

اثر فرآیند اتصال نورد تجمعی بر رفتار خوردگی نانو کامپوزیت Al-nano ZrO₂

سینا متین^۱، محمود پاکشیر*^۲، رضا بازرگان لاری^۳، خشایار مرشدبهبهانی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی، بخش مهندسی مواد، شیراز، ایران

۲- دانشیار، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی، بخش مهندسی مواد، شیراز، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی مواد، واحد مرودشت، دانشگاه آزاداسلامی، مرودشت، ایران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی، بخش مهندسی مواد، شیراز، ایران

*pakshir@shirazu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۶/۰۴، تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۶/۲۵)

چکیده

در این تحقیق به بررسی رفتار خوردگی نانو کامپوزیت Al-nano ZrO₂ تولید شده به روش اتصال نورد تجمعی (ARB) پرداخته شده است. ورق های آلیاژ آلومینیوم با ابعاد ۱ mm * ۴۰ * ۲۵۰ میلی آنیل شده در دمای ۶۲۳ K و فشار اتمسفر محیط، و پودر ZrO₂ با اندازه میانگین ۴۰ nm به عنوان ماده اولیه استفاده گردیدند. کامپوزیت Al-nano ZrO₂ طی ۵ سیکل ساخته شد. به منظور انجام آزمون های الکتروشیمیایی، نمونه های مستطیلی با ابعاد ۱ mm * ۱۰ * ۱۰ بریده شده، به سیم مسی متصل و سپس مانت سرد گردیدند. پتانسیل مدار باز (OCP) نمونه ها پس از ۲۴ ساعت غوطه وری در آب دریای مصنوعی (3.5wt% NaCl) اندازه گیری شد و سپس آزمون های طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) و پتانسیودینامیک با نرخ رویش ۱ mV/s انجام گردید. نتایج آزمون پتانسیودینامیک حاکی از کاهش دانسیته جریان خوردگی با افزایش تعداد سیکل های نورد می باشد. نتایج EIS نیز بیانگر افزایش مقاومت پلاریزاسیون (Rp) با افزایش تعداد سیکل های نورد می باشد. تصاویر SEM در سیکل های ۱، ۳ و ۵، نشان می دهد که با افزایش تعداد سیکل های نورد، توزیع یکنواختی از ذرات ZrO₂ در ماتریس آلومینیوم ایجاد می شود. بنابراین می توان نتیجه گیری کرد که به دلیل افزایش ضخامت و یکنواختی لایه اکسیدی در اثر افزایش سیکل های نورد، مقاومت به خوردگی این کامپوزیت افزایش یافته است. این لایه متراکم اکسیدی، در نتیجه توزیع یکنواخت ذرات نانو ZrO₂ در ماتریس می باشد که به افزایش مقاومت به خوردگی کامپوزیت کمک می کند.

واژه های کلیدی:

اتصال نورد تجمعی، نانو کامپوزیت، پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی.

۱- مقدمه

بوده، لذا تحقیقات در این زمینه همواره جزئی جدایی ناپذیر از مراحل رشد هر فناوری نوظهور بوده است. بر همین اساس در

از آنجایی که همواره یکی از عوامل محدود کننده بشر در دست یابی به رویاهای فناورانه اش، استفاده از مواد مهندسی مناسب

است [۵]. البته لازم به ذکر است که فرایند اتصال نورد تجمعی باعث کاهش شدید انعطاف پذیری در نمونه می شود.

میکروساختار و خواص مکانیکی آلومینیوم و آلیاژهای آن پس از اتصال نورد تجمعی توسط محققان بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است [۵-۱۲]. با این وجود اطلاعات کمی در مورد رفتار خوردگی آلیاژهای آلومینیوم فوق ریزدانه تولید شده به روش اتصال نورد تجمعی وجود دارد. اندک مطالعات خوردگی صورت گرفته نتایج متناقضی از مقاومت به خوردگی آلیاژهای مختلف آلومینیوم تحت فرایند تغییر فرم پلاستیک شدید را گزارش کردند [۱۳-۱۶].

این چنین به نظر می رسد که مقاومت به خوردگی مواد فوق ریزدانه عمدتاً به ترکیب شیمیایی آلیاژ، محیط خورنده و همچنین نوع فرآیند تغییر فرم پلاستیک شدید وابسته است. فدایی و همکاران نشان دادند که مقاومت به خوردگی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ پس از فرآیند اتصال نورد تجمعی کاهش می یابد [۱۵]. وی و همکارانش گزارش کردند مقاومت به خوردگی آلیاژ Al-Mn فوق ریزدانه شده تحت فرایند اتصال نورد تجمعی در محیط شبیه سازی آب دریا به دلیل کاهش اندازه ذرات $MnAl_6$ بهبود خواهد یافت [۱۶].

