فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، شماره ۱۲ (پیاپی ۲۲ ـ سال ششم) زمستان ۱۳۹۵ اثرولتاژ اعمالی بر پوشش ایجاد شده به روش اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی (PEO) روی فولاد آلومینایز

# اثرولتاژاعمالیبرپوششایجادشد*ه*بهروشاکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی (PEO) روی فولاد آلومینایز

محسن ساکت بجندی \*\*، چنگیز دهقانیان ۲، سید محمد نوری ۳

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

\* نویسنده مسئول: Msaket@ut.ac.ir

تاريخ دريافت: ١٣٩٥/١٩/٢۶ تاريخ پذيرش: ١٣٩٥/١١/٣٠

## چکیدہ

در این پژوهش، از روش غوطهوریگرم (دمای 2°۷۹ 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 پرتوایکس (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(۳۰۳)، دارای چگالی جریان خوردگی <sup>۲</sup>۰۹ مار ۲/۸ نسبت به نمونههای پوشش دهی شده در ولتاژ ۴۰۰ ولت، با درصد تخلخل (۴/۸۶) و ضخامت به ترتیب با چگالی جریانهای خوردگی ۲۰۰<sup>۹</sup> ۲۰۱۲ و ۲/۸۲ <sup>۲۰</sup>۰۰ ماومت به نمونههای پوشش دهی را به ترتیب در حدود ۲/۵ و ۲/۸ برابر بهبود میدهد.

كلمات كليدى: غوطهورى كرم، فولاد آلومينايز شده، اكسيداسيون الكتروليتى پلاسمايى ، مقاومت به خوردكى؛

# **The Effect of APplied Voltage on PEO Coatings on Aluminized Steel**

M. Saket bejandi 1\*, CH. Dehghanian 2, S. M. Noori 3

<sup>1</sup> M. Sc., Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Tehran University.

<sup>2</sup> Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Tehran University.

<sup>3</sup> 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  $\mu$ m had a corrosion current density of 2.88 ×10<sup>-8</sup> A/cm<sup>2</sup> which in comparison to that of coated samples produced at Voltages of 350 and 450 Volts with corrosion current densities of 1.04×10<sup>-7</sup> A/cm<sup>2</sup> and 2.18×10<sup>-7</sup> A/cm<sup>2</sup> 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

اكسيداسيون الكتروليتي پلاسمايي (PEO) فرايند نسبتاً جديدي است که برای ایجاد پوشش سرامیکی روی فلزات سبک با خاصیت پسیوشوندگی مانند: آلومینیوم [۱]، منیزیم [۲]، تیتانیوم [۳] و آلياژهايشان بكار ميرود. خواص عالي سايشي، سختي، خوردگي، الکتریکی، چسبندگی و حرارتی این پوشش ها موجب به کارگیری آنها در اجزای ماشینهای نساجی، شاتلهای فضایی، تجهیزات موتورها و برخی وسایل پزشکی شده است [۷-۴]. به کمک این روش می توان فیلمهای اکسیدی با مورفولوژیها و میزان تخلخل متفاوت (از یک پوشش متخلخل تا یک پوشش متراکم) روی سطح آلومينيوم ايجاد نمود [٧-٩] . خواص پوشش هاي توليد شده در این روش، به نوع، غلظت و pH الکترولیت، نوع و دانسیته جریان/ ولتاژ و پارامترهای پالسی (فرکانس و دوره کاری) بستگی دارند [۱۲–۱۰]. متداولترین الکترولیتهای مورد استفاده در این روش شامل نمکهای آلومیناتی [۱۴، ۱۴]، سیلیکاتی [۱۵]، فسفاتی [۱۴] و ... هستند که گاهی به صورت ترکیبی [۱۷] نیز مورد استفاده قرار می گیرند. در تحقیقات پیشین نشان داده شده که پوشش های PEO روی زیرلایه آلومینیومی عمدتاً شامل فازهای α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> هستند که سختی حداکثری در حدود ۲۵۰۰ ویکرز دارند [11]

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 پسیوشدن 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، کنید. تاکنون با روشهای متعددی مانند اسپری آوک]، 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 تحقيق

نمونههای فولاد ساده کربنی با ترکیب شیمیایی نمایش داده شده در جدول ۱و ابعاد mm ۵×۲۰×۳۰ بعنوان زیرلایه انتخاب شدند. لبههای تیز تا حد امکان ماشین کاری 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. نمونه ها پس از قلیایی شویی

(۱۰٪- NaOH) و اسیدشویی (۳۰٪-HCl)، فرایند غوطهوری گرم در مذاب آلومینیم حاوی ۵٪ سیلسیم و در دمای ۷۵۰°C به مدت ۵ دقیقه انجام شد. ضخامت لایه آلومینیومی و لایه بین فلزی FeAl پس از فرایند غوطهوری گرم به ترتیب ۷۵ و μm ۱۵ بود که ضخامت لایه آلومینیومی ایجاد شده، برای بخش پوشش نهایی به روش PEO مناسب می باشد.

