

ارزیابی خوردگی حفره‌ای آلیاژ نانو ساختار آلومینیم AA5052 تولید شده به روش اتصال نوردی تجمعی (ARB) در محیط کلریدی

مهدی فدایی نایینی*، محمد حسین شریعت، حسن فتاحی و مهدی ایزدجو

دانشگاه شیراز/دانشکده مهندسی بخش مهندسی مواد

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۸/۳/۲۱، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۸۸/۷/۲۱، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۸۸/۸/۲۸

چکیده اتصال نوردی (ARB) تجمعی یکی از روش‌های نوین شکل‌دهی پلاستیک شدید است که در سال‌های اخیر توسعه یافته و برای تولید ساختارهای نانوکریستالی فلزات مختلف استفاده می‌شود. در این مقاله، قبل از انجام فرایند فوق تا ۵ مرحله، ابتدا ورق‌های اولیه (As-received) از جنس آلیاژ آلومینیوم AA5052 تحت عملیات حرارتی آنیل کامل قرار گرفتند. رفتار خوردگی حفره‌ای این آلیاژ در محلول کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی قبل و بعد از فرایند اتصال نوردی تجمعی بررسی شد. پتانسیل مدار باز (OCP) الکترودها ثبت شد و آزمایش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و ولتامتری سیکلی انجام گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که پتانسیل‌های گسیختگی و غیرفعال‌شدن مجدد لایه اکسیدی (به ترتیب E_{bd} و E_{rp}) نمونه‌های آنیل شده در مقایسه با نمونه‌های اولیه، بسیار بالاتر بودند که مشخص می‌کند مقاومت به خوردگی حفره‌ای بر اثر عملیات حرارتی آنیل بهبود یافته است. از سوی دیگر، فرایند اتصال نوردی تجمعی اثر مخربی روی مقاومت به خوردگی حفره‌ای نمونه‌ها داشته و مقادیر E_{bd} و E_{rp} پس از هر مرحله نورد، اندکی به سمت پتانسیل‌های منفی‌تر انتقال می‌یابد. با وجود این، این مقادیر هنوز بالاتر از مقدار به دست آمده برای نمونه اولیه قبل از آنیل بودند. مشاهدات میکروسکپ نوری و میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح نمونه‌ها پس از گذشت ۳ هفته از آزمایش غوطه‌وری در محیط خوردنده، نتایج به دست آمده از آزمایش‌های الکتروشیمیایی را تأیید کرد.

کلمات کلیدی آلیاژ آلومینیم AA5052، نانو ساختار، اتصال نوردی تجمعی، پلاریزاسیون، خوردگی حفره‌ای.

Pitting corrosion of nanostructure AA5052 aluminum alloy fabricated by Accumulative Roll-Bonding in chloride media

Mehdi Fadaei Naeini*, Mohammad Hossain Shariat, Hassan Fattahi, Mehdi Eizadjou

Department of Materials Science and Engineering, Shiraz University

Abstract Accumulative Roll-Bonding (ARB) is one of the novel Severe Plastic Deformation (SPD) techniques that was developed in recent years and successfully applied to introduce a nanocrystalline structure in various metals. In this paper, as-received sheets of 5052 aluminum alloy were initially annealed before conducting ARB process up to five passes. Pitting corrosion behavior of AA5052 in 3.5%wt NaCl solution was investigated before and after ARB process. Open Circuit Potential (OCP) of electrodes was recorded and Potentiodynamic Polarization (PP) and Cyclic Voltammetry (CV) tests were carried out. It is found that, in comparison with as-received specimens, breakdown and repassivation potentials (E_{bd} and E_{rp} , respectively) of annealed specimens were significantly higher which indicated that pitting corrosion resistance was enhanced due to anneal heat treatment. On the other hand, ARB process had a destructive effect on the pitting corrosion resistance of specimens and E_{bd} and E_{rp} values shifted slightly toward negative direction after each pass. However, these values were still above that obtained for as-received condition. SEM and OM microscopy observations of sample surfaces after 3 weeks immersion test confirmed the electrochemical examination results.

Keywords AA5052 Aluminum Alloy, Accumulative Roll-Bonding (ARB), Polarization, Pitting Corrosion.

*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی، بخش مهندسی مواد

پیام‌نگار: fadaei-naeini@yahoo.com

۱- مقدمه

شدید بهبود چشمگیری از خود نشان دهند. در ضمن خواص مکانیکی بهتری هم از آنها شاهد خواهیم بود [۵].

در مطالعه و بررسی ماهیت الکتروشیمیایی لایه‌های اکسیدی، پتانسیلی که در آن دانسیته جریان تبادل به شدت افزایش می‌یابد، پتانسیل شکست لایه اکسیدی^۳ نامیده می‌شود که در آن تخریب موضعی لایه اکسیدی محافظ بر اثر نفوذ یون‌های Cl^- و جوانه‌زنی حفره‌ها آغاز می‌گردد [۶]. این پتانسیل، به عنوان معیاری برای بررسی مقاومت به خوردگی حفره‌ای به کار می‌رود. بدین صورت که هر چه این پتانسیل بالاتر باشد، مقاومت به حفره‌دار شدن فلز یا آلیاژ بهتر است [۷].

اگرچه تاکنون ریزساختار و خواص مکانیکی آلومینیوم و آلیاژهای آن، تولید شده به روش اتصال نورد تجمعی، مورد تحقیق قرار گرفته‌اند ولی تحقیقات بسیار کمی درباره چگونگی رفتار و خصوصیات خوردگی آلیاژهای بسیار ریزدانه آلومینیوم شکل‌دهی شده با این تکنیک به عمل آمده است. در تحقیق حاضر رفتار خوردگی آلیاژ آلومینیوم (AA5052 (Al-2.5%Mg پس از فرایند اتصال نوردی تجمعی طی ۵ مرحله نورد در دمای اتاق مطالعه شده است.

۲- نحوه انجام آزمایش

در تحقیق حاضر از آلیاژ آلومینیوم H18-5052-آنیل شده با ابعاد ۱ میلی‌متر ضخامت، ۳۰ میلی‌متر عرض و ۲۵۰ میلی‌متر طول، و ترکیب شیمیایی ارایه جدول ۱ شده است.

