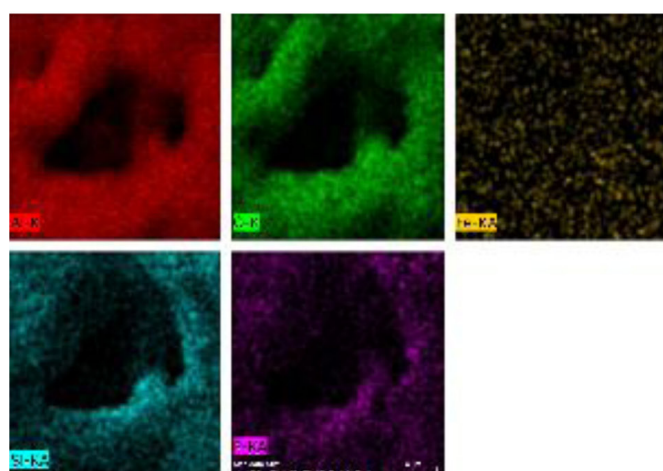
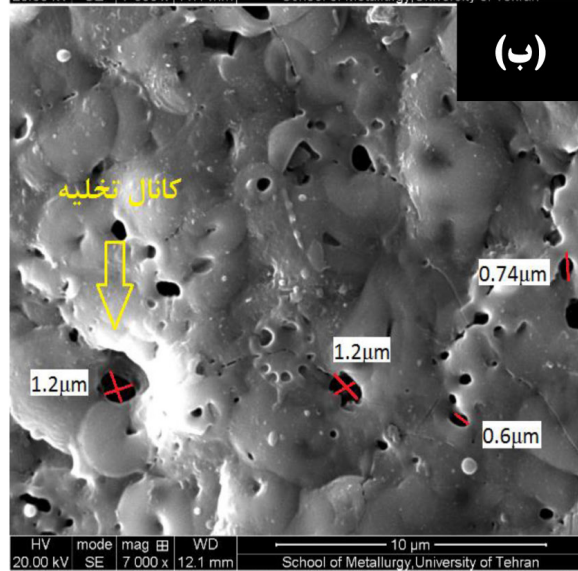
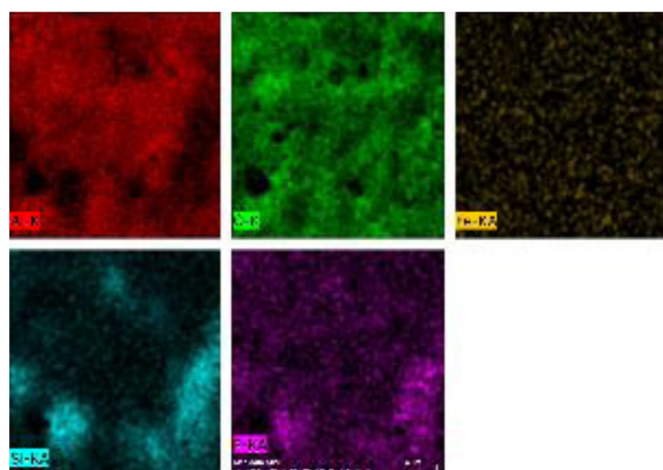
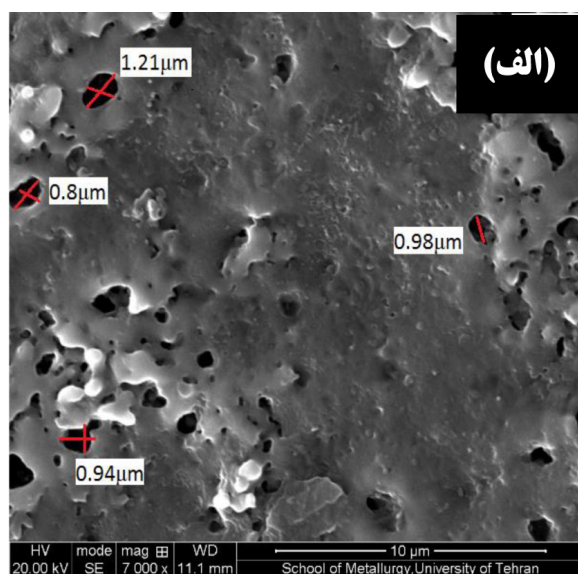
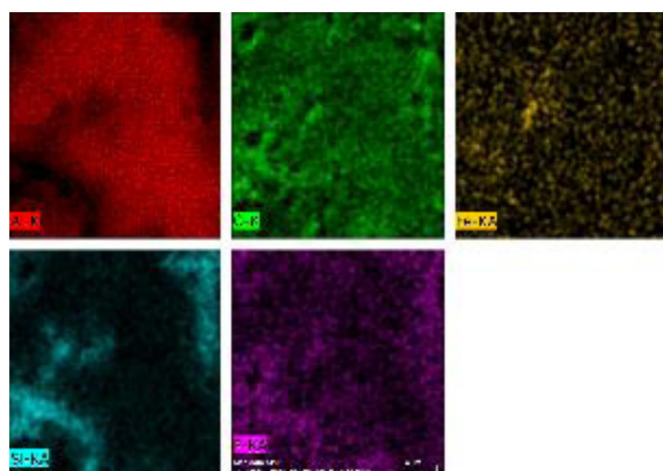
همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ولتاژ اعمالی، دانسیته کانال‌های تخلیه موجود روی سطح پوشش کاهش می‌یابد، درحالی‌که اندازه تخلخل‌ها بزرگتر می‌شود. بطور کلی هنگامی که ولتاژ اعمالی کم است پوشش PEO نازک هموار و دارای حفرات کوچکی است. با افزایش مقدار ولتاژ فرایند اکسیداسیون تسریع یافته و ضخامت پوشش افزایش می‌یابد. جدول ۲ مقادیر ضخامت لایه اعمالی، میانگین اندازه حفرات، درصد و دانسیته تخلخل‌ها محاسبه شده با نرم‌افزار Digimizer را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که با افزایش ولتاژ اعمالی علاوه بر ضخامت پوشش، میانگین اندازه حفرات و درصد تخلخل سطحی نیز افزایش می‌یابد.

