

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

بررسی مقاومت به خوردگی کامپوزیت‌های Al-1060/Alumina ساخته شده به روش نورد تجمعی

مقاله پژوهشی

علی جهانگیری صدری^۱، محمد حیدری وینی^{۲*}، سعید دانشمند^۳

۱- دانش آموخته، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، مجلسی، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد مبارکه، دانشگاه آزاد اسلامی، مبارکه، ایران.

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، مجلسی، ایران.

* M.heydarivini@gmail.com

چکیده

کامپوزیت‌های زمینه فلزی، کارایی مکانیکی عالی، قابلیت استفاده در دماهای بالا، مقاومت سایش خوب و نرخ خزش پایین دارند. روش ساخت این نوع کامپوزیت‌ها بسیار حائز اهمیت است. در میان فرآیندهای ساخت، فرآیند گرم نورد تجمعی به عنوان یک روش اعمال تغییر شکل شدید پلاستیک بر روی ورق‌ها بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تحقیق حاضر کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با ۵٪ وزنی ذرات Al_2O_3 با استفاده از آلیاژ AA1060 به روش نورد تجمعی تا هشت مرحله نورد تولید شد. ریز ساختار و رفتار خوردگی کامپوزیت به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی، پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی و اندازه‌گیری‌های طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که رفتار خوردگی کامپوزیت، بهبود در پارامترهای اصلی الکتروشیمیایی را به عنوان یک تأثیر مثبت نورد گرم نشان می‌دهد. با توجه به آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی استنباط می‌شود که افزایش تعداد دفعات نورد تجمعی (ARB) تا هشت مرحله، سبب کاهش جریان خوردگی و از طرفی باعث کاهش سرعت خوردگی و به عبارت دیگر افزایش مقاومت به خوردگی می‌شود به طوری که نمونه کامپوزیت تولید شده در ۸ پاس کمترین میزان خوردگی و در مقابل آن نمونه آیل شده دارای بیشترین میزان خوردگی می‌باشد.

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

کلید واژگان:

نورد تجمعی

ذرات آلومینا

کامپوزیت زمینه فلزی

خوردگی

آلیاژ آلومینیوم AA1060

The Investigation of the Corrosion Resistance of Al/Alumina Composites Fabricated Via Accumulative Roll Bonding (ARB) Process

Ali Jahangiri Sadri¹, Mohammad Heydari Vini^{2*}, Saeid Daneshmand³

1- MSc. Student Department of Mechanical Engineering, Majlesi Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Mobarakeh Branch, Islamic Azad University, Mobarakeh, Isfahan, Iran.

3- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Majlesi Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

* M.heydarivini@gmail.com

Article Information

Original Research Paper

Doi:

20.1001.1.24233226.1401.16.3.4.5

Keywords:

Accumulative Roll Bonding (ARB)

Alumina Particles

Metal Matrix Composite Corrosion

Aa1060 Aluminum Alloy

Abstract

Metal matrix composites, high mechanical performance, usability at high temperatures, good wear resistance and low creep rate. This type of composite manufacturing method is very important. Among manufacturing processes, ARB process as a method of applying severe plastic deformation is used on the sheets. In this study 5Wt. % Al/alumina composites fabricated by accumulative roll bonding process up to eight steps using Al1060. Microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of the composite were studied by scanning electron microscopy (SEM), potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy (EIS), measurement in 3.5wt% NaCl solution. Corrosion behavior of the composite revealed a considerable improvement in the main electrochemical parameters, as a result of enhancing influence of cold rolling. Also, the electrochemical experiments showed that corrosion resistance of samples increasing with increasing the number of ARB cycles. After 8- cycle ARB have a low corrosion density in comparison with high corrosion density of annealed specimens.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Mohammad Heydari Vini, Saeid Daneshmand, Ali Jahangiri Sadri, The Investigation of the Corrosion Resistance of Al/Alumina Composites Fabricated Via Accumulative Roll Bonding (ARB) Process, New Process in Material Engineering, 2022, 16(3), 43-54.

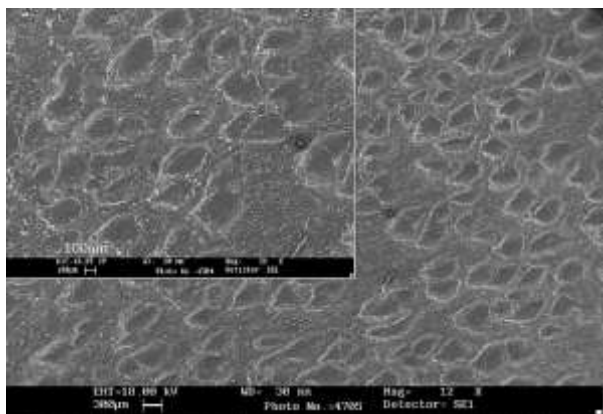
۱- مقدمه

خورنده مقاومت داشته باشند و همچنین باید تلاش کنند که اثرات خوردگی عوامل محیطی را کاهش دهند. در مقاله‌ای از طالبیان و همکارانشان که اثرات نورد و آنیل را بر روی کامپوزیت آلومینیوم فولاد بررسی کردند نشان دادند که ARB نه تنها باعث بهبود خواص مکانیکی می‌شود بلکه مقاومت به خوردگی را نیز بهبود می‌بخشد. بهبود مقاومت به خوردگی عموماً به توانایی بالای مرزخانه سطحی برای پسیو شدن منصوب می‌شود. ولیکن عملیات آنیل بعدی سبب رشد سریع دانه‌ها و کاهش مرزخانه‌ها می‌شود و با از بین بردن یا کاهش عیوب، پتانسیل خوردگی و مقاومت به خوردگی را مجدداً کاهش می‌دهد.

همان‌طور که مشخص است در عملیات آنیل منطقه پسیو کوچک‌تر شده و به سمت پتانسیل منفی‌تر میل می‌کند [۱]. مظفری و همکاران در طی تحقیقی که بر آلومینیوم ۷۰۷۵ داشته، اثر منفی فرآیند ARB بر مقاومت به خوردگی یکنواخت را مشاهده کردند که در بیان علت این امر می‌توان تشریح مکانیزم خوردگی را توضیح داد که شروع خوردگی حفره‌ای در عیوب روی سطح آلومینیوم مثل ذرات فاز ثانویه و یا روی مرزخانه‌ها اتفاق می‌افتد. در مورد آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ چنین به نظر می‌رسد که کرنش پلاستیک شدید، افزایش چگالی نا به جایی‌ها، ریز دانه شدن و در نتیجه افزایش سطح انرژی آلیاژ حین فرآیند عمده‌ترین عامل کاهش مقاومت به خوردگی این آلیاژ است [۲]. در مقاله دیگری، ریحانیان و همکارانشان بر مطالعه و مقایسه رفتار خوردگی کامپوزیت آلومینیومی تقویت شده با کاربید سیلیسیم نشان داده شده است که پتانسیل خوردگی کامپوزیت بین آلیاژ آلومینیوم آنیل شده و ARB شده قرار دارد. هم‌چنین کامپوزیت چگالی جریان کمتری و مقاومت به انتقال بار بیشتری از خود نشان می‌دهد [۳]. فدایی و همکارانشان در پژوهشی که بر آلیاژ نانو ساختار آلومینیوم AA5052 انجام دادند، نشان دادند که عملیات حرارتی آنیل قبل از اتصال نورد تجمعی باعث بهبودی مقاومت به خوردگی حفره‌ای شده است [۴-۸].

