

## استفاده از روشی نوین جهت بررسی خوردگی موضعی آلیاژهای آلومینیوم ۲۰۲۴، ۷۰۷۵ و ۶۰۶۱ در محیط‌های شبه اتمسفر دریایی

سید سعید عظیمی ابرقوئی<sup>۱\*</sup>، احمد ساعتچی<sup>۲</sup> و رضا ابراهیمی کهریزسنگی<sup>۳</sup>

### چکیده

افزودن برخی عناصر آلیاژی مانند مس و روی به آلومینیوم و اعمال عملیات رسوب‌سختی، باعث می‌شود این آلیاژها در محیط‌های اتمسفری دریایی حساس به انواع خوردگی شوند. رسوب‌های تشکیل شده در زمینه و مرزدانه‌ها، عامل اصلی خوردگی بشمار می‌روند. بمنظور بررسی رفتار خوردگی فلزات در محیط‌های اتمسفری دریایی نیاز به محیطی شبیه‌سازی شده است تا شرایط مخرب اتمسفری کلریدی را فراهم کند. در این پژوهش از روشی جدید برای بررسی خوردگی اتمسفری استفاده شد. در ابتدا نمونه‌ها با شرایط خاص آماده‌سازی شده و در مدت زمان‌های گوناگون درون سلول‌های خوردگی قرار گرفتند به‌گونه‌ای که بلورهای نمک کلرید سدیم، روی سطح نمونه‌ها قرار داده شد و نواحی انتهایی دانه واقع در ضخامت نمونه‌ها بررسی شد. در این شرایط رطوبت نسبی ۱۰۰٪ بود. مطالعات میکروسکوپی نشان دادند، آلیاژ ۷۰۷۵ به‌دلیل حضور رسوبات در مرزدانه‌ها در کم‌تر از ۷۲ ساعت دچار خوردگی بین‌دانه‌ای شده و پس از گذشت زمان، خوردگی بین‌دانه‌ای به خوردگی حفره‌ای و پوسته‌ای شدن تبدیل شده است. خوردگی یکنواخت همراه با حفرات ریز برای آلیاژ ۲۰۲۴ رخ داده و آلیاژ ۶۰۶۱ میزان خوردگی به مراتب کم‌تری نسبت به ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ داشته است. در پایان بمنظور مقایسه رفتار خوردگی روی سطح، آلیاژها بر اساس استاندارد ASTM B117 به مدت ۶۷۲ ساعت مورد آزمون مه‌نمکی قرار گرفتند. در این شرایط، آلیاژ ۲۰۲۴ بیش‌ترین مقدار خوردگی را داشته است.

**واژه‌های کلیدی:** آلیاژهای آلومینیوم، خوردگی اتمسفری دریایی، ترکیبات بین‌فلزی، خوردگی بین‌دانه‌ای، خوردگی پوسته‌ای شدن

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد- خوردگی و حفاظت مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، نجف آباد، اصفهان، ایران

۲- استاد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مواد، اصفهان، ایران

۳- دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد، دانشکده مهندسی مواد، نجف آباد، اصفهان، ایران

\* نویسنده مسئول مقاله: seyedsaeedazimi@yahoo.com

### پیشگفتار

آلیاژهای آلومینیوم به دلیل داشتن خواص منحصر به فردی مانند نسبت استحکام به وزن بالا، جوش پذیری خوب، شکل پذیری عالی و مقاومت به خوردگی نسبتاً خوب، به گونه گسترده در انواع سازه‌ها، صنایع هوایی و دریایی، خطوط انتقال برق، حمل و نقل و... استفاده می‌شوند. با اضافه کردن عناصری مانند مس، روی و سیلیسیوم به آلومینیوم می‌توان به خواص مکانیکی بهینه رسید. در برخی آلیاژهای آلومینیوم لازم است عملیات ترمومکانیکی انجام شود. در این عملیات که بیش‌تر ویژه آلیاژهای سری ۲۰۰۰، ۷۰۰۰ و ۶۰۰۰ است، ذرات در مرزدانه‌ها رسوب کرده و در نتیجه نواحی اطراف مرزدانه‌ها از عنصر آلیاژی تهی می‌شوند و این خود می‌تواند شروعی برای خوردگی موضعی بویژه خوردگی حفره‌ای و بین-دانه‌ای باشد. بنابراین، آلیاژهای آلومینیوم با استحکام بالا مانند ۲۰۲۴، ۷۰۷۵ و ۶۰۶۱ که در صنایع گوناگون کاربرد فراوانی دارند، حساسیت زیادی به خوردگی‌های موضعی بویژه حفره‌ای و بین‌دانه‌ای دارند. این نوع خوردگی‌ها می‌توانند شروعی برای انواع خوردگی مثل پوسته‌ای شدن (Exfoliation)، خوردگی تنشی (SCC) و ترک‌های خستگی در آلیاژهای آلومینیوم باشند. فرایندهایی مانند عملیات حرارتی محلول‌جامد، کوئنچ و رسوب‌سختی، اثر قابل ملاحظه‌ای بر ترکیب شیمیایی موضعی آلیاژهای استحکام بالا و قابل عملیات دارد. به‌طور کلی هر نوع عملیاتی که باعث از بین رفتن یکنواختی در میکروساختار آلیاژ شود مقاومت به خوردگی را کاهش می‌دهد [۱].

بررسی خوردگی موضعی آلیاژهای آلومینیوم مورد نظر در محیط‌های هالیدی از اهمیت بالایی برخوردار است. محیط‌های هالیدی شامل یون‌های کلرید و یا برومید می‌توانند لایه رویین روی سطح آلومینیوم را بشکنند و سبب ایجاد خسارت روی سطح شوند. از سوی دیگر، در این آلیاژها استحکام با انجام عملیات حرارتی و با رسوب ترکیبات شامل مس، روی و منیزیوم افزایش می‌یابد. انحلال این رسوبات در دماهای بالا (حدود  $480^{\circ}\text{C}$ ) محلول فوق اشباع از این عناصر را بوجود می‌آورد که تحت عملیات حرارتی، ترکیبات ریز شامل این عناصر رسوب می‌کنند. رشد همین ترکیبات، سبب ایجاد ساختاری

ناهمگون شده که افزون بر کاهش استحکام، در رشد لایه پسیو تشکیل شده چه در هوا و چه در محیط‌های آبی، اختلال به وجود می‌آورند. از این رو، محل شروع حفره‌دارشدن را می‌توان به نقاط ضعیف در لایه پسیو مرتبط دانست. برخلاف فلزات دیگر که خوردگی باعث کاهش کلی ضخامت می‌شود در آلومینیوم خوردگی تمایل دارد به صورت موضعی در سراسر سطح، حفرات زیادی تولید کند و در کل بخش وسیعی از سطح دست نخورده باقی می‌ماند [۲].