با نقشه توزیع عنصری (map) از سطح نمونه‌های پوشش‌دهی شده در ولتاژهای مختلف را نشان می‌دهد. گزارش شده که در میان پارامترهای الکتریکی مؤثر بر فرایند اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی (PEO)، ولتاژ اعمالی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است [۱۳]. مقدار ولتاژ اعمالی باید به اندازه کافی بالا باشد تا شرایط مورد نیاز برای واکنش‌های اکسیداسیون، ذوب موضعی و ایجاد ساختار آتشفشانی تأمین شود.

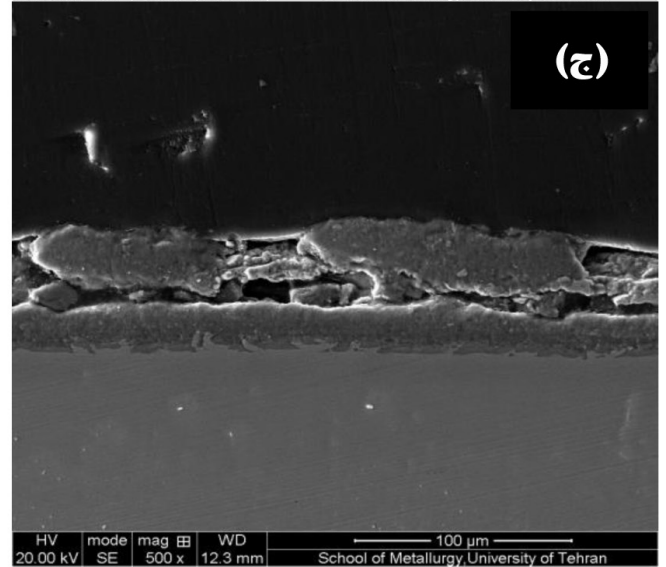
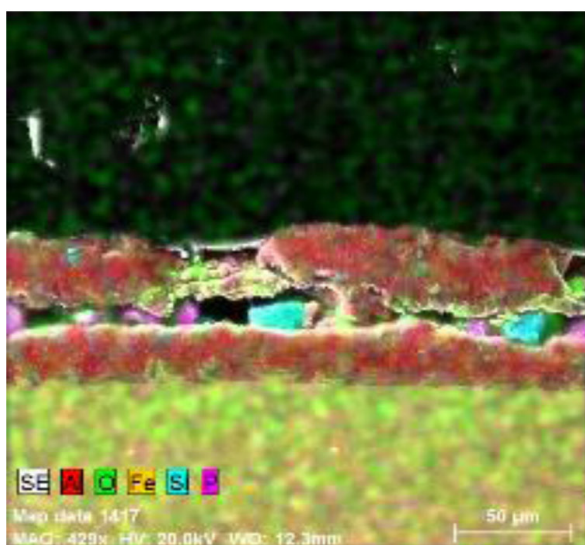
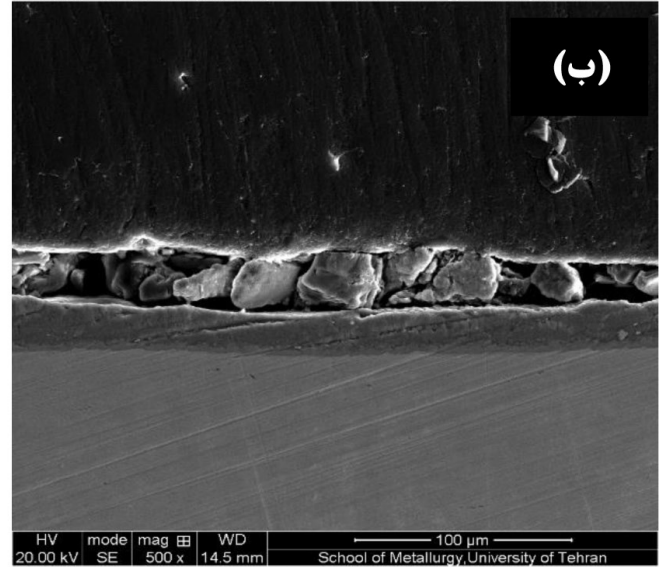
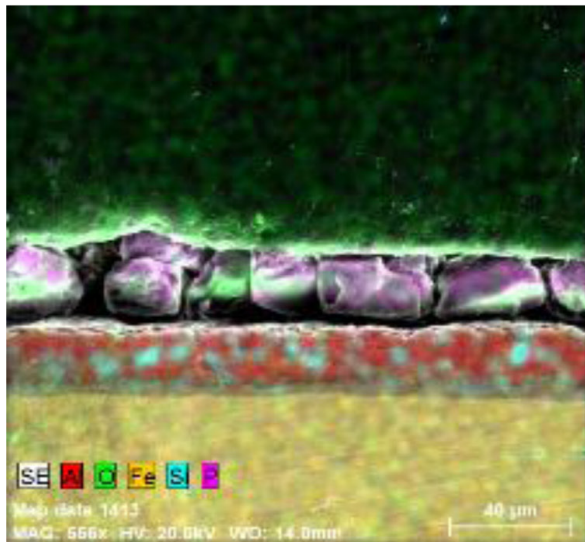
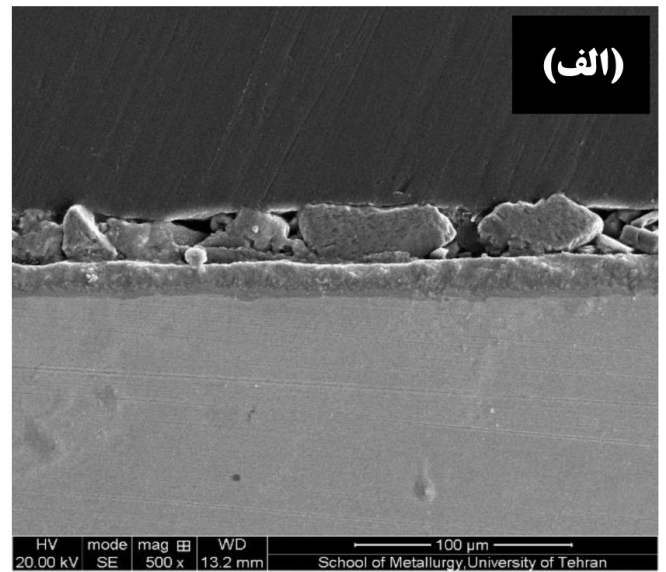