شکل غالب خوردگی در کامپوزیت های پایه آلومینیومی، خوردگی حفره ای می باشد. در اثر هیدرولیز کاتیون، غلظت یون های Al^{3+} و هیدروژن در داخل حفره افزایش یافته و باعث کاهش pH در حفره می شود و طبق نمودار پوربه، ماده به خارج از ناحیه حفاظت برده می شود [۱۸-۲۰].

آلومینیوم خالص تجاری و آلیاژهای آن به دلیل تشکیل فیلم اکسیدی متراکم روی سطح، مقاومت به خوردگی حفره ای نسبتاً خوبی دارند. اکثر محققان بر این باورند که مکانیزم خوردگی آلومینیوم شامل جذب و نفوذ یون کلراید درون فیلم پسیو، تشکیل حفره و گسترش آن می باشد و در مورد وجود ترک های بسیار ریز در فیلم پسیو که محل مناسبی برای پیدایش حفره می باشند تقریباً تمامی محققان اتفاق نظر دارند [۱۷ و ۱۸]. با این حال مقالات کمی در زمینه رفتار خوردگی آلومینیوم خالص

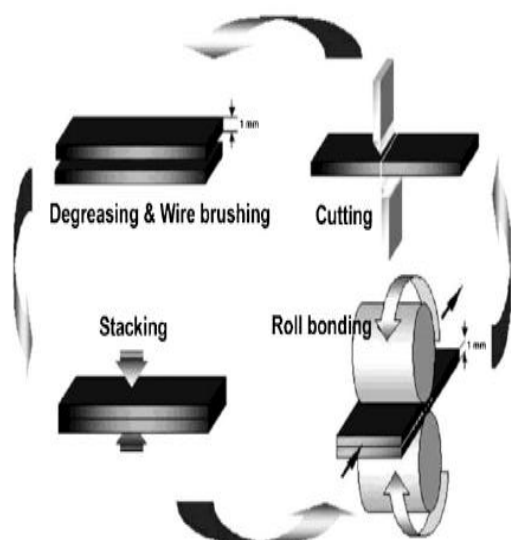
فناوری نانو نیز محققان برای کنترل فرایندها و ساخت تجهیزات در ابعاد نانومتری و دستیابی به خواص بهتر، شدیداً با مسئله ساخت و تولید موادی که در ابعاد مربوطه فرآوری شده باشند، روبرو هستند. ساخت، فرآوری و کنترل ابعاد و ریز ساختار مواد در ابعاد نانومتری نیاز به فناوری هایی بسیار پیشرفته تر از فناوری های موجود دارد، که این مسئله در فناوری نانو محقق شده است [۱].

به طور کلی به مواد با ریزساختار بین ۱۰۰-۱ nm، نانو مواد می گویند. روش های مختلفی جهت تولید مواد با ساختار نانو وجود دارد. یکی از این روش ها، تغییر شکل های پلاستیک بسیار شدید (SPD) می باشد. اگر چه اندازه دانه های مواد تولید شده با استفاده از روش های SPD بین ۱۰۰-۱۰۰۰ nm می باشد، ولی شامل ریزدانه ها و سلول های نابجایی با اندازه کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر هستند، بنابراین آنها را مواد با ساختار نانو می نامند [۲-۳].

یکی از روش های تولید مواد با ساختار نانو توسط اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید، روش نورد اتصال تجمعی (ARB) می باشد، که برای اولین بار در سال ۱۹۹۸ توسط تسوجی و همکارانش [۳ و ۲] بر روی ورق های فلزی پیشنهاد و توسعه داده شد. به طور کلی ARB به دلیل سادگی روش و امکان تولید مواد با ابعاد بزرگ، نسبت به روش های دیگر SPD، در صنعت کاربرد گسترده ای پیدا کرده است [۲-۳].

