

ایجاد سطح فوق آبگریز بر روی آلیاژ منیزیم AZ31 به کمک غوطه‌وری شیمیایی و بررسی مقاومت به خوردگی آن

مهدی یگانه، نیلوفر محمدی، سید مهدی مرعشی

گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

(دریافت مقاله: ۹۶/۰۵/۰۶ - پذیرش مقاله: ۹۷/۰۲/۱۹)

چکیده

با توجه به کاربردهای وسیع آلیاژهای منیزیم در صنایع گوناگون، خواص ضعیف سطحی آنها مانند مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی همواره بعنوان یک چالش مهم در تجاری سازی این آلیاژها مطرح بوده است. ایجاد سطوح فوق آبگریز روشی کارآمد و موثر جهت بهبود مقاومت به خوردگی ضعیف آلیاژهای منیزیم بوده که در سال‌های اخیر بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق، ایجاد ساختار فوق آبگریز (SHPs) به روی آلیاژ AZ31 منیزیم به کمک غوطه‌وری درون محلول CuCl_2 و NiSO_4 و سپس غوطه‌وری در محلول استتاریک اسید (SA) مورد بررسی قرار گرفته است. زاویه تماس آب با سطح به دست آمده 151.5° اندازه‌گیری شده است. طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) حضور پیوندهای مربوط به استتاریک‌اسید را روی سطح ارایه داد. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) وجود یک ساختار پولک مانند را که موجب جلوگیری از نفوذ الکترولیت به زیرلایه منیزیم شده بود را نشان داد. نتایج آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) و پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مشخص نمود مقاومت به خوردگی سطح آبگریز حدود ۱۰۰۰ برابر از آلیاژ منیزیم بیشتر است که به دلیل مورفولوژی زبر و مولکول‌های جذب شده بود.

واژه‌های کلیدی: آلیاژهای منیزیم، سطوح فوق آبگریز، خوردگی.

The Formation of Superhydrophobic Surface on the AZ31 Mg Alloy Using Chemical Immersion Method and The Investigation of Its Corrosion Behavior

Mehdi Yeganeh, Niloofar. Mohammadi, Sayed Mehdi Marashi

Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

(Received 28 July 2017, accepted 9 May 2017)

Abstract

Considering the large functions of Mg alloys in the various industries, their weak surface properties including resistance to oxidation and corrosion have been regarded as the primary challenge to commercializing them. Obtaining superhydrophobic surfaces have been an efficient way for enhancement of the corrosion resistance feature which has drawn much attention. In the present study, the formation of superhydrophobic structure (SHPs) on the Mg alloy was investigated by immersion into the CuCl_2 and NiSO_4 solutions following by soaking in the stearic acid (SA) solution. The contact angle of the obtained surface after the process measured about 151.5° . Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) spectra showed the presence of some bonds of SA on the surface of Mg alloy. Besides, FESEM morphology of SHP Mg alloy illustrated a flake-like morphology which could prevent corrosive electrolyte penetration toward Mg surface. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and potentiodynamic polarization tests illustrated that the corrosion resistance of SHP Mg was greater than Mg alloys about 1000 times which could be due to the presence of rough morphology and adsorbed hydrophobic molecules.

Keywords: Mg alloys, Superhydrophobic surfaces, Corrosion.

E-mail of Corresponding author: m.yeganeh@scu.ac.ir.

مقدمه

سانتی‌گراد و سپس در محلول سولفات نیکل (II) با غلظت ۸ گرم بر لیتر به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد غوطه‌ور گردیدند. نمونه‌های بدست آمده در محلول پایه اتانولی استتاریک اسید به مدت ۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری و در نهایت در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه خشک شدند.