در این تحقیق برای اولین بار به بررسی مقاومت به خوردگی شیمیایی کامپوزیت‌های زمینه فلزی زمینه آلومینیومی ساخته

کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMCs) تقویت شده با ذرات سرامیکی، دارای خواص حرارتی و مکانیکی مطلوب منحصر به فردی می‌باشند. در مقایسه با فلزات و آلیاژهای دیگر که تقویت نشده‌اند، کامپوزیت‌ها دارای استحکام، مدول الاستیسیته، مقاومت سایشی و مقاومت به خستگی بالاتر و نیز انبساط حرارتی کمتری هستند. هم‌چنین این گروه از کامپوزیت‌ها در دسته‌بندی کامپوزیت‌های با تقویت کننده‌های غیر پیوسته‌ای قرار می‌گیرند، در مقایسه با کامپوزیت‌های تقویت شده با فیبرهای پیوسته‌ای نسبتاً ارزان بوده و می‌توان آن‌ها را توسط روش‌های مرسوم تولید کرد. در حال حاضر این دسته از کامپوزیت‌ها توسط روش‌های مختلف ریخته‌گری، متالورژی پودر و آلیاژسازی مکانیکی تولید می‌شوند [۴-۱]. در سال ۱۹۹۸ فرآیند جدیدی در ژاپن ابداع گردید که مستقیماً با استفاده از نورد موفق به تولید مواد فوق ریزدانه گردید. این روش فرآیند نورد تجمعی (ARB) نام دارد. مزیت این روش قابلیت اعمال آن به مواد حجیم بزرگ است. ARB یک روش نسبتاً جدید از گروه SPD است که هدف ARB تحمیل کرنش پلاستیک بسیار بزرگ به ماده است که باعث اصلاح ساختاری و افزایش استحکام بدون تغییر ابعاد نمونه می‌شود، به طوری که محدودیت هندسی در اعمال کرنش وجود ندارد. ARB نسبت به دیگر روش‌های SPD ویژگی‌های منحصر به فردی دارد. خوردگی یکی از عمده‌ترین محدودکننده‌های عمر قطعات و دستگاه‌ها می‌باشد. ضعف‌های مکانیکی موجود در دستگاه‌ها را همواره باید کاهش داد، اما اگر خوردگی بیش از حد باشد دستگاه‌ها غیرقابل استفاده می‌شوند. خوردگی یک واکنش الکتروشیمیایی بین فلز و محیط اطراف آن است. این عمل با واکنش کاتدی (احیاء اکسیژن و یا متصاعد شدن گاز هیدروژن) همراه است. شرایط خوردگی به دلیل حضور دائمی آب، هوا و رطوبت محیط همواره فراهم بوده و در نتیجه خوردگی امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. البته باید توجه داشت خوردگی فقط به فلزات محدود نمی‌شود بلکه روی کامپوزیت‌ها و پلیمرها هم تأثیر دارد. در این میان نقش مهندسی خوردگی انتخاب موادی است که در برابر عوامل



شکل (۱): سطح برس کاری شده ورق آلومینیومی آنیل شده

شده به روش نورد گرم تجمعی پرداخته شد. ارزیابی رفتار خوردگی نمونه‌ها در محلول ۳/۵٪ وزنی کلرید سدیم در دمای محیط انجام شد. برای بررسی مورفولوژی و ریزساختار از میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) استفاده شد. اهمیت آلیاژهای آلومینیوم در صنعت به جهت خواص منحصر به فرد آنها شامل خواص مکانیکی عالی، مقاومت به خوردگی عالی و مقاومت بالا به ضربه و سایش می‌باشد که کاربرد وسیعی در صنایع هوافضا و صنایع زیرسطحی دارد [۱-۳].

۲- مواد و روش انجام تحقیق

۲-۱- آماده‌سازی اولیه

این فرآیند شامل گرم کردن ماده تا دمایی مناسب، نگهداری در آن دما در زمان مشخص و کافی و سپس سرد کردن آن با سرعت مناسب تا دمای محیط می‌باشد. در این مرحله ورق آلومینیومی ۱۰۶۰ درون کوره عملیات حرارتی قرار می‌گیرد. ورق‌ها درون کوره تا دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱ ساعت باقی می‌ماند. پس از آنیل، ورق‌ها با استفاده از کاتر صنعتی به ابعاد $20 \times 5 \times 0.5 \text{ cm}^3$ برش داده شدند. علت انتخاب طول ۲۰ سانتی‌متر آن است که در هر پاس مقداری از دو انتهای ورق باید برش خورده و حذف گردد و در هر پاس نمونه کوتاه‌تر می‌شود. برای اتصال بهتر دو سطح باید اکسید سطحی حذف گردد، برای این امر با استفاده از برس سیمی فولادی سطح ورق خراش داده می‌شود تا فلز تازه نمایان گردد. پس از حذف لایه اکسیدی باید سطح فلز از چربی و هرگونه آلودگی پاک شود، در غیر این صورت جوش سرد بین دو فلز رخ نخواهد داد. برای این امر ورق به مدت ۱۰ دقیقه در ظرف استون قرار داده می‌شود. شکل (۱)، سطح برس کاری ورق آلومینیومی آنیل شده را در دو بزرگنمایی نشان می‌دهد.

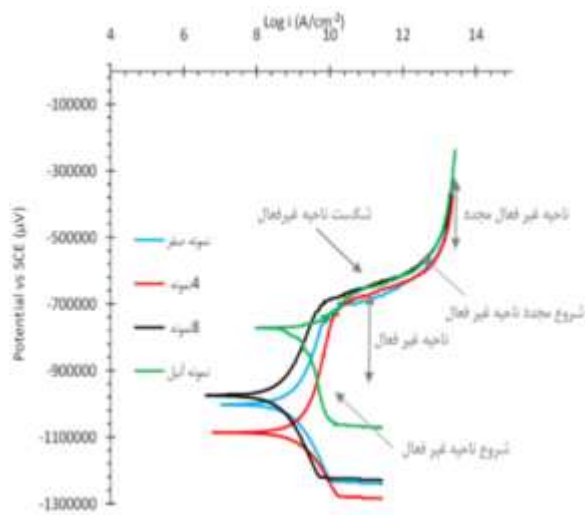
۲-۲- ساخت کامپوزیت

بعد از نشاندن ریز ذرات به مقدار ۵٪ وزنی به روش حمام آلتراسونیک گرم با فرکانس ۲۰ کیلو هرتز بر روی سطح ورق، ورق دیگر روی آن قرار گرفته و با ۷۵٪ کاهش ضخامت نورد می‌شود تا اصطلاحاً کامپوزیت اولیه یا پاس صفرم که دارای چسبندگی مناسب با وجود ذرات آلومینا بین دو ورق است حاصل شود. سپس نمونه به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد داخل کوره قرار داده می‌شود. هدف از انجام آن، حذف کار سختی این پاس و کاهش احتمال جدا شدن دو ورق به دلیل وجود ریز ذرات بین آنها می‌باشد. افزایش میزان کاهش ضخامت باعث افزایش نیروی چسبندگی بین لایه‌ای می‌شود. پس از انجام عملیات آماده‌سازی، جهت جلوگیری از آلودگی مجدد سطوح، حمل ورق‌ها با احتیاط خاصی انجام می‌گیرد. در این مرحله باید قطعه در دمای مدنظر گرفته شده (۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) برای نورد تجمعی گرم به مدت ۱۰ دقیقه قرار گیرد تا کل نمونه به آن دما برسد و بعد به سرعت در همان دما با کاهش ضخامت ۵۰٪ نورد شود. این عملیات تا ۸ پاس نورد گرم ادامه می‌یابد.