۱-۲- فرآیند اتصال نوردی تجمعی

فرآیند اتصال نوردی تجمعی ورق‌های آلومینیومی، شامل دو مرحله است. مرحله اول، فرآیند آماده‌سازی سطحی است که شامل چربی‌زدایی سطوح اتصال بین ورق‌های دولایه با

یکی از روش‌های تولید مواد نانوساختار با اعمال تغییر شکل‌های شدید، روش اتصال نوردی تجمعی (ARB)^۱ است. این فرآیند را اولین بار در اواخر دهه ۹۰ Tsuji و همکارانش [۱]، به منظور تغییر شکل‌های پلاستیک شدید بر روی ورق‌های فلزی پیشنهاد و توسعه دادند. به‌طور کلی روش فوق نسبت به روش‌های دیگر شکل‌دهی پلاستیک شدید به واسطه سادگی روش (به‌کارگیری فرآیند ساده نورد) و امکان تولید مواد با ابعاد بزرگ مانند ورق‌ها و تسمه‌ها، کاربرد گسترده‌ای در صنعت پیدا کرده‌اند. با این حال تاکنون به رفتار خوردگی بالک مواد بسیار ریز دانه توجه کمی شده است [۱].

معمولاً مواد نانوکریستالی به دلیل وجود دانسیته بالای عیوب و سطح بیشتر، مقاومت به خوردگی پایین‌تری نسبت به مواد دانه درشت‌تر همتای خود دارند. آلیاژهای نانوکریستالی Fe-Ni/Al در اسید نسبتاً ضعیف مقاومت به خوردگی بالایی را از خود نشان می‌دهند؛ در صورتی که در اسیدهای نسبتاً قوی رفتاری متفاوتی دارند [۲]. آزمایشات دیگر نیز نشان می‌دهند که مقاومت به خوردگی نیکل خالص نانوکریستالی تغییری نمی‌کند، در حالی که آلیاژهای Ni-P در حالت نانوکریستالی، مقاومت به خوردگی پایین‌تری را نشان داده‌اند [۲،۳].

در حال حاضر، نظر مشخصی در مورد این که مواد نانوکریستالی مقاومت به خوردگی بالاتری در مقایسه با مواد پلی‌کریستالی همتای خود دارند، وجود ندارد. علاوه بر این، مقاومت به خوردگی مواد نانوکریستالی به نوع سیستم آلیاژی و محیط خوردنده هم بستگی دارد. به‌طور مشابه مقاومت به خوردگی آلیاژ بسیار ریزدانه AA1050 با افزایش تعداد سیکل‌های روش فشار زاویه‌ای با کانال‌های برابر^۲ بهبود یافت [۲،۴]. بنابراین می‌توان انتظار داشت که مقاومت به خوردگی بالک فلزات نانوساختار تحت فرایندهای شکل‌دهی پلاستیک

1. Accumulative Roll-Bonding.
2. Equal Channel Angular Pressing.
3. Break Down Potential.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ به دست آمده از روش اسپکترومتری نشری.

Alloying Element	Mg	Fe	Cr	Si	Ti	Mn	Cu	Zn	Ni	Al
Wt. %	2.48	0.26	0.18	0.085	0.028	0.008	0.004	0.004	0.002	Base

مدل Philips FEG در ولتاژ کاری ۲۰۰kV صورت پذیرفت. نمونه‌های استاندارد و بسیار نازک میکروسکوپ الکترونی عبوری به قطر ۳ میلیمتر موازی با صفحه نورد محلول حاوی ۴۰۰ میلی لیتر HNO_3 و ۸۰۰ میلی لیتر CH_3OH ، الکتروجت پولیش شدند، به صورتی که مکان مشاهده شده $400\ \mu\text{m}$ زیر سطح بوده است.

۲-۳. آزمایش های خوردگی

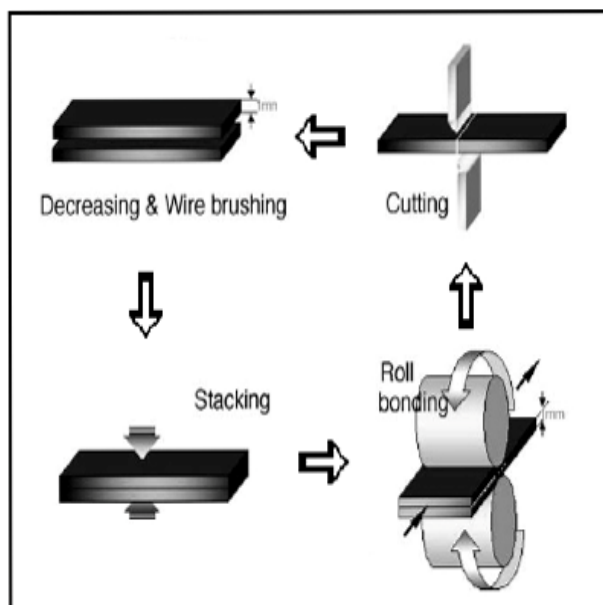
برای تهیه الکتروود کاری مورد استفاده در آزمایش‌های

استون و خشک شدن آنها در هوا و سپس برس کاری سطوح چربی زدایی شده با برس‌های دایره‌ای است. این برس‌ها از جنس فولاد با قطر ۹۰ میلیمتر، دارای سیم‌های فولادی به قطر ۰/۳۵ میلیمتر و طول ۲۲ میلیمتر است. شایان ذکر است که زمان بین فرآیند آماده‌سازی سطحی و فرآیند نورد برای جلوگیری و اجتناب از ایجاد لایه‌های اکسیدی مجدد بر روی سطوح ورق‌ها کمتر از ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. مرحله دوم، نورد هم‌زمان لایه‌های آماده‌سازی شده می‌باشد. فرآیند فوق با استفاده از یک دستگاه نورد با غلطک‌هایی به قطر ۱۷۰ میلیمتر و سرعت نورد ۵ دور بر دقیقه انجام گرفته است. مراحل فوق برای اعمال کرنش پلاستیک شدید و دستیابی به ساختار فوق ریز و نانو طی ۵ مرحله در دمای محیط تکرار خواهد شد. مراحل این فرآیند در شکل ۱ نشان داده شده است.