روش اتصال نورد تجمعی اساساً شامل اعمال تکرار روش نورد معمولی می باشد. ابتدا این روش برای آلیاژهای آلومینیوم به کار برده شد و ورقی فوق ریزدانه با اندازه چند صد نانومتر به طور موفقیت آمیز تولید شد [۴]. فرایند اتصال نورد تجمعی نسبت به سایر روش های تغییر فرم پلاستیک شدید دارای چندین مزیت می باشد از جمله: نیاز به دستگاه های با ظرفیت بالای اعمال نیرو و گران قیمت ندارد، همچنین بهره وری بالا و قابلیت تولید بدون محدودیت دارد. به دلیل توانایی ها و این که نورد تجمعی یک فرایند پیوسته برای تولید نانو کریستال ها و ورق های فوق ریز دانه پر کاربرد در صنعت می باشد، بسیار مورد توجه قرار گرفته

ها کمتر از ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. مرحله دوم، توزیع یکنواخت پودر ZrO₂ در بین لایه‌های آماده سازی شده و نورد هم زمان لایه های آماده سازی شده می‌باشد. میزان پودر مورد استفاده جهت ساخت نانو کامپوزیت، ۲/۵ درصد وزنی است. فرآیند فوق با استفاده از یک دستگاه نورد با غلطک هایی به قطر ۱۷۰ میلی متر و سرعت نورد ۵ دور بر دقیقه انجام گرفته است. این روند برای اعمال کرنش پلاستیک شدید و دستیابی به ساختار فوق ریز دانه و نانو طی ۵ مرحله در دمای محیط تکرار گردید [۱۵]. هدف از اضافه کردن ذرات ZrO₂، افزایش سختی و تولید مناطق پرانرژی بیشتر در کامپوزیت و همچنین اثر آن بر روی رفتار خوردگی بوده است. شماتیک این روش در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۲): شماتیک از فرآیند اتصال نورد تجمعی

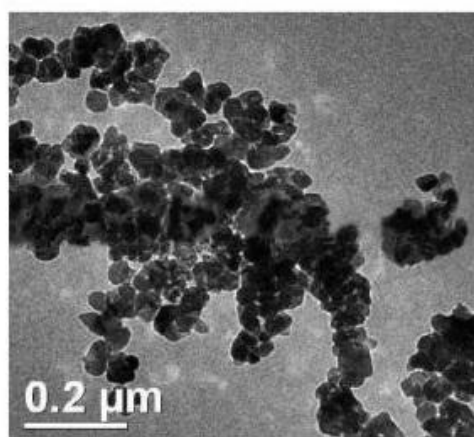
شایان ذکر است که بعد از اتمام ۵ مرحله نورد تجمعی، هیچگونه کار مکانیکی اضافی بر روی نمونه صورت نگرفته است و تنها کار مکانیکی صورت گرفته در حین فرآیند نورد (فرآیند اتصال نورد تجمعی) بوده است.

پاس های ۱ و ۳ و ۵ نانو کامپوزیت مورد آزمون های الکتروشیمیایی قرار گرفتند [۱۵]. برای تهیه الکتروود کاری مورد استفاده در آزمایش های الکتروشیمیایی، نمونه هایی از

تجاری پس از عملیات اتصال نورد تجمعی وجود دارد. در این تحقیق رفتار خوردگی کامپوزیت Al-nanoZrO₂ تولید شده به روش اتصال نورد تجمعی در محلول کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی در دمای اتاق مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش تحقیق

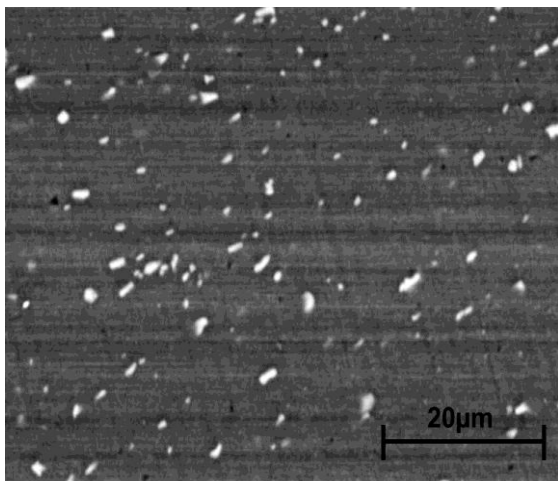
در این تحقیق آلایز ۱۰۵۰ آلومینیوم با ترکیب شیمیایی مطابق با جدول ۱ و ذرات ZrO₂ با اندازه دانه ۴۰-۶۰ nm مورد استفاده قرار گرفت. تصاویر مربوط به آنالیز TEM نانو ذرات ZrO₂ مربوط به شرکت Merck در شکل ۱ آورده شده است.



