

بررسی رفتار خوردگی حفره‌ای کامپوزیت Al-nano ZrO₂ تولید شده به روش اتصال نورد جمعی

سینا متین^{۱*}، محمود پاکشیر^۲

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

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

*s.matin66@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۱۸)

چکیده

در این تحقیق به بررسی رفتار خوردگی حفره‌ای نانو کامپوزیت Al-nano ZrO₂ تولید شده به روش اتصال نورد جمعی (ARB) پرداخته شده است. ورق‌های آلایژ آلومینیوم با ابعاد ۲۵۰×۴۰×۱ mm آنبیل 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 شده است. به منظور انجام آزمون‌های الکتروشیمیایی، نمونه‌های مستطیلی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱ mm بریده شده، به سیم مسی متصل و سپس مانت سرد گردیدند. پتانسیل مدار باز (OCP) نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در آب دریای مصنوعی (3.5 %wt NaCl) اندازه‌گیری شد و سپس تست‌های پلاریزاسیون سیکیلی در رنج پتانسیل ۰/۲۵- تا ۱ ولت نسبت به OCP و با سرعت روبش ۱ mv/s انجام گردید. نتایج آزمون پلاریزاسیون سیکیلی حاکی از کاهش مقدار E_b نمونه نانو کامپوزیتی با افزایش تعداد سیکل‌های نورد می‌باشد. همچنین با افزایش تعداد پاس نورد، مقادیر E_b-E_{pp} کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد لایه پسیو مجدد، راحت‌تر تشکیل گردیده است. تصاویر SEM نشان‌دهنده کاهش اندازه و توزیع یکنواخت حفره‌های ایجاد شده بر روی نمونه‌ها، با افزایش تعداد پاس‌های نورد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی:

اتصال نورد جمعی، نانو کامپوزیت، پلاریزاسیون سیکیلی.

۱- مقدمه

به‌طور کلی تلاش گسترده‌ای در جهت ساخت مواد فلزی ریزدانه با اندازه‌دانه کمتر از میکرون صورت گرفته است، زیرا این مواد با دانه‌های فوق ریز (زیرمیکرون) استحکام بالا در دمای محیط، تغییر فرم سوپرپلاستیک سریع در دمای بالا و مقاومت به خوردگی را از خود نشان می‌دهند. این مواد به عنوان آبرفلزات شناخته شده و توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۲].

موفقیت چشمگیر کاهش وزن در صنایع اتومبیل‌سازی، دریایی، توربین‌ها، کمپرسورها، صنایع هوایی و هواپیماها، دانشمندان و مهندسی در زمینه‌های مختلف صنعتی را برآن داشته است تا از نانو کامپوزیت‌ها در طراحی خود استفاده کنند. به دلیل وزن سبک، استحکام بالا، صلبیت و مقاومت در برابر دما؛ استفاده از دانه‌بندی میکرون (یا زیرمیکرون) متداول گردیده است [۱-۲]. کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی با نانوذرات تقویت کننده و

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 می‌رسد که مقاومت به خوردگی مواد فوق ریزدانه عمدتاً به ترکیب شیمیایی آلیاژ، محیط خوردنده و همچنین نوع فرآیند تغییر فرم پلاستیک شدید وابسته است. چانگ و همکارانش، اثر تعداد پاس‌های ECAP بر رفتار الکتروشیمیایی AA 1050 را مورد بررسی قرار دادند. آنها مشاهده کردند که با افزایش تعداد پاس‌های فرایند، مقاومت پلاریزاسیون نمونه افزایش می‌یابد [۱۴]. 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].

نوع غالب خوردگی در کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی، خوردگی حفره‌ای می‌باشد. در اثر هیدرولیز کاتیون، غلظت یون‌های Al^{3+} و هیدروژن در داخل حفره افزایش یافته و باعث کاهش pH در حفره می‌شود و طبق نمودار پوربه، ماده به خارج از ناحیه حفاظت برده می‌شود [۱۷-۱۸].