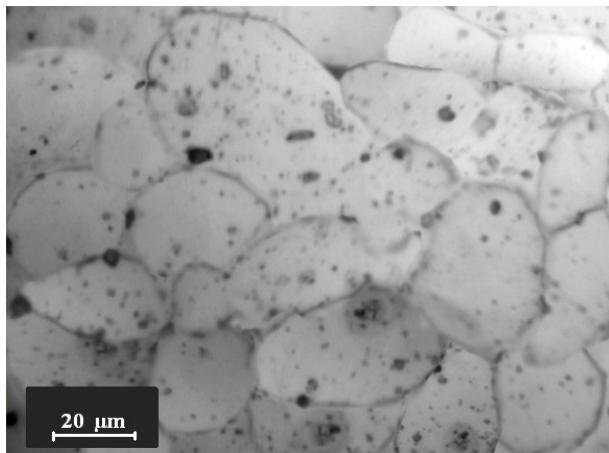
نمونه‌ها پیش از فرآیند اتصال نوردی، در دمای 550°C به مدت ۳ ساعت تحت عملیات حرارتی آنیل قرار گرفتند.

۲-۲. بررسی ریزساختار

به منظور بررسی ساختار ورق‌های آلومینیومی اولیه آنیل شده از میکروسکوپ نوری مدل Stereo Scan استفاده شده است. بدین منظور نمونه‌ها در محلول حاوی ۸۰۰ میلی لیتر اتانول، ۱۴۰ میلی لیتر H_2O و ۶۰ میلی لیتر HClO_4 اچ الکتریکی شدند. ارزیابی ریزساختار مواد اتصال نوردی شده در مراحل مختلف فرآیند، توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)



شکل ۱. نمایی شماتیک از فرآیند اتصال نوردی تجمعی [۸].



شکل ۲. تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ آنیل شده پس از اج الکتریکی.

همان گونه که در شکل ۲ ملاحظه می شود نمونه اولیه دارای یک ریزساختار تبلور مجدد یافته با اندازه دانه متوسط ۳۳ میکرون می باشد.

شکل ۳ تصویر TEM و الگوی پراش انتخابی^۴ آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ را بعد از ۵ مرحله فرآیند اتصال نوردی تجمعی نشان می دهد. دانه های فوق ریز با ابعاد زیر میکرون در نواحی مختلفی از نمونه مشاهده می شوند. در این نمونه، الگوی تفرقی با افزایش کرنش یا به عبارت دیگر افزایش مراحل فرآیند اتصال نوردی از حالت شبکه ای واحد^۵ خارج شده و یک الگوی تفرقی پراکنده را نشان می دهد. همچنین با توجه به توزیع نقاط تفرق به صورت حلقه، افزایش مرزهای با زاویه کج بالا را هم تأیید می کند [۱۱]. بعد از ۵ مرحله فرآیند اتصال نوردی تجمعی، ریزساختار شامل دانه های فوق ریز و به صورت یکنواخت دیده می شود. تصاویر بیانگر شکستن و ریز شدن دانه هاست. اندازه متوسط دانه ها یا زیردانه های محاسبه شده از تصاویر TEM در این مرحله کمتر از ۲۰۰ nm در صفحه نوردی می باشد.

الکتروشیمیایی، دیسک هایی از ورق آلومینیوم به ضخامت ۱ mm و سطح مقطع 1 cm^2 ماشین کاری شدند. قبل از هر آزمایش، نمونه ها طبق استاندارد ASTM G1-90 [۹]، با سمباده از جنس SiC و مش های به ترتیب ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ به صورت مکانیکی پولیش تر شدند و پس از شستشو با آب و مواد شوینده، با استون چربی زدایی شدند. آزمایش های خوردگی با دستگاه پتانسیواستات مدل $\mu\text{Autolab type III}$ ساخت شرکت Ecochemie 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] اندازه گیری و از یک میله پلاتینی به عنوان الکتروود کمکی استفاده شد. پتانسیل مدار باز (OCP) نمونه ها پس از گذشت ۱۲ ساعت زمان تعادل، به مدت ۱۰۰ ثانیه اندازه گیری شده و آزمایش های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک (PP) و ولتامتری سیکلی (CV) با نرخ روبش 5 mV/s انجام گرفت. برای آزمایش غوطه وری، نمونه ها طبق استاندارد ASTM G31-72 [۱۰]، به مدت ۳ هفته در محیط خورنده با دمای محیط قرار گرفتند. سطح نمونه ها جهت بررسی مورفولوژی حفره ها، پس از انجام آزمایش ولتامتری سیکلی، با میکروسکوپ نوری مدل Stereo Scan و پس از تست غوطه وری به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مطالعه و بررسی شدند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریزساختار

به منظور حصول یک اطلاعات مرجع، ساختار ورق های آنیل شده اولیه با میکروسکوپ نوری (شکل ۲) بررسی شد.