تا کنون پژوهش‌های زیادی در رابطه با خوردگی موضعی آلیاژهای آلومینیوم در محلول‌های کلریدی انجام گرفته است. برای مثال، در سال ۲۰۰۴ سینیاوسکی و کالینین به بررسی خوردگی آلیاژهای آلومینیوم در آب دریا پرداخته‌اند [۴]، ولی در مجموع کم‌تر به موضوع خوردگی اتمسفری پرداخته شده است. بتازگی کوزنیکا در سال ۲۰۰۹ در مورد آلیاژ ۲۰۱۷ [۵]، لی و همکارانش روی آلیاژ ۲۰۱۲ [۶] و نایت و همکارانش در سال ۲۰۱۱ در مورد آلیاژهای ۲۰۲۴ و ۷۰۵۰ [۷] و [۸]، مقالاتی در این زمینه به چاپ رسانده‌اند. خوردگی اتمسفری نوع خاصی از خوردگی بوده که به علت تشکیل یک لایه الکترولیت روی سطح که بیش‌تر فیلم نازکی از رطوبت است، بوجود می‌آید. ضخامت این لایه از ۱۰۰ میکرومتر تجاوز نمی‌کند و می‌توان فرض کرد این لایه همیشه اشباع از اکسیژن است. وقتی فلز در آب یا محلول نمکی مانند کلرید سدیم غوطه‌ور است به دلیل کاهش نفوذ اکسیژن در نواحی کاتدی نرخ خوردگی کاهش می‌یابد، ولی در خوردگی اتمسفری به دلیل این که گاهی لایه الکترولیت روی سطح خشک می‌شود یک شرایط تناوب خشک و تر بوجود می‌آید که باعث تشدید خوردگی نیز می‌شود [۳]. یون کلر نقش اصلی در خوردگی را ایفا می‌کند. مقدار خوردگی محیط به شدت تابع غلظت یون کلر در اتمسفر است [۱]. یون کلر باعث تخریب و سوراخ شدن لایه اکسیدی محافظ می‌شود. بر اساس پژوهش‌های بروکشیتیس و کلارک [۹] وجود این یون در اتمسفرهای دریایی باعث می‌شود که نرخ خوردگی آلومینیوم حدود ۲۲ برابر بیش‌تر از نرخ خوردگی اتمسفرهای روستایی شود.

خوردگی موضعی از نواحی انتهایی دانه (End Grain) در محیطی شبیه‌سازی شده از اتمسفر دریایی برای آلیاژهای رسوب‌سختی شده ۲۰۲۴، ۷۰۷۵ و ۶۰۶۱ که کاربردی بسیار گسترده در صنایع هوافضا و دریایی دارند، بررسی شود. به این منظور، یک سری سلول خوردگی خاص طراحی شد. ویژگی این سلول‌ها این است که برای سطح مقطع مورد نظر نمونه شرایطی فراهم می‌کند که بدون تماس مستقیم با محلول، شرایط محیطی حاوی یون کلر را ایجاد کند. سطح مقطع نمونه‌ها در طرف ضخامت در معرض محیط خورنده قرار می‌گیرند. آزمون مهنمکی روشی معمول در مطالعات خوردگی اتمسفری دریایی است که شرایطی تشدید شده از محیط خورنده دریایی را فراهم می‌کند و در این پژوهش بمنظور مقایسه رفتار خوردگی سطوح نمونه‌ها استفاده شد.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش از سه آلیاژ آلومینیوم شامل آلیاژهای T۳-۲۰۲۴ و T۶-۷۰۷۵ و T۴-۶۰۶۱ استفاده شد. ترکیب شیمیایی آلیاژهای مورد استفاده به وسیله دستگاه کوانتومتر اندازه‌گیری شده و در جدول ۱ نشان داده شده است. بمنظور بررسی خوردگی اتمسفری، شرایط آزمایشی طراحی شد که محیطی شبیه‌سازی شده از اتمسفر دریایی را فراهم کند. به این منظور، از هر کدام از آلیاژها تعداد ۱۶ نمونه با ابعاد  $۰/۲۳ \times ۱ \times ۲$  سانتیمتر به وسیله قیچی بریده شد به‌گونه‌ای که سطح مقطع محل مورد بررسی عمود بر جهت نورد بود. شکل الف سطح مورد نظری که در معرض محیط خورنده قرار گرفته را نشان می‌دهد. سطح مقطع مورد نظر کاملاً با کاغذ سمباده SiC تا شماره ۲۵۰۰ سمباده‌کاری و سپس به وسیله خمیر آلومینا تا ۶ میکرومتر پولیش شد. سپس تمام سطوح دیگر نمونه با لاک پوشانده شده تا در روند خوردگی تاثیری نداشته باشند. برای انجام آزمایش از یک سری سرنگ استفاده شد. نمونه‌ها به ته پیستون‌ها چسبانده شده و پس از شستشو با اتانول و خشک کردن، مقداری بلور نمک کلرید سدیم (NaCl) روی سطح مقطع تمام نمونه‌ها ریخته شد و سپس داخل سرنگ‌ها قرار گرفتند و در جای ثابتی بدون حرکت نگه داشته شدند. برای تهیه شرایط

حساسیت به خوردگی وابستگی زیادی به ساختار شکل گرفته در فرآیندهای آلیاژسازی، شکل‌دهی و عملیات حرارتی دارد. ترکیبات بین‌فلزی نقش بسیار مهمی در خوردگی بین‌دانه‌ای دارند. ترکیب شیمیایی، اندازه، نحوه توزیع و جهت رشد این ترکیبات از عوامل تأثیرگذار است [۱۰]. خوردگی‌های موضعی بویژه حفره‌ای و بین‌دانه‌ای باعث شده تا کارشناسان در تعیین زمان عمر سازه‌های آلومینیومی دچار مشکل شوند و نتوانند گزارش‌های دقیقی ارائه دهند. برخلاف مطالعات بسیار زیادی که طی ۸۰ سال روی خوردگی موضعی آلومینیوم انجام شده هنوز این خوردگی کاملاً شناخته شده نیست. همان‌گونه که بیان شد، بررسی خوردگی بین‌دانه‌ای آلیاژهای آلومینیوم در محیط‌های گوناگون کلریدی، به‌صورت غوطه‌وری و به وسیله پلاریزاسیون الکتروشیمیایی انجام شده است در حالی که این نمی‌تواند به‌درستی شرایط محیطی واقعی در اتمسفر را بیان کند. نخستین روش برای بررسی خوردگی اتمسفری قرار دادن نمونه‌ها در نواحی مورد نظر است، ولی این روش بسیار طولانی بوده و در بسیاری از موارد امکان‌پذیر نیست. روش‌هایی دیگری هم مانند آزمون مه نمکی وجود دارد که محیطی شبیه به اتمسفر دریایی فراهم می‌کنند، ولی باز محدودیت‌هایی در استفاده از آن‌ها وجود دارد. در این پژوهش روشی نوین برای بررسی خوردگی اتمسفری دریایی بکار برده می‌شود به‌گونه‌ای که با آغشته‌کردن سطح آلیاژ با نمک کلرید سدیم و قراردادن آن در محیطی مرطوب شرایطی خورنده برای ایجاد خوردگی ایجاد می‌شود. با این کار می‌توان محیطی شبیه به اتمسفرهای دریایی ایجاد کرد و نتایج بدست آمده را با شرایط واقعی تعمیم داد.

در رابطه با خوردگی اتمسفری آلومینیوم مطالب اندکی به چاپ رسیده است حتی از فلزاتی مانند فولاد کم‌کربن، روی و مس، کم‌تر به این موضوع پرداخته شده است. با توجه به اهمیت موضوع و مقاله‌های اندک چاپ شده در این زمینه بنظر می‌رسد این مقوله هنوز نیاز به پژوهش‌های بیشتری داشته باشد. شمار زیادی از خسارت‌های ناشی از خوردگی در صنعت از لبه سازه‌ها و قطعات است. در این پژوهش سعی بر آن است که رفتار

غیر از نمونه‌های آزمون مهنمکی، در راستای عمود بر جهت نورد و از ناحیه سطح مقطع ضخامت مورد بررسی قرار می‌گیرند.