آلومینیوم خالص تجاری و آلیاژهای آن به دلیل تشکیل فیلم اکسیدی متراکم روی سطح، مقاومت به خوردگی حفره‌ای 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 می‌باشد و در مورد وجود ترک‌های بسیار ریز در فیلم پسیو که محل مناسبی برای پیدایش حفره می‌باشند تقریباً تمامی محققان اتفاق نظر دارند [۱۷ و ۱۹]. با این حال مقالات کمی در زمینه رفتار خوردگی آلومینیوم خالص تجاری پس از عملیات اتصال نورد تجمعی وجود دارد. در این تحقیق رفتار خوردگی کامپوزیت $Al-nanoZrO_2$ تولید شده به روش اتصال نورد تجمعی در محلول کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی در دمای اتاق مورد بررسی قرار گرفت.

به طور کلی به مواد با ریزساختار بین ۱-۱۰۰ nm، نانو مواد می‌گویند. روش‌های مختلفی جهت تولید مواد با ساختار نانو وجود دارد. یکی از این روش‌ها، تغییر شکل‌های پلاستیک بسیار شدید (SPD) می‌باشد. اگر چه اندازه دانه‌های مواد تولید شده با استفاده از روش‌های SPD بین ۱۰۰-۱۰۰۰ nm می‌باشد، ولی شامل ریزدانه‌ها و سلول‌های نابجایی با اندازه کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر هستند، بنابراین آنها را مواد با ساختار نانو می‌نامند [۲-۳].

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

روش اتصال نورد تجمعی اساساً شامل اعمال تکرار روش نورد معمولی می‌باشد. ابتدا این روش برای آلیاژهای آلومینیوم به کار برده شد و ورق‌های فوق ریزدانه با اندازه چند صد نانومتر به طور موفقیت آمیز تولید شد [۴]. فرایند اتصال نورد تجمعی نسبت به سایر روش‌های تغییر فرم پلاستیک شدید دارای چندین مزیت می‌باشد از جمله: نیاز به دستگاه‌های با ظرفیت بالای اعمال نیرو و گران قیمت ندارد، همچنین بهره‌وری بالا و قابلیت تولید بدون محدودیت دارد. به دلیل توانایی‌ها و این که نورد تجمعی یک فرایند پیوسته برای تولید نانو کریستال‌ها و ورق‌های فوق ریز دانه پر کاربرد در صنعت می‌باشند، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۵]. البته لازم به ذکر است که فرایند اتصال نورد تجمعی باعث کاهش شدید انعطاف پذیری در نمونه می‌شود.

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

۲- مواد و انجام روش تحقیق

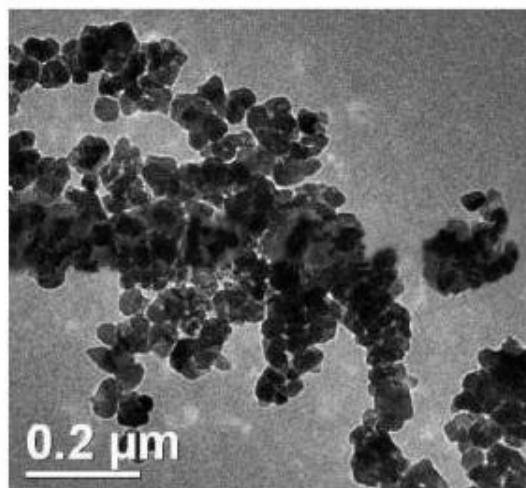
شرکت Merck مورد استفاده قرار گرفت. تصاویر مربوط به آنالیز TEM نانو ذرات ZrO₂ در شکل ۱ آورده شده است.