4. Selected Area Diffraction (SAD).
5. Single Net Pattern.

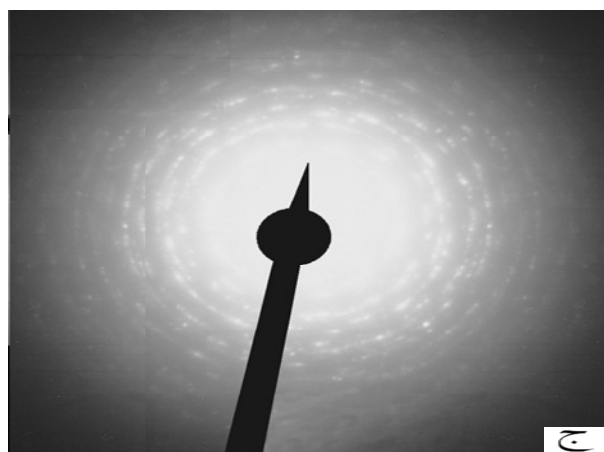
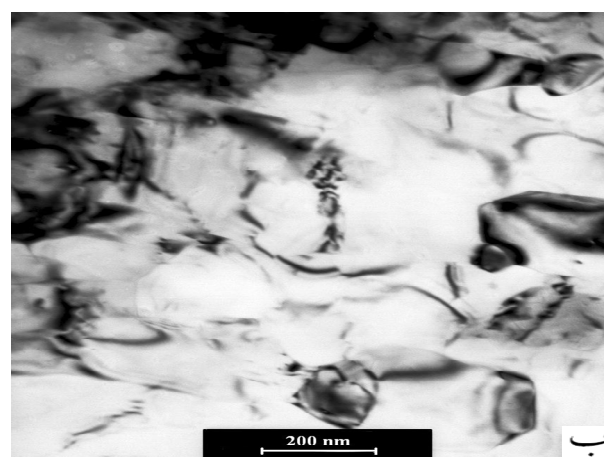
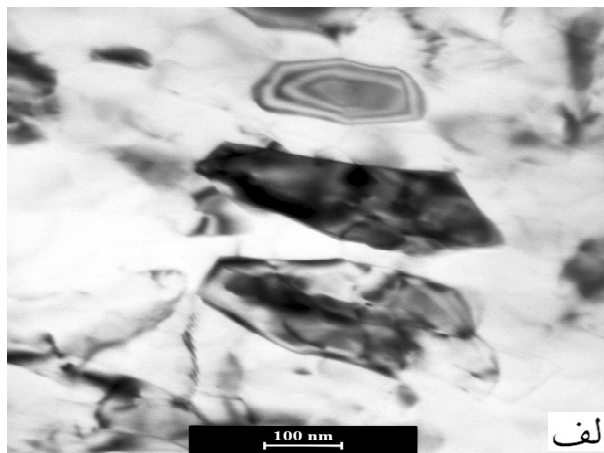
۲-۳- آزمایش‌های الکتروشیمیایی

۲-۳-۱- آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک (PP)

شکل ۴-الف) منحنی‌های‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای نمونه‌های اولیه آنیل شده را پس از ۱۲ ساعت غوطه‌وری در محلول NaCl ۳/۵٪ نشان می‌دهد. همان‌طور که از منحنی‌ها نیز مشخص است، شاخه کاتدی، شاخه آندی پلاریزاسیون را در ناحیه پسیو قطع کرده است که بیان‌گر تشکیل لایه اکسیدی محافظ روی آلیاژ در این محیط است [۱۲]. همان‌گونه که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود پتانسیل شکست لایه اکسیدی بر اثر اعمال عملیات آنیل به طور چشمگیری (در حدود 100 mV) افزایش یافته که نشانگر بهبود خواص خوردگی حفره‌ای نمونه آنیل است. شکل ۴-ب) همین منحنی‌ها را برای نمونه‌های آنیل شده، مرحله ۳ و مرحله ۵ نشان می‌دهد. اثر منفی فرایند اتصال نوردی تجمعی بر روی مقاومت به خوردگی حفره‌ای نمونه‌ها کاملاً مشخص است به طوری که با افزایش مراحل فرایند، پتانسیل شکست لایه اکسیدی به تدریج کم می‌شود. با وجود این، E_{bd} پس از اعمال مرحله ۵ فرایند اتصال نوردی هنوز از حالت اولیه بالاتر است. این موضوع در شکل ۴-ج) نشان داده شده است.

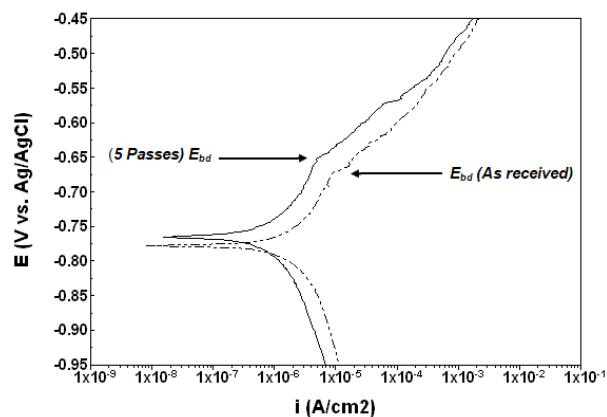
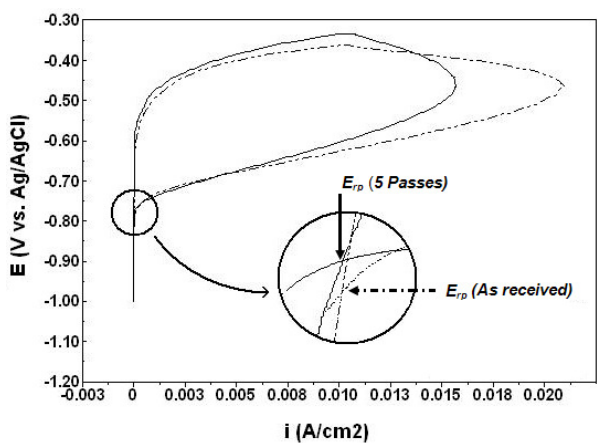
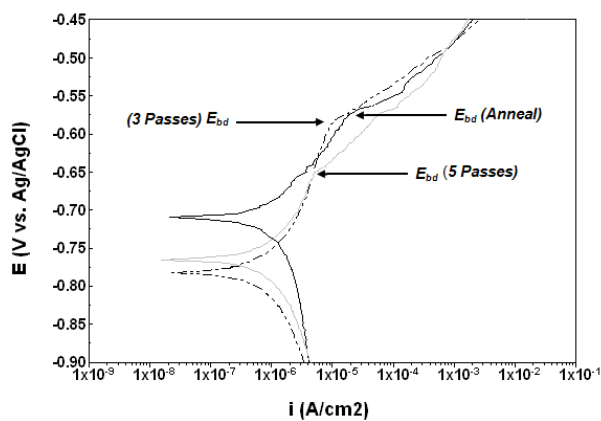
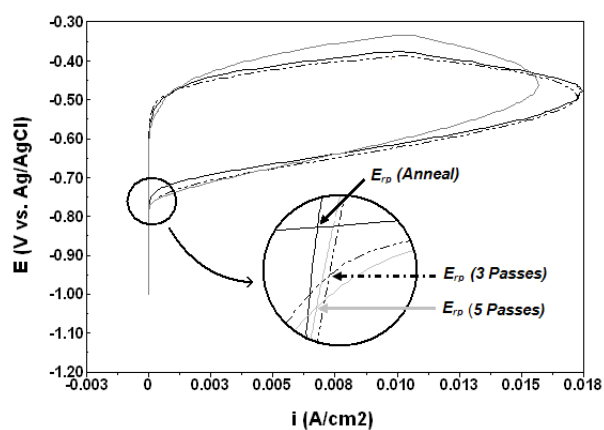
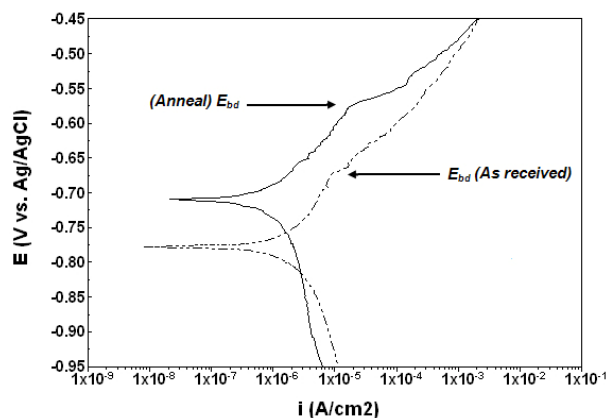
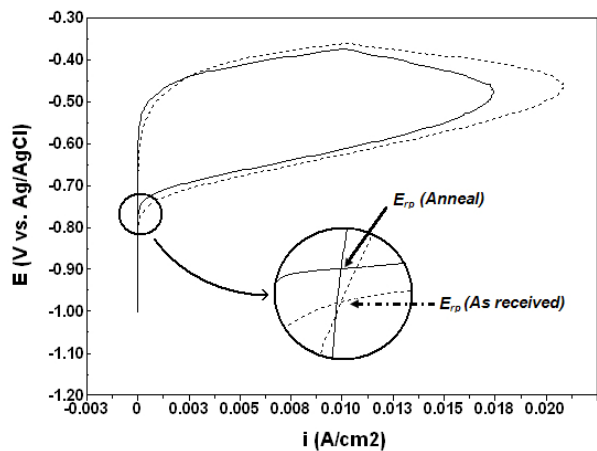
۲-۳-۲- آزمایش ولتامتری سیکلی (CV)

