

تأثیر درصد اوره بر ساختار و مقاومت خوردگی پوشش اکسیداسیون پلاسمایی الکترولیتی اعمال شده بر روی آلومینیم ۱۰۵۰

رضاحسینی راد، محمود علی اف خضرای، منصور طورانی، علیرضا صبور روح اقدم

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت مقاله ۹۵/۰۳/۰۳ - پذیرش مقاله : ۹۶/۰۳/۰۹)

چکیده

در این تحقیق پوشش اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی (PEO) با استفاده از محلول الکترولیت قلیایی و با افزودن درصدهای متفاوتی از اوره (۱۰ و ۱۰۰ گرم در لیتر)، در زمان‌های مختلف (۵ و ۲۰ دقیقه) و در دو سطح جریان (۳۰ و ۱۰۰ میلی آمپر بر سانتی متر مربع) بر روی زیرلایه آلومینیومی اعمال شد. برای بررسی مقطع عرضی و ساختار سطح از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و برای بررسی مقاومت به خوردگی پوشش‌ها نیز از تست طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) استفاده شده است. تصاویر SEM از سطح نمونه‌ها نشان می‌دهد که پوشش‌های شکل گرفته در الکترولیت حاوی ۱۰۰ گرم در لیتر اوره یکنواخت‌تر و دارای تخلخل‌های ریزتر و پوشش‌های شکل گرفته در الکترولیت حاوی ۱۰ گرم در لیتر اوره، دارای ساختاری درشت‌تر همراه با تخلخل‌های بزرگتر است. نتایج EIS نیز نشان می‌دهد که مدول امپدانس برای پوشش حاوی مقادیر زیادتر اوره تقریباً ۵ برابر بیشتر از مدول امپدانس برای پوشش‌های حاوی مقادیر کمتر اوره است.

واژه‌های کلیدی: پوشش اکسیداسیون پلاسمایی الکترولیتی، اوره، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی.

Effect of Urea on The Microstructure and Corrosion Resistance of Plasma Electrolyte Oxidation Coating Applied on Al 1050

Reza HosseiniRad, Mahmoud Aliofkhazraei, Mansour Toorani, Alireza Sabour
Roohaghdam

Department of Material Engineering, Tarbiat Modares University

(Received 23 May 2016, accepted 30 May 2017)

Abstract

In this study, plasma electrolyte oxidation (PEO) coating was applied on the aluminum sheets in an alkaline electrolyte solution with different amount of urea (10,100 g/l) and different time period (10,20 min) and in two level of current density (30,100 mA/cm²). SEM analysis was used to study surface structure and cross-section of prepared coatings. Also, anti-corrosion properties of coatings were investigated by electrochemical impedance spectroscopy (EIS). SEM analysis from top surfaces showed that the coatings formed in the electrolyte containing 100 g/l urea, are more uniform and have fine pores, while the coatings formed in the electrolyte containing 10 g/l urea have coarse structure with larger pores. EIS results showed that the impedance modulus of coatings containing 100 gr/l urea were almost 10 times higher than for coatings containing 10 g/l urea.

Keywords: Plasma electrolyte oxidation; urea; electrochemical impedance spectroscopy.

E-mail of Corresponding author: khazraei@modares.ac.ir.

مقدمه

جدول ۱. ترکیب آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰.

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
۱۰۵۰	۰/۲۵	۰/۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	/۰۵	/۰۳	۹۵/۵