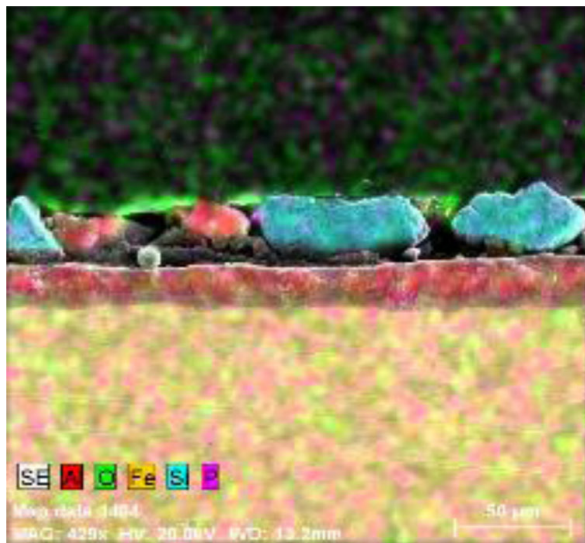
همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین اندازه حفرات روی سطح پوشش نهایی برای نمونه‌های ۳۵۷ و ۴۰۷، حدود $0/71$ و $0/79 \mu\text{m}$ اندازه‌گیری شد که بزرگتر از حفرات پوشش‌های PEO انجام گرفته توسط محققین بر روی نمونه‌های از جنس Al یا Mg است [۲۱]. بعلاوه ساختار شبه آتشفشانی شامل اکسیدها و کانال‌های تخلیه در اطراف دهانه‌های آتشفشان مشاهده گردید. میکروتراک‌های مشاهده شده روی سطح پوشش PEO، مربوط به تنش حرارتی ناشی از انجماد سریع آلومینای ذوب شده در کانال‌های تخلیه است. از آنجایی که دما در کانال‌های تخلیه به حدود 7000°C می‌رسد که در اثر تماس با الکترولیت در مجاورت خود با نرخ 10^8 K/s منجمد می‌شود [۲۲].