منحنی‌های ولتامتری سیکلی برای آلیاژ آلومینیوم در حالت اولیه و نیز آنیل شده در شکل ۵-الف) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، پتانسیل غیرفعال‌شدن مجدداً در حالت آنیل شده بسیار (در حدود 30 mV) بالاتر از حالت اولیه است. شکل ۵-ب) همین منحنی‌ها را برای نمونه‌های آنیل شده، مرحله ۳ و مرحله ۵ فرایند نشان می‌دهد؛ به طوری که با افزایش مراحل پتانسیل غیرفعال‌شدن مجدداً



شکل ۳-الف، ب) تصویر الکترونی عبوری TEM و (ج) الگوی پراش SAD از صفحه نوردی پس از مرحله پنجم از فرایند ARB.

6. Repassivation Potential (E_{rp})



شکل ۵- منحنی‌های ولتامتری سیکلی نمونه‌های آلومینوم ۵۰۵۲ در محلول ۳/۵٪ NaCl در حالت‌های (الف) اولیه و آنیل، (ب) آنیل، ۳ و ۵ مرحله ARB شده، (ج) اولیه و ۵ مرحله ARB شده

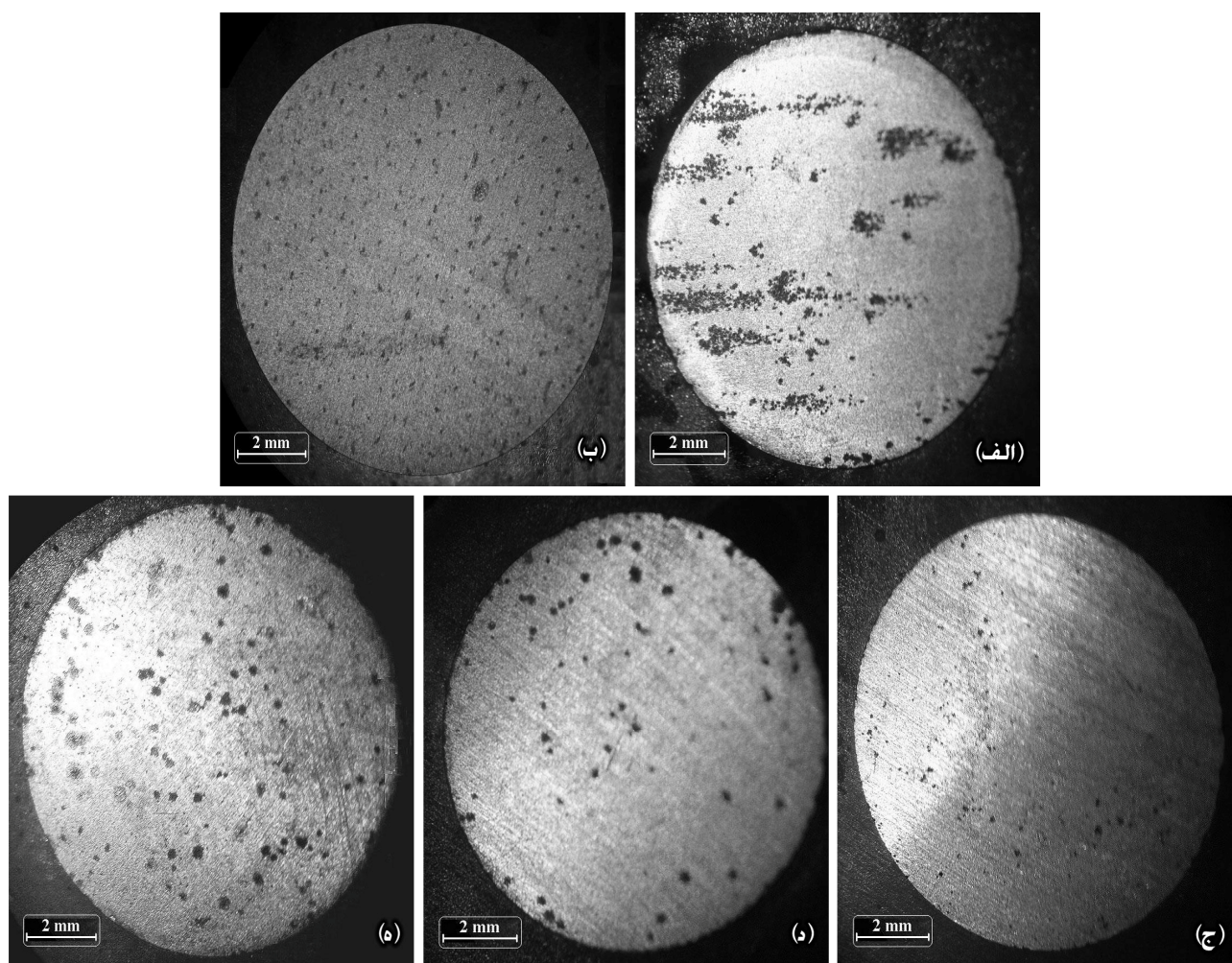
شکل ۴- منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه‌های آلومینوم ۵۰۵۲ در محلول ۳/۵٪ NaCl در حالت‌های (الف) اولیه و آنیل، (ب) آنیل، ۳ و ۵ مرحله ARB شده، (ج) اولیه و ۵ مرحله ARB شده.