۲-۳- آزمون پلاریزاسیون پتانسیو دینامیک و

طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

ارزیابی رفتار خوردگی نمونه‌ها در محلول کلرید سدیم ۳/۵٪ وزنی در دمای محیط انجام شد. همچنین نمونه‌های کامپوزیتی طبق استاندارد G1-90 با سنباده‌های شماره‌های



شکل (۲): نمودارهای پلاریزاسیون پتانسیودینامیک از کامپوزیت‌های تقویت شده در پاس‌های مختلف

در جدول (۱) β_a و β_c به ترتیب شیب شاخه‌های آنودی و کاتدی، Hg/Hg_2Cl_2 (الکترومد مرجع اشباع کالومل) E_{corr} پتانسیل خوردگی نمونه‌ها، I_{corr} دانسیته جریان خوردگی، R_p مقاومت پلاریزاسیون و V_{corr} سرعت خوردگی نمونه‌ها است. با توجه به داده‌های جدول (۱) شیب شاخه آنودی و کاتدی کامپوزیت‌های تولید شده در پاس‌های مختلف در یک راستا و محدوده تغییر کرده‌اند این در حالی است که نمونه آنیل شده دارای شیب آنودی و کاتدی متفاوتی نسبت به دیگر نمونه‌ها می‌باشد به طوری که شیب شاخه کاتدی نمونه آنیل شده در مقایسه با نمونه‌های تولید شده در پاس‌های مختلف بیشتر بوده و این روند برای شاخه آنودی برعکس می‌باشد؛ می‌توان نتیجه گرفت که اثرگذاری شاخه آنودی بیشتر از شاخه کاتدی بوده و این امر منجر به ایجاد واکنش‌های آنودی و نهایتاً خوردگی گردیده است [۹-۵].

شکل (۳) شاخه‌های آنودی نمونه‌های تولید شده در پاس‌های مختلف را نشان می‌دهد، با توجه به این شکل ماهیت شاخه‌های آنودی و روند خوردگی تا حدودی قابل تشخیص می‌باشد. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود شاخه‌های آنودی بعد از عبور از ناحیه غیرفعال و شکست فیلم آنودی ایجاد شده بر روی سطح دچار نویزها و تغییراتی می‌شود. با توجه به تصاویر میکروسکوپی به دست آمده این حدس مبنی بر ایجاد حفره و خوردگی موضعی به یقین تبدیل می‌گردد و

۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ پولیش شدند. نمونه‌ها در این آزمایش به وسیله دستگاه پتانسیواستات/گالوانواستات EG&G مدل PARSTAT 2273 ارزیابی شدند. سطح نمونه‌های مورد استفاده، جهت آزمون خوردگی معادل 1 cm^2 می‌باشد که در معرض الکترولیت قرار داشت. نمونه‌های مورد آزمایش قبل از انجام آزمون جهت پایداری پتانسیل درون محلول مذکور به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده شدند. از الکترومد مرجع کالومل اشباع، الکترومد کمکی گرافیت و الکترومد کاری به عنوان مجموعه سل الکتروشیمیایی استفاده گردید. میزان سرعت روبش ۱ میلی ولت بر ثانیه بود، شاخه کاتدی تقریباً از ۲۵۰ میلی ولت منفی تر از پتانسیل مدار باز نمونه شروع می‌شد و تا حدود ۱۰۰۰ میلی ولت به سمت مقادیر نجیب در شاخه آنودی ادامه می‌یافت و نتایج حاصل از آن به وسیله نرم‌افزار Ivium تحلیل گردید. همچنین، آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در ۳۰ نقطه در محدوده ۱۰ mHz تا ۱۰۰ kHz در پتانسیل مدار باز ۱۰ mV+ انجام و نتایج حاصل از آن به وسیله نرم‌افزار Z View تحلیل گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک (OCP)

شکل (۲)، منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک را به منظور بررسی خوردگی کامپوزیت‌های تقویت شده در پاس‌های مختلف نشان می‌دهد. پارامترهای سینتیکی به دست آمده از منحنی پلاریزاسیون نیز در جدول (۱) ذکر گردیده است.

خوردگی و فعال بودن بیشتر می‌باشد، اما همان‌طور که قابل ملاحظه است نمونه ۴ پاس با وجود تمایل ترمودینامیکی خوردگی بیشتر رفتار بهتری نسبت به نمونه آنیل شده که دارای پتانسیل مثبت تری است، از خود نشان می‌دهد که دلیل آن قطعاً به سینتیک خوردگی و عوامل تأثیرگذار بر آن مرتبط می‌شود به عبارت دیگر با افزایش تعداد سیکل‌های نورد تجمعی، میزان پتانسیل خوردگی بزرگ‌تر شده است؛ این افزایش در پتانسیل خوردگی بیانگر کاهش فعالیت سطحی نمونه‌ها می‌باشد [۱۳-۱۵]. با توجه به شکل (۳) و جدول (۱) بهترین و ضعیف‌ترین دانسیته جریان به ترتیب مربوط به نمونه‌های ۸ پاس و آنیل می‌باشد. تشخیص این روند قرارگیری منحنی برمی‌گردد به طوری که هر چه نمودار به سمت چپ میل کند نشان‌دهنده دانسیته جریان خوردگی و تمایل سینتیکی کمتر به خوردگی است. با توجه به کامپوزیت‌های ایجاد شده با پاس‌های مختلف و روند منحنی‌های پلاریزاسیون، این فرضیه مبنی بر کاهش تمایل ترمودینامیکی سبب کاهش دانسیته جریان خوردگی می‌شود اثبات می‌گردد چرا که منحنی ۴ پاس دارای کمترین پتانسیل و در عین حال ضعیف‌ترین دانسیته جریان می‌باشد و این رویه برای منحنی ۸ پاس بر عکس می‌باشد؛ به بیانی دیگر می‌توان گفت دانسیته جریان خوردگی با افزایش تعداد سیکل‌های نورد کاهش می‌یابد که بیانگر افزایش مقاومت به خوردگی این کامپوزیت‌ها با افزایش تعداد سیکل‌های نورد می‌باشد. به کمک برون‌یابی تافل خطوط کاتد و آند مقادیر شیب آندی و کاتدی محاسبه شد و با قرار دادن آن‌ها در رابطه استرن-گری^۲ مقاومت پلاریزاسیون (R_p) به دست آمد:

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

با توجه به محاسبات از طریق این رابطه و شکل (۱)، ملاحظه می‌شود که بیشترین و کمترین مقاومت به پلاریزاسیون به ترتیب مربوط به نمونه‌های ۸ و آنیل شده می‌باشد.