جدول ۱ ـ تر کیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در این تحقیق

Fe	С	Si	Mn	Р	S
Base	•/17	۰/۱۶	• /۶٨	•/••٨	•/• 44

حجم الکترولیت مورد استفاده ml و شامل محلول آبی <sup>۱</sup>-۱۰gL و سدیم فسفات (Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>)، <sup>۱</sup> AgL سدیم سیلیکات (Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) و (Na<sub>5</sub>IO<sub>3</sub> Y پتاسیم هیدروکسید (KOH) بود. Hp الکترولیت تهیه شده ۱۳/۰۶ و سرعت چرخش مگنت در محلول نیز pm ۵۰۰rp بود. از یک ۱۳/۰۶ و سرعت چرخش مگنت در محلول نیز ۵۰۰rp بود. از یک منبع تغذیه با توان ۲۰ KW و یک تولید کننده 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 ۲۹۲ طراحی شدکه با عبور جریان نگه داشته شد (شکل ۱). نمونههای فولاد آلومینایز شده بعنوان آند نگه داشته شد (شکل ۱). نمونههای فولاد آلومینایز شده بعنوان آند و لوله مارپیچ آبگرد بهعنوان کاتد قرار گرفت. نمونهها در سه ولتاژ تحت فرایند قرار گرفتند. سایر پارامترها مانند زمان پوشش دهی 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.

آنالیز فازی یوشش ایجاد شده با دستگاه یراش یرتوایکس مدل Philips X'Pert Pro X-ray diffractometer و به كمك نرمافزار X Pert HighScore Plus تعيين شد. مورفولوژی سطحی و مقطع عرضی پوشش اعمالی با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Camson MV2300 Oxford model 7538 بررسى گردید. اندازه حفرات و ضخامت پوشش به کمک نرمافزار Digimizer از روی تصویر SEM محاسبه گردید. رفتار خوردگی اين يوشش ها در يک سل سه الکتروده شامل: الکترود کالومل اشباع بعنوان الكترود مرجع، ورق پلاتيني بعنوان الكترود شمارنده و نمونه پوشش دهي شده نيز بعنوان الکترود کاري مورد ارزيابي قرار گرفتند. در تمامي نمونهها به منظور حصول اطمينان از نفوذ الكتروليت، قسمتی از سطح نمونه با دقت نسبی و ثابت ۱ cm<sup>2</sup> بوسیله یک روكش عايق جدا شدند و سپس در معرض محلول خورنده (محلول ۳/۵ ٪ سدیم کلرید) قرار گرفتند. نمونه ها به مدت یکساعت برای پايداري و ثابت شدن پتانسيل قبل از آزمون پلاريزاسيون در محلول سديم كلريد غوطهور شدند. آزمون پلاريزاسيون از ٣/٠- تا ١ ولت نسبت به OCP و با نرخ روبش ۱ mV/s انجام شد و سپس با استفاده از معادله ۱ مقاومت پلاريزاسيون پوشش محاسبه شد. آزمون امپدانس الكتروشيميايي نيز در دامنه اغتشاش t۱۰ mV و محدوده فركانس N• kHz تا mHz با استفاده از دستگاه Solarton SI-1260 انجام شد.