پس از آزمایش‌های الکتروشیمیایی نشان می‌دهد. در نمونه اولیه شدت حفره‌دار شدن زیاد است و حفره‌ها در امتداد جهت نورد اولیه ورق کشیده شده‌اند. در مقایسه با آن، حفره‌های ایجاد شده بر روی نمونه آنیل شده، ریزتر، با عمق کمتر و توزیع کاملاً یکنواخت بر کل سطح مشاهده می‌شوند. اما مطابق انتظار، با افزایش مراحل فرایند نورد بر شدت حملات حفره‌ای افزوده شده و توزیع آنها غیر یکنواخت‌تر می‌شود.

تدریج کم شده است. اما همان‌طور که در شکل ۵- (ج) نیز آمده است، این مقدار پس از انجام آخرین مرحله هنوز از حالت اولیه اندکی بالاتر است.

۳-۲-۳- مشاهدات میکروسکوپ نوری استریو از حفره‌های ایجاد شده

شکل ۶ تصویر حفرات تشکیل شده بر سطح نمونه‌ها را

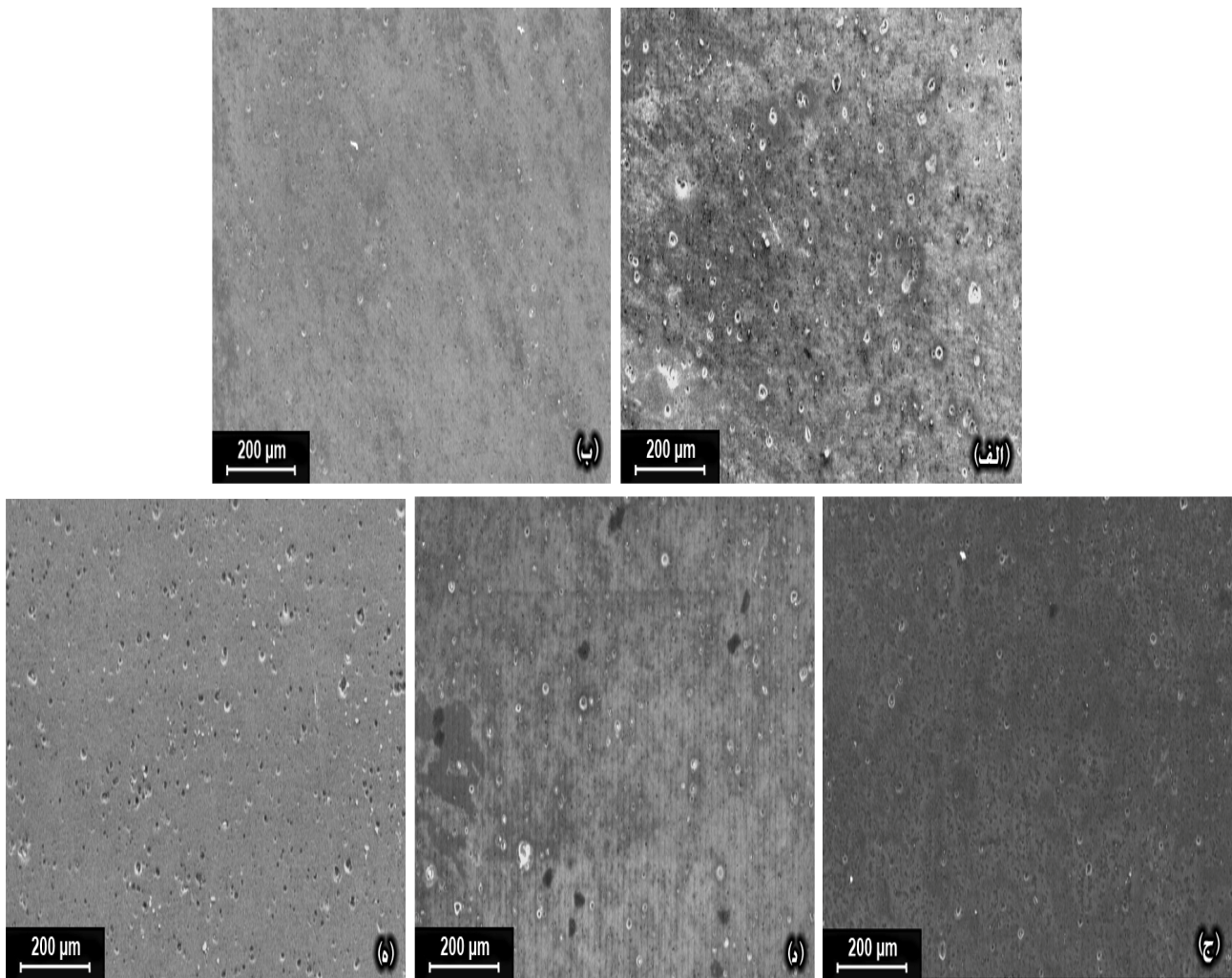


شکل ۶- تصاویر میکروسکوپ نوری استریو از حفره‌های تشکیل شده بر روی آلومینیوم ۵۰۵۲ پس از آزمایش ولتاژتری سیکلی در حالت‌های (الف) اولیه، (ب) آنیل، (ج) ۱ مرحله، (د) ۳ مرحله و (ه) ۵ مرحله ARB شده