در این تحقیق آلیاژ ۱۰۵۰ آلومینیوم با ترکیب شیمیایی مطابق با جدول ۱ و ذرات ZrO₂ با اندازه دانه ۴۰-۶۰ nm مربوط به

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	۰/۰۴۳	۰/۱	۹۹/۳۴

سازی شده و نورد هم زمان لایه های آماده سازی شده می باشد. میزان پودر مورد استفاده جهت ساخت نانوکامپوزیت، 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]. با توجه به عدم توانایی یکسان آلومینیم و زیرکونیا جهت تغییر شکل در حین نورد، با افزایش تعداد پاس های نورد و زیاد شدن لایه های آلومینیم، پودر زیرکونیا به صورت همگن تری در ساختار پخش شده است. ذرات پودر به عنوان مانعی برای حرکت نابجایی ها عمل کرده و باعث افزایش چگالی نابجایی ها در ساختار به بیش از حالت طبیعی شده و سختی را افزایش می دهند. هدف از اضافه کردن ذرات ZrO₂، افزایش سختی و تولید مناطق پراثری بیشتر در کامپوزیت و همچنین اثر آن بر روی رفتار خوردگی بوده است. شماتیک این روش در شکل ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که طی فرآیند نورد و ایجاد کرنش پلاستیکی شدید، ذرات زیرکونیا توزیع شده در بین ماتریکس تحت نیروی بسیار بالایی قرار می گیرد که این امر منجر به شکسته شدن ذرات آگلومره شده می گردد و همچنین با افزایش تعداد پاس نورد و افزایش کرنش، از میزان ذرات آگلومره به شدت کاسته شده و توزیع یکنواخت تری از ذرات زیرکونیا را در ماتریکس مشاهده گردید.



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

جهت انجام فرایند نورد تجمعی، نمونه ها با ابعاد ۱*۴۰*۲۵۰ تهیه و در دمای ۳۵۰°C به مدت ۶۰ دقیقه آویل 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 ها کمتر از ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. مرحله دوم، توزیع یکنواخت پودر ZrO₂ در بین لایه های آماده

پتانسیودینامیک و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی با نرخ روبش 1 mV/s انجام گرفت.

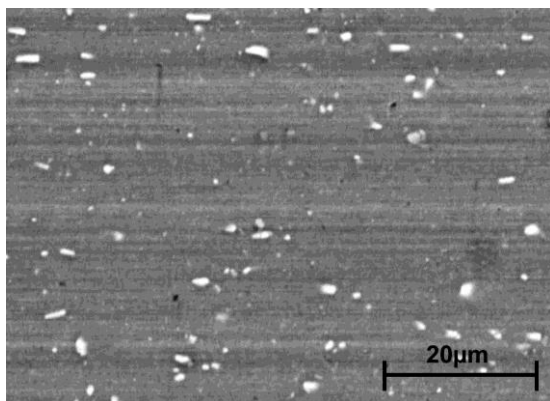
جهت بررسی خوردگی حفره ای کامپوزیت تولید شده، ابتدا نمونه های مورد نظر را به مدت ۱۶۸ ساعت در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم غوطه ور، سپس سطح نمونه ها را با آب دیونیزه و استون تمیز کرده و توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار داده شد.

متاسفانه یکی از مشکلات اصلی روش ARB، آگلومره شدن ذرات در حین نورد می باشد و با استفاده از روش های معمول پراکندگی ذرات (Dispersion) نمی توان ذرات را بر روی سطح ماتریکس توزیع نمود زیرا محلول disperse باعث کاهش چسبندگی و اتصال در حین فرآیند نورد می گردد. اما با افزایش تعداد پاس های نورد و توزیع یکنواخت ذرات در مرحله اول، می توان تا حد زیادی آگلومره شدن ذرات را از بین برد [۲۱].