شکل ۲ الگوی پراش پر توایکس نمونه های آلومینایز و پوشش دهی شده در ولتاژهای مختلف را نشان می دهد. مشاهده می شود که نمونه آلومینایز دارای فاز Al میباشدکه مربوط به لایه بالایی یوشش آلومینیمی است و همچنین فازهای FeAl و Fe<sub>2</sub>Al که مربوط به لايه مياني فولاد آلومينايز (لايه اينترمتاليك) مي شود. به دليل تخلخل در يوشش وجود قلههاي Al مربوط به لايههاي زيرين سطح است که در اثر نفوذ پر توایکس حاصل شده است. همچنین فازهای Al2O3 ، Al2O3 و Al2O4 ف شناسايي شدند. لايه هاي اكسيدي در حین پرتاب شدن از کانال تخیله به سمت بیرون در تماس با الکترولیت واکنش داده و ترکیبات مختلفی را پدید می آورند. در واقع انجماد سريع آلوميناى مذاب، موجب جوانەزنى فاز Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> مي گردد. همچنين فاز موليت (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>nSiO<sub>2</sub>) در نتيجه واکنش بين آلومینای مذاب و کاتیونهای سیلیکاتی و فاز AIPO4 نیز از واکنش بین آلومینای مذاب در کانال تخلیه و کاتیونهای فسفاتی است. در واقع پوشش PEO، پوشش کامپوزیتی شامل فازهای اکسیدی (اكسيد آلومينيم)، سيليكاتي(مولايت يا سيليكات آلومينيم)، فسفاتي(فسفات آلومينيم) مي باشد.

۳ ـ ۲ ـ مورفولوژی و میکروساختار پوشش

شكل۳ تصوير ميكروسكوپ الكتروني روبشي (SEM) همراه



 $R_P = \frac{\beta_a \times \beta_c}{i_{corr} \times (\beta_a + \beta_c) \times (\psi \cdot \psi)}$ 

شكل ۲- الگوی پراش پرتوايكس پوشش سراميكی PEO روی فولاد آلومينايز .

1+

(1)

با نقشه توزیع عنصری (map) از سطح نمونههای پوشش دهی شده در ولتاژهای مختلف را نشان می دهد. 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.

همان طور که مشاهده می شود، میانگین اندازه حفرات روی سطح پوشش نهایی برای نمونه های ۳۵۷ و ۴۰۷، حدود ۷۱/۰ و μη ۹۷/۰ اندازه گیری شد که بزرگتر از حفرات پوشش های PEO انجام گرفته توسط محققین بر روی نمونه های از جنس AL یا Mg است[۲۱]. بعلاوه ساختار شبه آتشفشانی شامل اکسیدها و کانال های تخلیه در اطراف دهانه های آتشفشان مشاهده گردید. میکروتر که های مشاهده شده روی سطح پوشش PEO، مربوط به تنش حرارتی ناشی از انجماد سریع آلومینای ذوب شده در کانال های تخلیه است. از آنجایی که دما در کانال های تخلیه به حدود ۲۰۰۰ می رسد که در اثر تماس با الکترولیت در مجاورت خود با نرخ ۲۸ <sup>۹</sup> ۸۰ منجمد می شود [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 می دهد. همان طور که مشاهده می شود، پوشش های PEO روی فولاد آلومینایز شده برخلاف این پوشش ها روی زیرلایه آلومینیومی دارای لایه متخلخل بیرونی و متراکم درونی بصورت مجزا نیستند و تنها لایه سرامیکی، لایه آلومینیومی باقیمانده و لایه بین فلزی FeAI وجود دارند [۲۲]. شکستگیها و کند گیهای متعددی که در تصویر مقطع عرضی نمونه ها مشاهده می شود مربوط به ترد بودن لایه سرامیکی است. همچنین ترکهایی درپوشش مشاهده می شود که می تواند ناشی از افزایش انرژی اعمالی حاصل از افزایش ولتاژ باشد. البته لایه نازک آلومنیوم پلاستیسیته خوبی داشته و تاحدی تافنس را در فصل مشترک پوشش سرامیکی بهبود می بخشد.

همان گونه که در نقشه توزیع عناصر مقطع عرضی مشاهده می شود، 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 می دهد و Si به لایه آلومینیومی و بین فلزی FeAI هم می رسد. با افزایش بیشتر ولتاژ برای نمونه ۴۵۷ مقدار

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

با افزایش ولتاژ اعمالی از ۳۵۰ تا ۴۵۰ ولت، اندازه حفرات سطحی تا ۸/۵ mµ 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 ۳۲ می شود. به نظر می رسد که افزایش ولتاژ اعمالی دو اثر معکوس هم دارد:

با افزایش ولتاژ اعمالی، فرایند اکسیداسیون فلز سریع تر رخ
داده و ضخامت لایه اکسیدی افزایش مییابد. این افزایش در
واکنش پذیری منجر به بهبود استحکام چسبندگی فصل مشترک
اکسید/زیرلایه می شود.

-از طرف دیگر با افزایش ولتاژ اعمالی، بعلت افزایش انرژی ورودی در کانالهای تخلیه، جرقهها درشت تر 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 ۱۰۰ ولت) تعادلی بین دو اثر فوق وجود خواهد داشت بصورتی که ضخامت لایه حداکثر و اندازه حفرات در حداقل باشد.