ضخامت لایه ایجاد شده روی سطح نیز از اهمیت بسزایی برخوردار است. شکل ۴ نیز تصویر SEM مقطع عرضی لایه را همراه با نقشه توزیع عناصر (map) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پوشش‌های PEO روی فولاد آلومینایی شده برخلاف این پوشش‌ها روی زیر لایه آلومینیومی دارای لایه متخلخل بیرونی و متراکم درونی بصورت مجزا نیستند و تنها لایه سرامیکی، لایه آلومینیومی باقیمانده و لایه بین فلزی FeAl وجود دارند [۲۲]. شکستگی‌ها و کندگی‌های متعددی که در تصویر مقطع عرضی نمونه‌ها مشاهده می‌شود مربوط به ترد بودن لایه سرامیکی است. هم‌چنین ترک‌هایی در پوشش مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از افزایش انرژی اعمالی حاصل از افزایش ولتاژ باشد. البته لایه نازک آلومینیوم پلاستیسیته خوبی داشته و تاحدی تافنس را در فصل مشترک پوشش سرامیکی بهبود می‌بخشد.

همان‌گونه که در نقشه توزیع عناصر مقطع عرضی مشاهده می‌شود، مقدار Si لایه سرامیکی در نمونه ۳۵۷ ولت، بسیار بیشتر از P است. اما با افزایش ولتاژ برای نمونه ۴۰۷ این مقدار تا حد زیادی کاهش یافته و جای خود را به عنصر P می‌دهد و Si به لایه آلومینیومی و بین فلزی FeAl هم می‌رسد. با افزایش بیشتر ولتاژ برای نمونه ۴۵۷ مقدار



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی و نقشه‌های عنصری پوشش PEO روی فولاد آلومینایز: (الف) ۳۵V و (ب) ۴۰V و (ج) ۴۵V.



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مقطع‌های عرضی و نقشه عنصری پوشش PEO روی فولاد آلومینایز؛ (الف) ۳۵۷ و (ب) ۴۰۷ و (ج) ۴۵۷

۳-۳- رفتار خوردگی

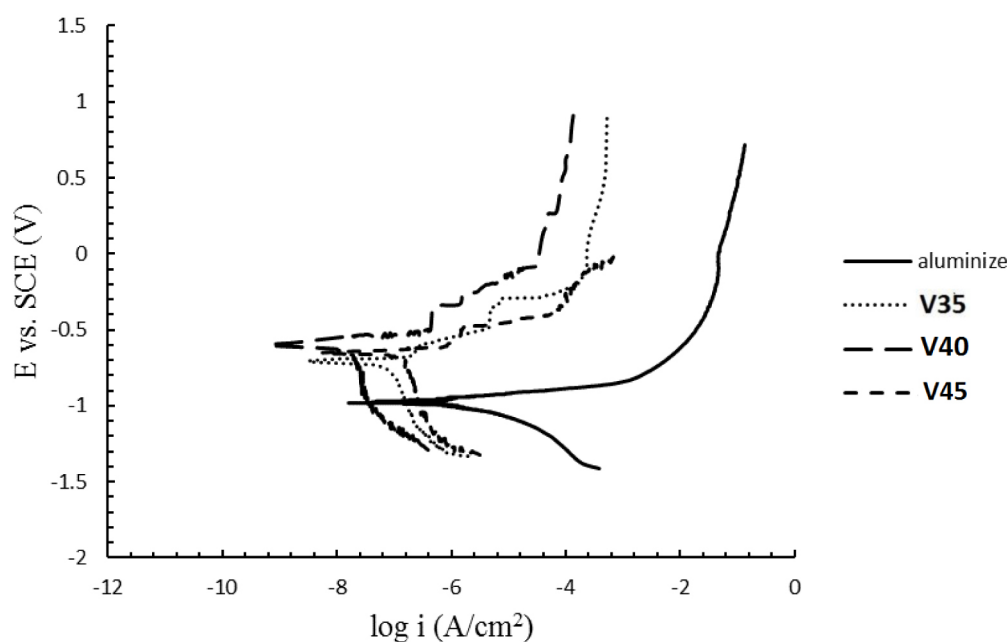
خوردگی، شیب‌های تافل کاتدی و آنودی و مقاومت پلاریزاسیون در جدول ۳ مشاهده می‌گردد.

مشاهده می‌شود که با افزایش ولتاژ اعمالی در فرایند PEO (نمونه‌های ۳۵V و ۴۰V)، مقدار پتانسیل خوردگی از ۰/۶۵- به ۰/۷۵V- کاهش و بعد از آن برای V۴۵ این مقدار به ۰/۶۸V- افزایش یافت. این مقدار برای نمونه فولاد آلومینایز ۰/۹۶۴V- است. شیب تافل

برای بررسی مقاومت به خوردگی پوشش‌های ایجاد شده از روش پلاریزاسیون پتئوسودینامیک استفاده گردید. شکل ۵ منحنی پلاریزاسیون پوشش‌های PEO روی فولاد آلومینایز شده را در محلول ۳/۵٪ سدیم کلرید نشان می‌دهد. همچنین پارامترهای استخراج شده از منحنی پلاریزاسیون شامل پتانسیل و دانسیته جریان