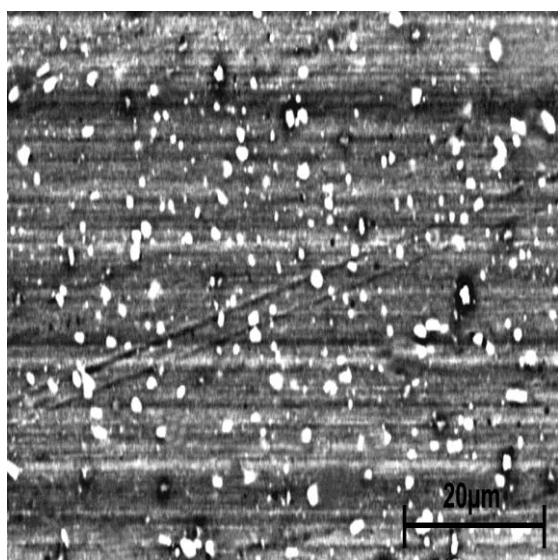
شکل (۱): تصویر میکروسکوپی الکترونی عبوری از ذرات nano ZrO₂ [۲۱]

جهت انجام فرآیند نورد تجمعی، نمونه‌ها با ابعاد mm ۱*۴۰*۲۵۰ تهیه و در دمای ۳۵۰°C به مدت ۶۰ دقیقه آنیل کامل گردیدند. فرآیند اتصال نورد تجمعی ورق های آلومینیومی، در دو مرحله صورت گرفت. مرحله اول، فرآیند آماده سازی سطحی است که شامل چربی زدایی سطوح اتصال بین ورق های دو لایه با استون و خشک شدن آنها در هوا و سپس برس کاری سطوح چربی زدایی شده با برس های دایره ای است. این برس ها از جنس فولاد با قطر ۹۰ میلی متر، دارای سیم های فولادی به قطر ۰/۳۵ میلی متر و طول ۲۲ میلی متر است. شایان ذکر است که زمان بین فرآیند آماده سازی سطحی و فرآیند نورد برای جلوگیری از ایجاد لایه های اکسیدی مجدد بر روی سطوح ورق

شکل (۳): تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نمونه سیکل ۱ نانو کامپوزیت Al-nano ZrO_2 ساخته شده به روش اتصال نورد تجمعی



شکل (۴): تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نمونه سیکل ۳ نانو کامپوزیت Al-nano ZrO_2 ساخته شده به روش اتصال نورد تجمعی



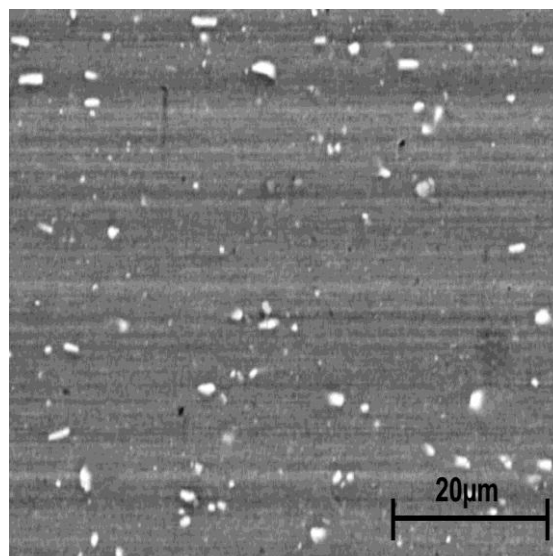
شکل (۵): تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نمونه سیکل ۵ نانو کامپوزیت Al-nano ZrO_2 ساخته شده به روش اتصال نورد تجمعی

البته شایان ذکر است که در روش اتصال نورد تجمعی نمی توان پودر ZrO_2 را بر روی سطح توزیع نمود و مقداری آگلومره شدن رخ می دهد که با افزایش تعداد پاس نورد از آگلومره شدن کاسته می شود. همانگونه که مشاهده می شود با افزایش تعداد سیکل های نورد، توزیع ذرات درون زمینه به صورت یکنواخت صورت می گیرد. توزیع یکنواخت ذرات در سیکل های بالاتر