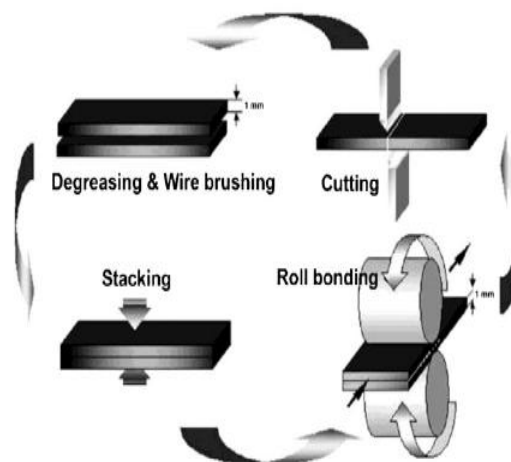
جهت حصول اطمینان از توزیع یکنواخت ذرات زیرکونیا در ماتریکس آلومینیوم با افزایش پاس نورد، تصاویر SEM از تمامی پاس های نورد تهیه گردید.

۳- نتایج و بحث

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.



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

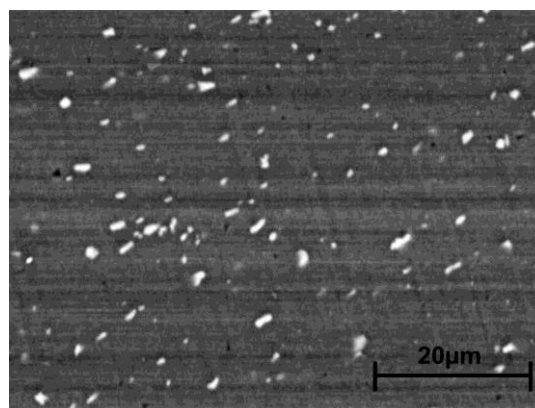


شکل (۲): نمایی شماتیک از فرآیند اتصال نورد تجمعی

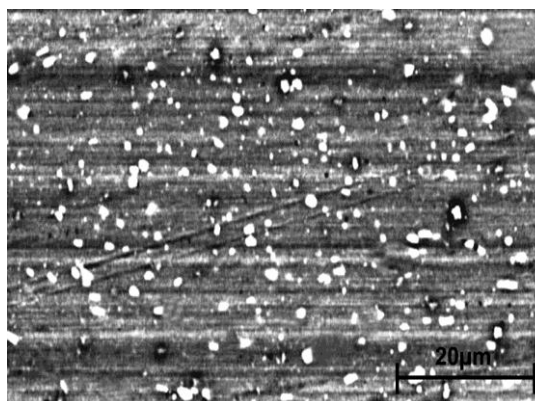
شایان ذکر است که بعد از اتمام ۵ مرحله نورد تجمعی، هیچگونه کار مکانیکی اضافی بر روی نمونه صورت نگرفته است و تنها کار مکانیکی صورت گرفته در حین فرآیند نورد (فرآیند اتصال نورد تجمعی) بوده است.

پاس های ۱ و ۳ و ۵ نانو کامپوزیت مورد آزمون پلاریزاسیون سیکلی قرار گرفتند [۱۵]. برای تهیه الکتروود کاری مورد استفاده در آزمایش های الکتروشیمیایی، نمونه هایی از نانو کامپوزیت به ضخامت 1 mm و سطح مقطع $10 \times 10 \text{ mm}$ 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 [۲۰]، 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 $\mu\text{Autolab Type III}$ در محلول کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی به عنوان محیط خوردنده 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

البته شایان ذکر است که در روش اتصال نورد تجمعی نمی‌توان پودر ZrO₂ را بر روی سطح توزیع نمود و مقداری آگلومره شدن رخ می‌دهد که با افزایش تعداد پاس نورد از آگلومره شدن کاسته می‌شود. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سیکل های نورد، توزیع ذرات درون زمینه به صورت یکنواخت صورت می‌گیرد. توزیع یکنواخت ذرات در سیکل های بالاتر نورد تجمعی عاملی در جهت بهبود رفتار خوردگی نانو کامپوزیت می‌باشد [۱۸].