مورفولوژی نمونه تولید شده به کمک میکروسکوپ الکترونی با وضوح بالا (CamScan Mira) مجهز به طیف‌سنج پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) به دست آمد. اندازه پولک‌های موجود در مورفولوژی به کمک نرم‌افزار Image Analyzer به دست آمد. ترکیب شیمیایی نمونه نیز به کمک دستگاه پراش سنج پرتو ایکس Philips PW 1730 با استفاده از تابش $\text{Cu K}\alpha$ در محدوده 20° - 90° و ولتاژ ۴۰ کیلوولت و آمپراژ ۴۰ میلی‌آمپر دست آمد. زاویه تماس بوسیله دستگاه اپتیکال اندازه‌گیری زاویه تماس (Data physics OCA15 plus) اندازه‌گیری و پیوندهای موجود در نمونه‌ها به کمک طیف‌سنجی مادون قرمز در محدوده 4000 تا 500 cm^{-1} و به صورت عبوری بررسی شد. مقاومت به خوردگی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه مجهز به یک سیستم ۳ الکتروده با الکتروده مرجع نقره/کلرید نقره شامل محلول اشباع شده با پتاسیم کلرید، الکتروده شمارنده پلاتینی و آلیاژ منیزیم و آلیاژ منیزیم با سطح فوق‌آبگریز بعنوان الکتروده کاری اندازه‌گیری شد. از سطح الکتروده کاری ۱ سانتی متر مربع جدا شد و بقیه سطح به کمک لاک عایق گردید. آزمایش‌ها در محلول آبی ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلرید و بعد از ثبات پتانسیل انجام شد. اندازه‌گیری‌های مربوط به طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در محدوده فرکانسی ۱۰۰ میلی‌هرتز تا ۱۰۰ کیلوهرتز با یک دامنه انحراف موج سینوسی ۱۰ میلی‌ولت به کمک دستگاه AUTOLAB PGSTAT 30 انجام پذیرفت. آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محدوده ۳۰۰- تا ۵۰۰ میلی‌ولت و با نرخ روبش ۱

آلیاژهای منیزیم بعنوان سبک‌ترین آلیاژ مهندسی خواص ویژه‌ای از جمله استحکام ویژه بالا، دانسیته کم، قابلیت ریخته‌گری خوب، قابلیت ماشین‌کاری و بازیافت دارند که باعث کاربردهای ویژه آن در زمینه‌های متفاوتی مانند خودروسازی، هوافضا، الکترونیک، ارتباطات، پزشکی و بسیاری از صنایع دیگر شده است [۱-۳]. مقاومت به خوردگی کم آلیاژهای منیزیم به دلیل پتانسیل کم الکتروده استاندارد آن‌ها مشکل عمده کاربردشان در محیط‌های اتمسفری یا آبی است [۴]. همچنین منیزیم دارای فعالیت شیمیایی بالایی بوده و فیلم اکسیدی تشکیل شده روی آن متخلخل است [۵]. از جمله راه‌کارهای جدید برای افزایش مقاومت به خوردگی آلیاژهای منیزیم، ایجاد سطح فوق‌آبگریز به روی این آلیاژها است [۶-۸]. چنانچه سطح تماس مستقیم آلیاژهای منیزیم با محیط فعال کاهش یابد، فعالیت شیمیایی آن‌ها نیز به میزان چشم‌گیری کاهش می‌یابد. بنابراین ایجاد لایه و یا سطح فوق‌آبگریز می‌تواند روشی جالب برای بهبود مقاومت به خوردگی آلیاژهای منیزیم باشد [۹]. هدف از انجام این تحقیق ایجاد یک سطح فوق‌آبگریز به روی آلیاژ منیزیم AZ31 با یک روش ساده غوطه‌وری و سپس اصلاح‌سازی بوسیله استتاریک اسید است که می‌تواند سبب افزایش مقاومت به خوردگی این آلیاژ گردد.

مواد و روش‌ها

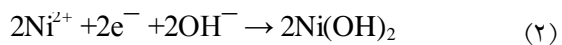
آلیاژ تجاری منیزیم (۳٪ آلومینیوم و ۱٪ روی) به ورق‌هایی با ابعاد $30 \times 25 \times 2$ میلی‌متر بریده و با ورق سمباده‌های شماره ۲۲۰ تا ۲۰۰۰ صیقلی شدند. پس از آماده‌سازی اولیه قطعات به مدت زمان ۱ دقیقه درون متانول به کمک امواج اولتراسونیک شسته شده و سپس در ۱۰۰ میلی‌لیتر از محلول ۲ درصد وزنی سیتریک اسید جهت فعال‌سازی سطح زیرلایه غوطه‌ور شدند. در مرحله بعدی، نمونه‌ها ابتدا در محلول آبی ۳/۴ درصد وزنی کلرید مس به مدت ۵ دقیقه در دمای ۹۰ درجه