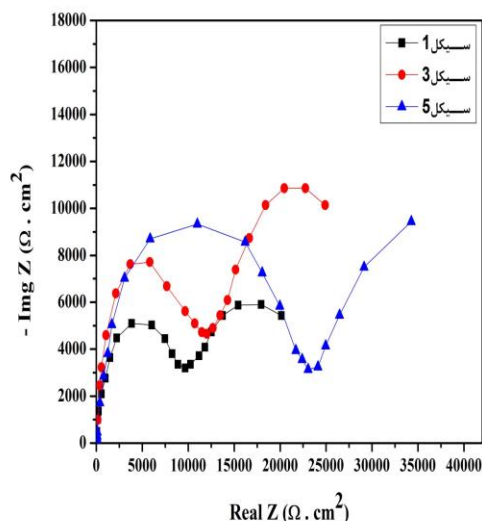
نانو کامپوزیت به ضخامت ۱ mm و سطح مقطع 10×10 mm از صفحه RD-TD آماده سازی، و پس از اتصال به سیم مسی مانت سرد شدند. به منظور جلوگیری از اثرات احتمالی دمای اعمال شده حین لحیم، اتصال سیم مسی و نمونه توسط چسب گرافیتی برقرار شد. سپس نمونه ها طبق استاندارد [ASTM-]G1-90 [۱۹]، با استفاده از سمباده حاوی ذرات SiC و مش های به ترتیب ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ به صورت مکانیکی پولیش گردیدند و پس از شستشو با آب و مواد شوینده، با استون چربی زدایی شدند. آزمایش های خوردگی با دستگاه پتانسیو استات مدل Autolab Type III μ و در محلول کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی به عنوان محیط خورنده انجام گرفت. تمامی پتانسیل ها در مقابل الکتروود مرجع [Ag/AgCl 3M KCl] و با الکتروود کمکی از جنس پلاتین اندازه گیری شد. پتانسیل مدار باز (OCP) نمونه ها به مدت ۱۸۰۰ ثانیه اندازه گیری شد و آزمایش های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی با نرخ روبش ۱ mV/s انجام گرفت.

۳- بحث و نتایج

شکل ۳، ۴ و ۵ به ترتیب نشان دهنده توزیع یکنواخت ذرات ZrO_2 در سیکل های ۱، ۳ و ۵ نورد تجمعی در زمینه آلومینیوم است.



نمودارهای نایکوئیست مربوط به آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی برای نمونه های نورد تجمعی شده در سیکل های مختلف در شکل ۷ آورده شده است. همچنین نتایج مربوط به آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل (۷): نمودارهای طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی ۳ نمونه از سیکل های مختلف نانو کامپوزیت Al-nano ZrO₂ ساخته شده به روش اتصال نورد تجمعی

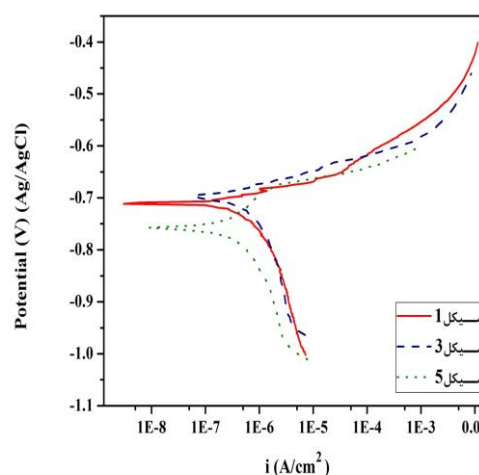
نتایج این آزمون حاکی از وجود دو ثابت زمانی می باشد که جهت شبیه سازی نتایج از مدار معادل شکل ۸ کمک گرفته شده است. مشاهده می گردد که با افزایش تعداد سیکل های نورد تغییری در تعداد ثوابت زمانی صورت نگرفته و تنها اندازه قطر های حلقه های ظرفیتی تغییر کرده است.

اجزاء سازنده مدار شکل ۸ عبارتند از: RS مقاومت محلول بین الکتروود کار و الکتروود مرجع، Rp مقاومت پلاریزاسیون، CPE_{dl} و CPE_{oxide} که به ترتیب عنصر فاز ثابت مربوط به لایه دوگانه و لایه اکسید سطحی می باشد. استفاده از عنصر فاز ثابت به علت تطابق حداکثری نتایج با مدار معادل نشان داده شده در شکل ۸ می باشد. عنصر فاز ثابت به صورت معادله ۱ تعریف می شود.

نورد تجمعی عاملی در جهت بهبود رفتار خوردگی نانو کامپوزیت می باشد [۲۰].

