

## Effect of H321 stabilizing treatment on microstructure, hardness, and grain boundary corrosion resistance of 5083 aluminum alloy

Hossein Ahmadi Dermeni<sup>1</sup>, \*Saeed G. Shabestari<sup>2</sup>, Saber Farmani<sup>3</sup>, Hossein Momeni<sup>4</sup>

1. B. Sc. graduate, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.
2. Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.
3. M.Sc. graduate, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.
4. Research associate, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

**Citation:** Ahmadi Dermeni H, Shabestari S, Farmani S, Momeni H. Effect of H321 stabilizing treatment on microstructure, hardness, and grain boundary corrosion resistance of 5083 aluminum alloy. Metallurgical Engineering 2020; 23(3): 196-205 <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2021.128765.1289>

**doi :** <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2021.128765.1289>

### ABSTRACT

In this research, the influence of H321 stabilizing heat treatment on microstructure, hardness, and intergranular corrosion resistance of 1cm thick sheet of AA5083 has been investigated. After 10%, 20%, 30%, and 40% cold rolling of samples, they were all annealed for recrystallization. The processes of rolling and annealing have been repeated until 1.5mm thickness samples were obtained. Then, 30% cold work was applied to them to achieve sheets having 1mm thickness. For stabilizing treatment, samples were put in the heat treatment furnace for 1 and 4 hours in a temperature range of 150°C to 300°C. Then, sensitization treatment was applied to the samples at 150°C for 48h to consider the effect of stabilizing. The results show that the hardness of samples decreases by increasing stabilizing temperature. The optimum stabilizing temperature for samples with 10% to 30% rolling is 220°C to attain the highest corrosion resistance, but this treatment does not improve the sample's corrosion resistance with 40% rolling. In conclusion, the sample with 20% rolling, which stabilized at 220°C, exhibits mass loss of 6 to 9 mg/cm<sup>2</sup> and hardness of 100HV in 4h and 110HV in 1h of stabilizing time has the optimum combination of hardness and intergranular corrosion resistance.

**Keywords:** AA 5083 aluminum – H321 treatment – sensitization – corrosion resistance.

Received: 6 June 2020

Accepted: 20 January 2021

■ ..... ■  
\* *Corresponding Author:*

Saeed G. Shabestari, PhD

Address: School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

Tel: +98 (21) 77240371

E-mail: Shabestari@iust.ac.ir

## اثر عملیات پایداری سازی H321 بر ریزساختار، سختی و مقاومت به خوردگی مرزدانه‌ای آلیاژ آلومینیم نوردی AA5083

حسین احمدی درمنی<sup>۱</sup>، سعید شبستری<sup>۲</sup>، صابر فرمانی<sup>۲</sup>، حسین مومنی<sup>۴</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۲- استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۴- همکار پژوهشی، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

### چکیده

در این پژوهش تاثیر عملیات پایداری سازی H321 بر ریزساختار، سختی و مقاومت به خوردگی مرزدانه‌ای آلیاژ آلومینیم AA5083 با ضخامت ۱۰ cm مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های مختلف به میزان ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ نورد شدند و سپس تحت آنیل تبلور مجدد قرار گرفتند؛ عملیات نورد سرد و آنیل به طور متناوب تا رسیدن به ضخامت ۱/۵ mm انجام شد. به منظور بررسی عملیات پایداری سازی H321، نمونه‌ها پس از اعمال ۳۰٪ کارسرد از طریق نورد و رسیدن به ضخامت ۱ mm، در بازه‌ی دمایی ۱۵۰ °C تا ۳۰۰ °C و به مدت زمان ۱ h و ۴ h قرار گرفتند. در ادامه نیز عملیات حساس سازی در دمای ۱۵۰ °C به مدت ۴۸ h، به منظور شبیه سازی شرایط کاری و بررسی اثر پایداری بر نمونه‌ها انجام شد. نتایج بدست آمده نشان داد که سختی تمامی نمونه‌ها طی پایداری سازی و با افزایش دما کاهش می‌یابد. مقاومت به خوردگی نمونه‌های با میزان نورد ۱۰٪ تا ۳۰٪ در دمای ۲۲۰ °C به حد بهینه می‌رسد، ولی پایداری سازی تاثیری روی نمونه ۴۰٪ نورد شده ندارد. نمونه‌ی حاصل از ۲۰٪ کارسرد و پایداری شده در دمای ۲۲۰ °C، با میزان کاهش وزن در اثر خوردگی حدود ۶ تا ۹  $\frac{mg}{cm^2}$  و سختی ۱۰۰ HV در مدت ۴ h و ۱۱۰ HV در مدت ۱ h پایداری سازی، بهترین ترکیب از نظر سختی و مقاومت به خوردگی را در میان تمام نمونه‌ها داراست.

واژه‌های کلیدی: تولید منیزیم، عرضه و تقاضای منیزیم در ایران، احیا سیلیکوترمی، تولید فلزات اولیه، فروسیلیسم.

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۷ | پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۱

### ۱. مقدمه

در حالت اول به صورت مستقیم در اثر برهم کنش اتم‌ها و نابجایی‌های متحرک در شبکه، حرکت نابجایی‌ها دشوارتر می‌شود و در حالت دوم به صورت غیرمستقیم با ممانعت از حرکت نابجایی‌ها طی بازیابی موجب تأخیر در پدیده تبلور مجدد و افزایش استحکام می‌شود [۴ و ۵]. لی و همکاران نشان دادند که یکی از دلایل اصلی افزایش مقاومت به حرکت نابجایی‌ها کاهش انرژی نقص چیده شدن است که موجب دشواری لغزش متقاطع خواهد شد [۶ و ۷].

آلیاژ ۵۰۸۳ دو عیب بسیار مهم دارد که کاربرد آن را در صنعت محدود می‌کند. مشکل اول این آلیاژ پیرنرمی است. طی این فرآیند در یک مدت زمان طولانی عنصر منیزیم از ساختار محلول جامد خارج شده و رسوب‌های  $Al_3Mg_2$  را تشکیل می‌دهد [۸]. در نتیجه اثر میدان‌های تنشی ناشی

آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ یکی از آلیاژهای سری ۵۰۰۰ (آلومینیم - منیزیم) است که در صنایع دریایی و حمل و نقل کاربرد دارد. اگرچه این آلیاژ عملیات حرارتی پذیر نیست، اما رسوب سختی به میزان اندکی توسط رسوباتی که در ساختار آن وجود دارند روی می‌دهد؛ ولی این مکانیزم، افزایش استحکام کمی به همراه دارد، به همین دلیل از دیگر مکانیزم‌های استحکام دهی برای افزایش سختی و استحکام این آلیاژ استفاده می‌شود [۲ و ۳]. اصلی ترین مکانیزم افزایش استحکام در این آلیاژها، ایجاد محلول جامد است. منیزیم یکی از عناصری است که انحلال پذیری خوبی در آلومینیم دارد و وجود اتم‌های آن به صورت محلول، سختی و استحکام را افزایش می‌دهد.

\* نویسنده مسئول:

دکتر سعید شبستری

نشانی: تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی.