شکل ۲ تصاویر SEM و آنالیز EDS از نمونه‌های خارج شده از سلول خوردگی پس از ۶۷۲ ساعت (چهار هفته) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از تصاویر مشخص است، مقدار خوردگی در آلیاژهای ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ به مراتب بیش‌تر از آلیاژ ۶۰۶۱ بوده است. محصولات خوردگی به رنگ خاکستری کاملاً روی سطح نمونه‌ها دیده می‌شوند. مقدار بالای آلومینیوم و اکسیژن در محصولات خوردگی به دلیل تشکیل لایه اکسیدی از اکسید آلومینیوم ( $Al_2O_3$ ) است. درمورد آلیاژ ۲۰۲۴ مقدار شایان توجه مس و برای آلیاژ ۷۰۷۵ هم مقدار بالای روی در محصولات خوردگی نشان از تشکیل ترکیبات مس و روی دارد. حضور کلر نیز حاکی از شرکت آن در تشکیل محصولات خوردگی و تشکیل ترکیبات کلردار است.

برای تعیین نوع خوردگی و بررسی رفتار آن نیاز است که محصولات خوردگی کاملاً از روی سطح برداشته شوند. برای این منظور از استاندارد ASTM G1 استفاده شد. پس از پاک شدن محصولات خوردگی، روی سطح آلیاژ ۷۰۷۵ ترک‌های بزرگ با عمق زیاد مشاهده می‌شود. نتایج حاکی از آن است که حتی در زمان‌های خیلی کوتاه خوردگی بین‌دانه‌ای وجود داشته است. در شکل ۳ وقوع ترک در لحظات ابتدایی مشاهده می‌شود. در این شکل نمونه به مدت ۷۲ ساعت در سلول خوردگی قرار داشته است. در بررسی نمونه‌هایی که در مدت‌های کم‌تر مانند ۴۸ ساعت در سلول خوردگی بوده‌اند چنین ترک‌هایی مشاهده نشده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت شروع خوردگی در بین ساعت‌های ۴۸ تا ۷۲ بوده است.

شکل ۴ سطح مقطع آلیاژ ۷۰۷۵ را که به مدت ۱۶۸ ساعت در سلول خوردگی بوده است را نشان می‌دهد. در این مدت ترک‌ها رشد کرده و به صورت ترکی با طول بزرگ و عمق زیاد در راستای موازی با کشیدگی دانه‌ها پیش‌روی داشته است. بر اساس اندازه‌گیری‌هایی که با میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام گرفت، طول دهانه ترک در مواردی به ۲۰ میکرون رسیده است. در شکل ۴ دهانه ترک در بزرگنمایی بالاتر نیز نشان داده شده است.

محیطی اتمسفری مرطوب، به داخل سرنگ‌ها آب مقطر تزریق شد به‌گونه‌ای که تا نیمه نمونه بالا بیاید و در آخر محیط داخل سرنگ‌ها یا همان سلول‌های آزمایش خوردگی توسط موم بسته شد تا بر اساس استاندارد ASTM E104-85 محیطی با رطوبت نسبی ۱۰۰٪ داشته باشیم. تمام این مراحل به این منظور انجام شد که محلول در تماس مستقیم با محل مورد بررسی نمونه نباشد و شرایطی از خوردگی اتمسفری ایجاد شود. تصاویر سلول‌های خوردگی و روش قرار گرفتن نمونه‌ها در آن‌ها در شکل ۱ مشاهده می‌شود. نمونه‌ها در مدت زمان‌های ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶، ۱۶۸، ۳۳۶، ۵۰۴ و ۶۷۲ ساعت از سلول خوردگی خارج و با آب مقطر شسته و خشک شدند. برای بالا بردن دقت در هر زمان از دو سلول خوردگی با شرایط یکسان استفاده شد.

در آزمایشی دیگر از هر سه آلیاژ تعداد دو نمونه با ابعاد  $0/13 \times 5 \times 5$  سانتیمتر تهیه و پس از سمباده کاری تا شماره ۱۲۰۰، بر اساس استاندارد ASTM B117 در دستگاه آزمون مهنمکی به مدت ۶۷۲ ساعت قرار داده شدند.

برای از بین بردن محصولات خوردگی، بر اساس استاندارد ASTM G1 نمونه‌ها به مدت پنج دقیقه در محلول (۸۵٪ وزنی)  $50 \text{ ml H}_3\text{PO}_4$  و  $20 \text{ g CrO}_3$  که با آب مقطر به حجم یک لیتر رسیده است در دمای  $90^\circ\text{C}$  قرار گرفتند. برای نمایان کردن ریزساختار و نحوه دانه‌بندی از محلول زیر استفاده شد.

$2/5 \text{ ml HNO}_3$  (۶۵٪ وزنی) +  $1/5 \text{ ml HCl}$  (۳۷٪ وزنی) +  $1 \text{ ml HF}$  (۴۸٪ وزنی) +  $95 \text{ ml H}_2\text{O}$

بمنظور مطالعه رفتار خوردگی از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به آنالیز EDS و نرم‌افزار پردازش‌گر تصویر برای تعیین مقدار نفوذ خوردگی استفاده شد.

## نتایج و بحث

پیش از این‌که به تفسیر تصاویر و نتایج پرداخته شود، در نظر گرفتن این نکته اهمیت دارد که هدف از این پژوهش بررسی خوردگی از نواحی انتهایی دانه (End Grain) بوده است برای همین تمام نمونه‌ها به

نتایج آنالیز EDS نشان می‌دهد که این رسوبات حاوی عناصر Al, Cu, Mn, Si و Fe هستند. نکته دارای اهمیت در آنالیز EDS حضور عنصر Fe، در این ترکیبات رسوب کرده است. Fe یک عنصر مضر در ساخت آلیاژهای آلومینیوم است و به‌گونه ناخواسته وارد آلیاژ می‌شود و موجب بوجود آمدن ترکیبات بین‌فلزی آهن‌دار زیادی مانند  $Al_3Fe$ ،  $Al_6Fe$  و  $Al_7Cu_2Fe$  می‌شود [۱۱]. این رسوبات و بویژه  $Al_3Fe$  به عنوان ذرات کاتدی محل آزاد شدن یون‌های هیدروکسیل ( $OH^-$ ) می‌شوند. pH در محل این رسوبات به علت احیای اکسیژن به‌گونه موضعی قلیایی می‌شود و زمینه اطراف خورده می‌شود و حفره‌ها جوانه می‌زنند. در برخی از موارد، رسوبات در حین آلیاژسازی و طی مرحله ریخته‌گری در اثر واکنش عناصر آلیاژی اصلی با عناصر ناخالصی نظیر آهن تشکیل می‌شوند. با توجه به حضور درصد شایان توجهی از آهن در آلیاژ و از سوی دیگر، حلالیت کم آهن در زمینه آلومینیوم انتظار می‌رود که آهن اضافه بر حد حلالیت، در حین انجماد به شکل فازهای غنی از آهن رسوب دهد [۱۱].