۳-۱- بررسی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک

نمودارهای پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای نمونه های نانو کامپوزیت در سیکل های مختلف نورد در محلول کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی در شکل ۶ آورده شده است. همچنین نتایج مربوط به این آزمون در جدول ۲ گزارش شده است.



شکل (۶): نمودارهای پلاریزاسیون خطی ۳ نمونه از سیکل های مختلف نانو کامپوزیت Al-nano ZrO₂ ساخته شده به روش اتصال نورد تجمعی

با افزایش تعداد پاس های نورد، اندازه ناخالصی های حاوی Si کاهش می یابد و این کاهش در اندازه ذرات Si، باعث افزایش مقاومت به خوردگی حفره ای نانو کامپوزیت می گردد، طبق مکانیزم کاتد کوچک- آند بزرگ [۱۴ و ۱۶]. همانطور که مشاهده می گردد با افزایش تعداد سیکل های نورد تجمعی، میزان پتانسیل خوردگی بزرگتر شده است. این افزایش در پتانسیل خوردگی بیانگر کاهش فعالیت سطحی نمونه ها می باشد. همچنین مشاهده می شود که میزان دانسیته جریان خوردگی با افزایش تعداد سیکل های نورد کاهش می یابد که این امر نشان دهنده افزایش مقاومت به خوردگی نانو کامپوزیت Al-nano ZrO₂ با افزایش تعداد سیکل های نورد می باشد.

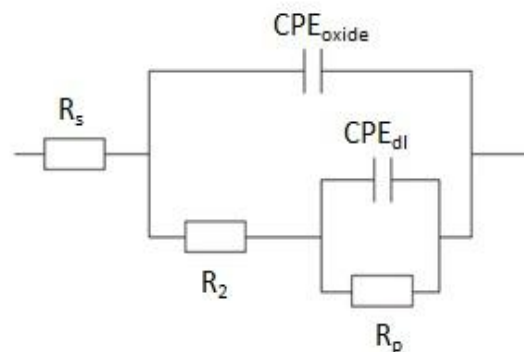
۳-۲- بررسی طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

ذرات ZrO_2 از سختی بالاتری نسبت به فاز زمینه برخوردارند. این تفاوت در سختی باعث افزایش مرزدانه‌های ناپایدار در کامپوزیت می‌شود که این مرزدانه‌ها به عنوان مناطق مناسب جهت جوانه زنی لایه پسیو عمل می‌کنند [۱۶ و ۱۷]. 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 جوانه زنی لایه پسیو می‌شود و در نتیجه مرحله رشد لایه پسیو کاهش یافته و عیوب کمتری در لایه پسیو ایجاد می‌شود. همچنین علت افزایش مقاومت به خوردگی نانو کامپوزیت را می‌توان با لایه اکسیدی تشکیل شده در سطح مرتبط دانست. با بررسی رفتار خازنی لایه اکسید سطحی مشاهده می‌شود که لایه اکسیدی تشکیل شده در سطح نمونه های مربوط به سیکل های بالاتر نورد از ضخامت بالاتر و یکنواختی بیشتری برخوردار می‌باشند. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سیکل های نورد، میزان C_{oxide} کاسته می‌شود. با توجه به رابطه معکوس میان خاصیت خازنی و ضخامت لایه اکسید سطحی، مشاهده می‌شود که ضخامت لایه سطحی با افزایش تعداد سیکل های نورد افزایش می‌یابد. n میزان انحراف از رفتار ایده آل خازنی است، $n=0$ بیانگر مقاومت خالص، $n=1$ خازن خالص و $n=-1$ القاگر خالص خواهد بود.

با بررسی مقادیر مربوط به n_{oxide} مشاهده می‌شود که لایه های اکسید سطحی از تراکم بالایی برخوردار هستند و با افزایش تعداد سیکل های نورد بر تراکم آن افزوده می‌شود (به علت توزیع یکنواخت تر ذرات ZrO_2 و تولید مرزدانه‌های ناپایدار بیشتر جهت ایجاد مناطق مناسب برا جوانه زنی لایه پسیو).

۴- نتیجه گیری

همانگونه که مشاهده گردید، استفاده از نانو کامپوزیت Al-nano ZrO_2 تولید شده به روش اتصال نورد تجمعی علاوه بر خواص خوب مکانیکی، خواص دیگری هم در زمینه خوردگی دارد که به صورت خلاصه بیان می‌شود.