تلفن: ۷۷۲۴۰۳۷۱ (۲۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: Shabestari@iust.ac.ir

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم AA5083

| عنصر               | Al   | Pb   | Ti    | Zn    | Cr    | Mg    | Mn    | Cu    | Fe    | Si    |
|--------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| درصد وزنی<br>(wt%) | پایه | ۰/۰۶ | ۰/۰۱۴ | ۰/۰۱۵ | ۰/۰۸۳ | ۴/۶۱۴ | ۰/۴۹۲ | ۰/۰۵۷ | ۰/۲۲۴ | ۰/۱۹۶ |

جدول ۲. دمای تبلور مجدد نمونه‌ها

| نام نمونه            | C1  | C2  | C3  | C4  |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|
| دمای تبلور مجدد (°C) | ۳۶۰ | ۳۳۰ | ۳۱۰ | ۳۰۰ |

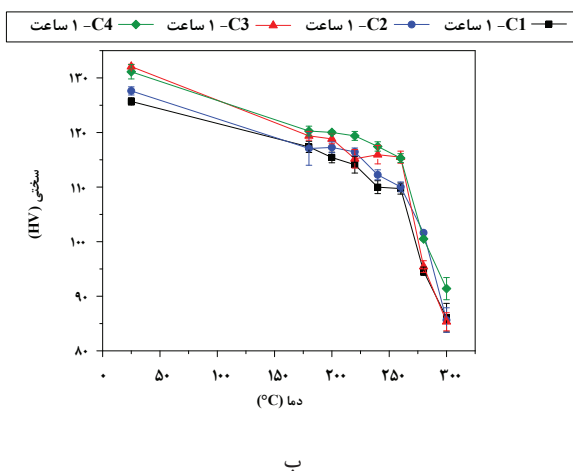
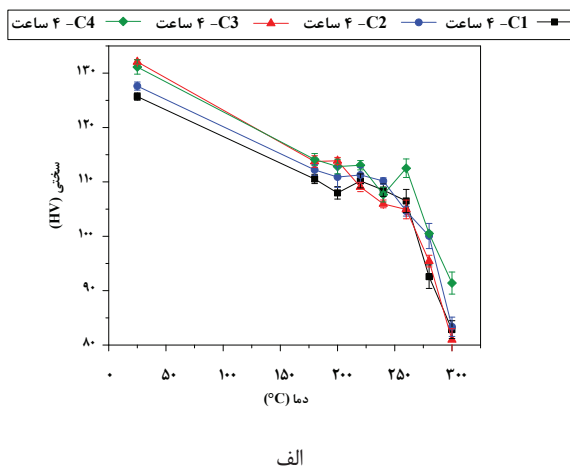
آنها در مرزدانه جلوگیری می‌شود. این مورد سبب می‌شود مقاومت به خوردگی مرزدانه‌ای آلیاژ بهبود یابد. در نتیجه عملیات پایداری سازی سختی و استحکام آلیاژ نسبت به حالت نوردی کاهش می‌یابد ولی نسبت به حالت آنیل کامل بالاتر است و می‌توان به مقدار بهینه‌ای دست یافت [۱۵ و ۱۶]. یکی از معضلات آلیاژهای کارشده‌ی آلومینیم-منیزیم، عدم امکان تولید ورق با ضخامت کم همراه با خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی مناسب است. هدف از این پژوهش دستیابی به ورق آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ با ضخامت‌های بسیار کم (۱ mm) و در ادامه بررسی پارامترهای مهم عملیات پایداری سازی یعنی دما و زمان برای رسیدن به سختی و مقاومت به خوردگی مناسب در این ورق‌ها است.

## ۲. مواد و روش تحقیق

از آلیاژ آلومینیم AA5083 با ضخامت ۱ cm و ترکیب شیمیایی مطابق با جدول ۱، ۴ نمونه تهیه شد. هر یک از نمونه‌ها به کمک دستگاه نورد دو غلتکی با قطر غلتک ۹۰ mm و سرعت چرخش ۲۵ rpm، به ترتیب تحت ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ کارسرد قرار گرفتند. این نمونه‌ها به ترتیب C1، C2، C3 و C4 نام‌گذاری شدند. پس از کار سرد، هر نمونه بر اساس دمای مناسب تبلور مجدد بدست آمده در پژوهش گذشته [۱۷] تحت عملیات حرارتی در کوره‌ی الکتریکی - مقاومتی با حجم ۴۰ لیتر قرار گرفت. دمای تبلور مجدد نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. چرخه‌ی درصد مشخص کارسرد و سپس آنیل تبلور مجدد تا رسیدن نمونه‌ها به ضخامت ۱/۵ mm تکرار شد. تعداد مراحل کارسرد و آنیل متوالی برای نمونه‌های C1 تا C4، به ترتیب ۱۷، ۹، ۶ و ۴ بوده است.

به منظور تعیین دمای مناسب پایداری سازی H۳۲۱، تمامی نمونه‌ها تحت ۳۰٪ کارسرد قرار گرفتند تا به ضخامت برابر ۱ mm برسند. در ادامه نمونه‌ها به دو دسته تقسیم شدند. دسته‌ی اول به مدت ۱ ساعت و دسته‌ی دوم به مدت ۴ ساعت درون گرم کن در بازه‌ی دمایی ۱۸۰ °C تا ۳۰۰ °C حرارت‌دهی شدند. به منظور تعیین اثر پایداری سازی بر مقاومت

از اختلاف شعاع اتمی منیزیم با اتم آلومینیم بر نابجایی‌های موجود در شبکه کاهش می‌یابد. این امر منجر به کاهش استحکام کششی، استحکام تسلیم و سختی می‌شود [۹]. دومین معضلی که استفاده از این آلیاژ را محدود می‌سازد افت مقاومت به خوردگی در این آلیاژ است که در نتیجه تشکیل رسوب‌های  $Al_3Mg_2$  (فاز  $\beta$ ) در مرزدانه‌ها روی می‌دهد. پتانسیل الکتروشیمیایی این فاز نسبت به زمینه‌ی آلومینیم کمتر است. با قرارگیری آلیاژ در محیط خورنده، در اثر ایجاد پدیده‌ی گالوانیک، فاز  $\beta$  نقش آند را ایفا کرده و اکسید می‌شود. در نتیجه این فاز دچار خوردگی می‌شود و در قطعه خوردگی مرزدانه‌ای اتفاق می‌افتد [۱۰ و ۱۱]. یکی از دلایل اصلی ایجاد فاز  $\beta$  در مرزدانه‌ها انرژی بالاتر این نواحی است که آن‌ها را به نقاط ترجیحی برای جوانه‌زنی رسوبات تبدیل می‌کند [۱۲ و ۱۳]. به منظور جلوگیری از افت سختی و مقاومت به خوردگی آلیاژ در گذر زمان، از عملیات پایداری سازی H321 استفاده می‌شود. عملیات حرارتی سری H، بر آلیاژهای غیرقابل رسوب‌سختی پذیر اعمال می‌شوند. عملیات H1 شامل اعمال کارسختی جزئی بدون عملیات حرارتی، H2 شامل اعمال عملیات حرارتی به همراه آنیل تبلور مجدد کامل، H3 شامل انجام کارسرد و سپس عملیات پایداری سازی و در نهایت H4 شامل کارسرد به همراه عملیات حرارتی ناشی از فرآیندهایی نظیر رنگ‌آمیزی است. طی عملیات H321 پس از اعمال ۲۵٪ تا ۳۰٪ کاهش ضخامت در دمای محیط، نمونه‌ها در بازه دمایی بین دمای تبلور مجدد و دمای حساس شدن قرار می‌گیرند تا بتوان افت سختی و استحکام را کند کرد و مقاومت به خوردگی آلیاژ را افزایش داد. فرآیند حساس‌سازی نیز عبارت است از قرارگیری نمونه به مدت طولانی در دمایی کمتر از دمای تبلور مجدد (حداکثر تا ۱۵۰ °C برای آلیاژهای آلومینیم-منیزیم) که می‌تواند اثر گذر زمان بر ایجاد فاز  $\beta$  در مرزدانه‌ها و ایجاد خوردگی مرزدانه‌ای را در مدت زمان کوتاه‌تری شبیه‌سازی کند [۲ و ۱۴]. به کمک اعمال شرایط مناسب پایداری سازی H321، رسوبات  $Al_3Mg_2$  به صورت ناپیوسته در درون دانه‌ها ایجاد می‌شوند و از تشکیل پیوسته



شکل ۱. تغییرات سختی بر حسب دمای پایداری در زمان‌های الف) ۱ ساعت و ب) ۴ ساعت.