ذکر است که زاویه تماس آب که برابر 151.5° بود وجود یک سطح فوق آبگریز را تایید می‌کند. بسیاری از محققان جهت توضیح پدیده فوق آبگریزی از نظریه Cassie-Baxter بهره جستند که رابطه آن در معادله ۱ ارایه شده است [۱۰]:

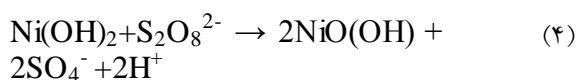
$$\cos\theta = f_{sl}(\cos\theta_0 + 1) - 1 \quad (1)$$

در معادله بالا θ و θ_0 به ترتیب زاویه تماس آب با منیزیم با سطح فوق آبگریز و منیزیم، f_{sl} رابط کسری فصل مشترک بین جامد و آب، θ_0 زاویه تماس سطح جامد هستند. با کاهش سطح تقریبی میان جامد و آب، θ افزایش می‌یابد؛ بنابراین هوای به دام افتاده در ناهمگونی‌های سطحی می‌تواند باعث ایجاد زاویه تماس بیشتر گردد و زاویه تماس بیشتر بین آب و هوا موجب جلوگیری از نفوذ آب یا هر مولکول مهاجم دیگری به سطح ماده می‌گردد [۱۰].

شکل ۱-ب نشان دهنده مراحل رسوب نیکل روی سطح منیزیم است. فاز β فعالیت شیمیایی کمتری نسبت به فاز α دارد [۱۱]. فاز α زودتر از β حل شده و کاتیون‌های منیزیم با دو بار مثبت و الکترون آزاد می‌کند. بعد از این کاتیون‌های نیکل با دو بار مثبت با الکترون‌ها و یون‌های هیدروکسید واکنش داده طبق واکنش زیر، هیدروکسید نیکل تولید می‌کند:



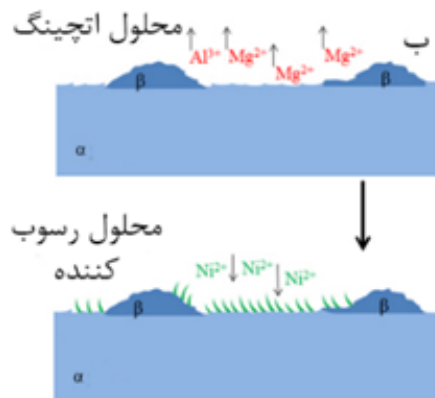
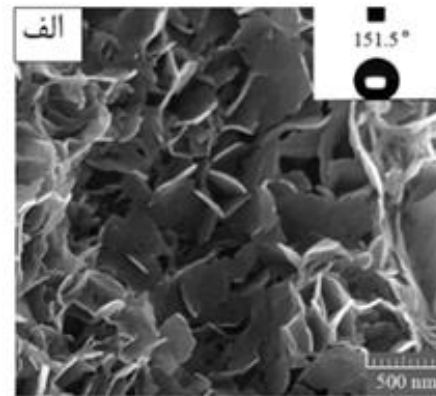
تشکیل ترکیبات هیدروکسیدی نیکل ممکن است تحت تاثیر حضور سولفات در محلول باشد. این ترکیبات می‌توانند با پرسولفات در محلول واکنش دهند و اکسید نیکل آب دار را طبق واکنش‌های زیر ایجاد نمایند [۱۲]:



میلی‌ولت بر ثانیه انجام شد. جهت حصول اطمینان از تکرار پذیری آزمون، سه تکرار انجام گردیده است.

بحث و نتایج

شکل ۱-الف تصویر میکروسکوپی الکترونی مربوط به سطح فوق آبگریز ایجاد شده را نشان می‌دهد.

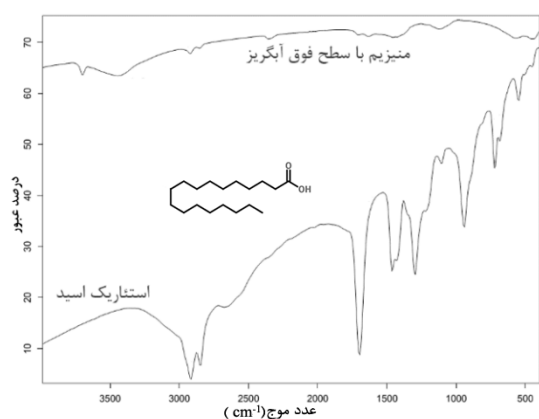


شکل ۱. الف) مورفولوژی سطحی منیزیم فوق آبگریز. ب) نمایی از فرآیند ایجاد سطح فوق آبگریز.