در شکل ۷ ترک‌های خوردگی بین‌دانه‌ای مشاهده می‌شود که موازی با جهت‌گیری دانه‌هاست. این ترک‌ها در محیط‌های خورنده با گذشت زمان رشد کرده و می‌توان گفت خوردگی بین‌دانه‌ای به پوسته‌ای شدن تبدیل می‌شود. با شروع خوردگی موضعی زمینه به‌طور سطحی حل می‌شود، اما طول رسوبات کاتدی محدود به سطح نیست بلکه در عمق نمونه فرو می‌رود. بنابراین، انحلال زمینه از لایه‌های سطحی به سمت داخل نمونه منتقل می‌شود. انحلال زمینه آلومینیوم می‌تواند به سطح زیرین این رسوبات برسد. در این صورت زمینه برای ادامه پیشروی از زیر رسوبات کانال می‌زند. با این مکانیزم پیوند رسوب با زمینه سست شده و سرانجام رسوب از زمینه جدا می‌شود. [۱۱].

تقریباً بیش‌تر بررسی‌های میکروسکوپی ۳۲ نمونه از آلیاژهای ۲۰۲۴ و ۶۰۶۱ که مانند ۷۰۷۵ در سلول خوردگی قرار داشته‌اند نشان می‌دهد که در هیچ یک از نمونه‌ها ترک مشاهده نشده است. خوردگی در این آلیاژها به‌گونه یکنواخت و حفره‌ای بوده است. آلیاژ ۲۰۲۴ پس از قرارگیری در سلول خوردگی مانند ۷۰۷۵ به سرعت از

با گذشت زمان ترک‌ها بزرگ‌تر شده‌اند به‌گونه‌ای که در نمونه‌هایی که به مدت ۶۷۲ ساعت در سلول خوردگی بوده‌اند، ترک‌ها تبدیل به حفراتی بزرگ و عمیق شده‌اند. این خوردگی را می‌توان از نوع خوردگی پوسته‌ای شدن (Exfoliation) در نظر گرفت. همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است، تقریباً در تمام سطح، حفرات ریزی نیز مشاهده می‌شود. این حفرات به‌دلیل مستعد بودن آلیاژ به خوردگی حفره‌ای در محیط‌های حاوی یون کلر است. یون کلر شعاع یونی نسبتاً کوچکی داشته و هم‌چنین، در محلول‌های آبی از موبیلیته بالایی برخوردار است. بنابراین، در لایه اکسیدی روی سطح نفوذ کرده و باعث تشکیل حفره می‌شود. هم‌چنین،  $Cl^-$  می‌تواند جانشین  $OH^-$  در ترکیب  $Al(OH)_3$  شود و تولید  $AlCl_3$  کند و این باعث می‌شود فیلم اکسیدی محافظ، خاصیت خود را از دست بدهد [۱]. خوردگی اصلی که موجب خسارت و گه‌گاه شکست زود هنگام قطعه می‌شود، ترک‌های بزرگ و عمیقی است که در شکل ۵ به وضوح مشاهده می‌شود. در اطراف ترک اصلی یک سری شیارهایی نیز مشاهده می‌شود. این شیارها به‌دلیل وقوع مکان‌های کاتدی و آندی در اطراف ترک است، ولی این مسئله کاملاً روشن است که خوردگی در محل ترک به صورت کاملاً موضعی تشدید شده است.

بمنظور بررسی چگونگی وقوع خوردگی باید به دانه‌بندی آلیاژ توجه کرد. همان‌گونه که در شکل ۶الف مشاهده می‌شود، دانه‌ها با جهت‌گیری یکسانی در امتداد یک‌دیگر کشیده شده‌اند. با مقایسه نمونه‌های خورده شده دیده می‌شود که همیشه جهت ترک موازی با جهت کشیدگی دانه‌هاست. هم‌چنین، برای بررسی رفتار خوردگی ناگزیر باید به بررسی ذرات بین‌فلزی پرداخت زیرا این ذرات باعث ایجاد مکان‌های ترجیحی برای شروع و ادامه خوردگی می‌شوند. این ذرات با رسوب در ساختار و مرزانه‌ها عامل اصلی وقوع خوردگی‌های موضعی از جمله بین‌دانه‌ای و حفره‌ای هستند. شکل ۶ب ذرات بین‌فلزی در ساختار آلیاژ ۷۰۷۵ را نشان می‌دهد که رنگ روشن‌تر از زمینه دارند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بخشی از ذرات بین‌فلزی در مرزانه‌ها رسوب کرده‌اند. این رسوبات به صورت پراکنده توزیع شده و اشکال نامنظمی دارند.

خود واکنش نشان داده و خورده شده است. به گونه ای که در همان ساعات ابتدایی محصولات خوردگی روی سطح نمایان شده‌اند، ولی با شستشوی محصولات خوردگی مشاهده می‌شود خوردگی از نوع حفره‌ای و یکنواخت بوده و هیچ گونه آثاری از ترک دیده نمی‌شود. آلیاژ ۶۰۶۱ بر خلاف دو آلیاژ دیگر نرخ خوردگی بسیار پایینی داشته و تنها تعداد معدودی حفره روی سطح آن مشاهده می‌شود. شکل ۸ تصاویر SEM از سطح نمونه‌های خورده شده را نشان می‌دهد که از محصولات خوردگی پاک شده‌اند.

### آزمون مهنمکی

بمنظور مقایسه نوع خوردگی در سطوح گوناگون فلز، آلیاژها مورد آزمون مهنمکی به مدت ۶۷۲ ساعت قرار گرفتند. در این آزمون محل مورد بررسی سطح آلیاژها بوده است. برای بررسی ابتدا نیاز است که نحوه دانه‌بندی و قرارگیری رسوبات بین‌فلزی تعیین شود. شکل ۹ الف چگونگی دانه‌بندی آلیاژ ۷۰۷۵ و شکل ۹ ب ذره‌ای بین‌فلزی که در ساختار فلز قرار گرفته است را نشان می‌دهد. این ذرات باعث تشدید اختلاف پتانسیل بین نواحی گوناگون ساختار فلز شده و خوردگی را تشدید می‌کنند. در مورد آلیاژ ۲۰۲۴ و ۶۰۶۱ نیز تقریباً دانه‌بندی مشابهی با آلیاژ ۷۰۷۵ مشاهده شد. همان‌گونه که در شکل ۹ ب مشخص است، رسوب ذرات بین‌فلزی که با رنگ روشن مشاهده می‌شود در ساختار کاملاً مشهود است. این ذرات ماهیت کاتدی داشته و خوردگی موضعی را تشدید می‌کنند. شکل ۱۰ تصاویر SEM از نواحی خورده شده آلیاژها را نشان می‌دهد. ترک‌های ایجاد شده و وقوع خوردگی بین‌دانه‌ای و حفره‌ای در آلیاژ ۲۰۲۴ مشاهده می‌شود. از عوامل موثر بر خوردگی آلیاژ ۲۰۲۴ حضور یون مس در لایه اکسید آلومینیوم است. در حین رشد فیلم اکسیدی، احیا اکسیژن به وسیله اکسیداسیون آب بر سطح آلومینیوم خالص قابل نظر است زیرا به دلیل مقاومت بالای لایه اکسیدی انتقال الکترون از فصل مشترک لایه اکسیدی/الکترولیت به سمت فلز ناچیز است، اما عناصر آلیاژی اصلی، مانند مس یا ترکیبات بین‌فلزی حاوی مس می‌توانند مکان‌های کاتدی مناسبی جهت احیا اکسیژن باشند [۱۲]. در تصاویر شکل ۱۰ و تصاویر

میکروسکوپی دیگر مشخص است مقدار خوردگی آلیاژ ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ به شدت بیش‌تر از ۶۰۶۱ بوده است. شکل ۱۱ میزان عمق و پهناهای عمیق‌ترین حفره در آلیاژهای ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ را نشان می‌دهد. آلیاژ ۲۰۲۴ دارای حفره‌ای با عمق ۲۳۰ و پهناهای ۱۲۲۵ میکرون بوده است. پس بیش‌ترین مقدار خوردگی را داشته است.