به کمک رابطه (۲)، نرخ خوردگی (V_{corr}) نمونه‌ها محاسبه شد. در این رابطه $M.V$ جرم مولکولی ماده خورده شده، n تعداد بار انتقال یافته در حین فرآیند، d دانسیته فلز خورده

ثابت می‌شود که وجود نویزهای ایجاد شده بر روی شاخه آندی به دلیل واکنش‌ها و فعل و انفعالات آندی یون خورنده با سطح کامپوزیت مذکور می‌باشد. همچنین با توجه به شکل‌های (۲) و (۳) می‌توان نمودارهای پلاریزاسیون پتانسیودینامیک را به چند قسمت تقسیم‌بندی نمود: این تقسیم‌بندی شامل شروع ناحیه غیرفعال (روئین)^۱، ناحیه غیرفعال، شکست ناحیه غیرفعال، تشکیل مجدد ناحیه فعال و ناحیه غیرفعال مجدد می‌شود. ماهیت نمودارهای پلاریزاسیون پتانسیودینامیک به این صورت است که از دو شاخه آندی و کاتدی تشکیل شده‌اند. به عبارت ساده‌تر این منحنی‌ها در ابتدا از mV ۲۰۰ کمتر از OCP برای شاخه کاتدی با اعمال پتانسیل کم شروع می‌شوند و این روند با افزایش پتانسیل زیادتر تا حد mV ۶۰۰ فراتر از OCP برای شاخه آندی ختم می‌شود. با شروع شاخه آندی و شروع خوردگی یک لایه غیرفعال بر روی سطح تشکیل می‌شود؛ با افزایش پتانسیل خوردگی فیلم غیرفعال شکسته می‌شود و اصطلاحاً سطح دچار خوردگی موضعی می‌شود و ناگهان جریان از مقادیر خیلی کم به سمت مقادیر بیشتر میل می‌کند که نشان‌دهنده روند خوردگی می‌باشد. این روال با تشکیل مجدد ناحیه غیرفعال ادامه دارد، در بین قسمت شکست ناحیه غیرفعال و تشکیل مجدد فیلم محافظ سطح نمونه دچار تغییراتی می‌شود که نمایانگر خوردگی سطح می‌باشد. با توجه به شکل فوق، اثر منفی فرآیند نورد تجمعی بر روی مقاومت به خوردگی حفره‌ای نمونه‌ها کاملاً مشخص است به طوری که افزایش مراحل فرآیند، پتانسیل شکست لایه اکسیدی را زیاد کرده ولی محدوده ناحیه روئین را به تدریج کم می‌کند. با وجود این پتانسیل شکست پس از اعمال ۸ مرحله فرآیند نورد هنوز از حالت اولیه بالاتر است که نمایانگر روند خوردگی بهتری نسبت به دیگر نمونه‌ها می‌باشد. گفتنی است که پتانسیل ناحیه روئین مجدد نیز با افزایش مراحل نورد افزایش می‌یابد [۹-۱۲]. E_{corr} و I_{corr} در حقیقت نشان‌دهنده تمایل ترمودینامیکی و سینتیکی واکنش‌های خوردگی هستند. متفاوت بودن پتانسیل‌های خوردگی کامپوزیت‌ها حاکی از تفاوت تمایل ترمودینامیکی آن‌ها در واکنش‌های خوردگی می‌باشد؛ به عبارت بهتر میل به پتانسیل کمتر نشان‌دهنده تمایل

شده و I_{corr} دانسیته جریان خوردگی می‌باشد:

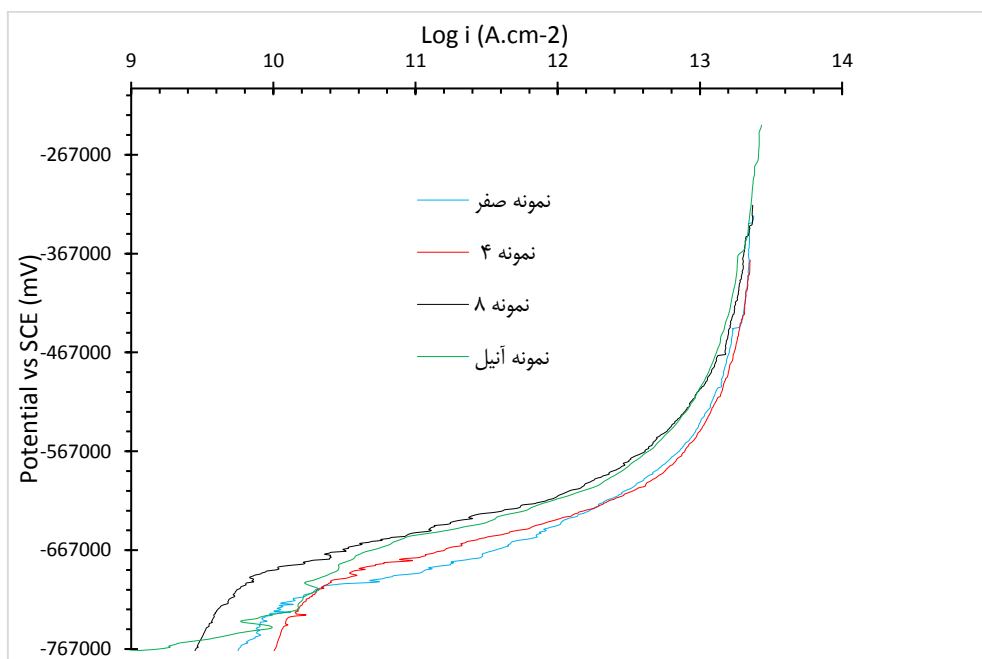
$$V_{corr} = \frac{0.0032 \times I_{corr} \times (M.V)}{n \times d} \quad (2)$$

می‌بخشد. بهبود مقاومت به خوردگی عموماً به توانایی چگالی بالای مرزانه‌های سطحی برای پسیو شدن منسوب می‌شود. آلومینیوم و آلیاژهای آن قابلیت پسیو شدن خوبی دارند، ولی تمایل به حفره‌دار شدن در محلول‌های حاوی کلر دارند. وقتی آلومینیوم در تماس با محلول آبی قرار می‌گیرد، یک فیلم اکسید هیدراته ($Al(OH)_3$) همچنین می‌تواند به صورت ($Al_2O_3 \cdot H_2O$ مشاهده می‌شود) روی سطح تشکیل می‌شود. فرآیندهای تشکیل اکسید هیدراته در روابط ۳ تا ۶ نشان داده شده است:

با توجه به رابطه (۲) و شکل (۵)، این نتیجه استنباط می‌شود که بیشترین و کمترین سرعت خوردگی مربوط به نمونه‌های آنیل شده و ۸ می‌باشد و تأییدی بر داده‌های استخراج شده از جدول و شکل‌های (۴-۱) است. اختلاف کمترین و بیشترین سرعت خوردگی برای نمونه‌های ذکر شده بیش از ۱۰ برابر می‌باشد. به‌طور کلی، ARB نه تنها باعث بهبود خواص مکانیکی می‌شود بلکه مقاومت به خوردگی را نیز بهبود

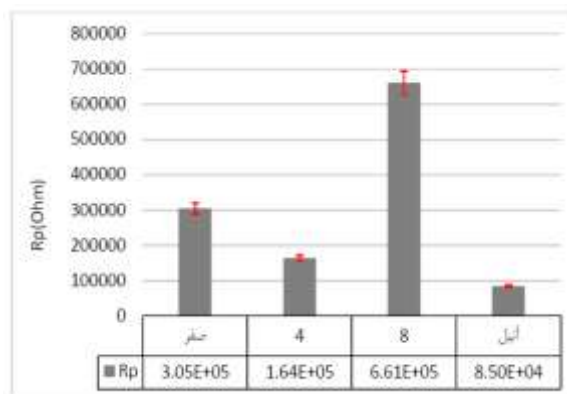
جدول (۱): نتایج حاصل از نمودارهای پلاریزاسیون پتانسیودینامیک کامپوزیت‌های در پاس‌های مختلف