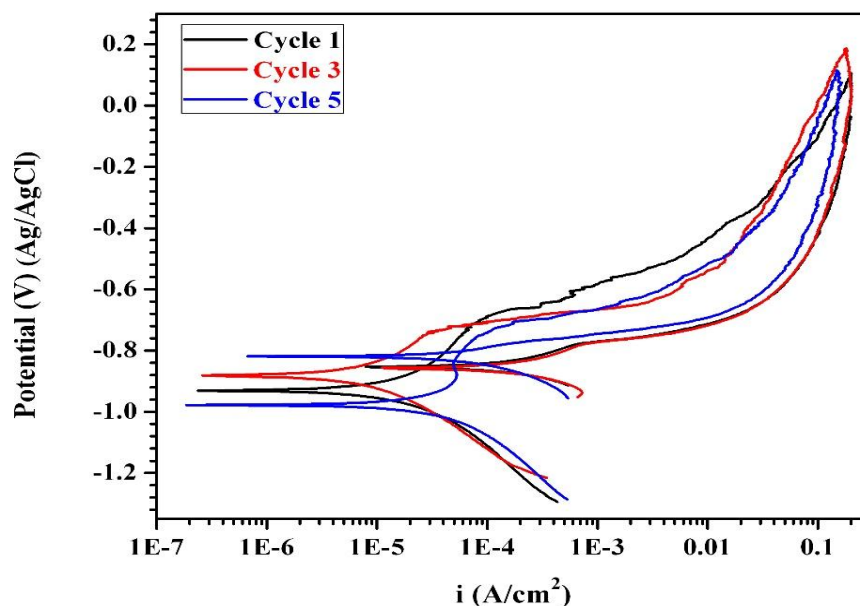
شکل (۴): تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نمونه سیکل ۳ نانو کامپوزیت Al-nano ZrO₂ ساخته شده به روش اتصال نورد تجمعی



شکل (۵): تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نمونه سیکل ۵ نانو کامپوزیت Al-nano ZrO₂ ساخته شده به روش اتصال نورد تجمعی

۳-۱- بررسی پلاریزاسیون سیکلی

نمودار های پلاریزاسیون سیکلی 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 سیکلی ۳ نمونه از سیکل های مختلف نانو کامپوزیت Al-nano ZrO₂ ساخته شده به روش اتصال نورد تجمعی

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

نورد جمعی

نمونه	E _b (V)	E _{rp} (V)	E _b -E _{rp} (V)
سیکل ۱	-۰/۶۶۲	-۰/۸۵۳	۰/۱۹۱
سیکل ۳	-۰/۷۲۱	-۰/۸۵۷	۰/۱۳۶
سیکل ۵	-۰/۶۷۵	-۰/۸۰۲	۰/۱۲۷

میزان مناطق فعال سطحی (مرزدانه ها) لایه پسیو راحت تر و متراکم تری تشکیل خواهد شد. همچنین توزیع یکنواخت ذرات ZrO₂ با افزایش تعداد پاس های نورد، باعث ایجاد مناطق مناسب جهت جوانه زنی و رشد لایه پسیو می شود و در نتیجه لایه پسیو متراکم تری تشکیل خواهد گردید.

۳-۲- بررسی تصاویر SEM حفره دار شدن

تصاویر مربوط به حفره دار شدن در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش تعداد سیکل های نورد، اندازه حفره های تشکیل شده کاهش یافته و همچنین توزیع حفره ها بر روی سطح نمونه ها افزایش یافته که این امر نشان دهنده افزایش مقاومت به خوردگی نمونه با افزایش تعداد پاس نورد و همچنین تشکیل مجدد راحت تر لایه پسیو می باشد.

۴- نتیجه گیری

همانگونه که مشاهده گردید، استفاده از نانو کامپوزیت Al-nanoZrO₂ تولید شده به روش اتصال نورد جمعی علاوه بر خواص خوب مکانیکی، خواص دیگری هم در زمینه خوردگی دارد که به صورت خلاصه بیان می شود.