مورفولوژی پولک ماندنی که بعد از مراحل غوطه‌وری و اصلاح‌سازی مشاهده می‌شود، بعنوان مانعی در برابر نفوذ مولکول‌های آب عمل می‌کند. این سطح موجود از پولک‌های ظریفی که بطور یکنواخت توزیع شده‌اند حاصل می‌گردد. پولک‌های موجود دارای ضخامت ۲۰-۵۰ نانومتر هستند و از طریق به دام انداختن هوا مانع از نفوذ مایع درون پوشش می‌شوند [۱۰ و ۶]. لازم به

شکل ۲-الف مربوط به پراش اشعه ایکس حضور منیزیم، اکسید نیکل و اکسید منیزیم را در سطح فوق آبریز نشان می‌دهد. پیک‌هایی که در حدود $37/8$ درجه در الگوی پراش پرتو ایکس ظاهر شده است، می‌تواند مربوط به صفحه (۱۱۱) فاز اکسید نیکل باشد. این صفحات قوی (۱۱۱) می‌توانند به دلیل جهات ترجیحی مورفولوژی پولک مانند تشکیل شده در شکل ۱-الف باشند. از شکل ۲-ب می‌توان مشاهده نمود که در سطح ماده منیزیم، گوگرد، نیکل و اکسیژن وجود دارد. حضور منیزیم می‌تواند به ضخامت کم مواد رسوب داده شده و زبری سطحی مربوط باشد. گوگرد و نیکل می‌توانند هنگام تشکیل اکسید نیکل از محلول رسوب کنند، در صورتی که مس معمولاً نقش اچ کننده داشته و روی سطح رسوب نمی‌کند.

شکل ۳ نتایج حاصل از طیف‌سنجی مادون قرمز اسید استتاریک و منیزیم با سطح فوق آبریز را نشان می‌دهد.

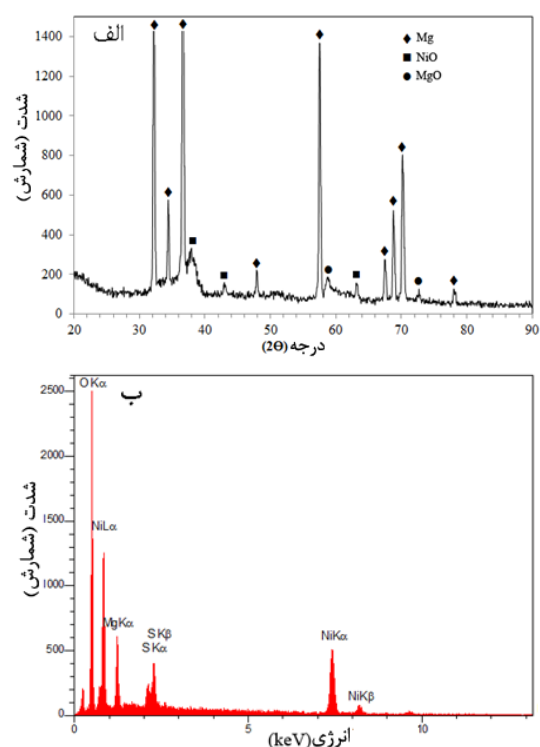


شکل ۳. منحنی حاصل از طیف‌سنجی مادون قرمز فوریه استتاریک اسید و منیزیم با سطح فوق آبریز.