کمتر است و علت این مورد نیز کاهش مقدار منیزیم محلول در زمینه در اثر عملیات حرارتی پایداری و در نتیجه‌ی آن، کاهش تمایل اتم منیزیم به خروج بیشتر از زمینه است. نمونه‌های نوردی نسبت به نمونه‌های پایداری شده دارای تعداد نابیایی‌های بیشتری هستند. این نابیایی‌ها می‌توانند از طریق مکانیزم نفوذ لوله‌ای در هسته‌ی خود، نفوذ منیزیم و تشکیل فاز  $\beta$  و افت سختی را تسریع کنند [۲۱ و ۲۲]. با افزایش زمان پایداری به ۴ ساعت، سرعت افت سختی نیز بیشتر می‌شود زیرا نفوذ جانشین منیزیم، بازیابی، تبلور مجدد و رشد دانه‌ها پدیده‌های وابسته به زمان هستند. شکل ۳ مقدار افت سختی را پس از عملیات حساس‌سازی نشان می‌دهد. با توجه به شکل، به طور کلی اختلاف سختی نمونه‌ها با افزایش دمای پایداری کاهش پیدا می‌کند و در دمای  $300^\circ\text{C}$  تقریباً هیچ تفاوتی در سختی نمونه‌های پایداری شده و پایدار نشده وجود ندارد. همانطور که مشاهده می‌شود بدون اعمال پایداری (معادل دمای پایداری  $25^\circ\text{C}$  بر روی نمودار)، نمونه‌ها پس از حساس‌سازی افت

به خوردگی، نمونه‌های پایداری شده و همچنین نمونه‌های کارسرد شده بدون اعمال پایداری در دمای  $150^\circ\text{C}$  به مدت ۴۸ ساعت حساس‌سازی شدند.

برای بررسی اثر حساس‌سازی بر مقاومت به خوردگی مرزانه‌ای آلیاژ AA5083، آزمایش NMLT<sup>۱</sup> مطابق با استاندارد ASTM G67-13 انجام شد، نمونه‌هایی به ابعاد  $10 \times 10 \times 1$  mm به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط، در اسید نیتریک با غلظت ۷۰٪ حجمی قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها شست‌وشو شدند و اختلاف وزن آن‌ها ناشی از خوردگی بوسیله‌ی ترازو با دقت  $\pm 0.1$  mg اندازه‌گیری شد.

برای بررسی ریزساختار نمونه‌ها، از محلول آبی اسید فسفریک ۱۰٪ حجمی در دمای  $85^\circ\text{C}$  مطابق با منابع، استفاده شد [۱۸]. ریزساختار نمونه‌ها از طریق میکروسکوپ نوری مدل HR3-TBF-P شرکت HUVITZ مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین سختی نمونه‌ها بوسیله‌ی دستگاه میکروسختی سنج ویکرز شرکت SHAAB و نیروی gf50 اندازه‌گیری شد و میانگین پنج بار سختی سنجی در هر نمونه گزارش شد.

### ۳. نتایج و بحث

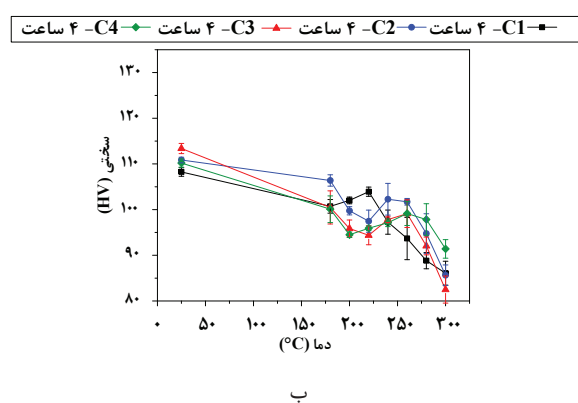
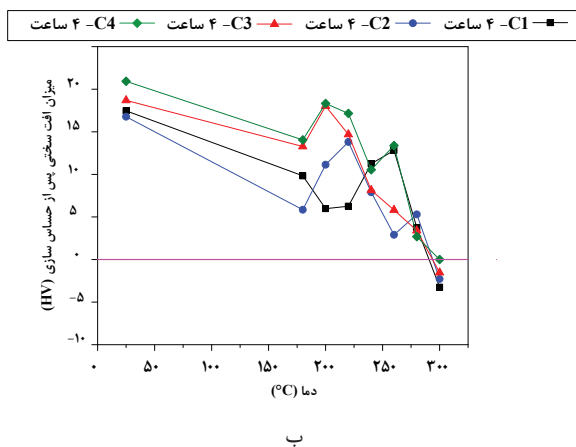
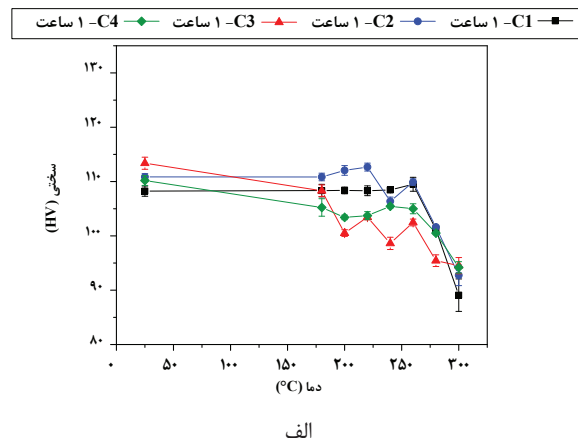
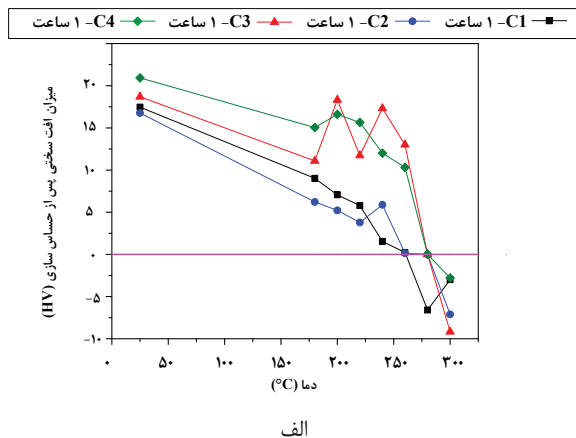
با توجه به نتایج تحقیق قبلی این نویسندگان [۱۷]، مشخص شد با افزایش درصد کار سرد، سختی نمونه‌ها افزایش و اندازه دانه‌ها کاهش می‌یابد. تاثیر دما و زمان عملیات پایداری بر سختی و مقاومت به خوردگی ورق‌های با ضخامت ۱ mm در این پژوهش ارائه شده است.