۱- با افزایش تعداد سیکل های نورد در فرآیند اتصال نورد جمعی، 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.

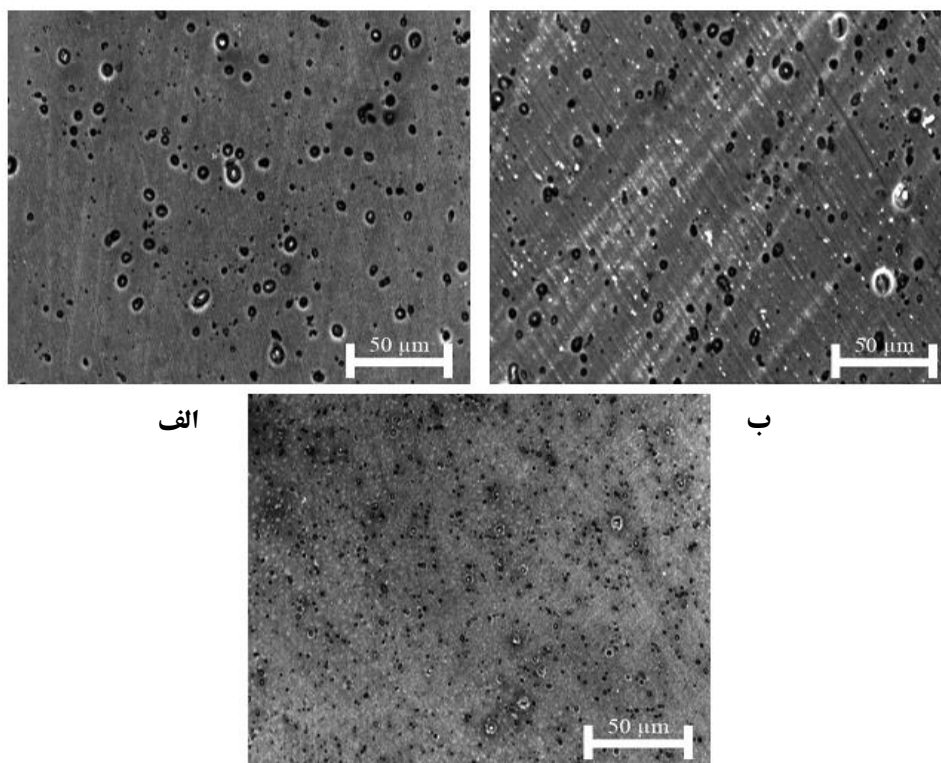
۲- با افزایش تعداد سیکل های نورد جمعی، مقادیر E_b منفی تر می شود که نشان دهنده کاهش مقاومت به خوردگی حفره ای می باشد.

همانگونه که ملاحظه می شود تمام منحنی ها دارای هیستریزس مثبت هستند، بنابراین در نانو کامپوزیت پدیده حفره دار شدن رخ خواهد داد.