جدول ۲- مقادیر ضخامت پوشش، میانگین اندازه حفرات و درصد تخلخل سطحی برای نمونه‌های پوشش‌دهی شده روی فولاد آلومینایز شده

کد نمونه	میانگین ضخامت پوشش (μm)	میانگین اندازه حفرات (μm)	درصد تخلخل سطحی (%)	دانسیته تخلخل‌های سطحی (no. pores/mm ²)
V35	۲۱±۱	۰/۷۱۴±۰/۰۱	۴/۰۸	۶/۴×۱۰ ^۵
V40	۳۰±۲	۰/۷۹۰±۰/۰۳	۴/۸۶	۲/۶×۱۰ ^۵
V45	۴۲±۲	۸/۵±۰/۱	۷/۷۱	۷/۰×۱۰ ^۴



شکل ۵- منحنی پلاریزاسیون پوشش‌های PEO روی فولاد آلومینایز.

جدول ۳- مقادیر پارامترهای استخراج شده از منحنی پلاریزاسیون پوشش‌های PEO روی فولاد آلومینایز

کد نمونه	E _{corr} (V)	i _{corr} (A/cm ²)	β _a (V/dec)	β _c (V/dec)	R _p (Ω.cm ²)
Aluminized steel	-۰/۹۶±۰/۰۵	(۱/۱۲±۰/۰۱)×۱۰ ^{-۶}	۰/۰۳۱	۰/۰۶۷	۷۷۵۸±۱۰۰
V35	-۰/۷۵±۰/۰۱	(۱/۰۴±۰/۰۳)×۱۰ ^{-۷}	۰/۰۶۸	۰/۰۵۴	۹۱۵۳۳±۱۵۰
V40	-۰/۶۵±۰/۰۷	(۲/۸۸±۰/۰۱)×۱۰ ^{-۸}	۰/۰۱۴	۰/۰۸۶	۱۸۱۵۳۲±۳۵۰
V45	-۰/۶۸±۰/۰۳	(۲/۱۸±۰/۰۱)×۱۰ ^{-۷}	۰/۰۴۴	۰/۱۸۷	۷۰۹۹۲±۱۲۰

مثل اندازه حفرات و تخلخل‌های سطحی و نیز ضخامت پوشش سرامیکی است. لذا در نمونه ۴۰V که تعادلی بین کاهش اندازه حفرات و افزایش در ضخامت پوشش وجود دارد، بالاترین مقاومت به خوردگی وجود دارد. همچنین به نظر میرسد که وجود فسفر بیشتر در لایه سرامیکی نمونه ۴۰V تأثیر به سزایی در این افزایش مقاومت به خوردگی داشته است. با افزایش ولتاژ تا ۴۵۰ ولت، مقاومت به خوردگی حدود ۶۰٪ کاهش یافت که مربوط به حضور حفرات بزرگتر روی سطح پوشش است.

کاتدی برای هر سه نمونه تقریباً یکسان ولی شیب تافل آندی به دلیل شرایط مخلف پوشش‌دهی و واکنش‌های آندی مختلفی که برای هر نمونه رخ می‌دهد متفاوت است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، مقدار دانسیته جریان خوردگی برای نمونه ۴۰V از همه پایین‌تر است، که نشان‌دهنده مقاومت پلاریزاسیون بالاتر این نمونه از دو مورد دیگر است. در اثر اعمال پوشش PEO مقاومت به خوردگی تا ۲۳/۳۹ برابر نسبت به فولاد آلومینایز شده افزایش یافت. نفوذ الکترولیت خورنده و یون Cl^- به زیرلایه وابسته به مواردی