با تخریب لایه اکسیدی شکل گرفته بر روی سطح آلومینیوم، با گذشت زمان پدیده خوردگی رخ می‌دهد. اعمال پوشش یکی از راهکارهای مطلوب جهت جلوگیری از تخریب لایه اکسیدی و کند نمودن واکنش‌های خوردگی است. بسیاری از پوشش‌ها همانند پوشش‌های کروماته به خاطر مسایل زیست محیطی هر روزه با پوشش‌های نسل جدید دوست‌دار محیط زیست، در حال جایگزین شدن هستند [۱-۳]. لایه‌های تبدیلی نیز این امکان را فراهم می‌کنند تا بتوان با اصلاح زیرلایه، سطحی را با چسبندگی بهتر و عاری از آلودگی به وجود بیاورند [۴-۶]. فرآیند اکسیداسیون پلاسمایی الکترولیتی (PEO) در ولتاژهای بالا و در الکترولیت‌های دوست‌دار محیط زیست انجام شده و باعث تولید پوشش شبه سرامیکی ضخیم می‌شود [۷]. لایه شبه سرامیکی / اکسیدی پیوند محکمی را با زیرلایه برقرار کرده و ترکیبی از خواص مقاومت به خوردگی و مقاومت به سایش را فراهم می‌کند [۸]. مطالعات انجام گرفته، نشان می‌دهد که خواص پوشش به وجود آمده با استفاده از فرآیند PEO به طور عمده به ماهیت زیرلایه، نوع منبع تغذیه، ترکیب و غلظت الکترولیت و پارامترهای الکتریکی همانند نوع جریان اعمالی و دانسیته جریان بستگی دارد [۹، ۱۰]. با توجه به مطالب بیان شده در این تحقیق به بررسی تاثیر حضور اوره بعنوان افزودنی بر خواص ضد خوردگی و ساختاری پوشش‌های PEO اعمال شده بر آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ پرداخته شده است. همچنین اثر تغییر زمان فرآیند و دانسیته جریان بر خواص پوشش ایجاد شده نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش

آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ در ابعاد $۶ \times ۵ \times ۰/۲ \text{ Cm}^3$ و با ترکیب شیمیایی ارایه شده در جدول ۱ بعنوان زیرلایه مورد استفاده قرار گرفت.

آماده‌سازی زیرلایه

عملیات آماده‌سازی سطح با پولیش توسط سنباده‌های ۸۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ انجام پذیرفت. سپس نمونه‌ها در داخل استون چربی‌گیری شده و در نهایت قبل از انجام فرآیند PEO، نمونه‌ها با آب مقطر شسته و با دمش هوا خشک گردیدند.

انجام فرآیند PEO

از محلول الکترولیت با ترکیب سیلیکات سدیم (6 gr/l)، فسفات سدیم (4 gr/l) و هیدروکسید پتاسیم (2 gr/l) همراه با دو مقدار متفاوت ۱۰ و 100 gr/l افزودنی اوره استفاده شد. همچنین دو سطح جریان DC مختلف ۳۰ و ۱۰۰ میلی آمپر بر سانتی متر مربع در زمان‌های مختلف ۵ و ۲۰ دقیقه جهت پوشش‌دهی استفاده شدند. پوشش‌دهی به روش PEO با استفاده از مجموعه‌ای از وسایل شامل محفظه فولادی زنگ نزن حاوی الکترولیت قلیایی بعنوان کاتد، نمونه آلومینیومی بعنوان آنود، یک همزن جهت خنک نگه داشتن محلول الکترولیت و انتقال بهتر اکسیژن در داخل محلول الکترولیت و یک منبع تغذیه جریان ثابت انجام پذیرفت. بعد از انجام فرآیند پوشش‌دهی نمونه‌ها با آب مقطر شسته و در هوا خشک شدند. در جدول ۲ شرایط پوشش‌دهی نمونه‌ها همراه با کد بندی آن‌ها ارایه شده است.

جدول ۲. نمونه‌های مورد استفاده شده همراه با کد و پارامتر.

کد نمونه	پوشش PEO (پارامترهای PEO)		
	اوره (g/l)	جریان (mA/cm ²)	زمان (دقیقه)
۱	بدون PEO		
۲	۱۰	۳۰	۵
۳	۱۰	۱۰۰	۲۰
۴	۱۰۰	۳۰	۵
۵	۱۰۰	۱۰۰	۲۰

اندازه‌گیری‌های میکروسکوپ الکترونی

از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Philips XL 30 برای بررسی ساختار سطحی و تصاویر مقطع عرضی نمونه‌های پوششی استفاده شد.