نمونه	β_c (mV/decade)	β_a (mV/decade)	E_{corr} (V vs. SCE)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	R_p ($K\Omega \cdot cm^2$)	V_{corr} ($\mu m/year$)
صفر	۱۵۵	۲۱۹	-۱/۰۱	۰/۱۳	۳۰۵	۹/۳۴
۴	۱۲۸	۲۹۹	-۱/۱۰	۰/۲۴	۱۶۴	۱۳/۲۲
۸	۱۶۹	۲۱۵	-۰/۹۸	۰/۰۶	۶۶۱	۷/۱۸
آنیل	۲۹۲	۷۱	-۰/۷۸	۰/۳۰	۸۵	۱۶/۱۶

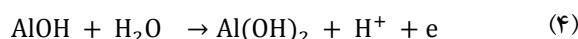
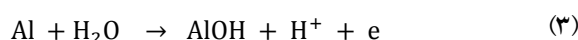


شکل (۳): شاخه‌های آندی نمودارهای پلاریزاسیون پتانسیودینامیک از کامپوزیت‌های تقویت شده در پاس‌های مختلف

واکنش تشکیل فیلم پسیو سریع‌تر و شدیدتر اتفاق می‌افتد و حجم بیشتری از عیوب فیلم اکسیدی در سطح مواد فوق ریزدانه به دست می‌آید. تشکیل سریع‌تر و شدیدتر فیلم پسیو با حجم عیوب بالا، دلیل افزایش مقاومت به خوردگی کامپوزیت است. همچنین این نتایج کاملاً با افزایش مقدار پتانسیل خوردگی در نمودارهای پلاریزاسیون، پس از ARB همخوانی دارد. پتانسیل خوردگی نمونه‌های آزمایش، توسط فیلم‌های اکسیدی نجیب خارجی و داخلی کنترل می‌شود. از این رو حجم عیوب بیشتر، مقدار پتانسیل خوردگی بیشتری به نمونه ما می‌بخشد. حجم عیوب بیشتر فیلم پسیو، زمان هجوم Cl^- را طولانی‌تر می‌کند؛ به عبارت دیگر حتی اگر حفره‌های شبه پایدار در جایی تشکیل شود، حجم زیاد عیوب فیلم پسیو پایدار، مهاجرت کلر و محصولات خوردگی را به تعویق می‌اندازد که منجر به افزایش افت اتمی محلول درون حفره می‌شود و پسیو شدن مجدد حفره‌های شبه پایدار را آسان‌تر می‌کند. نمودارها شامل دو حالت مجزا می‌باشند، یکی مربوط به تغییرات فاز برحسب لگاریتم فرکانس (گنبدی شکل) و دیگری تغییرات لگاریتم امپدانس برحسب لگاریتم فرکانس است. از نمودار تغییرات فاز برحسب فرکانس می‌شود دو زمانه بودن نمونه‌ها را تشخیص داد. انتقال ماکزیمم نمودار زاویه فاز به سمت راست در محنی مربوط به نمونه ۸ پاس نسبت به نمونه آنیل شده مشهود است. هرچقدر که نقطه ماکزیمم این نمودار به سمت راست میل پیدا کند بیانگر بالاتر بودن خواص حفاظتی سطح در برابر خوردگی است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نمونه ۸ پاس دارای خواص حفاظتی بهتری نسبت به نمونه آنیل شده و دیگر نمونه‌ها است. پهن‌تر بودن قله این منحنی بیانگر جذب مطلوب‌تر فرآیند ARB بر زیرلایه آلومینیومی مطابق شکل (۶) است. شکل (۷)، پارامتر اساسی دیگر نمودار بُعد ناحیه خازنی و ناحیه مقاومتی است. شکل (۸) نیز مدار معادل طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی کامپوزیت‌های هیبریدی تقویت شده در پاس‌های مختلف را نشان می‌دهد. منحنی امپدانس-فرکانس به دو قسمت تقسیم می‌شود، قسمتی که با فلش مورب نشان داده شده است موسوم به ناحیه خازنی و قسمتی که با فلش افقی نشان داده شده است ناحیه موسوم به مقاومتی



شکل (۴): نمودار مقاومت پلاریزاسیون کامپوزیت‌های تقویت شده در پاس‌های مختلف



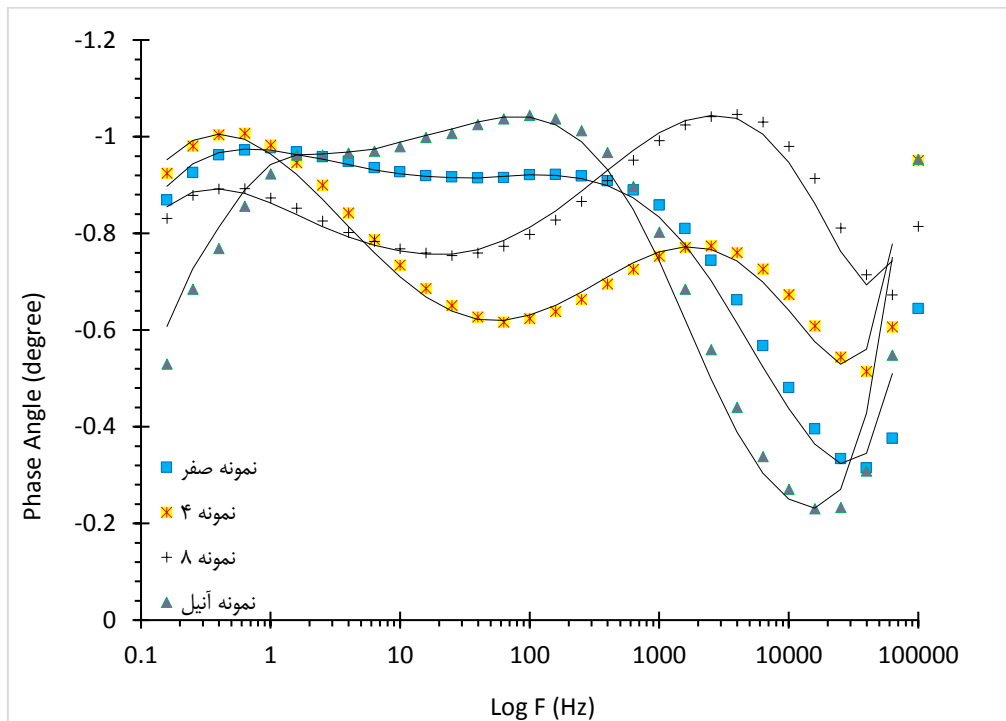
بنابراین واکنش کلی عبارت است از:



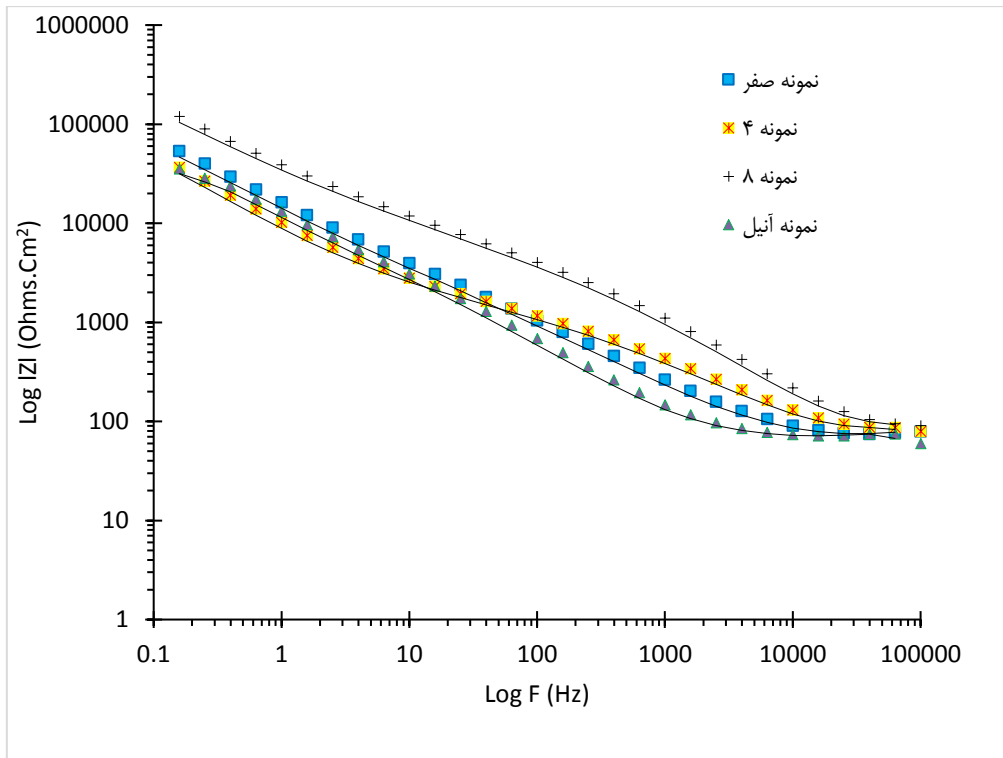
اگرچه این فیلم اکسیدی هیدراته مقداری خلل و فرج دارد، ولی مقاومت به خوردگی خوبی در مقابل حمله یون‌ها دارد. ترکیب فیلم اکسیدی هیدراته (سطح خارجی) و فیلم اکسیدی طبیعی (سطح داخلی) باعث تشکیل فیلم اکسیدی کامپوزیتی روی سطح آلومینیوم و منجر به پسیو شدن عالی آن در محلول‌های آبی می‌گردد [۱۰-۱۲]. هنگامی که آلومینیوم در محلول آبی حاوی کلر قرار می‌گیرد، فیلم پسیو مورد هجوم واکنش انحلال آندی قرار می‌گیرد. محصولات آندی $(AlOHCl_2$ و $AlOHCl$) قابلیت انحلال خوبی در محلول آبی دارند و انحلال آندی فیلم پسیو را توسعه می‌دهند. همان‌طور که مشخص است فیلم‌های اکسیدی یا دیگر فیلم‌ها مستعد جوانه‌زنی در عیوب سطحی مانند مرزدانه‌ها و نابجایی‌ها هستند. فرآیند ARB در آلیاژهای فوق ریزدانه نه تنها اصلاح دانه‌ها بلکه عیوب کریستالی با انرژی داخلی بالا مانند عیوب مرزدانه‌های زاویه بالا و نابجایی را به همراه دارد. این عیوب کریستالی پر انرژی در مواد فوق ریزدانه، مکان‌های جوانه‌زنی بیشتری را برای تشکیل فیلم پسیو ایجاد می‌کنند؛ بنابراین پس از قرارگیری مواد فوق ریزدانه در محلول آبی،

نشان می‌دهد. پارامتر مهم دیگر این نمودار فرکانس شکست است. فرکانس شکست، فرکانسی است که در آن ناحیه خازنی به ناحیه مقاومتی تبدیل می‌شود. اثبات شده است که هرچه قدر محل تقاطع این دو منحنی به مقادیر کمتری میل کند، بیانگر جدایش ماکروسکوپی کم‌تر لایه محافظ اکسیدی از سطح فلز است. این پارامتر نیز نشان می‌دهد که نمونه ۸ پاس کمترین فرکانس شکست را به خود اختصاص داده است و لذا می‌توان ادعا نمود که این کامپوزیت طی فرآیند آزمون جدایش کمتری از زیر لایه نسبت به دیگر کامپوزیت‌ها داشته است.

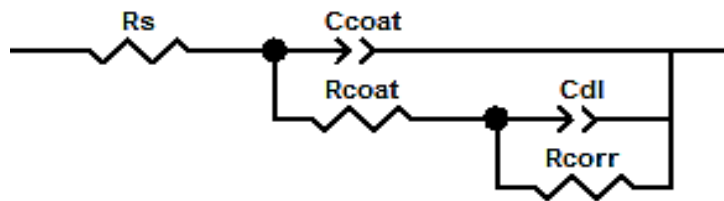
است. دلیل این مطلب به معادلات امپدانس مقاومت و خازن برمی‌گردد. در خازن، مقاومت تابعی از فرکانس است پس در نمودار امپدانس برحسب فرکانس این منحنی نمی‌تواند خط افقی باشد؛ اما امپدانس مقاومت تابعی از فرکانس نیست و با تغییر فرکانس تغییر نمی‌کند و افقی باقی می‌ماند. اثبات می‌شود که افزایش اندازه در ناحیه خازنی و کاهش در ناحیه مقاومتی بیانگر خواص سدکنندگی بهتر سطح در برابر ورود الکترولیت و عوامل خوردنده به سطح است. دیده می‌شود که در این مورد نیز نمونه ۸ پاس دارای بیشترین مقدار مربوط به ناحیه خازنی است که سدکنندگی بالاتر این کامپوزیت را



شکل (۶): نمودار فازی طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی کامپوزیت‌های تقویت شده در پاس‌های مختلف



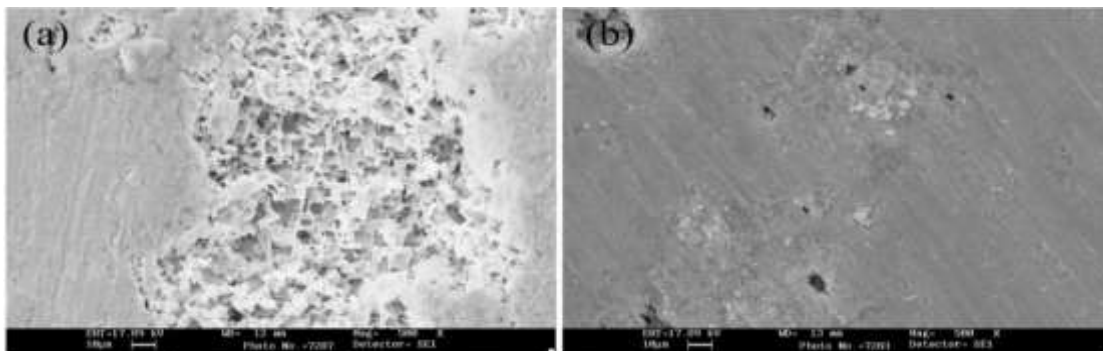
شکل (۷): نمودار بُعد طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی کامپوزیت‌های تقویت شده در پاس‌های مختلف



شکل (۸): مدار معادل طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی کامپوزیت‌های هیبریدی تقویت شده در پاس‌های مختلف