همان طور که مشاهده می شود با افزایش ولتاژ اعمالی، دانسیته کانالهای تخلیه موجود روی سطح پوشش کاهش می یابد، درحالی که اندازه تخلخلها بزرگتر می شود. بطور کلی هنگامی که ولتاژ اعمالی کم است پوشش PEO ناز ک هموار و دارای حفرات کوچکی است. با افزایش مقدار ولتاژ فرایند اکسیداسیون تسریع یافته و ضخامت پوشش افزایش می یابد. جدول ۲ مقادیر ضخامت لایه اعمالی، میانگین اندازه حفرات، درصد و دانسیته تخلخل ها محاسبه شده با نرمافزار Digimizer را نشان می دهد. مشاهده می گردد که با افزایش ولتاژ اعمالی علاوه بر ضخامت پوشش، میانگین اندازه حفرات و درصد تخلخل سطحی نیز افزایش می یابد.

فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، شماره ۱۲ (پیاپی ۲۲ ـ سال ششم) زمستان ۱۳۹۵ ۱۳ اثرولتاژ اعمالی بر پوشش ایجاد شده به روش اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی (PEO) روی فولاد آلومینایز



شکل ۳\_ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی و نقشههای عنصری پوشش PEO روی فولاد آلومینایز ؛ (الف) ۳۵۷ (ب) ۷۰۶ و (ج) ٤٥٧.











(الف)

شکل ٤ـ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مقطعهای عرضی و نقشه عنصری پوشش PEO روی فولاد آلومینایز ؛ (الف) ۳۵۷ (ب) ۷۰۶ و (ج) ٤٥٧

#### ۳\_۳\_ رفتار خوردگی

V40

V45

برای بررسی مقاومت به خوردگی پوششهای ایجاد شده از روش پلاریزاسیون پتنسیودینامیک استفاده گردید. شکل۵ منحنی پلاریزاسیون پوششهای PEO روی فولاد آلومینایز شده را در محلول ۳/۵ ٪ سدیم کلرید نشان میدهد. همچنین پارامترهای استخراج شده از منحنى پلاريزاسيون شامل پتانسيل و دانسيته جريان

۴۲±۲

خوردگی، شیبهای تافل کاتدی و آندی و مقاومت پلاریزاسیون در جدول۳ مشاهده مي گردد. مشاهده می شود که با افزایش ولتاژ اعمالی در فرایند PEO (نمونه های ۳۵۷ و ۴۰۷)، مقدار پتانسیل خوردگی از ۰/۶۵– به ۷۵۷-کاهش و بعد از آن برای ۷۴۵ این مقدار به ۰/۶۸۷ افزایش یافت. این مقدار برای نمونه فولاد آلومینایز /۱۹۶۴۷- است. شیب تافل

V/·×1.\*

جدول ۲ ـ مقادیر ضخامت پوشش، میانگین اندازه حفرات و درصد تخلخل سطحی برای نمونههای پوششدهی شده روی فولاد آلومینایز شده				
دانسيته تخلخل هاي سطحي	درصد تخلخل سطحي	ميانگين اندازه حفرات	ميانگين ضخامت پوشش	1: . : . 15
(no. pores /mm <sup>2</sup> )	(%)	(µm)	(µm)	ند نمو نه
$f/f \times 1 \cdot ^{\Delta}$	۴/۰۸	۰/۷۱۴±۰/۰۱	۲ ۱±۱	V35
۲/۶×۱۰ <sup>۵</sup>	۴/٨۶	・/ <b>V</b> ٩・±・/・٣	*·±*	V40

 $\Lambda/\delta \pm \cdot / 1$ 

٧/٧١



شکل ۵ ـ منحنی پلاریزاسیون پوششهای PEO روی فولاد آلومینایز .