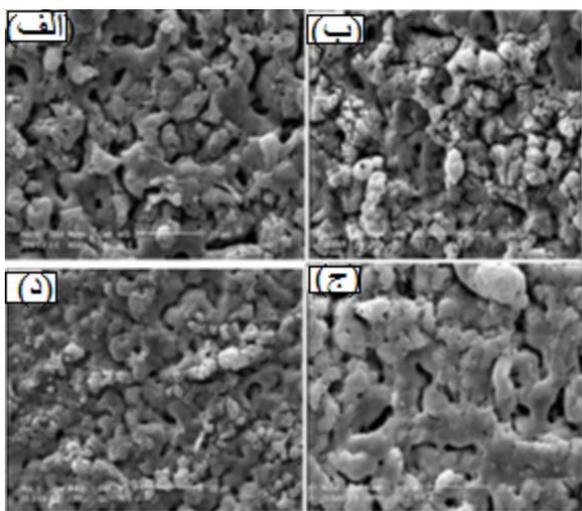
آزمون خوردگی

عملکرد محافظت از خوردگی نمونه‌های آلومینیومی پوشش داده شده با استفاده از فرآیند PEO، بوسیله آنالیز طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) در یک سل سه الکترودی معمولی صورت پذیرفت؛ که در آن کالومل اشباع (SCE) بعنوان الکترود مرجع، پلاتین بعنوان الکترود کمکی و نمونه پوششی هم بعنوان الکترود کار است. جهت انجام آزمون، از سطح پوشش در معرض محلول الکترولیت ۳/۵٪ NaCl قرار گرفت. آزمون با استفاده از دستگاه پتانسیواستات/گالوانواستات (EG&G) بعد از نیم ساعت غوطه وری جهت رسیدن به پتانسیل مدار باز انجام پذیرفت. اندازه‌گیری‌های امپدانس در محدوده‌ای از فرکانس 65KHz-0.01Hz انجام گرفت و داده‌های حاصل از آزمون بوسیله نرم‌افزار zview2 تحلیل و بررسی شد.

نتایج و بحث

بررسی ریزساختار

شکل ۱ تصویر مربوط به ساختار سطحی پوشش‌های اکسیدی را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود سطح پوشش‌های PEO ساختار پنکیکی دارد. با توجه به مکانیزم فرآیند PEO می‌توان بیان نمود که در مرکز هر کدام از این پنکیک‌ها، یک کانال تخلیه وجود داشته که مواد مذاب بسرعت از این کانال بیرون رانده شده و در مرز و کنار آن منجمد می‌شوند و منجر به ایجاد ساختار پنکیک مانند می‌گردند [۱۱، ۱۲]. سوراخ‌هایی با قطر نسبتاً بزرگ در مرکز پنکیک‌ها نشان دهنده قدرت بالای تخلیه الکتریکی رخ داده در کانال است. تخلیه‌های قوی‌تر بیانگر انرژی بیشتر بوده و در نتیجه باعث شده تا قسمت بیشتری از زیرلایه و پوشش ذوب شده و آتشفشان‌های قوی‌تری را بوجود آورده و در نتیجه پس از انجماد، حفرات با قطر بزرگتری را ایجاد می‌کند [۱۱]. در شکل ۱ تخلخل‌های با اندازه‌های مختلف دیده می‌شود، که بیانگر قدرت تخلیه الکتریکی رخ داده بر روی سطح پوشش است [۱۱]. همچنین نمونه‌های پوششی شامل میکروترک‌ها بوده که دلیل آن می‌تواند به خاطر تنش‌های حرارتی به وجود آمده از انجماد سریع اکسیدهای مذاب باشد [۱۲، ۱۳].