جدول (۲): نتایج حاصل از نمودارهای طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی کامپوزیت‌های در پاس‌های مختلف

نمونه	R_s ($\Omega.cm^2$)	C_{coat-T} ($F/cm^2\mu$)	C_{coat-P}	R_{coat} ($\Omega.cm^2$)	C_{dl-T} ($F/cm^2\mu$)	C_{dl-P}	R_{corr} ($\Omega.cm^2$)
صفر	۵۸/۳۵	۰/۱۱	۰/۶۷	۸۵۲۲	۵/۴۳	۰/۷۴	$۲/۱ \times 10^5$
۴	۴۴/۶۸	۹/۷۰	۰/۶۲	۲۲۷۸	۰/۱۶	۰/۷۵	$۱/۹ \times 10^5$
۸	۴۷/۲۱	۱/۱۸	۰/۷۵	۶۳۲۰	۷/۰۹	۰/۶۰	$۸/۳ \times 10^5$
آنیل	۶۳/۱۷	۰/۱۰	۰/۷۷	۵۶۳۲	۷/۷۴	۰/۷۹	$۰/۳۶ \times 10^5$



شکل (۹): تصاویر الکترون ثانویه میکروسکوپ الکترونی روشی کامپوزیت‌های تولید شده در پاس‌های مختلف پس از خوردگی در دو بزرگنمایی

۲۵۰ و ۱۰۰۰ برابر: (الف) نمونه اولیه و (ب) ۸ پاس ARB

کشیده شده‌اند. در مقایسه با آن، حفره‌های ایجاد شده بر روی نمونه آنیل شده، درشت‌تر، با عمق نسبتاً بیشتر و توزیع کاملاً یکنواخت بر کل سطح مشاهده می‌شوند. طبق انتظار و تحقیقات گذشته، با افزایش مراحل فرآیند نورد از شدت حملات حفره‌ای کاسته شده و توزیع آن‌ها غیریکنواخت‌تر می‌شود. شدت حملات خوردگی حفره‌ای در نمونه آنیل شده در مقایسه با دیگر نمونه‌ها به مراتب بیشتر شده است. از سوی دیگر با اعمال مراحل فرآیند اتصال نورد تجمعی به تدریج از شدت خوردگی حفره‌ای کاسته شده است. با وجود این، بایستی توجه داشت که شدت تخریب سطح نمونه پس از آخرین مرحله فرآیند هنوز از حالت اولیه تا حدودی کمتر به نظر می‌رسد.

مطابق شکل (۹)، خوردگی حفره‌ای زمانی اتفاق می‌افتد که نواحی موضعی یک ماده متحمل حمله سریع باشد، اگرچه سطوح وسیعی از ماده بدون تأثیر باقی می‌ماند. در تشریح مکانیزم خوردگی حفره‌ای بیان می‌شود که شروع خوردگی حفره‌ای در عیوب روی سطح آلومینیوم مثل ذرات فاز ثانویه و یا روی مرزدهانه‌ها اتفاق می‌افتد. منطقه مرده به وجود آمده در اثر هیدرولیز کاتیون‌های حاصل از انحلال آلومینیوم اسیدی شده و با افزایش بار مثبت حاصل از غلظت کاتیون‌ها در انتهای حفره، مهاجرت آنیون‌های موجود در محیط خارج به ویژه یون‌های Cl^- به داخل منطقه مرده را سبب می‌شود. با توجه به وجود عیوب و ناخالصی‌ها در ساختار فیلم اکسیدی، انرژی جذب سطحی یون‌های Cl^- از محلی به محل دیگر متفاوت است؛ بدین صورت که محل‌های با انرژی بالاتر تمایل به جذب بیشتر یون Cl^- دارند. مواد فوق ریزدانه با چگالی بالای مرزدانه و نابجایی درون دانه‌ها، تعادل انرژی را در سرتاسر ماده حفظ می‌کند و تشکیل لایه روئین سطحی روی نمونه فوق ریزدانه شده را تسریع می‌بخشد. واضح است که حجم بزرگی از مرزدانه‌های غیر تعادلی و تنش بالای درون دانه‌ها، روی لایه روئین تأثیر دارد و بر اساس تحقیقات انجام گرفته لایه روئین سطحی نمونه آلومینیوم فوق ریزدانه شده در مقایسه با نمونه درشت دانه همتای خود بیشتر و یکنواخت‌تر است. به دلیل انرژی بالای ذخیره شده در مرزدهانه‌های غیر تعادلی و تنش داخلی زیاد هنگام فرآیند

در تحلیل کلی می‌توان گفت که اطلاعات مستخرج از EIS برای تمام نمونه‌های آلومینیومی با شرایط مختلف، یکسان است. این امر با این تصور سازگار است که مکانیزم واکنش بیشتر توسط ترکیب آلیاژ تحمیل می‌شود و به‌طور خاص کمتر به ریز ساختار و ترکیبات بین فلزی وابسته است. هر چه میزان مقاومت به پلاریزاسیون افزایش یابد، مقاومت به خوردگی نیز افزایش می‌یابد. با توجه به جدول (۲) مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل نورد، مقاومت پلاریزاسیون افزایش یافته که این امر نشان‌دهنده افزایش مقاومت به خوردگی کامپوزیت تولید شده در ۸ پاس (افزایش تعداد سیکل نورد) می‌باشد. همچنین با بررسی تغییرات خاصیت خازنی لایه دوگانه مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل‌های نورد، کاهش در میزان انحلال فلز (کاهش در مقادیر C_{dl}) رخ می‌دهد. از آنجا که با کاهش خاصیت خازنی، مقاومت به خوردگی افزایش می‌یابد، پس در نتیجه مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل‌های نورد، مقاومت به خوردگی نمونه ۸ پاس افزایش می‌یابد. افزایش مرزدانه در موادی که قابلیت تشکیل لایه پسیو ندارند باعث افزایش نرخ خوردگی شده و در موادی که قابلیت تشکیل لایه پسیو داشته باشد موجب ایجاد مناطق مناسب جهت جوانه‌زنی لایه پسیو می‌شود و در نتیجه مرحله رشد لایه پسیو کاهش یافته و عیوب کمتری در لایه پسیو ایجاد می‌شود؛ لذا علت افزایش مقاومت به خوردگی نمونه ایجاد شده در پاس بالا را می‌توان با لایه اکسیدی تشکیل شده در سطح مرتبط دانست.

۲-۳- نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی کامپوزیت‌های تقویت شده در پاس‌های مختلف بعد از آزمون خوردگی

شکل (۹)، تصاویر کامپوزیت‌های ساخته شده به روش نورد گرم تجمعی با عامل تقویت‌کننده اکسید آلومینیوم در پاس‌های متفاوت را پس از آزمون خوردگی نشان می‌دهد که به تحلیل آن به شرح ذیل می‌باشد: با توجه به تصاویر SEM الکترون ثانویه مشهود است که نمونه اولیه شدت حفره‌دار شدن زیاد است و حفره‌ها در امتداد جهت نورد اولیه ورق

۵- مراجع

[1] م. طالبیان، م. عزیزاده و م. احتشام زاده، "بررسی اثرات نورد و آنیل بر روی رفتارهای کششی و خوردگی کامپوزیت چندلایه آلومینیوم/فولاد"، مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۳، شماره ۲، ۱۳۹۳.

