

تأثیر فرآیند فعال‌سازی مذاب با اعمال کرنش بر رفتار خوردگی آندهای فداشونده پایه آلومینیمی Al-Zn-In

محمد رضا قشقایی^۱، بهروز شایق بروجنی^{۲*}، حمید صفرزاده^۱

^۱مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

^۲دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۵/۲/۲۱، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۵/۶/۱۰، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۵/۸/۲۵

چکیده فرآیند فعال‌سازی مذاب با اعمال کرنش (SIMA) یکی از فرآیندهای شکل‌دهی نیمه جامد در تولید قطعات با ساختار غیردندریتی می‌باشد. در پژوهش حاضر اثر فرآیند SIMA بر ریزساختار و رفتار خوردگی آند فدا شونده Al-Zn-In مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا با اعمال فشار تک‌محوری، تأثیر متغیر کار سرد در محدوده ۴۰-۱۰ درصد بر ریزساختار نیمه جامد آلیاژ Al-Zn-In در دمای محیط بررسی شد. عملیات حرارتی نیمه جامد در محدوده دمایی ۶۶۰-۶۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۰ دقیقه انجام گرفت. بررسی رفتار خوردگی نمونه‌ها توسط آزمون پلاریزاسیون تافل در محلول ۳/۵ درصد کلرید سدیم انجام گرفت. تصاویر میکروسکوپ نوری نشان داد که ریزساختار نمونه‌های تهیه شده به روش SIMA دارای دانه‌بندی ریزتر و میزان کرویت بیشتری در مقایسه با ریزساختار اولیه آلیاژ می‌باشد. با افزایش نسبت کار سرد از ۱۰ به ۳۰ درصد فاکتور شکل افزایش یافته اما با افزایش میزان کار سرد تا ۴۰ درصد، افزایش و کاهش نسبتاً محسوسی به ترتیب در اندازه دانه و فاکتور شکل مشاهده شد. با افزایش دمای عملیات حرارتی، میانگین اندازه دانه‌های جامد α -Al کاهش و میزان کرویت آنها افزایش یافت. نتایج حاصل از آزمون خوردگی تافل نشان داد، با افزایش میزان کار سرد در فرآیند SIMA، پتانسیل خوردگی نمونه‌های آلیاژ Al-Zn-In منفی‌تر شده و کمترین نرخ خوردگی مربوط به نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۶۴۰ درجه سانتی‌گراد با نسبت ۳۰ درصد کار سرد بود. نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز خوردگی یکنواخت نمونه تهیه شده تحت شرایط مذکور را تأیید کرد.

کلمات کلیدی: آند فدا شونده، Al-Zn-In، فرآیند فعال‌سازی مذاب با اعمال کرنش (SIMA)، غیردندریتی، نرخ خوردگی.

Verifying the Effects of SIMA (Strain Induced Melt Activation) Process on Corrosion Behavior in Al Sacrificial Anodes

Mohammad Reza Ghashghaei¹, Behrooz Shayegh Boroujeni^{2*}, Hamid Safarzadeh¹

¹Advanced Materials Research Center, Faculty of Materials Engineering, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

²Department of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

Abstract The Strain Induced Melt Activation (SIMA) process is one of the semi-solid forming processes in Preparation of non-dendritic microstructures. In this research, verifying the effects of SIMA process on microstructure and the corrosion behavior of Al-Zn-In sacrificial anode was studied. The effect of plastic deformation on the semisolid microstructure of Al-Zn-In alloy was investigated by applying 10-40% uniaxial compression at the ambient temperature and the semi-solid treatment was carried out at the range of 640 to 660 °C for 40 min. Investigate the behavior corrosion by Tafel polarization test was performed in a solution of Sodium Chloride 3.5%. The results indicated that the microstructure of SIMA processed specimens is finer and more Globular than the microstructure of initial material. With increase in the compression ratio from 10 to 30%, The sphericity increased significantly but the variation rate of the average grain size increased and the shape factor decreased with more increase in the compression ratio up to 40%. The average size and sphericity of α -Al solid grains increased with the increase of the temperature heat treatment. Tafel test results showed, Corrosion potential samples alloys Al-Zn-In is more negative and lowest rate of corrosion related to sample heat treated at 640 °C with the compression ratio 30%. The results of scanning electron microscopy also indicate the uniform corrosion under aforementioned conditions.

Keywords: Sacrificial Anode, Al-Zn-In, SIMA, Non-Dendritic, Corrosion Rate.