<u>وی</u> فولاد آلومینایز	پوششهای PEO ر	منحنى پلاريزاسيون	، استخراج شده از	۳– مقادیر پارامترهای	جدول
---------------------------	---------------	-------------------	------------------	----------------------	------

$\frac{R_p}{(\Omega.cm2)}$	$\beta_{c}$ (V/dec)	$\beta_a$ (V/dec)	i <sub>corr</sub> (A/cm2)	E <sub>corr</sub> (V)	كد نمونه
vv۵∧±۱۰۰	•/• <del>?</del> V	•/•٣١	(1/1 <b>1</b> ±•/•1)×1• <sup>-9</sup>	$-\cdot/99\pm/\cdot\delta$	Aluminized steel
912TT±12.	•/•04	•/•9٨	(1/•F±•/٣)×1•- <sup>-</sup>	$-\cdot/V\delta\pm\cdot/\cdot$ )	V35
111077±70.	•/•89	•/•14	$(\Upsilon/\Lambda\Lambda\pm \cdot/1)\times 1\cdot^{-\Lambda}$	-•/9۵ ±•/•V	V40
<b>⋎</b> ∙٩٩ <b>۲</b> ±۱۲۰	•/188	•/•44	(Y/1A±•/1)×1•- <sup>-</sup>	-•/9 <b>\</b> ±•/•٣	V45

14

فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، شماره ۱۲ (پیاپی ۲۲ ـ سال ششم) زمستان ۱۳۹۵ اثرولتاژ اعمالی بر پوشش ایجاد شده به روش اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی (PEO) روی فولاد آلومینایز

مثل اندازه حفرات و تخلخل های سطحی و نیز ضخامت پوشش سرامیکی است. لذا در نمونه ۴۰۷ 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 ۴۰۷ 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 پوشش دهی و واکنش های آندی مختلفی که برای هر نمونه رخ می دهد متفاوت است. همان طور که در جدول ۳ مشاهده می شود، مقدار دانسیته جریان خوردگی برای نمونه ۴۰۷ از همه پایین تر است، که نشان دهنده 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 <sup>-</sup>CD به زیرلایه وابسته به مواردی

### نتيجه گيري

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

۱- آنالیز فازی پوشش نشان دهنده تشکیل فازهای AI<sub>2</sub>O<sub>3</sub> anSiO<sub>2</sub> ، AI<sub>2</sub>O<sub>3</sub> anSiO<sub>2</sub> و AI<sub>2</sub>O<sub>2</sub> AI<sub>2</sub>O
۲- پوشش نهایی از روی سطح به ترتیب شامل: لایه سرامیکی، لایه آلومینیوم باقیمانده و لایه بین فلزی FeAI بود. پوشش های ایجاد شده مقاومت به خوردگی بسیار خوبی را از خود نشان دادند.
۳- نمونه ۴۰۷ با ضخامتی در حدود نشان دادند.
۳- نمونه ۲۰۷ با ضخامتی در حدود مان دادند.
۳- نمونه ۲۰۷ با ضخامتی در حدود مان دادند.
۳- نمونه ۲۰۷ با ضخامتی در حدود نشان دادند.
۳- نمونه ۲۰۷ با ضخامتی در حدود مان دادند.
۳- نمونه فولاد آلومینایز بود.
۳- نمونه و لایه بین خرین خوردگی (۲۰۸۹ × ۲۰۰۸) و بالاترین مقاومت بالا مان دادند.
۳- نمونه ۲۰۷ با ضخامتی در حدود مان دادند.
۳- نمونه فولاد آلومینایز بود.
۳- مان دادند.
۳- نمونه ۲۰۷ با ضخامتی در حدود مان ۲۰۸۹ و اندازه حفرات ۲۰۳ ۲۰۰۹ بایین ترین دانسیته جریان خوردگی (۲۰۸۹ ۸۰۰۰ ۲۰۰۰ و بالاترین مقاومت پلاریزاسیون (۲۰۸۵ ۵۰۰ ۲۰۰۰ دان ۲۰۰۰ مان ۲۰۰۰ ده مان دادند.
۳- با افزایش بیشتر ولتاژ اعمالی تا ۴۵۰ ولت به دلیل بزرگ شدن حفرات نفوذ یون خورنده ۲۰۰ به زیرلایه راحت ر شده و علیرغم ضخامت بیشتر،

مقاومت به خوردگی کمتری را از خود نشان داد.

#### مراجع

- [1] S. Gnedenkov, S. Sinebryukhov, V. Egorkin, and I. Vyaliy, "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 NaAlO 2 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 ZrO 2-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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/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.

1	
	فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، شماره ۱۲ (پیاپی ۲۲ ــسال ششم) زمستان ۱۳۹۵ اثر ۱۳۱۴ ما است شراع می مشالع میا ایم می ایم می ایم می ایم می ایم ایم
11	الروكتار اعمالي بر پوشش ايجاد شده به روش الحسيداسيون الحدروكتيني پادشمايي (PEO) روى فولاد الوميتاير

- [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% H,S 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.