پیک‌های پیوندهای کششی ارتعاشی C-H در حدود 2850 cm^{-1} و 2920 cm^{-1} مشخص هستند که می‌توانند مرتبط به گروه‌های آلیفاتیک موجود در سطح فوق آبریز ناشی از استتاریک اسید، باشند. پیوندهای در حدود 1700 cm^{-1} و 1105 cm^{-1} می‌توانند مربوط به گروه‌های

این واکنش‌ها می‌توانند تعیین کننده نرخ رشد اکسید نیکل باشند [۱۲]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تشکیل اکسید نیکل می‌تواند به علت دهیدراته شدن هیدروکسید نیکل و یا واکنش با مواد سولفوروری درون محلول باشد. در انتها فاز تشکیل شده کاملاً فاز α را می‌پوشاند و به محض پوشش فاز α با اکسید نیکل، انحلال منیزیم متوقف می‌گردد. در مرحله بعد فاز β شروع به حل شدن می‌کند و کاتیون‌های منیزیم به دو بار مثبت و آلومینیوم به سه بار مثبت به علاوه الکترون آزاد می‌گردند. در پایان این مراحل، هر دو فاز α و β بوسیله اکسید نیکل پوشانده شده و واکنش‌ها به تعادل می‌رسند [۱۱].

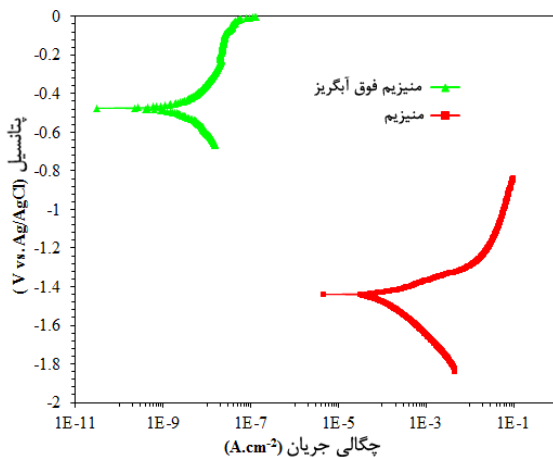
شکل ۲-الف و ب الگوی پراش پرتو ایکس و طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) مربوط به سطح منیزیم فوق آبریز را نشان می‌دهد.



شکل ۲. الف) الگوی پراش پرتو ایکس و ب) طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس منیزیم با سطح فوق آبریز.

کاهش قابل توجه نفوذ الکترولیت به فصل مشترک پوشش و زیرلایه است. وجود حلقه القایی می‌تواند از طریق مکانیزم‌هایی مانند تشکیل حفرات، تشکیل هیدروکسید و جذب آن توضیح داده شود [۱۷]. با اصلاح‌سازی سطحی و نهایی منیزیم، سطح آزاد و در دسترس آن از تماس با مواد و جذب یون‌ها حفظ شده‌است. R_{ct} مربوط به منیزیم و منیزیم فوق آبگریز به ترتیب ۳۴۰ اهم در سانتی‌متر مربع و $۱۰^۶ \times ۴/۲$ اهم در سانتی‌متر مربع اندازه‌گیری شده است. همچنین ظرفیت لایه خازنی مرتبط به منیزیم فوق آبگریز به علت کاهش واکنش انتقال بار از $F ۰/۰۰۰۱۵$ به $nF ۱/۲۵$ کاهش پیدا کرد. علت افزایش قابل توجه مقاومت به خوردگی منیزیم فوق آبگریز می‌تواند به علت حضور سطح فوق آبگریز با ظاهری پولکی مانند و ترکیبی مقاوم به خوردگی و جذب گروه‌های عاملی کم انرژی از اسید استتاریک باشد.

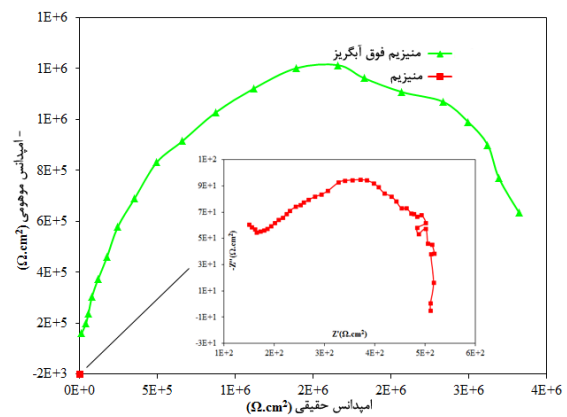
شکل ۵ نمودار پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مربوط به آلیاژ منیزیم و منیزیم فوق آبگریز را در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم نشان می‌دهد.



شکل ۵. نمودار مربوط به پلاریزاسیون پتانسیودینامیک منیزیم فوق آبگریز و آلیاژ منیزیم در محلول ۳/۵ wt.% کلرید سدیم.