۱- مقدمه

لیکوئیدوس) که هر دو فاز مایع و جامد در کنار یکدیگر وجود دارند، انجام می‌شوند [۵]. عامل اصلی که امکان شکل‌پذیری آلیاژها را در حالت نیمه‌جامد فراهم می‌سازد، وجود ساختار غیردندریتی و هم‌محور می‌باشد [۶]. برخی یافته‌ها حاکی از مقاومت به خوردگی بهتر ساختارهای هم‌محور نسبت به ساختارهای دندریتی و ستونی می‌باشد [۷ و ۸]. توزیع مناسب دانه‌ها و ریزتر شدن آن‌ها موجب خوردگی یکنواخت‌تر آندها، یکنواختی مورفولوژی حمله، بالا رفتن راندمان و افزایش پتانسیل کاری آند می‌شود. از آنجایی که فرایندهای شکل‌دهی نیمه‌جامد دارای مزایایی همچون کاهش جدایش‌های ماکروسکوپی و تخلخل، نیروی پایین شکل‌دهی و پر شدن یکنواخت قالب می‌باشند، مطالعه اثر فرایند نیمه‌جامد بر خواص الکتروشیمیایی آندهای فداشونده بسیار حائز اهمیت است. به‌طور کلی، فرایندهای شکل‌دهی نیمه‌جامد شامل سه مرحله اساسی تولید شمش نیمه‌جامد، ذوب مجدد جزئی و تیکسوس^۱ شکل‌دهی است [۶]. نکته کلیدی در فرایندهای نیمه‌جامد، تهیه مواد نیمه‌جامد با ریزساختار کروی (گلوبولی) می‌باشد. روش‌های مختلفی جهت تولید این نوع ساختارها وجود دارد که از^۲ آن جمله می‌توان به فرایندهای همزدن مکانیکی یا مغناطیسی- هیدرودینامیکی، فرایند ترمومکانیکی SIMA و ریخته‌گری افشانشی اشاره نمود [۴ و ۹]. در میان روش‌های مذکور، فرایند SIMA که برپایه کار مکانیکی قرار دارد برای اولین بار توسط یانگ مطرح گردید [۴]. این فرایند به لحاظ سادگی و هزینه پایین تجهیزات مورد استفاده، در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است و می‌تواند در مورد بسیاری از آلیاژهای مهندسی به کار گرفته شود [۵، ۹ و ۱۰]. پژوهش حاضر در نظر دارد شمش نیمه‌جامد با ریزساختار کروی از آلیاژ Al-Zn-In را با استفاده از فرایند SIMA تهیه و رفتار خوردگی نمونه‌های تهیه شده در شرایط مختلف سنتز را بررسی نماید.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق از آند ریخته‌گری شده Al-Zn-In با ترکیب شیمیایی مطابق جدول (۱) استفاده شد.

در چند دهه اخیر، از سیستم‌های حفاظتی مختلفی جهت غلبه بر مشکل خوردگی و کاهش هزینه‌های مربوط به آن در سازه‌های دریایی استفاده شده است. یکی از مهمترین گسترده‌ترین این سیستم‌ها، سیستم حفاظت کاتدی می‌باشد. سیستم آند فداشونده به عنوان یکی از موفق‌ترین روش‌ها در سیستم‌های حفاظت کاتدی، به خصوص در سازه‌های دریایی و یا سازه‌های نزدیک دریا شناخته می‌شود [۱]. آندهای مختلفی در حفاظت کاتدی سازه‌های دریایی استفاده می‌شود که اغلب بر پایه آلومینیوم بوده و روز به روز بر انواع آن افزوده می‌گردد [۲]. در این میان آندهای Al-Zn-In با ظرفیت جریان بالا (۲۴۰۰ Ah/Kg) جزء پرمصرف‌ترین و مطلوب‌ترین آندهای کاربردی در محیط‌های دریایی می‌باشد. در آندهای آلومینیومی افزودن عنصر روی (Zn) تا حدود ۵ درصد وزنی باعث می‌شود که پتانسیل آند منفی‌تر و راندمان آن به بیشترین مقدار خود برسد، در این حالت Zn به صورت محلول جامد α وجود دارد [۲]. نقش عنصر ایندیم (In) در آلیاژ فوق، حذف مشکل مربوط به پسیو شدن آلومینیوم می‌باشد.

در فرایند تولید آلیاژهای آلومینیومی و به ویژه آندهای فدا شونده آلومینیومی، کنترل شرایط و متغیرهای فرایند بسیار با اهمیت است زیرا این مرحله نقش تعیین کننده‌ای در شکل‌گیری ریزساختار آلیاژ دارد. بنابراین در تهیه آندهای فداشونده باید دقت شود تا ترکیب نهایی آند با مشخصات مورد نظر مطابقت داشته باشد، در غیر این صورت از یک سو جداسازی عناصر آلیاژی (جدایش شیمیایی) تشکیل دهنده آند اتفاق می‌افتد که منجر به خوردگی موضعی آند خواهد شد و از سوی دیگر تمایل آند به پسیو شدن و یا احتمال خرد شدن مکانیکی، افزایش می‌یابد [۳ و ۱]. از آنجا که ریخته‌گری معمولی آندهای فداشونده با مشکلات تکنولوژیکی خاصی از قبیل اکسیداسیون شدید و احتراق مذاب همراه است، استفاده از روش‌هایی که نیاز به ذوب کامل آلیاژ نداشته، می‌تواند مثمرتر واقع شود.