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از ساختار سطحی پوشش‌ها:

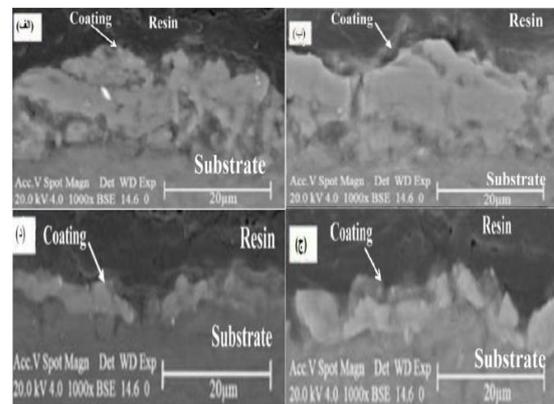
الف) نمونه ۲ ب) نمونه ۳ ج) نمونه ۴ د) نمونه ۵

تغییر کرده است. بدین ترتیب که در مقادیر بالای اوره (۱۰۰ گرم)، ضخامت پوشش PEO کاهش پیدا کرده است. بر اساس مشاهدات می‌توان دو دلیل را برای اختلاف در ساختار مطرح کرد: اول این‌که شدت انرژی در پلاسمای رخ داده در محلول الکترولیت حاوی مقادیر بالای اوره، پایین است. دوم این‌که اکسی نیتريت آلومینیوم رسوب یافته در اثر حضور افزودنی اوره، انرژی زیادی را برای ذوب شدن لازم دارد. بنابراین در مقادیر زیاد اوره ساختار ظریف‌تر شده و ضخامت لایه PEO کاهش می‌یابد [۱۴]. بنابراین مقادیر بالای اوره از یک طرف ساختار متراکم‌تر و از طرف دیگر ساختار نازک‌تری را ایجاد می‌کند.

آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)

برای آنالیز خواص خوردگی پوشش‌های PEO از آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شده است. در شکل ۴ نمودارهای نایکویست مربوط به نمونه‌های پوششی رسم شده است. با توجه به تصاویر SEM و مطالعات مشابه صورت گرفته در زمینه پوشش‌های PEO مبنی بر حضور ساختار دو لایه‌ای شامل متخلخل خارجی و متراکم داخلی، مدار معادلی با دو ثابت زمانی مطابق شکل ۳ جهت معادل‌سازی داده‌های امپدانس استفاده شد. در مدار معادل مذکور Re نشان دهنده مقاومت محلول الکترولیت و جفت R1/CPE1 بیانگر مقاومت و عنصر فاز ثابت لایه متخلخل خارجی پوشش PEO بوده و R2/CPE2 بیانگر مقاومت و عنصر فاز ثابت مربوط لایه متراکم داخلی است [۱۵].

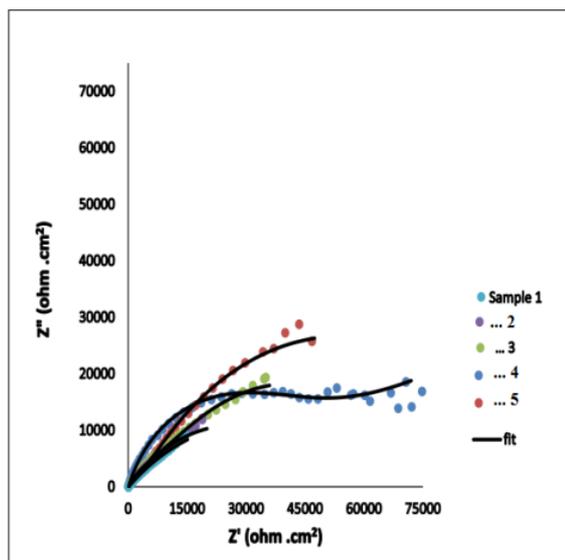
جریان و زمان از دیگر پارامترهای موثر بر خواص پوشش PEO هستند. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش زمان، میکروتراک‌ها در پوشش زیاد شده و همچنین تخلخل‌های با قطرهای بزرگتر را می‌توان مشاهده نمود [۱۳]. با توجه به تصاویر ساختار (شکل ۱) می‌توان تاثیر پارامتر زمان و دانسیته جریان را بر ساختار پوشش حاصله، مشاهده کرد؛ بنحوی که با افزایش زمان فرآیند، پوششی با میزان تخلخل بالاتر و حفرات درشت‌تر ایجاد شده است. همچنین ساختار ایجاد شده در دانسیته جریان کمتر، یکنواخت‌تر بوده است.