چگالی جریان خوردگی منیزیم فوق آبگریز و آلیاژ منیزیم به ترتیب برابر $۱/۴۷ nA.cm^{-2}$ و $۸۲/۷ \mu A.cm^{-2}$

$C=O$ استتاریک اسید باشند. پیوندهای مربوط به $C-O$ و $C-C$ در حدود $1120 cm^{-1}$ و $1635 cm^{-1}$ دیده می‌شوند. همچنین پیوندی که در حدود $837 cm^{-1}$ وجود دارد، حضور $C-OR$ در سطح فوق آبگریز را نشان می‌دهد [۱۳ و ۱۴]. پیوندهای جذب شده مذکور موجود روی سطح منیزیم فوق آبگریز مشابه گروه‌های عاملی موجود در اسید استتاریک بوده و شاهدی بر وجود استتاریک اسید روی سطح منیزیم فوق آبگریز هستند. شکل ۴ طیف نایکوئیست مربوط به منیزیم و منیزیم فوق آبگریز را پس از غوطه‌وری در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم نشان می‌دهد.



شکل ۴. منحنی نایکوئیست مربوط به منیزیم فوق آبگریز و آلیاژ منیزیم در محلول ۳/۵ wt.% کلرید سدیم.

نمودار نایکوئیست منیزیم یک حلقه خازنی در فرکانس بالا تا متوسط و یک حلقه القایی را در فرکانس پایین نشان می‌دهد که تایید می‌کند در زمان غوطه‌وری منیزیم، دو زمان ثابت ایجاد شده است [۱۵ و ۱۶]. حلقه خازنی مشاهده شده در فرکانس بالا-متوسط ناشی از فرآیند انتقال بار است که به خازن الکتریکی لایه دوگانه مرتبط است. مقاومت انتقال بار یا مقاومت خوردگی (R_{ct}) به عنوان $Z''=0$ وقتی که $-Z''=0$ باشد، اندازه‌گیری می‌شود که معمولاً در فرکانس‌های متوسط محاسبه می‌شود. ناپدید شدن حلقه القایی در رابطه با منیزیم فوق آبگریز بیانگر

- Corrosion*, *Advance Engineering Materials*, (2015) 1 54.
2. Z. R. -Chang, Z. Jin, H. W.-Jiu, W. Dietzel, K. U. Kanier, C. Blawert, K.E. Wei, *Review of studies on corrosion of magnesium alloys*, *Trans, Nonferrous Met. SOC. China* 16 (2006) 763- 771.
3. M. Easton, A. Beer, M. Barnett, C. Davies, G. Dunlop, Y. Durandet, S. Blackket, T. Hilditch, P. Beggs, *Magnesium Alloy Applications in Automotive Structures*, 60 (2008)57-62.
4. G. Song, A. Atrens, G. Song, A. Atrens, *Recent Insights into the Mechanism of Magnesium Corrosion and Research Suggestions*, *advanced engineering materials* 9 (2007) 177-183.
5. R. Udhayan, D.P. Bhatt, *On the corrosion behavior of magnesium and its alloys using electrochemical techniques*, *J. Power Sources* 53 (1996) 103–107.
6. Miaomiao Liang, Yinghui Wei, Lifeng Hou, Haiyang Wang, Chunli Guo, *Fabrication of a super-hydrophobic surface on a magnesium alloy by a simple method*, *Journal of Alloys and Compounds*, 656(2016) 311-317.
7. Takahiro Ishizaki, Sou Kumagai, Mika Tsunakawa, Takuya Furukawa, Kae Nakamura, *Ultrafast Fabrication of Superhydrophobic Surfaces on Engineering Light Metals by Single-Step Immersion Process*, *Materials Letters*, 193(2017) 42-45.
8. Joy Gray-Munro, Justin Campbell, *Mimicking the hierarchical surface topography and superhydrophobicity of the lotus leaf on magnesium alloy AZ31*, *Materials Letters*, 189(2017) 271-274.
9. Shaohua Wang, Xingwu Guo, Yijun Xie, Lihua Liu, Haiyan Yang, Rongyu Zhu, Jia Gong, Liming Peng, Wenjiang Ding, *Preparation of superhydrophobic silicafilm on Mg–Nd–Zn–Zr magnesium alloy with enhanced corrosion resistance by combining micro-arc oxidation and sol–gel method*, *Surface & Coatings Technology* 213 (2012) 192–201.
10. A.B.D. Cassie, S. Baxter, *Surface roughness and contact angle*, *Trans. Faraday Soc.* 40 (1944) 546–551.
11. Hui Feng, Shuhong Liu, Yong Du, Ting Lei, Tiechui Yuan, *Effect of the second phases on corrosion behavior of the Mg-Al-Zn alloys*,