نتیجه گیری

در این تحقیق با روش اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی (PEO) یک لایه متخلخل روی فولاد آلومینایز شده ایجاد گردید که نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- آنالیز فازی پوشش نشان دهنده تشکیل فازهای Al_2O_3 ، $Al_2O_3 \cdot nSiO_2$ و $AlPO_4$ بود.
- ۲- پوشش نهایی از روی سطح به ترتیب شامل: لایه سرامیکی، لایه آلومینیوم باقیمانده و لایه بین فلزی FeAl بود. پوشش‌های ایجاد شده مقاومت به خوردگی بسیار خوبی را از خود نشان دادند.
- ۳- نمونه ۴۰V با ضخامتی در حدود $30 \mu m$ و اندازه حفرات $0.79 \mu m$ ، پایین‌ترین دانسیته جریان خوردگی ($2/88 \times 10^{-8} A/cm^2$) و بالاترین مقاومت پلاریزاسیون ($181532 \Omega \cdot cm^2$) را داشت که حدود ۲۳/۳۹ برابر نمونه فولاد آلومینایز بود.
- ۴- با افزایش بیشتر ولتاژ اعمالی تا ۴۵۰ ولت به دلیل بزرگ شدن حفرات نفوذ یون خورنده Cl^- به زیرلایه راحت‌تر شده و علیرغم ضخامت بیشتر، مقاومت به خوردگی کمتری را از خود نشان داد.

مراجع

- [1] S. Gnedenkov, S. Sinebryukhov, V. Egorokin, and I. Vyalii, "Wettability and electrochemical properties of the highly hydrophobic coatings on PEO-pretreated aluminum alloy," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 307, 2016, Pp. 1241-1248.
- [2] E. Matykina, I. Garcia, R. Arrabal, M. Mohedano, B. Mingo, J. Sancho, M.C. Merino, A. Pardo, "Role of PEO coatings in long-term biodegradation of a Mg alloy," *Applied Surface Science*, Vol. 389, 2016 Pp. 810-823.
- [3] R. Kumari, C. Blawert, and J. D. Majumdar, "Microstructures and Properties of Plasma Electrolytic Oxidized Ti Alloy (Ti-6Al-4V) for Bio-implant Application," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 47, 2016, Pp. 788-800.
- [4] A. L. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland, A. Matthews, and S. J. Dowey, "Plasma electrolysis for surface engineering," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 122, 1999, Pp. 73-93.
- [5] T. ArunnellaiaPpan, S. Anoop, and N. Rameshbabu, "Fabrication of multifunctional black PEO coatings on AA7075 for spacecraft applications," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 307, 2016, Pp. 735-746.
- [6] Y. Savguira, Q. Ni, P. H. Sobrinho, T. H. North, and S. J. Thorpe, "Effect of Process Parameters on the Corrosion Resistance Properties of PEO Coatings Produced on AZ31B Magnesium Alloy," in *Meeting Abstracts*, 2016, Pp. 936-936.