#### الف) تاثیر عملیات پایداری بر سختی

شکل ۱ نمودار سختی آلیاژ بر حسب دماهای مختلف پایداری را در دو زمان ۱ ساعت و ۴ ساعت نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با افزایش دمای پایداری در زمان ثابت، سختی آلیاژ افت می‌کند. علت کاهش سختی آلیاژ، خروج عنصر منیزیم از حالت محلول جامد و تشکیل فاز  $\beta$  و همچنین بازیابی جزئی نابیایی‌ها و کاهش چگالی آن‌ها است. میزان افت سختی از دمای  $180^\circ\text{C}$  تا  $260^\circ\text{C}$  نسبتاً پایین است ولی پس از آن نرخ افت سختی به شدت افزایش می‌یابد زیرا تبلور مجدد در آلیاژ رخ می‌دهد [۱۹ و ۲۰]. با افزایش زمان پایداری، روندی مشابه در افت سختی رخ می‌دهد. گرچه به دلیل زمان بیشتر، فرصت نفوذ اتم‌های منیزیم افزایش یافته و در نتیجه، در دمای پایداری یکسان، مقادیر سختی کم‌تری بدست می‌آید [۱۴].

در ادامه برای بررسی تاثیر عملیات پایداری در جلوگیری از افت سختی، نمونه‌های پایداری شده، تحت عملیات حساس‌سازی قرار گرفتند. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، پس از حساس‌سازی، افت سختی در نمونه‌های پایداری شده در مقایسه با نمونه‌های نوردی اولیه

1. Nitric Acid Mass Loss Test



شکل ۳. نمودار تفاوت مقدار سختی نمونه‌های بدون پایدار سازی و نمونه‌های پایدار شده پس از عملیات حساس‌سازی: الف) زمان پایداری سازی ۱ ساعت، ب) زمان پایداری سازی ۴ ساعت.

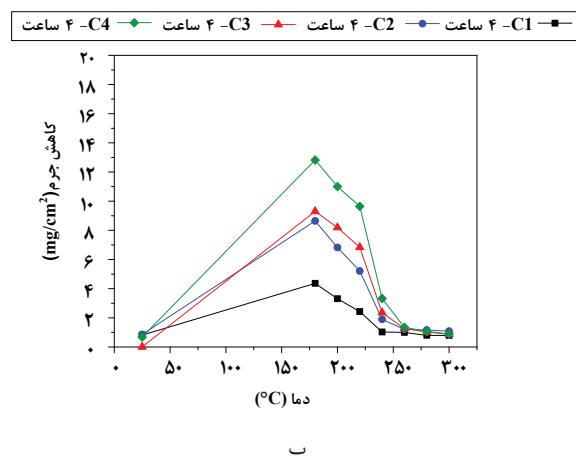
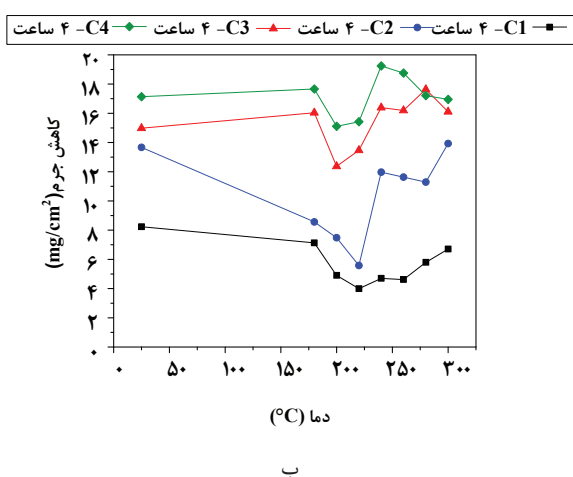
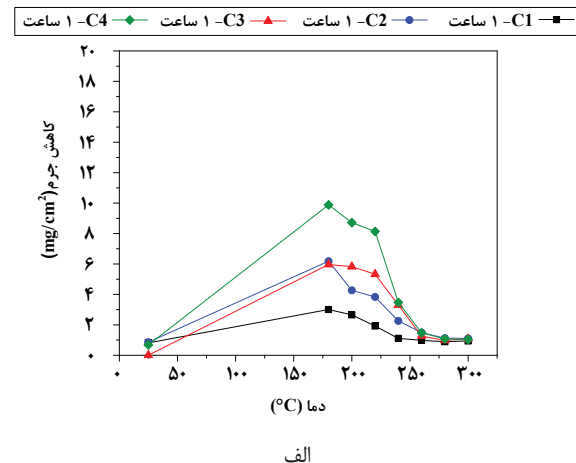
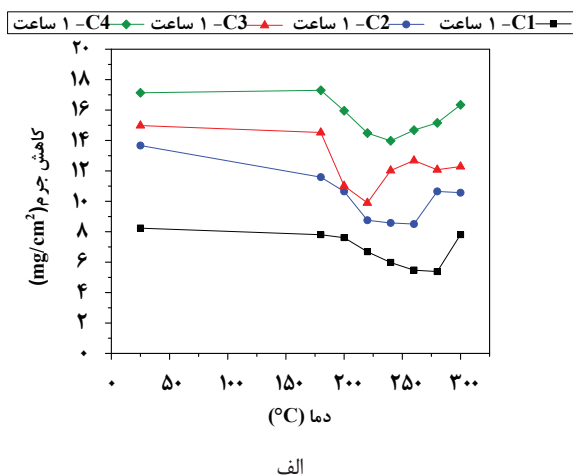
شکل ۲. تغییرات سختی بر حسب دمای پایداری سازی برای نمونه‌های پایدار و حساس‌شده در زمان‌های الف) ۱ ساعت، ب) ۴ ساعت و پ) تفاوت سختی پس از حساس‌سازی در دو حالت پایداری شده و بدون پایداری سازی

کم‌ترین میزان کاهش جرم در محیط خورنده رخ می‌دهد. با افزایش دمای پایداری سازی تا  $180^{\circ}\text{C}$  نفوذ منیزیم به مرزانه‌ها تسهیل می‌شود، در نتیجه خوردگی نمونه‌ها تشدید می‌شود. در بازه دمای  $180^{\circ}\text{C}$  تا  $250^{\circ}\text{C}$  امکان بازیابی نابیایی‌های ناشی از کارسرد افزایش می‌یابد و مرزهای فرعی ناشی از منظم شدن نابیایی‌ها بوجود می‌آیند. این مرزها به عنوان مراکز جوانه‌زنی فاز  $\beta$  عمل کرده و مانع از پیوستگی این فاز در مرزهای دانه می‌شوند و باعث افت مقدار خوردگی و کاهش وزن نمونه‌ها می‌شوند. در دمای بالاتر از  $250^{\circ}\text{C}$ ، نمونه‌ها وارد ناحیه‌ی تک‌فاز محلول بین‌نشین منیزیم در آلومینیوم شده و مقدار خوردگی مشابه با حالت نورد شده، به سمت صفر میل می‌کند [۱۶ و ۱۷].

با افزایش زمان پایداری سازی از یک به چهار ساعت، قابلیت نفوذ بیشتر منیزیم و تشکیل رسوب بیشتر در مرزها بوجود می‌آید. پس خوردگی افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش اندازه دانه، به دلیل افزایش مساحت مرزانه، مکان‌های مرجع جوانه‌زنی رسوب  $\beta$  افزایش یافته و خوردگی تشدید می‌شود [۲۳].

سختی در حدود HV ۱۵ تا HV ۲۰ را نسبت به نمونه‌های پایداری شده در دماهای بالا را تجربه می‌کنند. این اتفاق در طول زمان کاری آلیاژ می‌تواند منجر به تخریب غیرقابل پیش‌بینی و کاهش عمرکاری قطعات شود. در هر دو زمان ۱ و ۴ ساعت، میزان افت سختی پس از حساس‌سازی در نمونه‌های C1 و C2 کمتر از نمونه‌های C3 و C4 است. در درصدی کمتر کارسرد نیز به دلیل وجود عیوب ساختاری کمتر، نفوذ منیزیم به سمت مرزها کمتر است. علت کاهش میزان افت سختی نیز همان‌طور که پیش‌تر گفته شد کاهش تمایل منیزیم به خروج از ساختار به دلیل ایجاد فاز  $\beta$  طی پایداری سازی و افت مقدار منیزیم محلول در زمینه است.