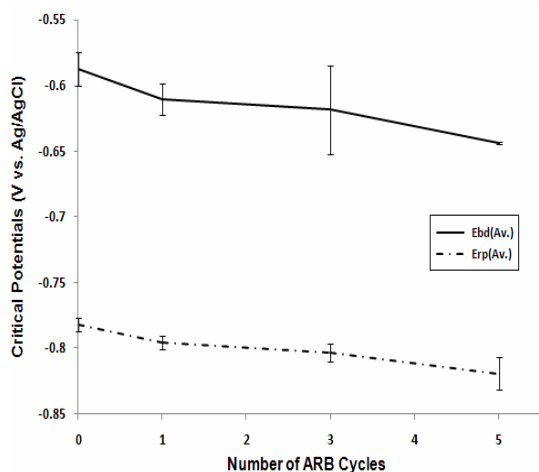
۳-۳- آزمایش غوطه‌وری

به منظور تایید نتایج آزمایش‌های الکتروشیمیایی، آزمایش غوطه‌وری نمونه‌های آلومینیوم AA5052 به مدت ۳ هفته در محلول ۳/۵٪ NaCl انجام گرفت. شکل ۷، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح این نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود،

شدت حملات خوردگی حفره‌ای در نمونه آنیل شده در مقایسه با نمونه اولیه به مراتب کمتر شده است. از سوی دیگر با اعمال مراحل فرایند اتصال نوردی تجمعی روی نمونه آنیل شده تا ۵ مرحله، به تدریج بر شدت خوردگی حفره‌ای افزوده شده است. با وجود این، بایستی توجه داشت که شدت تخریب سطح نمونه پس از آخرین مرحله فرایند هنوز از



شکل ۷- تصاویر SEM از حفره‌های تشکیل شده بر روی آلومینیوم ۵۰۵۲ پس از ۳ هفته غوطه‌وری در محیط خورنده در حالت‌های (الف) اولیه، (ب) آنیل، (ج) ۱ مرحله، (د) ۳ مرحله و (ه) ۵ مرحله ARB شده



شکل ۸. منحنی تغییرات E_{bd} و E_{rp} بر حسب تعداد مراحل ARB برای آلومینیوم ۵۰۵۲.

اتصال نوردی تجمعی از دو طریق می‌تواند بر خوردگی حفره‌ای آلیاژهای آلومینیوم موثر باشد. چنین به نظر می‌رسد که ایجاد کرنش پلاستیک شدید، افزایش دانسیته نابعی‌ها، ریز دانه شدن و در نتیجه افزایش سطح انرژی آلیاژ در حین فرایند ARB، عمده ترین عامل کاهش مقاومت به خوردگی حفره‌ای این آلیاژ باشد. از سوی دیگر اعمال کرنش برشی شدید ضمن این فرایند، سبب افزایش، ریز شدن و توزیع یکنواخت تر فازهای بین فلزی در زمینه آلیاژ می‌شود [۱۵]. در ساختار آلیاژ ۵۰۵۲ مورد استفاده در این مقاله، فازهای بین فلزی کاتدی نظیر $Al_6(Fe,Mn)$ و $Al-(Fe,Mn,Cr,Si,Cu)$ و نیز فازهای بین فلزی آندی حاوی Mg حضور دارند [۱۶]. حفره‌دار شدن با تشکیل پیل‌های گالوانیکی موضعی در فصل مشترک زمینه/فاز ثانویه آغاز می‌شود. رشد حفره‌ها در فازهای کاتدی در نواحی مجاور فاز و در فازهای آندی در داخل فاز رخ می‌دهد [۱۵]. افزایش تعداد محل‌های جوانه‌زنی حفره‌ها (فازهای بین فلزی) در حین فرایند نورد می‌تواند تا حدودی باعث بهبود شرایط

حالت اولیه تا حدودی کمتر به نظر می‌رسد.

همان‌طور که از منحنی‌های شکل‌های ۴- (الف) و ۵- (الف) و نیز مشاهدات میکروسکوپی مشخص است، اعمال یک مرحله عملیات آنیل بر روی ورق‌های اولیه قبل از انجام فرایند اتصال نوردی تجمعی، به طور چشمگیری مقاومت به خوردگی حفره‌ای را بهبود می‌بخشد. دلیل این امر بزرگ شدن اندازه دانه و کمتر شدن مرز دانه‌ها و نیز کاهش عیوب نقطه‌ای مانند جاهای خالی در داخل فیلم محافظ است. به عبارت دیگر انرژی سطحی بر اثر عملیات آنیل کاهش می‌یابد [۱۴]. بر اساس مدل عیب نقطه‌ای در بیان مکانیزم حفره‌دار شدن آلیاژهای آلومینیوم، یون‌های Cl^- با اشغال جاهای خالی آنیونی درون فیلم اکسیدی نفوذ می‌کنند. در نتیجه جاهای خالی آنیونی کاهش یافته و در عوض تعداد جاهای خالی کاتیونی زیاد می‌شود. بر اثر تجمع جاهای خالی کاتیونی در فصل مشترک فلز/اکسید، فیلم محافظ از آن محل دچار شکست و گسیختگی موضعی می‌شود [۱۳]. نتایج حاصل از روش‌های آنالیز نظیر SIMS, XPS و غیره حاکی از جذب سطحی یون Cl^- بر لایه اکسیدی است. با توجه به وجود عیوب و ناخالصی‌ها در ساختار لایه اکسیدی، انرژی جذب سطحی یون کلر از محلی به محل دیگر متفاوت است. بدین صورت که محل‌های با انرژی بالاتر تمایل به جذب بیشتر یون کلر را دارند [۱۴]. توزیع حفره‌های ایجاد شده در نمونه اولیه در راستای جهت نورد اولیه ورق نیز می‌تواند ناشی از وجود محل‌های با انرژی بالاتر در این راستا باشد. با توجه به شکل‌های ۴- (ب) و ۵- (ب) و نیز تصاویر میکروسکوپی از حفره‌ها مشاهده می‌شود که با انجام مرحله به مرحله فرایند اتصال نوردی، مقاومت به حفره‌دار شدن آلیاژ به تدریج کاهش می‌یابد. شکل ۸ منحنی تغییرات پتانسیل‌های بحرانی خوردگی حفره‌ای (E_{bd} و E_{rp}) بر حسب تعداد مراحل فرایند ARB را نشان می‌دهد که مقادیر این پتانسیل‌ها با افزایش تعداد مراحل، کاهش یافته‌اند. فرایند

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از زحمات بی دریغ آقای دهقانیان برای انجام فرایند نورد و نمونه سازی، خانم مهندس منصف برای انجام آزمایش های الکتروشیمیایی، خانم مهندس پایدار و خانم کاوه برای تهیه تصاویر میکروسکوپی تشکر و قدردانی می شود.