E_b بیانگر مقاومت به تشکیل حفره و E_{rp} بیانگر پتانسیل تشکیل مجدد لایه پسیو می باشد. مشاهده می شود که با افزایش سیکل نورد، E_b به سمت مقادیر منفی تر حرکت می کند که نشان دهنده کاهش مقاومت در برابر حفره دار شدن است. این امر به دلیل افزایش مناطق مستعد به ایجاد حفره (مرزدانه ها) و به تبع آن افزایش تعداد حفره ها در اثر کاهش اندازه دانه در طی افزایش سیکل نورد جمعی می باشد. البته نکته قابل توجه این است که اندازه حفره ها، با افزایش تعداد سیکل های نورد کاهش یافته و توزیع آنها به صورت یکنواخت تری بر روی سطح صورت گرفته است. افزایش تعداد سیکل های نورد باعث شده تا مقادیر E_{rp} به سمت پتانسیل های مثبت تر تغییر یابد. از سوی دیگر هر چه اندازه لوپ هیستریزس (E_b-E_{rp}) کوچکتر باشد، لایه پسیو مجدد راحت تر تشکیل می شود. مشاهده می شود با افزایش سیکل نورد، E_b-E_{rp} کاهش می یابد که نشان می دهد لایه پسیو مجدد، راحت تر تشکیل می گردد. با توجه به مقادیر E_b-E_{rp} می توان نتیجه گرفت که با کاهش اندازه دانه نانو کامپوزیت در اثر فرایند نورد، لایه پسیو پس از تخریب شدن، راحت تر دوباره تشکیل می شود. همانطور که می دانیم هر چه میزان مناطق فعال در سطح فلزات پسیو شونده بیشتر باشد، لایه پسیو راحت تر تشکیل شده و یکنواخت تر خواهد بود. پس می توان نتیجه گرفت که کاهش اندازه دانه در نمونه های نانو کامپوزیت باعث افزایش دانسیته سطحی مرزدانه ها شده و به تبع آن با افزایش

و در نتیجه مقاومت به خوردگی کامپوزیت افزایش می‌یابد.

۳- با افزایش تعداد سیکل های نورد، مقادیر E_b-E_{rp} کاهش می‌یابد که نشان دهنده تشکیل مجدد راحت تر لایه پسیو می‌باشد



شکل (۷): حفره دار شدن نانو کامپوزیت در محیط ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم: (الف): پاس ۱، (ب): پاس ۳ و (ج): پاس ۵

Science and Engineering, Vol. 441A, 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", 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, Vol. 528A, 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, Vol. 423A, pp. 331-342, 2006.

۵- مراجع

- [1] J. W. Kaczmar, K. Pietrzak & W. Wlosinski, "The production and application of metal matrix composite materials", J. Mater. Process. Technol, Vol. 106, pp.58-67, 2000.
- [2] Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai & R. G. Hong, "ultra-fine grained bulk aluminium 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 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, Overview of processing, microstructure and mechanical properties of ultrafine grained bcsteels", Materials

- alloys”, *Materials Science and Engineering*, Vol. 366A, pp. 282-291, 2004.
- [15] M. FadaeiNaeini, 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*, Vol. 454-455A, pp. 536-541, 2007.
- [17] E. McCafferty, “Sequence of steps in the pitting of aluminum by chloride ions”, *Corrosion Science*, Vol. 45, pp. 1421-1438, 2003.
- [18] 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.
- [19] Woo-Jin. Lee & Su-II. Pyun, “Effects of sulphateionadditives on the pitting corrosion of pure aluminum in 0.01 M NaCl solution”, *Electrochimica Acta*, Vol. 45, pp. 1901-1910, 2000.
- [20] Annual book of ASTM standard, “standard practice for preparing”, cleaning and evaluation corrosion test specimens. Vol. 03. 02, 2002.
- [21] Ch. W. Schmidt, C. Knieke, V. Maier, H. Werner Hoppel, W. Peukret & M. Goken, “Accelerated grain refinement during accumulative roll bonding by nano particle reinforcement”, *Scripta Materialia*, Vol. 64, pp. 245-248, 2011.
- [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 rollbonding”, *Materials Science and Engineering*, Vol. 527A, 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*, Vol. 480A, 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*, Vol. 492A, pp. 110-117, 2008.
- [11] N. Tsuji, Y. Ito, Y. Saito & Y. Minamino, “Strength and ductility of ultrafine grainedaluminum and iron produced by ARB and annealing”, *ScriptaMaterialia*, Vol. 47, pp. 893-899, 2002.
- [12] B. L. Li, N. Tsuji & N. Kamikawa, “Microstructure homogeneity in various metallicmaterials heavily deformed by accumulative roll-bonding”, *Materials Science and Engineering*, Vol. 423A, pp. 331-342, 2006.
- [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 MetalsSociety 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 ECAPpass time on the electrochemical properties of 1050 Al