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی مقطع عرضی پوشش‌ها:

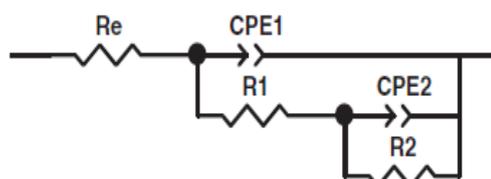
(الف) نمونه ۲ (ب) نمونه ۳ (ج) نمونه ۴ (د) نمونه ۵

اوره هم بعنوان منبع دارای نیتروژن، دو خاصیت جالب را داراست: اول این‌که قابلیت انحلال آن بسیار بالا بوده و قابلیت حل شدن ۱ گرم در یک میلی‌لیتر محلول را دارد. دوم این‌که چون در آب تجزیه نمی‌شود، بر روی رسانایی الکترولیت تاثیر قابل توجهی نمی‌گذارد. افزایش درصد اوره در الکترولیت از طریق افزایش نیتروژن در لایه اکسیدی حاصل، باعث ریز و یکنواخت کردن ساختار می‌شود. نتایج بدست آمده نیز نشان می‌دهد که با افزایش افزودنی اوره در یک زمان و دانسیته جریان ثابت، ساختاری با تراکم بالاتر حاصل شده است. شکل ۲ تاثیر اوره را بر مقطع عرضی پوشش نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که ضخامت لایه اکسیدی با تغییر مقدار اوره



شکل ۴. نمودار نایکوئیست نمونه‌های پوشش داده شده بعد از نیم ساعت غوطه‌وری نمونه‌ها در محلول ۳.۵٪ NaCl.

تفاوت در بین منحنی‌های نشان داده شده (شکل ۴) بیشتر در فرکانس‌های پایین مشهود است، از آنجایی که فرکانس‌های بالا بیانگر خواص لایه بیرونی پوشش PEO بوده و فرکانس‌های پایین بیانگر خواص لایه درونی این پوشش اکسیدی هستند [۱۷]. می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت لایه متراکم داخلی بالاتر از لایه متخلخل خارجی است. وجود دو ثابت زمانی در تمامی نمونه‌ها نشان می‌دهد که نفوذ از طریق لایه بیرونی و متخلخل کامل شده و الکترولیت در حال عبور از لایه متراکم داخلی است [۱۸]. به هر حال بالاتر بودن شعاع نیم‌دایره بیانگر این است که لایه متراکم نسبت به لایه متخلخل مقاومت به خوردگی بالاتری دارد. در نمونه‌های ۴ و ۵ به علت مقدار زیاد اوره نسبت به نمونه‌های ۲ و ۳ (۱۰ گرم اوره) دارای لایه بیرونی یکنواخت‌تر و همراه با تخلخل‌های ریزتری هستند، در واقع همین امر باعث شده تا در نمونه‌های ۴ و ۵ نفوذ به سختی انجام پذیرد که این موضوع با طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (شکل ۴) نیز همخوانی دارد که در آنجا نمونه‌های ۵،۴ دارای مدول امپدانس بالاتری هستند. همچنین داده‌های جدول ۳ نشان می‌دهد که مقاومت این نمونه‌ها (۵،۴) بالاتر بوده که این



شکل ۳. مدار معادل مربوط به غوطه‌وری فلز آلومینیوم پوشش داده شده با استفاده از PEO در محیط ۳.۵٪ NaCl.

به دلیل غیریکنواختی سطح پوشش و با توجه به لهیدگی نمودارهای نایکوئیست، از عنصر فاز ثابت بجای خازن خالص استفاده شد. میزان ظرفیت خازنی پوشش با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌گردد [۱۶]:

$$C_x = \frac{(R_x CPE)^{1/n}}{R_x} \quad (2)$$

که در آن C نشان دهنده ظرفیت خازنی، CPE ظرفیت غیرایده آل، R مقاومت و n فاکتور ظرفیت هستند. جدول ۳ داده‌های حاصل از معادل‌سازی داده‌های امپدانس را با استفاده از مدار معادل مذکور را نشان می‌دهد.