در سال‌های اخیر فرایندهای شکل‌دهی نیمه‌جامد در موضوع بسیاری از پژوهش‌ها قرار گرفته و به عنوان فرآیندی موثر که قابلیت تولید محصول با خواص مکانیکی بالا (به شکل نهایی) دارد [۴]. فرایندهای شکل‌دهی نیمه‌جامد در محدوده دمای نیمه‌جامد (بین دماهای سالیدوس و

¹ Thixo forming

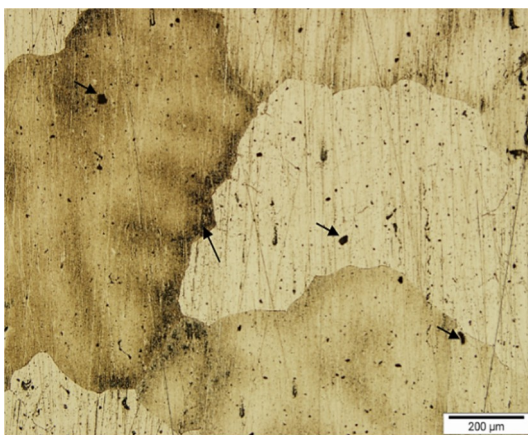
$$F = \frac{\sum_{N=1}^N 4\pi A / P^2}{N} \quad \text{معادله (۱)}$$

در رابطه فوق، A و P به ترتیب مساحت و محیط دانه‌ها و N تعداد دانه‌های جامد می‌باشد. برای هر نمونه، اندازه‌گیری از کل سطح جامد صورت پذیرفت. برای مطالعه رفتار الکتروشیمیایی نمونه‌ها، از آزمون پلاریزاسیون تافل استفاده شد. محلول مورد استفاده برای این آزمایش، محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم و الکتروود مرجعی که در این آزمون استفاده شد، کالومل اشباع بود. همچنین از الکتروود کمکی گرفت برای تکمیل مدار الکتروشیمیایی دستگاه پتانسیواستات، استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ ریزساختار و آنالیز حرارتی شمش Al-Zn-In

شکل (۱) ریزساختار آند فداشونده آلومینیومی را قبل از اعمال فرآیند SIMA نشان می‌دهد. ریزساختار آلیاژ شامل دانه‌های جامد α -Al و برخی رسوبات در درون دانه‌ها و در امتداد مرز دانه‌ها می‌باشد. با توجه به دیاگرام‌های فازی دوتایی آلومینیوم-روی و آلومینیوم-این‌دیوم، روی به صورت کامل در آلومینیوم حل می‌شود، ولی این‌دیوم در آلومینیوم نامحلول است [۱۳و۱۲]. با توجه به جدول (۱)، آهن و سیلیسیم عناصری هستند که به عنوان ناخالصی همراه با روی در آلیاژ وجود دارند. آهن اغلب به صورت $FeAl_3$ ظاهر می‌گردد [۱۴].



شکل ۱. تصویر میکروسکوپی نوری از آلیاژ ریختگی Al-Zn-In (علامت فلش نشان دهنده مناطق غنی از عناصر آلیاژی).

شکل (۲)، منحنی DTA آلیاژ Al-Zn-In را که تحت نرخ گرمایش $5^\circ C/min$ تا دمای $700^\circ C$ حرارت داده شده را

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آند پایه آلومینیومی Al-Zn-In (برحسب درصد وزنی).

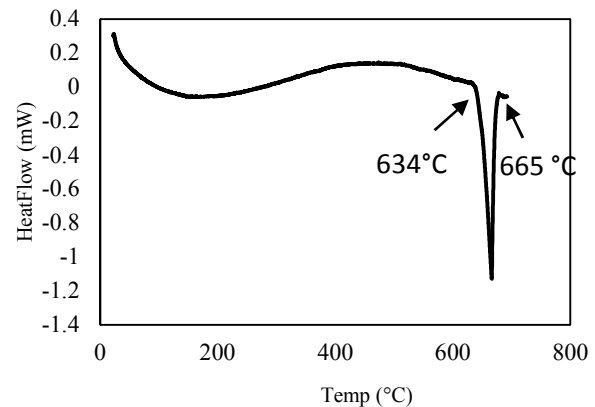
Zn	In	Si	Fe	Cu	Cd	Al
۵/۷۵	۰/۰۴	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	باقی

جهت تعیین دماهای سالی‌دوس و لیکوئیدوس آلیاژ پایه آلومینیومی Al-Zn-In تهیه شده، از دستگاه آنالیز حرارتی (DTA) مدل ۱۶۴۰-PL-STA استفاده گردید. برای انجام این آزمایش ۳۰ میلی‌گرم از ماده در بوتله آلومینیایی قرار داده و تحت جریان گاز آرگون با نرخ $5^\circ C/min$ تا دمای $700^\circ C$ حرارت داده شد. با استفاده از منحنی DTA به دست آمده، محدوده دمایی ذوب آلیاژ Al-Zn-In تعیین شده و براساس آن دماهای مناسب جهت عملیات حرارتی و ذوب مجدد جزئی مشخص گردید.