در تمام نمونه‌ها این موضوع دیده می‌شود که خوردگی آلیاژهای ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ در شرایط محیطی دریایی حاوی یون کلر موضعی بوده و بیش‌تر به صورت حفره و گاهی به صورت ترک‌های بین دانه‌ای رخ می‌دهد. بیش‌تر بررسی‌ها نشان می‌دهند که خوردگی بین‌دانه‌ای آلیاژهای آلومینیوم به دلیل تشکیل سلول‌های گالوانیکی که در مرز دانه‌ها بوجود می‌آیند، رخ می‌دهد. در واقع می‌توان گفت ترکیب شیمیایی متفاوت ترکیب بین‌فلزی و فاز زمینه باعث ایجاد یک پیل گالوانیک بین این دو بخش شده است. واکنش کاتدی در این پیل احیای اکسیژن و تشکیل یون هیدروکسید است که در اثر لایه اکسیدی اطراف ترکیب بین‌فلزی حل می‌شود. وقتی این لایه حل شد، قلیایی شدن موضعی موجب ایجاد خوردگی شیاری در فصل مشترک بین ذره و زمینه می‌شود. واکنش آندی متناظر با واکنش کاتدی مزبور نیز رشد لایه پسیو بر روی زمینه و افزایش ضخامت این لایه است. ضمن این‌که واکنش آلومینیوم با یون کلر موجود در محیط می‌تواند محصول خوردگی را در ترکیب بین‌فلزی ایجاد کند [۱۳]. در مورد آلیاژهای سری ۲۰۰۰ خوردگی بین‌دانه‌ای بستگی به میزان مس و منیزیم موجود در آلیاژ دارد. رسوب فاز  $Al_2Cu$  (نسبت به  $\alpha-Al$ ، کاتدی است) یا  $Al_2CuMg$  و  $Al_2Mg_3$  (نسبت به  $\alpha-Al$ ، آندی است) باعث خوردگی بین‌دانه‌ای می‌شود [۱۴].

گفتنی است در بررسی‌های میکروسکوپی از سطح آلیاژ ۷۰۷۵ خورده شده مقدار کمی ترک‌های بین‌دانه‌ای مشاهده شد. از این مطلب می‌توان نتیجه گرفت با این‌که این آلیاژ از نواحی انتهایی دانه و از طرف ضخامت قطعه در محیط‌های کلریدی بسیار مستعد به خوردگی بین‌دانه‌ای است، ولی در روی سطح مقدار خوردگی کم‌تری نسبت به آلیاژ ۲۰۲۴ داشته است. البته، از این مطلب نمی‌توان نتیجه گرفت که آلیاژ ۷۰۷۵ مستعد به این نوع خوردگی

آلیاژ در مدت زمان کمتر از ۷۲ ساعت ترک خورده و با گذشت ۱۶۸ ساعت دهانه ترک نزدیک به ۲۰ میکرون رسیده است. آلیاژ ۲۰۲۴ در نواحی انتهایی دانه دچار خوردگی یکنواخت همراه با حفرات ریز شده است، ولی در بررسی سطح آن در آزمون مه‌نمکی بیش‌ترین مقدار خوردگی را با داشتن حفره‌هایی با عمق حدود ۲۳۰ و پهنای ۱۲۲۵ میکرون داشته است. آلیاژ ۶۰۶۱ هم از نواحی انتهایی دانه و هم روی سطح کم‌ترین مقدار خوردگی را داشته است.

از متفاوت بودن نتایج دو آزمایش می‌توان نتیجه گرفت بررسی خوردگی در نواحی انتهایی دانه واقع در ضخامت قطعه اهمیت بالایی دارد زیرا حاوی نتایج جدیدی است.

### سپاسگزاری

در پایان از شرکت هواپیماسازی ایران (هسا) به دلیل فراهم کردن مواد اولیه سپاسگزاری می‌کنیم.

### References

- 1- C. Vargel, Corrosion of Aluminium, 2th ed., Elsevier, Lyon, 2004.
- 2- M. A. Golozar, "Electrochemical Investigation of Localized Corrosion Behavior of Heat Treated AA7075 in Aqueous Solution Containing Chloride Ions", 12th National, Iranian Corrosion Congress, Iran, 2011.
- 3- D. De La Fuente, E. Otero-Huerta and M. Morcillo, "Studies of Long-Term Weathering of Aluminium in the Atmosphere", Corrosion Science, Vol. 49, pp. 3134-3148, 2007.
- 4- V. S. Sinyavskii and V. D. Kalinin, "Marine Corrosion and Protection of Aluminum Alloys According to Their Composition and Structure", Protection of Metals, Vol. 41, pp. 317-328, 2005.
- 5- B. Kuźnicka, "Influence of Constitutional Liquefaction on Corrosion Behaviour of Aluminium Alloy 2017A", Material Characterization, Vol. 60, pp. 1008-1013, 2009.
- 6- T. Li, X.G. Li, C.F. Dong, and Y.F. Cheng "Characterization of Atmospheric Corrosion of 2A12 Aluminum Alloy in Tropical Marine Environment " Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 19, pp. 591-598, 2010.

نیست بلکه می‌توان گفت در شرایط اتمسفری کلریدی نسبت به آلیاژ ۲۰۲۴ مقاومت بیش‌تری نسبت به خوردگی بین‌دانه‌ای در روی سطح داشته است. بیان این نکته ضرورت دارد که هر سه آلیاژ ۲۰۲۴، ۷۰۷۵ و ۶۰۶۱ در محیط‌های کلریدی بویژه در محیط‌هایی مانند آب دریا مستعد به خوردگی بین‌دانه‌ای و حفره‌ای هستند.

### نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهند که روش استفاده شده در این پژوهش روشی مناسب در مطالعه خوردگی اتمسفری است زیرا شرایط تشدید شده اتمسفری را فراهم می‌کند و مکان مورد بررسی در تماس مستقیم با محلول نیست.

در بررسی نواحی انتهایی دانه واقع در ضخامت، آلیاژ ۷۰۷۵ بسیار مستعد به خوردگی موضعی بوده است. به‌گونه‌ای که ابتدا از ترک‌های بین‌دانه‌ای شروع شده و سپس به خوردگی پوسته‌ای شدن تبدیل شده است. این

- 7- S.P. Knight, M. Salagaras and A.R. Trueman, "The Study of Intergranular Corrosion in Aircraft Aluminium Alloys Using", Corrosion Science, Vol. 53, pp. 727-734, 2011.
  - 8- S.P. Knight, M. Salagaras, A.M. Wythe, F. De Carlo, A.J. Davenport and A.R. Trueman, "In Situ X-Ray Tomography of Intergranular Corrosion of 2024 and 7050 Aluminium Alloys", Corrosion Science, Vol. 52, pp. 3855-3860, 2010
  - 9- G.K. Berukshtis and G.B. Klark, "Corrosion of Metals and Alloys", Jerusalem, pp. 281-297, 1966.
  - 10- W. Zhen-Yao, Li Qiao-Xia, Wang Chuan, Han Wei and Yu Guo-Cai, "Corrosion Behaviour of Al Alloy LC4 in Geermu Salt Lake Atmosphere", The Chinese Journal of Nonferrous Metals, Vol. 17, pp. 24-29, 2007.
  - 11- R., Ambat, A.J., Davenport, G.M., Scamans, and A., Afseth, "Effect of Iron-Containing Intermetallic Particles on the Corrosion Behaviour of Aluminium", Corrosion Science, Vol. 48, No. 11, pp.3455-3471, 2006.
- ۱۲- م. سعیدی خانی، م. جاویدی، ع. یزدانی، س، وفاخواه، "آندایزینگ آلیاژ آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ در الکترولیت ترکیبی

اسید سولفوریک، بوریک و فسفریک و تعیین ضخامت لایه اکسیدی و بررسی رفتار خوردگی به روش امپدانس الکتروشیمیایی " مجله مواد نوین، شماره چهارم، جلد دوم، ص. ۴۴-۳۱، تابستان ۱۳۹۱.