جدول ۳. پارامترهای حاصل از شبیه‌سازی نمودارهای امپدانس با استفاده از مدار معادل شکل ۳.

Sample	R1 ($\Omega.cm^2$)	CPE1 ($\Omega^{-1} cm^{-2} S^n$)	R2 ($\Omega.cm^2$)	CPE2 ($\Omega^{-1} cm^{-2} S^n$)
1	1175	3.85e-06	2325	1.20e-05
2	5300	1.69e-06	6847	6.30e-06
3	9805	3.85e-06	11256	1.20e-05
4	11542	8.91e-08	31154	5.61e-06
5	22256	1.09e-07	32325	1.96e-06

فرکانس‌های بالا خواص خوردگی لایه اول یا لایه متخلخل خارجی را نشان داده در حالی که نیم‌دایره مربوط به فرکانس‌های پایین خواص خوردگی لایه ممانعت‌کننده یا همان لایه متراکم داخلی را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۳ نیز مشاهده می‌شود که مقاومت لایه متراکم بیشتر از لایه متخلخل بوده و این بر اساس شکل ۲ نیز بدیهی بنظر می‌رسد. همچنین با توجه به جدول ۳ نیز مشاهده می‌شود پوشش‌های حاوی ۱۰۰ گرم اوره مقاومت بیشتری را نسبت به سایر نمونه‌ها دارند. همانطور که توضیح داده شد، این موضوع بخاطر تاثیر اوره در اصلاح کردن ساختار و مورفولوژی پوشش حاصل است. یکی از معایب استفاده از اوره این است که در واقع اوره باعث ایجاد رسوب در الکترولیت می‌شود [۸].

جریان و زمان از دیگر پارامترهای متغیر تاثیرگذار هستند. تاثیر زمان و جریان نیز به گونه‌ای است که در جریان‌های زیاد، به علت تخلیه‌های الکتریکی قوی‌تر، ساختار پوشش غیریکنواخت بوده و توزیع تخلخل‌ها کاملاً تصادفی است. همچنین در زمان‌های زیاد نیز قطر تخلخل‌ها بزرگ‌تر شده که با توجه به شکل ۴ برای دو نمونه که دارای اوره یکسانی هستند (نمونه ۵، ۴) نمونه ۵ دارای خواص بهتری است. به طور کلی با توجه به نتایج بدست آمده برای نمونه‌های حاوی اوره با تغییر جریان و زمان فرآیند، به نظر می‌رسد که در دانسیته جریان‌های بیشتر مقدار اوره بیشتری از طریق کانال‌های ایجاد شده جذب می‌شود و بر اساس نتایج حاصل از داده‌های امپدانس به نظر می‌رسد که تاثیر دانسیته جریان در بهبود میکروساختار پوشش و در نتیجه بهبود خواص حفاظتی آن بیشتر از درصد اوره است.

نتیجه‌گیری

افزودن مقادیر مختلف اوره به الکترولیت پایه، منجر به تغییرات قابل توجهی در ساختار پوشش و خواص شیمیایی پوشش اکسیداسیون پلاسمایی الکترولیتی (PEO) می‌شود. افزایش مقدار اوره از ۱۰ به ۱۰۰ گرم بر لیتر اگرچه باعث کاهش ضخامت لایه اکسیدی می‌شود، اما از طریق افزایش نیتروژن در لایه اکسیدی و کاهش نقطه