[2] م. ر. رضائی، م. ر. طرقي نژاد و ف. اشرفی زاده، "مدل سازی و پیش بینی استحکام تسلیم آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ پس از انجام فرایند نورد تجمعی"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱۲، شماره ۳، صفحه ۴۵-۵۶، ۱۳۹۷.

[3] M. Reihanian, S. M. Lari Baghal, F. Keshavarz Haddadian & M. H. Mohammad Paydar, "A Comparative Corrosion Study of Al/Al₂O₃-SiC hybrid composite Fabricated by Accumulative Roll Bonding (ARB)", Journal of Ultrafine Grained and Nanostructured Mterials, vol. 49, no.1, pp. 29-35, 2016.

[4] ا. ح. اسلامی، س. م. زبرجد و م. م. مشکسار، "بررسی رفتار ساختاری، مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت لایه‌ای مس تولید شده به روش اتصال نورد تجمعی (ARB)"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۹، شماره ۱، صفحه ۷-۱، ۱۳۹۴.

[5] O. Bouaziz, Y. Estrin & H. S. Kim, "Severe Plastic Deformation by The Cone-Cone Method: Potential For Producing Ultrafine Grained Sheet Material", Metallurgical Research & Technology, vol. 104, no.6, pp. 318-322, 2007.

[6] J. Yin, J. Lu, H. Ma & Z. Pengsheng, "Nanostructural Formation of Fine Grained Aluminum Alloy by Severe Plastic Deformation at Cryogenic Temperature", Materials Science, vol. 39, pp. 2851-2854, 2004.

[7] S. M. Lee & C. G. Kang, "Effect of Solid Fraction on Formability and Mechanical Properties In A Vertical-Type Rheo Squeeze-Casting Process", Proc Inst Mech Eng Part B J Eng. Manuf, vol. 225, pp. 184-196, 2011.

[8] H. Roven, M. Liu, Y. Chen, J. Hjelen, W. Qifn, M. Karlsen & Y. Yu, "Network-Shaped Fine-Grained Microstructure and High Ductility of Magnesium Alloy Fabricated By Cyclic Extrusion Compression", Scripta Mater, vol. 58, no.4, pp. 311-314, 2008.

[9] M. Abdolahi Sereshki, B. Azad & E. Borhani, "Corrosion Behavior of Al-2wt%Cu Alloy Processed By Accumulative Roll Bonding (ARB) Process", Ultrafine Grained and Nanostructured Mterials, vol. 49, no.1, pp. 22-28, 2016.

ARB شکل‌گیری لایه روپین سطحی در نمونه فوق ریزدانه شده آسان است؛ بنابراین تعادل سازی انرژی مرزدانه‌های غیر تعادلی و عیوب مرزدانه‌ای منجر به خوردگی یکنواخت‌تر و همگن‌تر می‌شود و تمایل نمونه برای خوردگی به واسطه مکانیزم نسبت کاتد/آند (کاتد کوچک‌تر و آند بزرگ‌تر) کاهش می‌یابد؛ اما در مورد آلیاژ آلومینیوم A1060 چنین به نظر می‌رسد که ایجاد کرنش پلاستیک شدید، افزایش چگالی نابجایی‌ها، ریزدانه شدن و در نتیجه افزایش سطح انرژی آلیاژ در حین فرایند ARB عمده‌ترین عامل افزایش نسبی مقاومت به خوردگی این آلیاژ می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

۱- با توجه به آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک استنباط می‌شود که افزایش تعداد دفعات فرآیند نورد تجمعی (ARB) سبب کاهش دانسیته جریان خوردگی و از طرفی باعث کاهش سرعت خوردگی می‌شود به طوری که نمونه کامپوزیت تولید شده در ۸ پاس، کمترین میزان خوردگی در مقابل آن نمونه آنیل شده دارای بیشترین میزان خوردگی می‌باشد. دلیل این امر تغییر فرم پلاستیک است که در این فرآیند سبب ریزدانه شدن و افزایش مرزدانه می‌شود درحالی که فرآیند آنیل سبب رشد سریع دانه‌ها و از بین رفتن نابجایی‌ها و عیوب می‌گردد.

۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی کامپوزیت‌های ساخته شده در پاس‌های مختلف پس از خوردگی نیز نشان داد با افزایش تعداد دفعات فرآیند ARB میزان خوردگی و حفره‌دار شدن سطح کاهش می‌یابد به طوری که در راستای تأیید داده‌های خوردگی بیشتر میزان حفره ایجاد شده مربوط به نمونه آنیل شده بوده است که این حفرات در راستای عملیات نورد ایجاد شده‌اند. همچنین تأیید می‌شود که حفرات در عیوب سطحی مثل مرزدانه‌ها و ذرات فاز ثانویه ایجاد شده‌اند و یون کلر درون مناطق مرده باعث انحلال آلومینیوم شده است. بدین ترتیب اعمال کرنش شدید در فرآیند ARB سبب ریز شدن و توزیع فازهای بین فلزی آلیاژ می‌گردد و باعث بهبود رفتار خوردگی می‌شود.

Composite Fabricated by Accumulative Roll Bonding (ARB)", Ultrafine Grained and Nanostructured Materials, vol. 49, no.1, p. 29-35, 2016.

[۱۵] م. سالاری، "تشکیل دانه‌های با ابعاد نانو و تکامل بافت حین نورد تجمعی ورق مسی"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۴، شماره ۳، صفحه ۱۷-۲۳، ۱۳۸۹.

[16] M. Mahdi Taherian, M. Yousefpour & E. Borhani, "The effect of ARB process on corrosion behavior of nanostructured aluminum alloys in $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ PCMs", Engineering Failure Analysis, vol. 107, pp. 104222, 2020.

[17] M. Heydari Vini & S. Daneshmand, "Corrosion of Al/TiO₂ Composites fabricated by accumulative roll bonding", Materials performance, vol. 59. no. 11, pp. 28-31, 2020.

۶- پی‌نوشت

- [1] Passive
[2] Stern- Geary

[10] W. Wei, K. X. Wei & Q. B. Du, "Corrosion and Tensile Behaviors of Ultra-Fine Grained Al-Mn Alloy Produced By Accumulative Roll Bonding", Materials Science and Engineering: A. 454-455, pp. 536-541, 2007.

[11] M. F. Naeni, M. H. Shariat & M. Eizadjou, "On the Chloride induced Pitting of Ultra Fine Grains 5052 Aluminum Alloy Produced By Accumulative Roll Bonding Process", Alloys and Compounds, vol. 509, no.4, pp. 696-700, 2011.

[12] E. Darmiani, I. Danaee, M. A. Golozar & M. R. Toroghinejad, "Corrosion Investigation of Al-SiC Nano-Composite Fabricated By Accumulative Roll Bonding (ARB) Process," Alloys and Compounds, vol. 552, no.3, pp. 1-9, 2013.

[13] M. Eizadjou, H. Fattahi, A. K. Talachi, H. D. Manesh, K. Janghorban & M. H. Shariat, "Pitting Corrosion Susceptibility of Ultrafine Grains Commercially Pure Aluminium Produced by Accumulative Roll Bonding Process", Corrosion Engineering Science and Technology, vol. 47, no.1, pp.19-24, 2012.

[14] M. Reihanian, S. M. L. Baghal, F. Keshavarz Haddadian & M. Hosein Paydar, "A Comparative Corrosion Study of Al/Al₂O₃-SiC Hybrid