ب) تاثیر عملیات پایداری سازی بر مقاومت به خوردگی  
نتایج حاصل از آزمایش خوردگی نمونه‌های C1 تا C4 در شکل ۴ نمایش داده شده است. به دلیل انتقال حرارت سریع در آلومینیوم و نسبت سطح به حجم زیاد در ورق‌ها، پس از آنیل تبلور مجدد و سرد شدن نمونه‌ها در هوا، منیزیم به صورت فوق‌اشباع در زمینه باقی می‌ماند. لذا در نمونه‌های نوردشده و بدون اعمال پایداری سازی، بهترین مقاومت به خوردگی و



شکل ۵. نمودار کاهش جرم بر حسب دمای پایداری برای نمونه‌های پایدار و حساس‌سازی شده به مدت الف) یک ساعت، ب) چهار ساعت.

شکل ۴. نتایج آزمایش خوردگی نمونه‌های C1 تا C4 پایداری شده بر حسب دمای پایداری به مدت الف) یک ساعت، ب) ۴ ساعت.

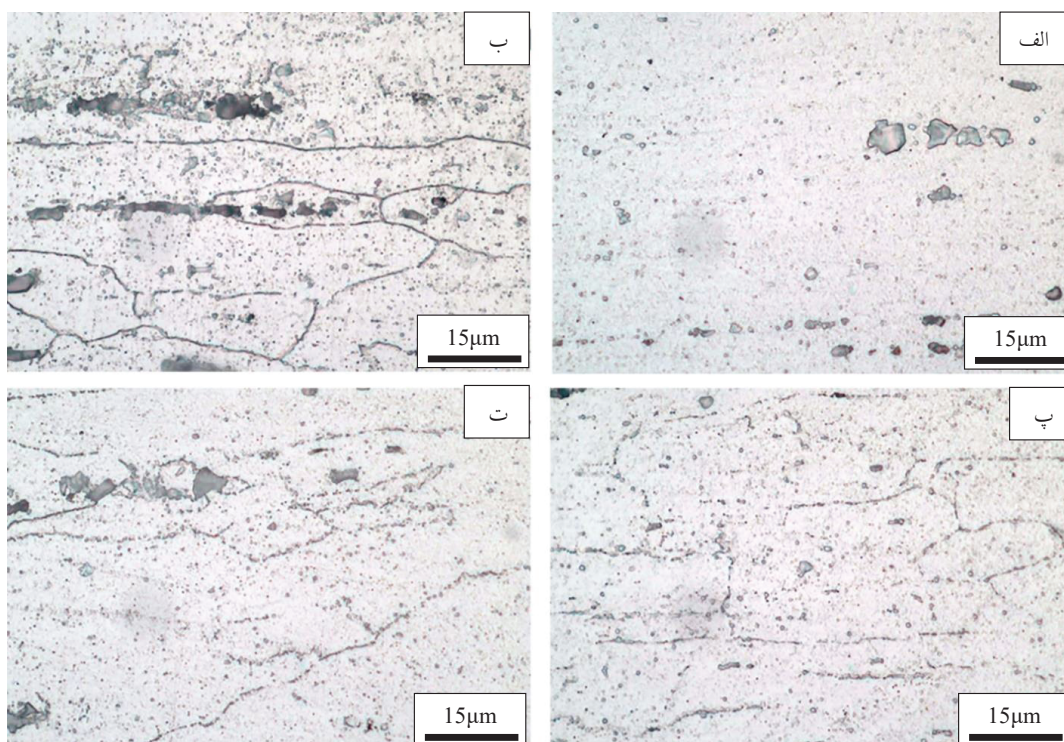
## حساس‌سازی

را دارند پس از حساس‌شدن ضعیف‌ترین مقاومت به خوردگی را از خود نشان می‌دهند. زیرا چگالی بالای نایجایی‌ها باعث تسهیل در نفوذ منیزیم به مرزدانه‌ها و تشکیل فاز  $\beta$  می‌شوند این رفتار در منابع نیز گزارش شده است [۲۵]. نمونه‌هایی که در دمای نزدیک به دمای تبلور مجدد آنیل شده‌اند نیز چنین وضعیتی را دارند. در این نمونه‌ها با آن که چگالی نایجایی‌ها در اثر تبلور مجدد، کاهش می‌یابد، مرزدانه‌ها همچنان محل ترجیحی جوانه‌زنی و رشد فاز  $\beta$  هستند. پس با تشکیل پیوسته‌ای این فاز در مرزها میزان کاهش جرم در نمونه‌ها در اثر خوردگی افزایش می‌یابد. اما در نمونه‌های آنیل شده در دماهای میانی، منظم شدن نایجایی‌ها در اثر بازایی و تشکیل مرزهای فرعی می‌تواند منجر به ایجاد مکان‌های اضافی برای جوانه‌زنی فاز  $\beta$  و جلوگیری از پیوستگی آن در مرزدانه‌ها شود.