- [7] J. Curran and T. Clyne, "Thermo-physical properties of plasma electrolytic oxide coatings on aluminium," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 199, 2005, Pp. 168-176.
- [8] J.-H. Lee and S.-J. Kim, "Characterization of Ceramic Oxide Layer Produced on Commercial Al Alloy by Plasma Electrolytic Oxidation in Various KOH Concentrations," *Journal of the Korean institute of surface engineering*, Vol. 49, 2016, Pp. 119-124.
- [9] P. Wang, J. Li, Y. Guo, Z. Yang, and J. Wang, "Ceramic coating formation on high Si containing Al alloy by PEO process," *Surface Engineering*, Vol. 32, 2016, Pp. 428-434.
- [10] J. Martin, A. Melhem, I. Shchedrina, T. Duchanoy, A. Nomine, G. Henrion, T. Czerwies, T. Belmonte, "Effects of electrical parameters on plasma electrolytic oxidation of aluminium," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 221, 2013, Pp. 70-76.
- [11] C. Dunleavy, J. Curran, and T. Clyne, "Time dependent statistics of plasma discharge parameters during bulk AC plasma electrolytic oxidation of aluminium," *Applied Surface Science*, Vol. 268, 2013, Pp. 397-409.
- [12] S. F. Sotomonte, C. B. Pinzon, and S. G. Vergara, "Growth of PEO ceramic coatings on AA 2024-T3 aluminium alloy," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, p. 012037.
- [13] X. Li, X. Liu, and B. L. Luan, "Corrosion and wear properties of PEO coatings formed on AM60B alloy in NaAlO₂ electrolytes," *Applied Surface Science*, Vol. 257, 2011, Pp. 9135-9141.
- [14] R. Hussein, D. Northwood, and X. Nie, "The effect of processing parameters and substrate composition on the corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation (PEO) coated magnesium alloys," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 237, 2013, Pp. 357-368.
- [15] P. Sun, Y. Lu, Y. Yuan, X. Jing, and M. Zhang, "Preparation and characterization of duplex PEO/MoC coatings on Mg-Li alloy," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 205, 2011, Pp. 4500-4506.
- [16] J. Zhuang, Y. Guo, N. Xiang, Y. Xiong, Q. Hu, and R. Song, "A study on microstructure and corrosion resistance of ZrO₂-containing PEO coatings formed on AZ31 Mg alloy in phosphate-based electrolyte," *Applied Surface Science*, Vol. 357, 2015, Pp. 1463-1471.
- [17] J.-Y. Yu, S.-D. Choi, J.-I. Yu, J.-G. Yun, H. Ko, and Y.-J. Jung, "The Characteristic Study of Plasma Electrolytic Oxidation in AZ31B Magnesium Alloy," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, Vol. 10, 2015, Pp. 1746-1751.
- [18] H. Wu, J. Wang, B. Long, B. Long, Z. Jin, W. Naidan, F. Yu, D. Bi, "Ultra-hard ceramic coatings fabricated through microarc oxidation on aluminium alloy," *Applied Surface Science*, Vol. 252, 2005, Pp. 1545-1552.
- [19] M. Badaruddin, C. J. Wang, H. Wardono, and D. Asmi, "High-temperature oxidation behavior of aluminized AISI 4130 steel," in *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FRONTIER OF APPLIED PHYSICS (ISFAP) 2015*, p. 040002, 2016.
- [20] W. Gu, D. Shen, Y. Wang, G. Chen, W. Feng, G. Zhang, S. Fan, C. Liu, S. yang, "Deposition of duplex Al₂O₃/Aluminum coatings on steel using a combined technique of arc spraying and plasma electrolytic oxidation," *Applied surface science*, Vol. 252, 2006, Pp. 2927-2932.
- [21] Z. Xue, X. Hao, Y. Huang, L. Gu, Y. Ren, and R. Zheng, "Wear Resistance and Wear Mechanism of a Hot Dip Aluminized Steel in Sliding Wear Test," *Surface Review and Letters*, Vol. 23, p. 1550098, 2016.

-
- [22] J. Lou and C. X. Ruan, "Cyclic Oxidation Resistance of Hot-DiPping Aluminized Steel," in Materials Science Forum, 2016, Pp. 9-13.
- [23] D. B. Lee and M. J. Kim, "High-Temperature Corrosion of Aluminized and Chromized Carbon Steel in N₂-2.5% H₂S Gas," Science of Advanced Materials, Vol. 8, 2016. Pp. 128-133.
- [24] X. F. Sun, Y. L. Huang, W. Song, and M. M. Sun, "Study on Thermal-Shock-Resistance of the Composite Coating of 20 Steel Substrate by Hot Dip Aluminum and Micro-Arc Oxidation," in Key Engineering Materials, 2017, Pp. 450-453.
- [25] X. Huang, Q. Yang, and D. Guzonas, "Performance of Chemical Vapor Deposition and Plasma Spray-Coated Stainless Steel 310 in Supercritical Water," Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, Vol. 2, 2016, p. 021011.