به منظور انجام فرآیند SIMA ابتدا نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۲ میلی‌متر از آند اولیه تهیه شد. عملیات ایجاد کرنش با نیروی ۱۵ تن و با سرعت ۳ میلی‌متر بر دقیقه توسط دستگاه تست کشش سنتام مدل ۱۵۰-STM به مقدار ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد در دمای محیط به روش فشار تک‌محوری انجام شد. در مرحله بعد به منظور ایجاد ریزساختار کروی و هم‌محور، نمونه‌ها در سه دمای مختلف $640^\circ C$ ، $650^\circ C$ و $660^\circ C$ درجه سانتی‌گراد با نرخ گرم شدن $5^\circ C/min$ به مدت زمان ۴۰ دقیقه، تحت اتمسفر آرگون با فشار ۵ بار حرارت‌دهی و سپس به سرعت در آب سرد شدند. نمونه‌ها جهت بررسی‌های ریزساختاری پس از سنباده زنی و پولیش با استفاده از محلول آبی ۵۰ گرم بر لیتر اسید کرومیک (انیدریک کرومیک) همراه با ۴ گرم بر لیتر سولفات سدیم اچ شدند. مطالعه ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از دستگاه میکروسکوپ نوری مدل CK40M و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Leo-Vp۴۳۵ انجام پذیرفت. جهت تعیین اندازه دانه از روش تقاطع خطی متوسط استفاده گردید. برای این منظور یک سری خطوط مستقیم با طول معین بر روی تصاویر میکروسکوپ نوری هر یک از نمونه‌ها در نظر گرفته شده و اندازه دانه متوسط با تقسیم طول خط (L) بر تعداد دانه‌های قطع شده توسط خط مستقیم (N) تعیین گردید. اندازه‌گیری کمیت فاکتور شکل بر روی تصاویر میکروسکوپ نوری به کمک نرم افزار-Clemex Professional و با استفاده از رابطه (۱) انجام شد [۱۱].

نشان می‌دهد. با استفاده از این منحنی دماهای سالیدوس و لیکوئیدوس آلیاژ Al-Zn-In محاسبه می‌شود. با توجه به منحنی DTA، در طول گرمایش حرارتی یک پیک بزرگ اتفاق افتاده است، در دمای 634°C تغییرات در جریان حرارتی رخ داده و تغییر حالت در شبکه انجام و ذوب گسترده در آلیاژ آغاز شده است که همان ابتدای پیک می‌باشد. این محدوده تا 665°C ادامه دارد. بنابراین شروع و پایان ذوب به ترتیب 634°C و 665°C درجه می‌باشد. از این رو عملیات حرارتی نیمه‌جامد در محدوده دمایی $640-660^{\circ}\text{C}$ به مدت ۴۰ دقیقه انجام پذیرفت.

همچنین افزایش بیشتر نسبت کار سرد به میزان ۴۰ درصد منجر به شکسته شدن بیشتر ساختار و لذا افزایش تعداد مرزخانه‌ها و مرزخانه‌های فرعی شده و از این طریق باعث افزایش قابلیت تشکیل جوانه‌های تبلور مجدد یافته و به عبارتی افزایش نرخ جوانه‌زنی می‌شود. از طرفی بادقت در شکل ۳-د، با افزایش تعداد مرزخانه‌ها، مسیرهای ذوب بیشتری در ساختار به وجود آمده و لذا کسر فاز مایع در حین حرارت‌دهی افزایش می‌یابد [۱۱ و ۱۵].



شکل ۲. منحنی DTA شمش Al-Zn-In در نرخ گرمادهی $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

۲-۳ اثر میزان کار سرد در فرآیند SIMA بر ریزساختار آلیاژ Al-Zn-In

در ارتباط با نتایج بالا می‌توان این‌طور بیان کرد که در اثر تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده در حین کار سرد، انرژی کرنش داخلی در نتیجه افزایش چگالی نابجایی‌ها و تشکیل عیوب شبکه بلوری نظیر جاهای خالی افزایش پیدا کرده و نیروی محرکه لازم جهت بازیابی و تبلور مجدد در حین حرارت‌دهی تامین می‌شود. با افزایش نسبت کار سرد، انرژی تغییر شکل بیشتری در ساختار ذخیره شده و ناپایداری ترمودینامیکی افزایش می‌یابد که این امر باعث افزایش نیروی محرکه تبلور مجدد و در نتیجه ریزتر شدن دانه‌های تبلور مجدد یافته و همچنین کروی‌تر شدن دانه‌ها در اثر افزایش میزان نفوذ اتمی می‌گردد. به نظر می‌رسد با افزایش نسبت پرس تا ۳۰ درصد، انرژی اعوجاج ایجاد شده به یک حد کمینه می‌رسد که این موضوع می‌تواند به دلیل خنثی شدن جاهای خالی، عیوب شبکه و نابجایی‌ها توسط یکدیگر باشد [۳].