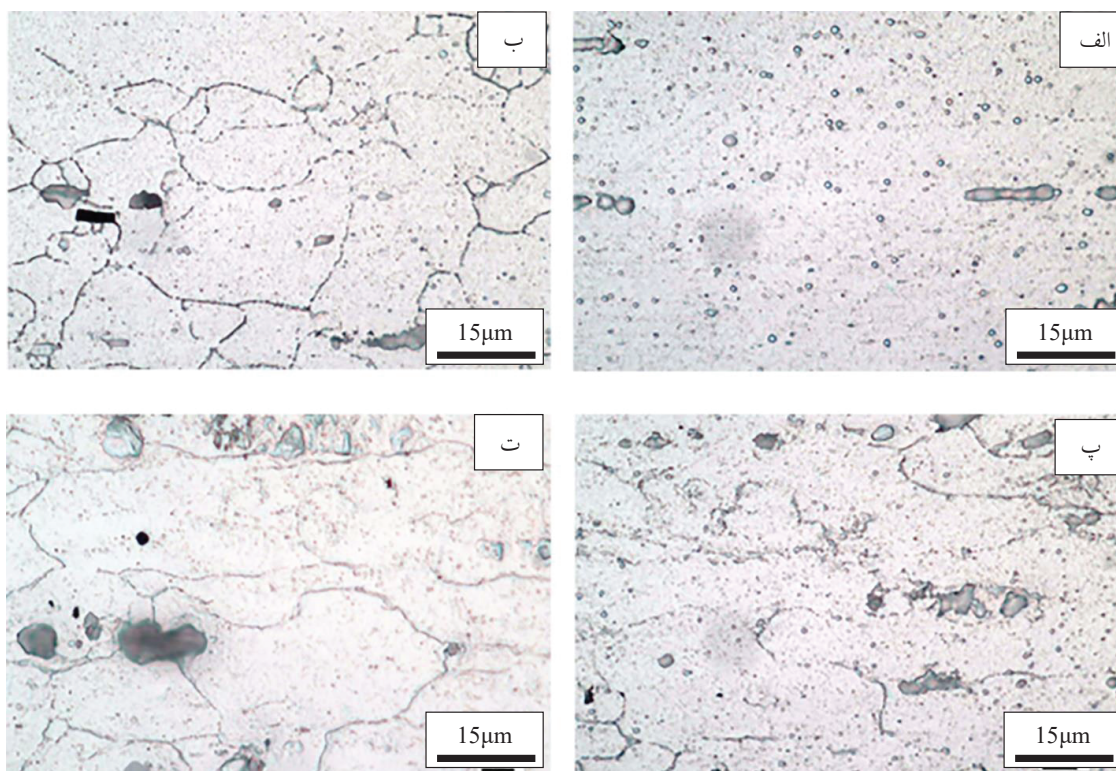
## بررسی‌های ساختاری

شکل‌های ۶ تا ۹ مشاهدات ساختاری در اثر عملیات

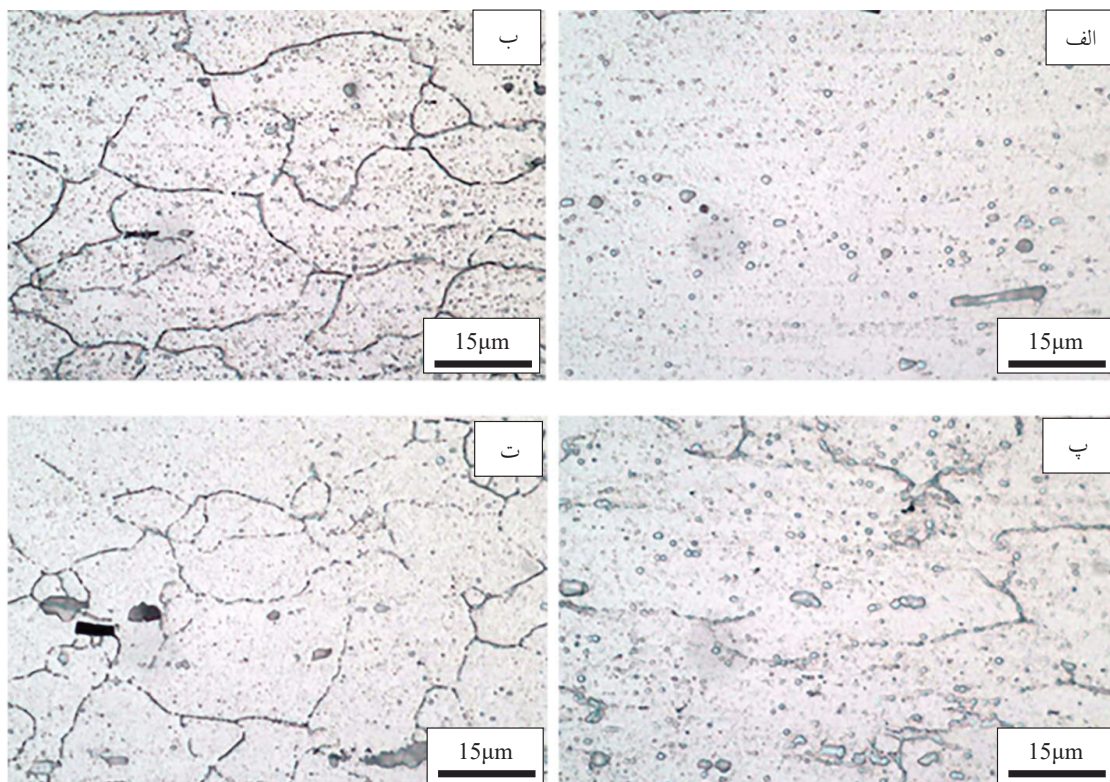
شکل ۵ اثر دمای پایداری بر مقدار کاهش جرم نمونه‌ها پس از حساس‌سازی آن‌ها در دمای  $150^\circ\text{C}$  به مدت ۴۸ ساعت را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بیشترین حساسیت به خوردگی مربوط به نمونه‌های نوردی و نمونه‌هایی است که در بالاترین دما آنیل شده‌اند. کاهش جرم پس از پایدار و حساس‌سازی نمونه‌های C1 و C2 در هیچ یک از دماها و زمان‌های پایداری از محدوده‌ی مجاز  $15 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2}$  عبور نمی‌کند. اما نمونه‌های C4، پس از یک ساعت و نمونه‌های C3 پس از چهار ساعت پایداری از محدوده‌ی  $15 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2}$  عبور می‌کنند. این نمونه‌ها باید مورد بررسی میکروسکوپی قرار بگیرند تا از صحت عملکرد آن‌ها اطمینان حاصل شود. با توجه به پژوهش پیشین [۱۷]، اندازه‌ی دانه به ترتیب در نمونه‌های C1 تا C4 کاهش می‌یابد. در نتیجه می‌توان گفت که حساسیت به خوردگی با کاهش اندازه‌ی دانه‌ها، افزایش می‌یابد نتایجی مشابه در پژوهش‌ها گزارش شده است [۲۴]. همچنین ناحیه‌ی مناسب برای پایداری آلایز محدودتر می‌شود. نمونه‌های نوردی با آن که بهترین مقاومت به خوردگی



شکل ۶. ساختار نمونه‌ی C1 حاصل از چرخه‌ی ۱۰٪ نورد و آنیل میانی، پس از پایداری سازی و حساس شدن: (ا) شده در اسید فسفریک ۲۰٪ در دمای ۸۵ °C (الف) بدون پایداری سازی - عدم حساس سازی، (ب) بدون پایداری سازی- حساس شده، (پ) آنیل شده در دمای ۲۲۰ °C و زمان ۱ ساعت- عدم حساس سازی، (ت) آنیل شده در دمای ۲۲۰ °C و زمان ۱ ساعت- حساس شده.



شکل ۷. ساختار نمونه‌ی C2 حاصل از چرخه‌ی ۲۰٪ نورد و آنیل میانی، پس از پایداری و حساس شدن: (ا) شده در فسفریک اسید ۲۰٪ در دمای ۸۵ °C (الف) بدون پایداری سازی - عدم حساس سازی، (ب) بدون پایداری سازی- حساس شده، (پ) آنیل شده در دمای ۲۲۰ °C و زمان ۱ ساعت- عدم حساس سازی، (ت) آنیل شده در دمای ۲۲۰ °C و زمان ۱ ساعت- حساس شده.