به دلیل تغییر ساختار پوشش اکسیدی حاصل با افزایش درصد اوره است. زیرا به نظر می‌رسد که افزایش اوره بعنوان یک منبع دارای نیتروژن، از طریق افزایش نیتروژن در لایه اکسیدی بطور همزمان باعث هموارکردن مسیر رسوب جوانه‌ها (مداب سرد شده بر اثر تماس با الکترولیت که آلومینیوم الکترولیتی را مصرف می‌کنند) و باعث افزایش تخلخل می‌شوند [۸]. در واقع به نظر می‌رسد که در دانسیته جریان‌های بالاتر به علت ایجاد شدن کانال‌ها بزرگ، مقدار بیشتری اوره جذب می‌شود. استفاده از افزودنی‌ها در فرآیند PEO باعث تغییر در انرژی پلاسمای می‌شود و به نظر می‌رسد که افزودن اوره بعنوان افزودنی، از طریق تغییر در انرژی پلاسمای باعث کاهش نقطه ذوب می‌شود. در واقع اوره با کاهش در نقطه ذوب از طریق شارش مواد حاصل بر روی سطح باعث پرکردن تخلخل‌های موجود بر سطح می‌شود و تخلخل‌های کوچک‌تر و ریزتری به وجود می‌آید [۱۹]. بنابراین در مقادیر زیاد اوره، پوششی یکنواخت حاصل می‌شود که این قضیه با تصاویر SEM گرفته شده از سطح نمونه‌ها (شکل ۱) نیز هم‌خوانی دارد. در واقع تصاویر سطحی پوشش‌های شکل گرفته در الکترولیت حاوی ۱۰۰ گرم اوره دارای تخلخل‌های ریزتر و یکنواخت‌تری، نسبت به پوشش‌های شکل گرفته در الکترولیت ۱۰ گرم است. اندازه تخلخل‌ها در پوشش ۱۰ گرم اوره بزرگ‌تر بوده و همین باعث می‌شود که الکترولیت براحتی از داخل تخلخل‌ها نفوذ کند. در واقع بزرگ شدن اندازه تخلخل‌ها مسیرهای مناسبی را برای نفوذ الکترولیت به فلز پایه فراهم کرده، و باعث خوردگی شود [۲۰]. بعبارتی دیگر اوره از طریق ریزکردن و یکنواخت کردن ساختار پوشش حاصله، نفوذ الکترولیت به داخل پوشش را به حداقل می‌رساند [۸]. همچنین این ریزکردن ساختار که با کوچک شدن تخلخل‌ها همراه است، باعث شده که با کم‌ترین محصول خوردگی به وجود آمده، این تخلخل‌ها مسدود شوند و در واقع الکترولیت به فلز پایه نرسد [۸].

Influences of urea and sodium nitrite on surface coating of plasma electrolytic oxidation. Appl Surf Sci, Elsevier B.V, 356(2015)135–41.

9. G. Lv, W. Gu, H. Chen, W. Feng, ML. Khosa, L. Li, *Characteristic of ceramic coatings on aluminum by plasma electrolytic oxidation in silicate and phosphate electrolyt.*, Appl Surf Sci. 253(5)(2006)2947–52.

10. E. Cakmak, KC. Tekin, U. Malayoglu, S. Shrestha, *The effect of substrate composition on the electrochemical and mechanical properties of PEO coatings on Mg alloys*, Surf Coatings Technol. Elsevier B.V.; 204(8)(2010)1305–13.

11. W. Xue, Q. Jin, Q. Zhu, M. Hua, Y. Ma, *Anti-corrosion microarc oxidation coatings on SiCP/AZ31 magnesium matrix composite*, J Alloys Compd, 482(1–2)(2009)208–12.

12. JA, Curran, TW. Clyne, *Thermo-physical properties of plasma electrolytic oxide coatings on aluminium*. Surf Coatings Technol, 199(2–3 SPEC. ISS.)(2005)168–76.

13. G. Sundararajan, L. Rama Krishna. *Mechanisms underlying the formation of thick alumina coatings through the MAO coating technology*. Surf Coatings Technol, 167(2–3)(2003)269–77.

14. D. Chidambaram, CR. Clayton, GP. Halada, *The role of hexafluorozirconate in the formation of chromate conversion coatings on aluminum alloy*., Electrochim Acta, 51(14)(2006)2862–71.