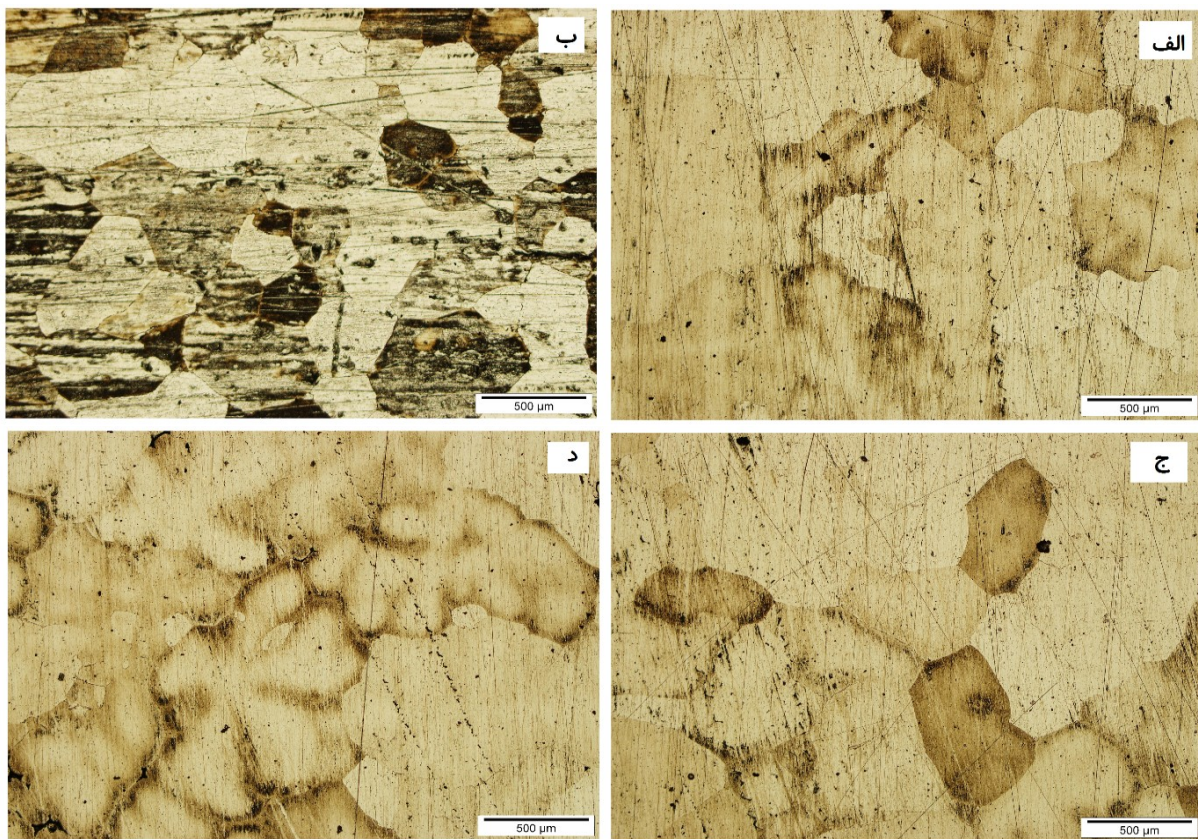
شکل (۳) ریزساختار آلیاژ Al-Zn-In را با درصدهای مختلف کار سرد پس عملیات حرارتی در دمای 640°C به مدت ۴۰ دقیقه نشان می‌دهد. شکل (۴) نیز تغییرات اندازه دانه و فاکتور شکل نمونه‌های مذکور را تحت شرایط SIMA نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار و تصاویر میکروسکوپ نوری شکل ۳-الف، زمانی که نسبت کار سرد ۱۰ درصد می‌باشد، ریزساختار آلیاژ شامل دانه‌های جامد درشت با شکل‌های نامنظم و غیر هم‌محور است. با افزایش نسبت کار سرد از ۱۰ تا ۲۰ درصد طی شرایط عملیات حرارتی اندازه دانه به سرعت کاهش و مقدار فاکتور شکل به شدت افزایش پیدا می‌کند (شکل ۳-ب).