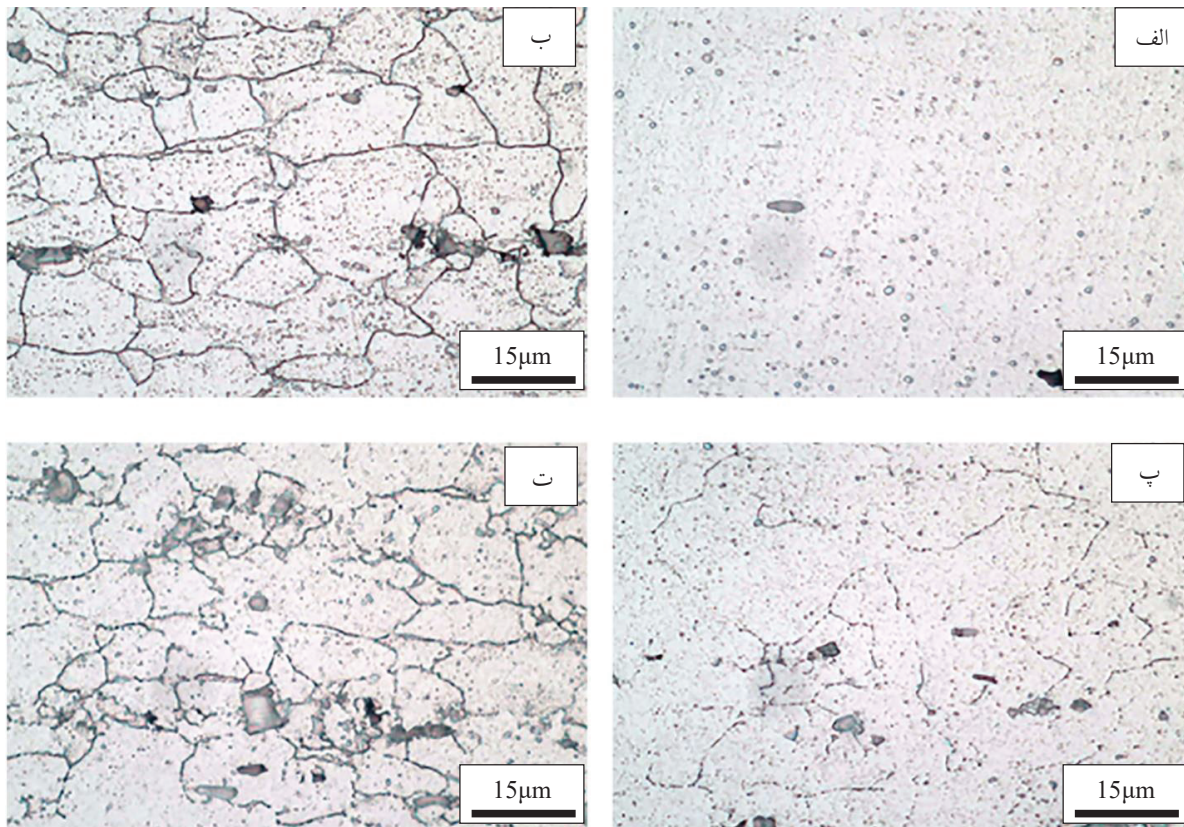
شکل ۸. ساختار نمونه‌ی C3 حاصل از چرخه‌ی ۳۰٪ نورد و آنیل میانی، پس از پایدار و حساس شدن: (اچ شده در فسفریک اسید ۲۰٪ در دمای ۸۵ °C: الف) بدون پایدار سازی - عدم حساس سازی، ب) بدون پایدار سازی - حساس شده، پ) آنیل شده در دمای ۲۲۰ °C و زمان ۱ ساعت - عدم حساس سازی، ت) آنیل شده در دمای ۲۲۰ °C و زمان ۱ ساعت - حساس شده.

تغییرات ایجاد شده در ساختار نمونه‌ی C2 طی عملیات پایدار سازی و حساس سازی مشابه با نمونه‌ی C1 است. اما شدت خوردگی مرزها افزایش یافته است. دلیل این اتفاق، وجود چگالی بیشتر نابجایی‌ها با افزایش میزان کار سرد و کمک آن‌ها به خروج منیزیم از شبکه و تشکیل فاز  $\beta$  در حین حساس سازی است. همچنین اندازه‌ی دانه‌ی کوچک‌تر و وجود مرزدانه‌ی بیشتر، مراکز مناسب جوانه‌زنی بیشتری برای فاز  $\beta$  فراهم می‌کند. خوردگی پیوسته در مرزها به صورت ضعیفی در این نمونه پس از پایدار و حساس سازی دیده می‌شود و علت این مورد نیز عدم پیوستگی فاز  $\beta$  در مرزها است. پس می‌توان گفت که نمونه‌ی C2 پایدار سازی شده در دمای ۲۲۰ °C و زمان ۱ ساعت، مقاومت به خوردگی مناسبی از خود نشان می‌دهد.

نمونه‌ی پایدار شده C3، مقاومت به خوردگی بیشتری نسبت به حالت نوردی و حساس شده دارد. بهترین دمای پایدار سازی در زمان ۱ ساعت، ۲۲۰ °C است. اما پس از حساس سازی، پیوستگی در خوردگی مرزها مشاهده می‌شود. با توجه به خوردگی پیوسته در مرزها، افزایش زمان پایدار سازی منجر به تضعیف مرزها در برابر خوردگی می‌شود.

در نمونه‌ی پایدار شده‌ی C4، ساختاری مشابه با نمونه‌ی پس از حساس سازی بدست آمد. یعنی با وجود انجام این

پایدار سازی و حساس سازی را بر نمونه‌ها نمایش می‌دهند. در نمونه‌های نوردی و بدون عملیات حرارتی، هیچ‌گونه خوردگی در مرزدانه‌ها مشاهده نمی‌شود که ناشی از حضور منیزیم به صورت محلول بین‌نشین در ساختار آلومینیم است. اما در اثر حساس سازی و حرارت دادن نمونه به مدت زمان طولانی، تجمع رسوب فاز  $\beta$  پیوسته در مرزدانه به شدت افزایش می‌یابد. شکل‌های (۶-الف تا ۹-الف) بیانگر مقاومت به خوردگی آلیاژ نوردی بدون هیچ‌گونه عملیات حرارتی اضافه است. اما پس از عملیات حساس سازی که قرارگیری نمونه در شرایط کاری و زمان‌های طولانی را در دمایی بالاتر و زمانی بسیار کوتاه‌تر شبیه سازی می‌کند، نمونه‌ی نوردی بیشترین آسیب ناشی از خوردگی را در مرزدانه‌ها تجربه می‌کند (شکل‌های ۶-ب تا ۹-ب). اما ساختار پایدار شده، قبل و بعد از حساس سازی تغییر زیادی را نشان نمی‌دهد (شکل‌های ۶-پ و ت تا ۹-پ و ت). بیشترین میزان خوردگی در مرزدانه‌ها مربوط به نمونه‌ی نوردی حساس شده بدون عملیات پایدار سازی است. پایدار سازی منجر به خوردگی غیریکنواخت در مرزدانه‌ها شده است. در نتیجه جدا شدن دانه‌ها از بدنه‌ی اصلی نمونه و کاهش جرم شدید نمونه، کاهش می‌یابد. پس می‌توان گفت پایدار سازی در دمای ۲۲۰ °C و زمان ۱ ساعت باعث بهبود خواص خوردگی آلیاژ شده است.



**شکل ۹.** ساختار نمونه‌ی C4 حاصل از چرخه‌ی ۴۰٪ نورد و آنیل میانی، پس از پایداری و حساس شدن: (اچ شده در فسفریک اسید ۲۰٪ در دمای ۸۵ °C: (الف) بدون پایداری سازی - عدم حساس سازی، (ب) بدون پایداری سازی - حساس شده، (پ) آنیل شده در دمای ۲۲۰ °C و زمان ۱ ساعت - عدم حساس سازی، (ت) آنیل شده در دمای ۲۲۰ °C و زمان ۱ ساعت - حساس شده.

آلومینیم نوردی ۵۰۸۳ ضروری به نظر می‌رسد. این عملیات علاوه بر جلوگیری از کاهش سختی آلیاژ طی زمان، از افت مقاومت به خوردگی آن نیز جلوگیری می‌کند. افزایش زمان و دمای عملیات پایداری سازی موجب افت سختی اولیه نمونه‌های نوردی شده است، اما پس از عملیات حساس‌سازی کاهش سختی نمونه‌های پایداری‌شده نسبت به نمونه‌های نوردی کمتر است. نمونه‌های بدون پایداری‌سازی، پس از حساس شدن، حدود HV ۱۵ تا HV ۲۰ افت سختی را تجربه می‌کنند در حالی که نمونه‌های پایداری‌شده با ۱۰٪ یا ۲۰٪ کارسرد، به کمتر از HV ۱۰ می‌رسد. همچنین با توجه به آزمایش مقاومت به خوردگی و بررسی ریزساختاری نمونه‌ها، با انجام عملیات پایداری‌سازی در دمای ۲۲۰ °C به مدت ۱ ساعت روی نمونه‌های با ۱۰٪ تا ۳۰٪ نورد سرد شده از کاهش مقاومت به خوردگی آنها پس از حساس‌سازی جلوگیری شده است و این نمونه‌ها نسبت به حالت نوردی و آنیل کامل کاهش جرم کمتری دارند. نمونه‌های ۱۰٪ تا ۴۰٪ کارسرد شده، بدون اعمال پایداری‌سازی و پس از حساس‌سازی، به ترتیب کاهش وزن  $8 \frac{mg}{cm^2}$  تا  $17 \frac{mg}{cm^2}$  را دارند در حالی که نمونه‌های پایداری‌شده کاهش وزن  $4 \frac{mg}{cm^2}$  تا  $14 \frac{mg}{cm^2}$  را دارند. اما عملیات پایداری‌سازی روی کاهش جرم نمونه با ۴۰٪ کار سرد تاثیر چندانی نداشته است.