شکل (۸): مدار معادل برای شبیه سازی داده های تست طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نانو کامپوزیت $Al-nano ZrO_2$ ساخته شده به روش اتصال نورد تجمعی

$$CPE = P \times (i\omega)^n \quad (1)$$

در رابطه بالا، P به خاصیت خازنی و n به مورفولوژی سطح مربوط می‌شود. جهت تعیین خاصیت خازنی لایه دوگانه و همچنین لایه اکسید سطحی از رابطه ۲ کمک گرفته شده است.

$$C = (F \times (R_p)^{1-n})^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

هر چه میزان مقاومت پلاریزاسیون افزایش یابد، مقاومت به خوردگی نیز افزایش می‌یابد. با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل های نورد، مقاومت پلاریزاسیون افزایش یافته که این امر نشان دهنده افزایش مقاومت به خوردگی نانو کامپوزیت $Al-nano ZrO_2$ با افزایش تعداد سیکل نورد می‌باشد.

همچنین با بررسی تغییرات خاصیت خازنی لایه دوگانه مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل های 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 سیکل های نورد، مقاومت به خوردگی نانو کامپوزیت $Al-nano ZrO_2$ افزایش می‌یابد.

- ۱- با افزایش تعداد سیکل های نورد و افزودن ذرات nano ZrO₂ مقاومت به خوردگی کامپوزیت تولید شده افزایش می یابد.
- ۲- با افزایش تعداد سیکل های نورد در فرآیند اتصال نورد تجمعی، ذرات nano ZrO₂ به صورت یکنواخت توزیع می شوند
- که این امر باعث افزایش مقاومت به خوردگی این کامپوزیت در سیکل های بالا می گردد.
- ۳- با افزایش تعداد سیکل های نورد، تراکم لایه اکسید سطحی افزایش می یابد که این امر موجب افزایش مقاومت به خوردگی نانو کامپوزیت می شود.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژ ۱۰۵۰ آلومینیوم مورد استفاده در تحقیق

عنصر	Ni	Cr	Ti	Zr	Cu	Mg	Fe	Si	Al
درصدوزنی %	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۹	۰/۰۰۲	۰/۴۳	۰/۱	۹۹/۳۴

جدول (۲): پارامترهای محاسبه شده برای نمودارهای پلاریزاسیون خطی ۳ نمونه از سیکل های مختلف نانو کامپوزیت Al-Nano ZrO₂ تولید شده به روش اتصال

نورد تجمعی

نمونه	b _c (V/dec)	b _a (V/dec)	E _{corr} (V)	I _{corr} (A/Cm ²)
سیکل ۱	۰/۰۲۹	۰/۱۶۴	-۰/۷۰۹	۱/۶۰۱ × ۱۰ ^{-۶}
سیکل ۳	۰/۰۲۹	۰/۱۴	-۰/۶۹۷	۱/۱۰۴ × ۱۰ ^{-۶}
سیکل ۵	۰/۰۶۷	۰/۱۲۶	-۰/۶۵۸	۱/۰۳۴ × ۱۰ ^{-۶}

جدول (۳): پارامترهای محاسبه شده برای نمودارهای طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی ۳ نمونه از سیکل های مختلف نانو کامپوزیت Al-nano ZrO₂ ساخته

شده به روش اتصال نورد تجمعی

نمونه	R _p (Ω.cm ²)	R ₂ (Ω.cm ²)	C _{oxide}	n _{oxide}	C _{dl}	n _{dl}	R _s (Ω.cm ²)
سیکل ۱	۲۶۷۲۰	۱۰۷۳۰	۰/۰۰۰۵۴	۰/۹۸	۷/۵ × ۱۰ ^{-۶}	۰/۶۵	۱۵
سیکل ۳	۳۷۶۵۰	۱۶۶۷۰	۰/۰۰۰۴۹	۰/۹۶	۵/۶ × ۱۰ ^{-۶}	۰/۵۴	۲۰
سیکل ۵	۷۳۴۷۱	۱۲۶۵۰	۰/۰۰۰۴۲	۰/۹۸	۳/۷ × ۱۰ ^{-۶}	۰/۷۳	۱۶

roll bonding (ARB) process ", Acta Mater, Vol. 4, No. 2, pp. 579-583, 1999.

- [4] R. Song, D. Ponge, D. Raabe, J. G. Speer & D. K. Matlock, "Overview of processing, microstructure and mechanical properties of ultrafine grained bcsteels ", Materials Science and Engineering A, Vol. 441, pp. 1-17, 2006.