با عنوان مثال زمانی که دو نابجایی با بردار برگرز غیر هم علامت به هم می‌رسند، همدیگر را خنثی می‌کنند. بنابراین بخشی از انرژی کرنش داخلی ایجاد شده در اثر تغییر شکل از بین می‌رود که این امر می‌تواند تا حدودی در افزایش اندازه دانه موثر باشد. در تحقیق انجام شده توسط بلوری و همکارانش [۱۶] نیز تاثیر نسبت کار سرد بر ریزساختار آلیاژ نیمه جامد آلومینیوم ۷۰۷۵ در فرآیند SIMA مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مشابهی در خصوص افزایش اندازه دانه و کاهش مقدار

با حرارت‌دهی هم‌دما، مرزخانه‌های پر انرژی (با زاویه زیاد) دانه‌های تبلور مجدد یافته در اثر نفوذ فاز مایع از هم جدا شده و به دانه‌های ریزتر تبدیل می‌شوند، هر چند که شکل دانه‌های به وجود آمده تحت این شرایط کاملاً منظم و گلوبولی

نمونه‌ها نیز نمی‌تواند به عنوان ریزساختار تیکسوتروپیک بهینه در نظر گرفته شود. مقادیر اندازه دانه در نمونه‌های ۲۰ و ۳۰ درصد کار سرد شده (به خصوص نمونه ۳۰ درصد کار سرد شده) از یکنواختی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها برخوردار است، اما مقادیر فاکتور شکل نمونه ۳۰ پرس شده افزایش نسبتاً قابل توجهی نسبت به نمونه ۲۰ درصد کار سرد شده را نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به نتایج فوق می‌توان مقدار کاهش ارتفاع ۳۰ درصد را به عنوان مقدار بهینه درصد کار سرد مکانیکی در فرآیند SIMA معرفی نمود.

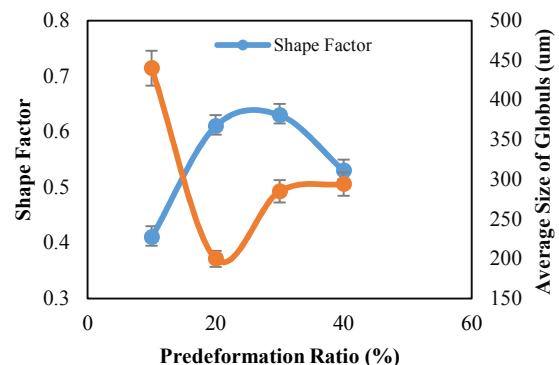
فاکتور شکل نمونه‌های ۴۰ درصد پرس شده گزارش شده است. بنابراین با توجه به مطالب بحث شده می‌توان نتیجه گرفت که ریزساختار نمونه‌های ۱۰ درصد کار سرد شده پس از حرارت‌دهی هم‌دما شامل دانه‌های درشت با میزان کرویت بسیار پایینی می‌باشد و لذا نمی‌توان خواص تیکسوتروپیک مناسبی برای آنها تصور نمود. همچنین با توجه به این‌که در نمونه‌های ۴۰ درصد پرس شده کاهش نسبتاً محسوسی در مقدار فاکتور شکل (به سبب تشکیل مرزهای فرعی در حال شکل‌گیری) در مقایسه با نمونه‌های ۲۰ و ۳۰ درصد پرس شده مشاهده می‌شود، لذا ریزساختار نیمه‌جامد به‌دست آمده برای این



شکل ۳. تصویر میکروسکوپی نوری نمونه‌های کار سرد شده آلیاژ Al-Zn-In با درصد‌های: الف) ۱۰، ب) ۲۰، ج) ۳۰ و د) ۴۰ و عملیات حرارتی شده در دمای ۶۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۰ دقیقه در بزرگنمایی ۵۰ برابر.

۳-۳ تاثیر دما در فرآیند SIMA بر ریزساختار آلیاژ Al-Zn-In

شکل (۵) اثر دمای عملیات حرارتی را بر ریزساختار نمونه‌ها (در شرایط ۳۰ درصد کار سرد شده به مدت ۴۰ دقیقه) نشان می‌دهد. شکل ۵-الف، نمونه بهینه انتخاب شده در بررسی اثر کار سرد در فرآیند SIMA می‌باشد. در ادامه با افزایش بیشتر دمای حرارت‌دهی (شکل ۵-ب) و (ج)، ضخامت مرزدهانه‌ها افزایش یافته که نشان دهنده افزایش کسر