13- N. Birbilis and R.C. Buchheit, "Electrochemical Characteristics of Intermetallic Phases in Aluminum Alloys", Journal of the Electrochemical Society, B,

152(4), pp.140-151, 2005.

14- RG. Buchheit, "A compilation of Corrosion Potentials Reported for Intermetallic Phases in Aluminium Alloys", Journal of Electrochemical Society, Vol. 142, pp. 3994-3996, 1995.

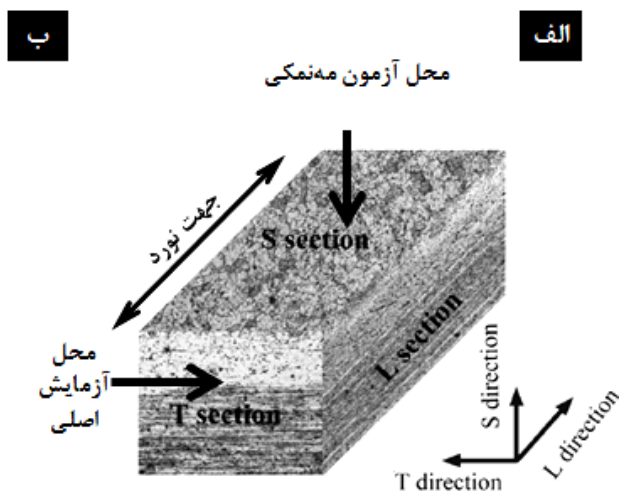
**پیوست‌ها**

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژهای مورد آزمایش.

%Cr	%Ti	%Fe	%Mn	%Mg	%Si	%Zn	%Cu	%Al	آلیاژ / درصد وزنی
۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۱۶	۰/۶۲	۱/۴۳	۰/۰۴۵	۰/۰۷	۴/۳۸	بقیه	۲۰۲۴-T۳
۰/۲۰	۰/۰۳	۰/۲۶	۰/۰۴	۲/۴۲	۰/۰۶	۵/۹۱	۱/۸۳	بقیه	۷۰۷۵-T۶
۰/۱۴	۰/۰۳	۰/۳۶	۰/۰۹	۰/۸۶	۰/۶۳	۰/۰۳	۰/۳۲	بقیه	۶۰۶۱-T۴

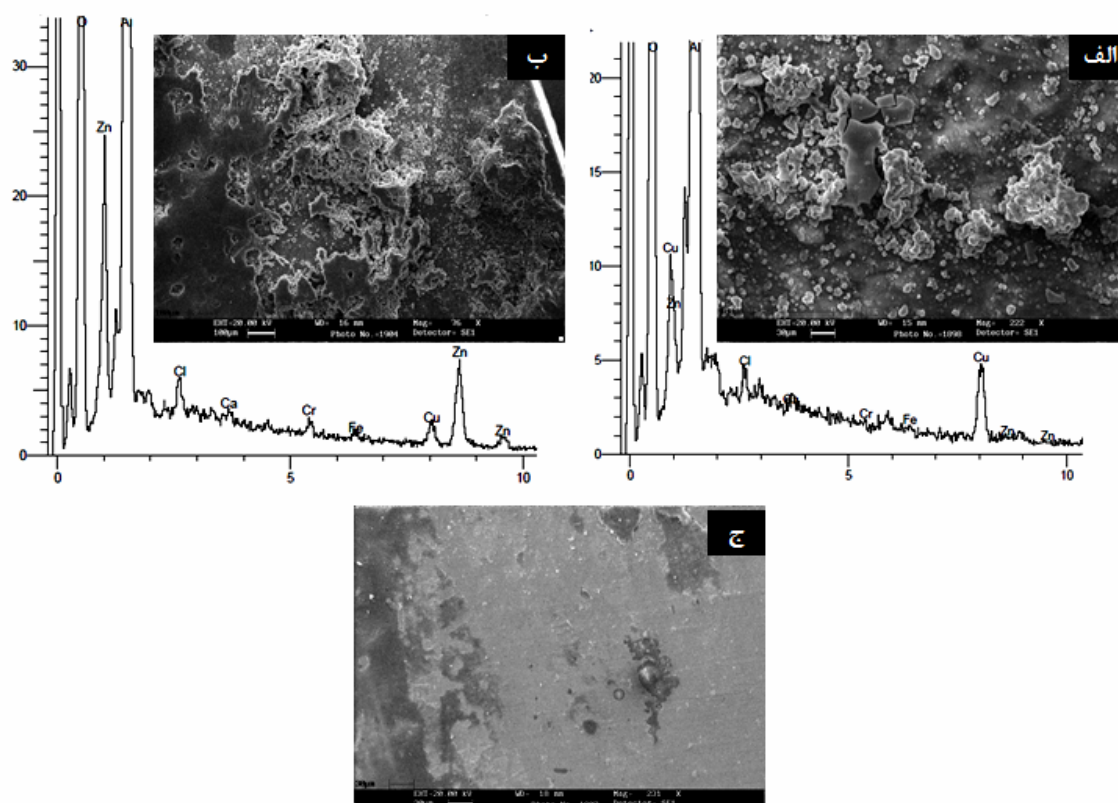


سلول‌های خوردگی



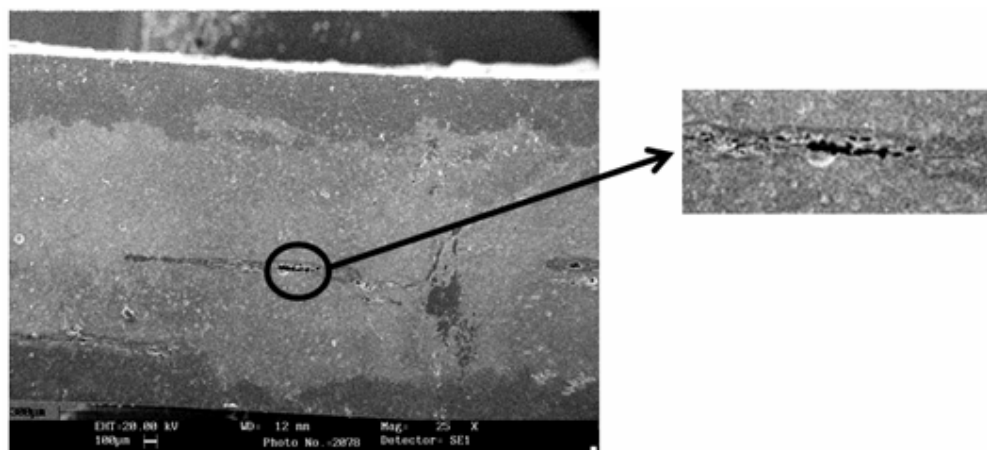
شکل ۱- الف: تصویر شماتیک از مقاطع نمونه (محل‌های مورد بررسی با فلش نشان داده شده‌اند). ب: سلول خوردگی و نحوه قرارگیری نمونه‌ها.