15. J. Liang, PB. Srinivasan, C. Blawert, M. Störmer, W. Dietzel, *Electrochemical corrosion behaviour of plasma electrolytic oxidation coatings on AM50 magnesium alloy formed in silicate and phosphate based electrolytes*, Electrochim Acta. Elsevier; 54(14)(2009)3842–50.

16. B. Hirschorn, ME. Orazem, B. Tribollet, V. Vivier, I. Frateur, M. Musiani, *Determination of effective capacitance and film thickness from constant-phase-element parameter*., Electrochim Acta. Elsevier Ltd, 55(21)(2010)6218–27.

17. C. Blawert, V. Heitmann, W. Dietzel, HM. Nykyforchyn, MD. Klapkiv, *Influence of electrolyte on corrosion properties of plasma electrolytic conversion coated magnesium alloys*, Surf Coatings Technol. Elsevier; 201(21)(2007)8709–14.

18. M. Kendig, F. Mansfeld, S. Tsai

ذوب، باعث ریز و یکنواخت کردن ساختار و تخلخل‌های موجود در پوشش می‌شود. در نهایت این خود باعث افزایش مقاومت و مدول امپدانس تا سه برابر نسبت به نمونه‌های حاوی ۱۰ گرم بر لیتر اوره می‌شود. تاثیر زمان و دانسیته جریان نیز بدین گونه است که با افزایش زمان، قطر تخلخل‌ها بزرگتر می‌شود. همچنین نشان داده شد که در دانسیته جریان‌های زیاد، ساختار پوشش غیریکنواخت بوده است و توزیع تخلخل‌ها کاملاً تصادفی است.

مراجع

1. U. Malayoglu, KC. Tekin, U. Malayoglu, S. Shrestha, *An investigation into the mechanical and tribological properties of plasma electrolytic oxidation and hard-anodized coatings on 6082 aluminum alloy*. Mater Sci Eng A. Elsevier B.V, 528(24)(2011)7451–60.
2. RM. Park, JF. Bena, LT. Stayner, RJ Smith, HJ. Gibb, PSJ. Lees, *Hexavalent chromium and lung cancer in the chromate industry: A quantitative risk assessment*. Risk Anal. 24(5)(2004) 1099–108.
3. M. Golabadi, M. Aliofkhaeaei, M. Toorani, A.S. Rouhaghdam, *Corrosion and cathodic disbondment resistance of epoxy coating on zinc phosphate conversion coating containing Ni 2+ and Co 2+*, J. Ind. and Eng. Chem. 47(2016) 154-168.
4. PI. Butyagin, Y V. Khokhryakov, AI. Mamaev, *Microplasma systems for creating coatings on aluminium alloys*. Mater Lett., 57(11)(2003)1748–51.
5. P. Dearnley, J. Gummersbach, H. Weiss, a.Ogwu, T.Davies, *The sliding wear resistance and frictional characteristics of surface modified aluminium alloys under extreme pressure*, Wear, 225–229(1999)127–34.
6. DI. Slovetskii, *Terent'ev SD. Parameters of an Electric Discharge in Electrolytes and Physicochemical Processes in an Electrolyte Plasma*, High Energy Chem, 37(5)(2003)310–6.
7. C. Blawert, W. Dietzel, E. Ghali, G. Song *Anodizing treatments for magnesium alloys and their effect on corrosion resistance in various environments*, Adv Eng Mater, 8(6)(2006)511–33.
8. SC. Yeh, DS. Tsai, SY. Guan, CC.Chou,

Determination of the long term corrosion behavior of coated steel with A.C. impedance measurements, Corros Sci, 23(4)(1983)317–29.

19. M. Golabadi, M. Aliofkhazraei, M. Toorani, AS. Rouhaghdam, *Evaluation of La containing PEO pretreatment on protective performance of epoxy coating on magnesium. Prog Org Coatings. Elsevier B.V., 105(2017)258–66.*

20. D. Srekanth, N. Rameshbabu, K. Venkateswarlu, *Effect of various additives on morphology and corrosion behavior of ceramic coatings developed on AZ31 magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation, Ceram Int. Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l., 38(6)(2012)4607–15.*