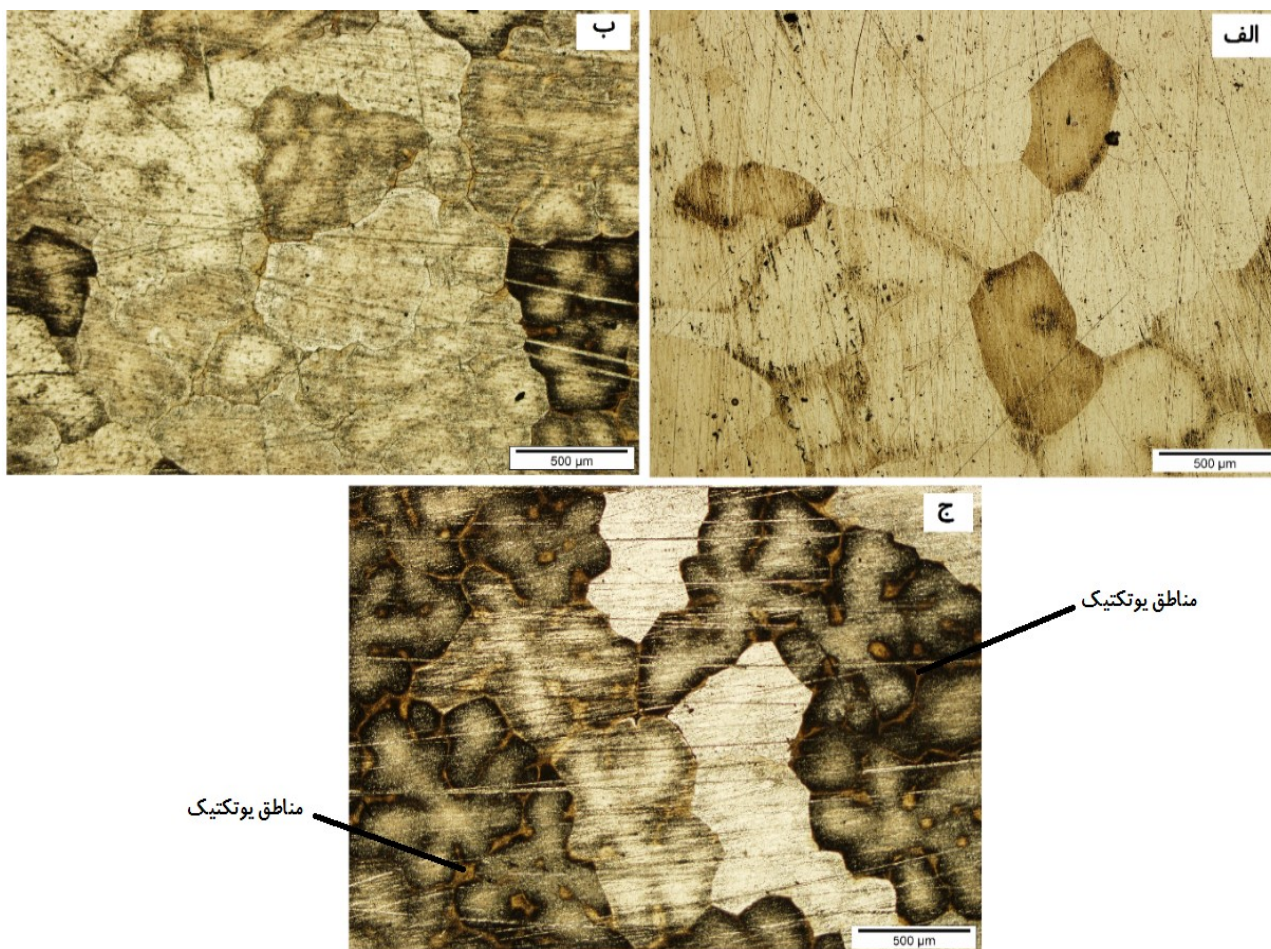
شکل ۴. تغییرات اندازه دانه و فاکتور شکل در اثر افزایش کار سرد از ۱۰ تا ۴۰ درصد در فرآیند SIMA.

قطرات ریزمایع در داخل دانه‌ها حبس می‌شوند و دوم در اثر به هم پیوستن ذرات جامد با اشکال هندسی پیچیده در مرحله حرارت‌دهی به منظور کاهش انرژی فصل مشترک بین فازهای جامد و مایع، قطرات بزرگتری از فاز مایع در مقایسه با حالت قبلی در داخل دانه‌ها محبوس می‌شوند.