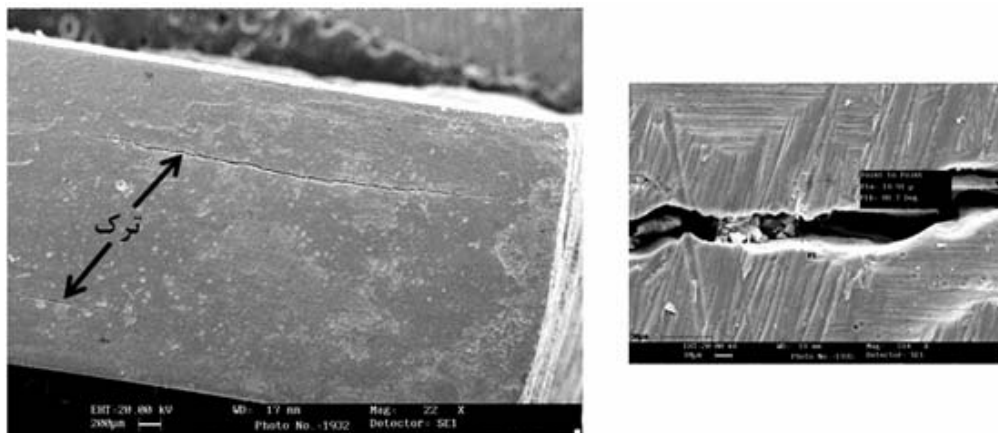


شکل ۲- نتایج آنالیز SEM/EDS از محصولات خوردگی آلیاژی که به مدت ۶۷۲ ساعت در سلول خوردگی بوده‌اند.

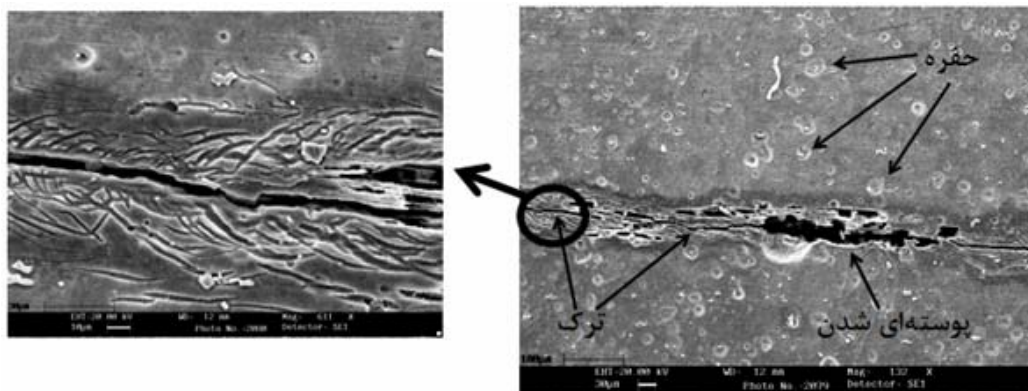
الف: ۲۰۲۴ ب: ۷۰۷۵ ج: ۶۰۶۱



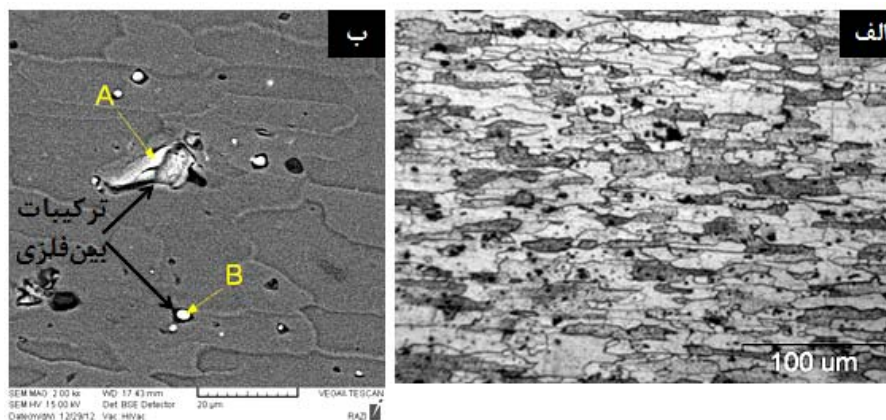
شکل ۳- تصویر SEM از سطح مقطع آلیاژ ۷۰۷۵ که به مدت ۷۲ ساعت در سلول خوردگی بوده است.



شکل ۴- تصاویر SEM از سطح مقطع آلیاژ ۷۰۷۵ که به مدت ۱۶۸ ساعت در سلول خوردگی بوده است.



شکل ۵- تصاویر SEM از سطح مقطع آلیاژ ۷۰۷۵ که به مدت ۶۷۲ ساعت در سلول خوردگی بوده است.



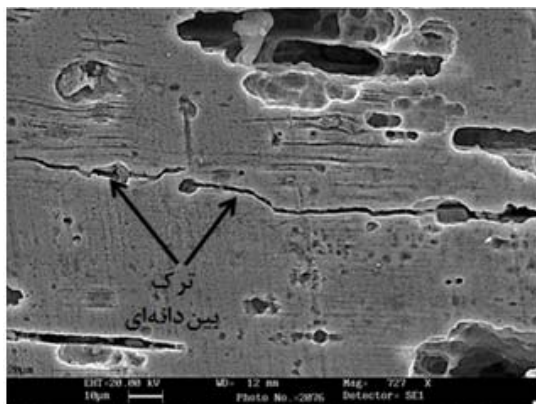
## Spectra: A

Element	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [wt.-%]
Aluminium	K series	36.45	52.61	71.80
Manganese	K series	0.06	0.09	0.06
Iron	K series	6.32	9.12	6.02
Copper	K series	26.45	38.18	22.13

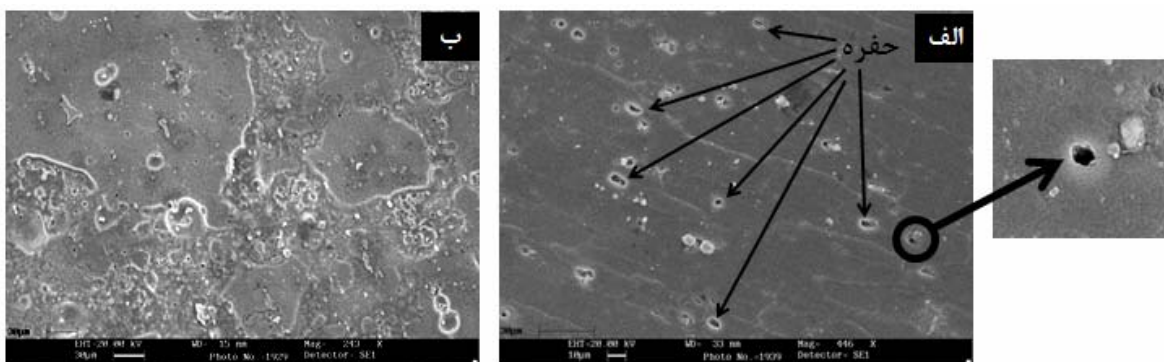
## Spectra: B

Element	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [wt.-%]
Aluminium	K series	36.31	40.12	61.14
Silicon	K series	0.03	0.04	0.06
Manganese	K series	0.71	0.79	0.59
Iron	K series	0.12	0.13	0.10
Copper	K series	53.32	58.92	38.12

شکل ۶- الف: تصویر میکروسکوپ نوری از دانه‌بندی آلیاژ ۷۰۷۵ پولیش و حکاکی شده. ب: تصویر SEM/BSE از سطح مقطع آلیاژ ۷۰۷۵ همراه با آنالیز EDS از ترکیبات بین‌فلزی.