- [5] M. R. Rezaei, M. R. Toroghinejad & F. Ashrafizadeh, "Effects of ARB and ageing processes on mechanical properties and microstructure of 6061 aluminum alloy ",

۵- مراجع

[۱] م. حبیب نژاد کواریم، نانومواد، تهران، انتشارات تهران فراندیش،

۱۳۸۶.

- [2] Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai & R. G. Hong, "ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll bonding process ", Scripta Materialia, Vol. 39, pp. 1221-1227, 1998.

- [3] Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji & T. Sakai, "Novel ultra-high straining process for bulk materials development of the accumulative

- [13] S. Dan, M. Ai-bin, J. Jing-hua, L. Pin-hua & Y. Dong-hui, "Corrosion behavior of ultra finegrained industrial pure Al fabricated by ECAP", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 19, pp. 1065-1070, 2009.
- [14] M.K. Chung, Y.S. Choi, J.G. Kima, Y.M. Kimb & J.C Lee, "Effect of the number of ECAP pass time on the electrochemical properties of 1050 Al alloys", Materials Science and Engineering A, Vol. 366, pp. 282-291, 2004.
- [15] M. FadaeiNaeni, M. H. Shariat & M. Eizadjou, "On the chloride-induced pitting of ultrafine grains 5052 aluminum alloy produced by accumulative roll bonding process", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 509, pp. 4696-4700, 2011.
- [16] 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, Vol. 454-455, pp. 536-541, 2007.
- [17] W. J. Lee & S. I. Pyun, "Effects of sulphate ion additives on the pitting corrosion of pure aluminum in 0.01 M NaCl solution", Electrochimica Acta, Vol. 45, pp. 1901-1910, 2000.
- [18] E. McCafferty, "Sequence of steps in the pitting of aluminum by chloride ions", Corrosion Science, Vol. 45, pp. 1421-1438, 2003.
- [19] Annual book of ASTM standard, "standard practice for preparing", cleaning and evaluation corrosion test specimens, Vol. 03.02, .2002.
- [20] E. Darmiani, I. Danaee, M. A. Golozar & M. R. Toroghinejad, "Corrosion investigation of Al-sic nano-composite fabricated by accumulative roll bonding (ARB) process", Journal of Alloy and Compounds, Vol. 552, pp. 31-39, 2013.
- [21] <https://www.merck.com>
- Journal of Materials Processing Technology, Vol. 211, pp. 1148-1190, 2011.
- [6] R. Jamaati, S. Amirkhanlou, M. R. Toroghinejad & B. Niroumand, "Significant improvement of semi-solid microstructure and mechanical properties of A356 alloy by ARB process", Materials Science and Engineering A, Vol. 528, pp. 2495-2501, 2011.
- [7] B.L. Li, N. Tsuji, N. Kamikawa, "Microstructure homogeneity in various metallic materials heavily deformed by accumulative roll-bonding", Materials Science and Engineering A, Vol. 423, pp. 331-342, 2006.
- [8] B. Beausir, J. Scharnweber, J. Jaschinskib, H. G. Brokmer, C. G. Oertel & W. Skrotzki, "Plastic anisotropy of ultrafine grained aluminium alloys produced by accumulative roll bonding", Materials Science and Engineering A, Vol. 527, pp. 3271-3278, 2010.
- [9] Ch. Kwan, Zh. Wang & S. B. Kang, "Mechanical behavior and microstructural evolution upon annealing of the accumulative roll-bonding (ARB) processed Al alloy 1100", Materials Science and Engineering A, Vol. 480, pp. 148-159, 2008.
- [10] H. Pirgazi, A. Akbarzadeh, R. Petrov, J. Sidor & L. Kestens, "Texture evolution of AA3003 aluminum alloy sheet produced by accumulative roll bonding", Materials Science and Engineering A, Vol. 492, pp. 110-117, 2008.
- [11] N. Tsuji, Y. Ito, Y. Saito & Y. Minamino, "Strength and ductility of ultrafine grained aluminum and iron produced by ARB and annealing", Scripta Materialia, Vol. 47, pp. 893-899, 2002.
- [12] B. L. Li, N. Tsuji & N. Kamikawa, "Microstructure homogeneity in various metallic materials heavily deformed by accumulative roll-bonding", Materials Science and Engineering A, Vol. 423, pp. 331-342, 2006.