مراجع

1. Valiev, R.Z., "Nanostructuring of Metals by Severe Plastic Deformation for Advanced Properties", *Nature Materials*, Vol. 3 (2004) 511-516.
2. Wei, W., Xia, K., Du, Q.B., "Corrosion and tensile Behavior of UFG Al-Mn alloy produced by Accumulative roll-bonding", Department of materials science and engineering, Jiangsu polytechnic university, china, 2006.
3. M. Bethencourt, F.J. Botana, M.A. Cauqui, M. Marcos, M.A. Rodríguez, J.M. Rodríguez Izquierdo, "Protection against corrosion in marine environments of AA5083 Al-Mg alloy by lanthanide chlorides", *Journal of Alloying Compounds*, Vol. 250, 1997, pp. 455-460.
4. Y.R. Kolobov, G.P. Grabovetskiy, K.V. Ivanov and M.B. Ivanov, "Diffusion and properties of bulk nanostructured materials process by severe plastic deformation", *Chemistry for sustainable development*, No. 10, 2002, pp. 65-71.
5. P. B. Prangnell, J. R. Bowen, P. J. Apps, " Ultra-Fine Grain Structures in Aluminium Alloys by Severe Deformation Processing ", *Materials Science and Engineering A*, 2003, No. 375-377, pp. 178-185.
6. J.R. Galvele, S.M. de Micheli, I.L. Muller, S.B. DeWexler, and I.L. Alanis, "Critical Potentials for Localized Corrosion of Aluminum Alloys", in *Localized Corrosion*, B.F. Brown, J. Kruger, and R.W. Staehle, Ed., *National Association of Corrosion Engineers*, 1974, pp. 580-589.
7. H. Kaesche, "Investigation of Uniform Dissolution and Pitting of Aluminum Electrodes", *Werkst. Korros.*, Vol. 14, 1963, pp 557-559.
8. Y. Saito, H. Utsunomia, N. Tsuji, T. Sakai, "Novel Ultra-High Straining Process for Bulk Materials Development of the Accumulative Roll-Bonding (ARB) Process ", *Acta material* Vol. 47, No. 2, 1999, pp. 579-583.
9. Annual Book of ASTM Standards, "Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test specimens", Vol. 03.02, 2002.

خوردگی حفره ای شود [۱۳]. ولی تأثیر این عامل در مقایسه با عامل اول کمتر به نظر می رسد.

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر تغییرات ریزساختار و مقاومت به خوردگی حفره ای آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ پس از اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید توسط فرآیند اتصال نوردی تجمعی مطالعه شده است که نتایج به دست آمده را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

اندازه متوسط دانه ها یا زیردانه های آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ بعد از ۵ مرحله به شدت کاهش یافته و به میزان کمتر از ۲۰۰ nm در صفحه نوردی رسیده است.

الگوی پراش انتخابی بعد از مرحله ۵ فرآیند فوق، حضور مرزهای با زاویه کج بالا را ناشی از توزیع نقاط تفرقی به صورت حلقه نشان می دهد.

اعمال یک مرحله عملیات آنیل بر روی ورق های اولیه قبل از انجام فرایند ARB به طور چشمگیری مقاومت به خوردگی حفره ای را بهبود می بخشد.

انجام فرایند اتصال نوردی تجمعی روی نمونه های آنیل شده، مقاومت به حفره دار شدن آلیاژ را کاهش می دهد.

ایجاد تغییر شکل پلاستیک شدید، افزایش دانسیته نابجایی ها، ریزدانه شدن و در نتیجه افزایش سطح انرژی آلیاژ در حین این فرایند، عمده ترین عامل کاهش مقاومت به خوردگی حفره ای این آلیاژ محسوب می شود.

شایان ذکر است که اعمال ۵ مرحله فرایند نورد بر روی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲، در مقایسه با حالت اولیه، در کنار افزایش شدید خواص مکانیکی، باعث افت مقاومت به حفره دار شدن آن نمی شود و حتی تا حدودی نیز بهبود می بخشد.

- corrosion NACE 3, R.W. Staehle, B.F. Brown, J. Kragur, ed.6, NACE, 1974, pp.516-525.
14. Z. Szklarska-Smialowska, "Pitting corrosion of aluminum", **Corrosion Science**, Vol. 41, 1999, pp 1743-1767.
 15. E. Akiyama, Z. Zhang, Y. Watanabe and K. Tsuzaki, "Effects of severe plastic deformation on the corrosion behavior of aluminum alloys", **Journal of Solid State Electrochemistry**, <http://www.springerlinks.com>, DOI 10.1007/s10008-007-0496-9.
 16. F. Lockwood, S. Lee, J. Faunce and J.A.S. Green, "Pitting corrosion of 5052 aluminum alloy", **Applications of Surface Science**, Vol. 20, 1985, pp. 339-346.
 10. Annual Book of ASTM Standards, "Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals", Vol. 03.02, 2002.
 11. X. Huang, N. Tsuji, Y. Minamino, N. Hansen, "Characterization of Ultra-Fine Microstructures in Aluminum Heavily Deformed by Accumulative Roll-Bonding (ARB) "Proceeding of the 22th Riso international symposium on material science, Riso national laboratory, Roskilde, Denmark, 2001, pp. 255-262.
 12. E. E. Stansbury, R. A. Buchanan, "Fundamentals of Electrochemical Corrosion", 3th edition, McGraw-Hill, 1997, pp. 232-235.
 13. H. Kaesche, "Pitting corrosion of Aluminum and Intergranular corrosion of Aluminum alloys", **Localized**