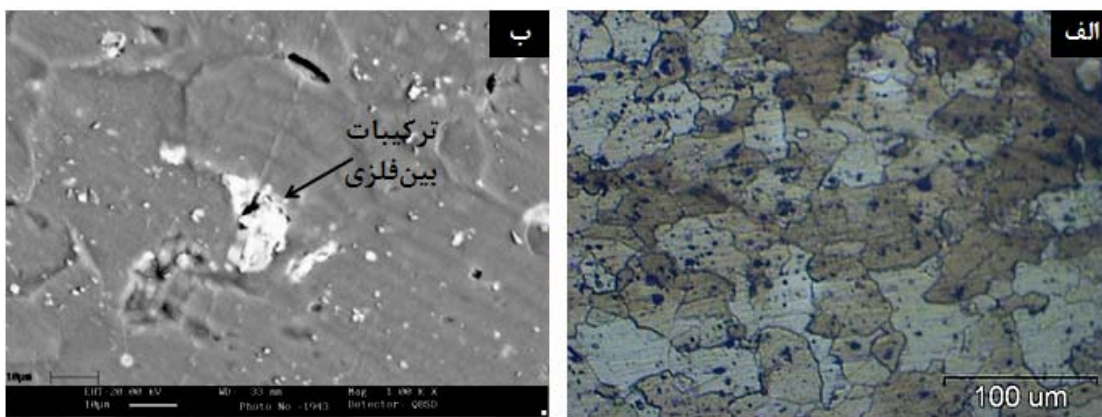


شکل ۷- تصویر SEM از ترک بین دانه‌ای در آلیاژ ۷۰۷۵ که به مدت ۶۷۲ ساعت در سلول خوردگی بوده است.

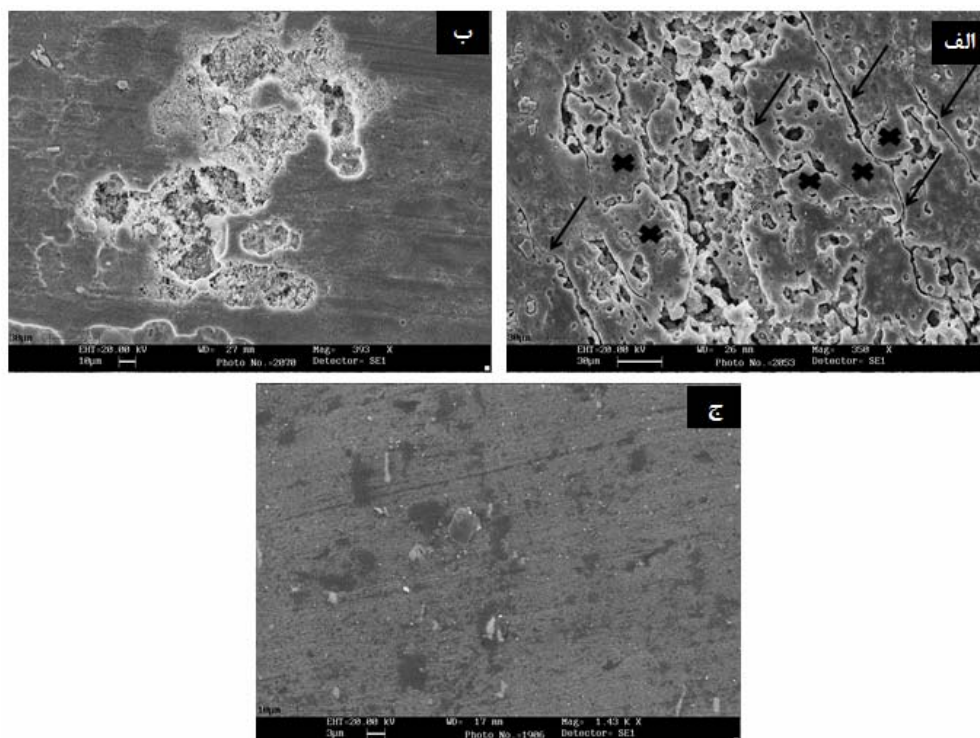


شکل ۸- تصاویر SEM از سطح مقطع آلیاژی که به مدت ۶۷۲ ساعت در سلول خوردگی بوده‌اند.

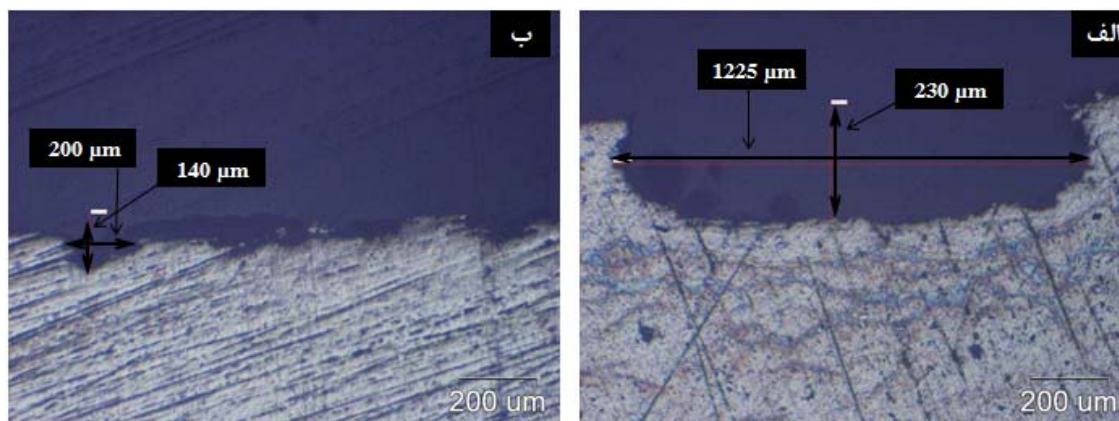
الف: ۲۰۲۴ ب: ۶۰۶۱



شکل ۹- الف: دانه‌بندی آلیاژ ۷۰۷۵ پولیش و حکاکی شده. ب: تصویر BSE از ساختار سطح آلیاژ ۷۰۷۵



شکل ۱۰- تصاویر SEM از نواحی خورده شده آلیاژهایی که به مدت ۶۷۲ ساعت مورد آزمون مه‌نمکی قرار گرفته‌اند.  
الف: ۲۰۲۴ (برخی از دانه‌ها و ترک‌ها با علامت و فلش نشان داده شده است) ب: ۷۰۷۵ ج: ۶۰۶۱



شکل ۱۱- عمق و پهنای عمیق‌ترین حفره در آلیاژهایی که به مدت ۶۷۲ ساعت مورد آزمون مه‌نمکی قرار گرفته‌اند.  
الف: ۲۰۲۴ ب: ۷۰۷۵