برآورد شد. همانطور که مشاهده می‌شود دانسیته جریان خوردگی منیزیم با سطح فوق‌آبگریز حدود ۱۰۰۰ مرتبه کمتر از آلیاژ منیزیم است که بیشتر بودن خوردگی آلیاژ منیزیم را در محیط‌های خورنده حاوی کلرید نشان می‌دهد. پتانسیل خوردگی منیزیم با سطح فوق‌آبگریز بسیار مثبت‌تر از آلیاژ منیزیم است که می‌تواند ناشی از فعال بودن بیشتر منیزیم و تمایل به خوردگی بیشتر آن در محیط خورنده باشد. همان طور که قبلاً ذکر شد، فاز اکسید نیکل با استفاده از روش‌های شیمیایی روی سطح منیزیم شکل گرفت و می‌تواند بعنوان یک مانع در برابر گونه‌های خوردگی و مولکول‌های آب عمل کند و بنابراین منیزیم با سطح فوق‌آبگریز مقاومت به خوردگی بیشتری نسبت به آلیاژ منیزیم نشان داد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، منیزیم فوق‌آبگریز از طریق غوطه‌وری ورق‌های منیزیمی در نمک‌های کلرید مس و سولفات نیکل (II) و سپس اصلاح‌سازی در محلول اسید استتاریک به دست آمد. سطح ایجاد شده به دلیل وجود ساختار پولک مانند با ضخامت نانومتری بر روی آن، از خود خاصیت فوق‌آبگریزی با زاویه تماس آب $151/5^\circ$ نشان داد. همچنین ساختار ایجاد شده مانع از نفوذ آب به درون پوشش شده و منیزیم فوق‌آبگریز در محیط‌های خورنده حاوی یون‌های کلرید مقاومت به خوردگی قابل توجهی از خود نشان داد. مقاومت به خوردگی منیزیم فوق‌آبگریز بیشتر از ۱۰۰۰ برابر آلیاژ منیزیم شاهد به دست آمد که ناشی از فرآیندهای سطحی مانند غوطه‌وری و اصلاح سطحی به کمک استتاریک اسید بود.

منابع

1. A. Atrens, G.-L. Song, M. Liu, Z. Shi, F. Cao, M. S. Dargusch, *Review of Recent Developments in the Field of Magnesium*

Journal of Alloys and Compounds, 695, 25 (2017) 2330-2338.

12. S.-Y. Han, D.-H. Lee, Y.-J. Chang, S.-O. Ryu, T.-J. Lee, C.-H. Chang, *The Growth Mechanism of Nickel Oxide Thin Films by Room-Temperature Chemical Bath Deposition*, Journal of The Electrochemical Society, 153 (2006) 382-386.

13. W.F. Ng, M.H. Wong, F.T. Cheng, *Stearic acid coating on magnesium for enhancing corrosion resistance in Hanks' solution*, Surf. Coat. Technol. 204 (2010) 1823–1830.

14. M. Hatami, M Yeganeh, A. Keyvani, M. Saremi, R. Naderi, *Electrochemical behavior of polypyrrole-coated AZ31 alloy modified by fluoride anions*, J. Solid. State. Electrochem. 21 (2017) 777–785

15. M. Yeganeh, M. Saremi, *Corrosion inhibition of magnesium using biocompatible Alkyd coatings incorporated by mesoporous silica nanocontainers*, Progress in Organic Coatings 79 (2015) 25–30.

16. A. Keyvani, M. Yeganeh, H. Rezaeyan, *Application of mesoporous silica nanocontainers as an intelligent host of molybdate corrosion inhibitor embedded in the epoxy coated steel*, Progress in Natural Science: Materials International, 27 (2017) 261-267.

17. Zhiguang Guo, Weimin Liu, Bao-Lian Su, *Superhydrophobic surfaces: From natural to biomimetic to functional*, Journal of Colloid and Interface Science 353 (2011) 335–355.