عملیات، خروج اتم‌های منیزیم از ساختار و ایجاد فاز  $\beta$  به صورت پیوسته در مرزدانه در این حالت رخ داده است زیرا افزایش میزان کار سرد و چگالی نابجایی در این حالت زیاد بوده و نفوذ لوله‌ای اتم‌ها و تشکیل فاز  $\beta$  در مرزدانه‌ها با سرعت بیشتری رخ می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که پایداری‌سازی هیچ تاثیری بر بهبود مقاومت به خوردگی آلیاژ در این حالت ندارد. در نتیجه می‌توان گفت که ورق تولید شده طی سیکل ترمومکانیکی با ۴۰٪ نورد سرد، مناسب کاربرد در محیط‌های مرطوب و خورنده نیست.

در نهایت می‌توان گفت که بهترین شرایط پایداری‌سازی برای نمونه‌های C1، C2 و C3، دمای ۲۲۰ °C و زمان ۱ ساعت است. در نمونه‌ی C4 گرچه نتایج آزمایش خوردگی قابل قبول است اما با توجه به تصاویر میکروسکوپی می‌توان گفت که در هیچ حالتی مقاومت به خوردگی خوبی ندارد افزایش زمان پایداری‌سازی نیز می‌تواند منجر به تشدید خوردگی شود.

#### ۴. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش، عملیات پایداری‌سازی H321 برای استفاده‌های طولانی‌مدت از آلیاژ

## References

- [1] Yi G, Sun B, Poplawsky JD, Zhu Y, Free ML. Investigation of pre-existing particles in Al 5083 alloys. *J Alloys Compd.* 2018;740:461-9.
- [2] Polmear I. *Light alloys: from traditional alloys to nanocrystals.* Elsevier; 2005.
- [3] Huskins EL, Cao B, Ramesh KT. Strengthening mechanisms in an Al-Mg alloy. *Mater Sci Eng A.* 2010;527(6):1292-8.
- [4] Gubicza J, Chinh NQ, Horita Z, Langdon TG. Effect of Mg addition on microstructure and mechanical properties of aluminum. *Mater Sci Eng A.* 2004;387:55-9.
- [5] Radović L, Nikačević M. Microstructure and properties of cold rolled and annealed Al-Mg alloys. *Sci Tech Rev.* 2008;58(2):14.
- [6] Lee B-H, Kim S-H, Park J-H, Kim H-W, Lee J-C. Role of Mg in simultaneously improving the strength and ductility of Al-Mg alloys. *Mater Sci Eng A.* 2016;657:115-22.
- [7] Rollett A, Humphreys F, Rohrer G.S., Hatherly M. *Recrystallization and Related Annealing Phenomena.* Pergamon, 2004.
- [8] Sarkar S, Wells MA, Poole WJ. Softening behaviour of cold rolled continuous cast and ingot cast aluminum alloy AA5754. *Mater Sci Eng A.* 2006;421(1-2):276-85.
- [9] Oguocha INA, Adigun OJ, Yannacopoulos S. Effect of sensitization heat treatment on properties of Al-Mg alloy AA5083-H116. *J Mater Sci.* 2008;43(12):4208-14.
- [10] Jones RH, Baer DR, Danielson MJ, Vetrano JS. Role of Mg in the stress corrosion cracking of an Al-Mg alloy. *Metall Mater Trans A.* 2001;32(7):1699-711.
- [11] Moldovan P, Stanica CN, Ciobanu G, Ungureanu I, Iorga GM, Buju M. Intergranular corrosion of AA 5083-H321 aluminum alloy. *UPB Sci Bull Ser B.* 2014;76(3):169-80.
- [12] Yen C-H, Wu C-T, Chen Y-H, Lee S-L. Effects of annealing temperature on stress corrosion susceptibility of AA5083-H15 alloys. *J Mater Res.* 2016;31(8):1163-70.
- [13] Yan J, Heckman NM, Velasco L, Hodge AM. Improve sensitization and corrosion resistance of an Al-Mg alloy by optimization of grain boundaries. *Sci Rep.* 2016;6(1):1-10.
- [14] Meng CY, Zhang D, Cui H, Zhang JS, Zhuang LZ. Effect of stabilizing treatment on the intergranular corrosion behavior of high strength Al-Mg alloys. In: *Materials Science Forum.* Trans Tech Publ; 2014. p. 253-8.
- [15] Li CHM, Li CHM, Chen DM. Influence of Heat Treatment on Corrosive Property of 5083 Aluminum Alloy. In: *Advanced Materials Research.* Trans Tech Publ; 2013. p. 205-11.
- [16] Kramer L, Phillippi M, Tack WT, Wong C. Locally reversing sensitization in 5xxx aluminum plate. *J Mater Eng Perform.* 2012;21(6):1025-9.
- [17] امیرعباس عابدینی، حسین احمدی، صابر فرمانی، سعید شبستری. تاثیر کار سرد و دمای آنیل میانی بر ریزساختار و سختی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳. هفتمین کنفرانس بین‌المللی مواد و متالورژی (ایران). ۱۳۹۷.
- [18] Buczynski J. Electrochemical Analyses of Etchants Used to Detect Sensitization in Marine-Grade 5XXX Aluminum-Magnesium Alloys. *Mater Sci Eng Univ Virginia.* 2012;81-4.
- [19] Wen W, Zhao Y, Morris JG. The effect of Mg precipitation on the mechanical properties of 5xxx aluminum alloys. *Mater Sci Eng A.* 2005;392(1-2):136-44.
- [20] Lin S, Nie Z, Huang H, Li B. Annealing behavior of a modified 5083 aluminum alloy. *Mater & Des.* 2010;31(3):1607-12.
- [21] Yi G, Zeng W, Poplawsky JD, Cullen DA, Wang Z, Free ML. Characterizing and modeling the precipitation of Mg-rich phases in Al 5xxx alloys aged at low temperatures. *J Mater Sci Technol.* 2017;33(9):991-1003.
- [22] D'Antuono DS, Gaies J, Golumbskie W, Taheri ML. Direct measurement of the effect of cold rolling on  $\beta$  phase precipitation kinetics in 5xxx series aluminum alloys. *Acta Mater.* 2017;123:264-71.
- [23] Chen R-Y, Chu H-Y, Lai C-C, Wu C-T. Effects of annealing temperature on the mechanical properties and sensitization of 5083-H116 aluminum alloy. *Proc Inst Mech Eng Part L J Mater Des Appl.* 2015;229(4):339-46.
- [24] Zhang R, Gupta RK, Davies CHJ, Hodge AM, Tort M, Xia K, et al. The influence of grain size and grain orientation on sensitization in AA5083. *Corrosion.* 2016;72(2):160-8.
- [25] Ding Y, Wu X, Gao K, Huang C, Xiong X, Huang H, et al. The influence of stabilization treatment on long-term corrosion resistance and microstructure in Er and Zr containing 5083 aluminum alloy. *Mater Charact.* 2020;161:110143.