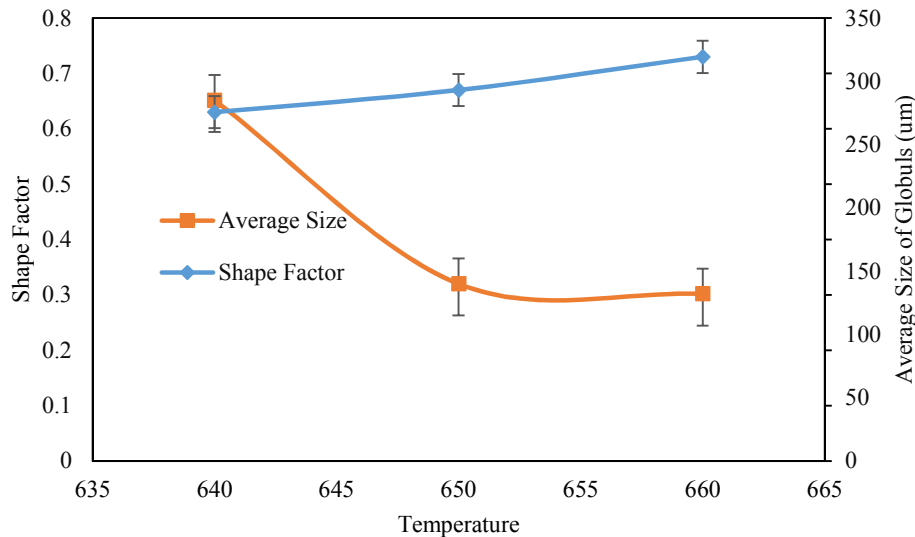
شکل (۶) نیز تغییرات فاکتور شکل و اندازه دانه (مرزهای فرعی نیز به عنوان مرزدانه در نظر گرفته شد) را در اثر افزایش دمای عملیات حرارتی نشان می‌دهد. با توجه به شکل با افزایش دمای عملیات حرارتی از ۶۴۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد مرزهای فرعی در درون دانه‌ها شکل گرفته که با افزایش دما به ۶۶۰ °C تبدیل به مرزهای بزرگ با ضخامت زیاد می‌شود، لذا اندازه دانه با افزایش دمای عملیات حرارتی در اثر تشکیل دانه‌های جدید کاهش می‌یابد.

فاز مایع می‌باشد به طوری که در نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۶۶۰ °C، مناطق یوتکتیک بزرگ در بین دانه‌های جامد که در شکل ۵-ج، مشخص شد، تشکیل می‌گردد (لازم به ذکر است که زمان اچ نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ۶۶۰ °C به جهت نشان دادن تفاوت اثر دما، بیشتر از دو نمونه دیگر انتخاب شد).

تحت این شرایط ریزساختار شامل دانه‌های جامد گل مانند (چندپر) α -Al فاز مایع یوتکتیک بین دانه‌ها به عنوان فاز زمینه و همچنین قطرات مایع محبوس در درون دانه‌های جامد می‌باشد. دلیل تیره شدن رنگ دانه‌ها با فاصله گرفتن از مرکز دانه به سمت مرزدانه، تغییر در پروفیل غلظتی عناصر آلیاژی می‌باشد. تشکیل قطرات مایع محبوس به دو طریق صورت می‌گیرد [۱۵]. اول این‌که در نتیجه جدایش عناصر آلیاژی در درون ذرات جامد در طی فرآیند ذوب مجدد جزئی، برخی



شکل ۵. تصویر میکروسکوپی نوری نمونه‌های ۳۰ درصد کار سرد شده و عملیات حرارتی شده در دماهای: الف) ۶۴۰ °C، ب) ۶۵۰ °C و ج) ۶۶۰ °C به مدت ۴۰ دقیقه در بزرگنمایی ۵۰ برابر.



شکل ۶. تغییرات اندازه دانه و فاکتور شکل نمونه ها در اثر افزایش دمای عملیات حرارتی از ۶۴۰ °C تا ۶۶۰ °C در فرآیند SIMA

جامد مجزا از طرف این مرز کم انرژی به هم برسند می‌توانند به یکدیگر متصل شوند که در نتیجه آن عمل به هم پیوستن ذرات (کوالسنس^۱) با مرزدهانه‌های کم انرژی اتفاق می‌افتد [۱۶]. مرحله دوم در فرآیند SIMA گلبولی شدن ذرات فاز جامد می‌باشد. با افزایش دمای عملیات حرارتی، کسر فاز مایع افزایش پیدا کرده و دانه‌های مجزا تشکیل می‌گردند. در نمونه‌هایی که تحت فرآیندهای ذوب جزئی نظیر SIMA گرفته‌اند، بسته به این که میزان کرویت ذرات فاز جامد و میزان کسر حجمی مایع به چه میزان باشد، یکی از مکانیزم‌های کوالسنس و استوالد^۲ بر تحولات ریزساختاری آنها حاکم خواهد بود [۱۷]. مکانیزم استوالد یک مکانیزم کنترل شونده نفوذی است و در کسرهای حجمی فاز مایع بالا (دماهای حرارت‌دهی بالا) مکانیزم غالب می‌باشد. این مکانیزم در رشد دانه تاثیر کمتر ولی بر گلبولی شدن دانه‌ها تاثیر زیادی دارد. در مقابل، مکانیزم کوالسنس که به زمان‌های کوتاه و کسرهای حجمی مایع اندکی جهت تحولات ریزساختاری احتیاج دارد، در رشد دانه‌ها تاثیر بیشتر ولی در گلبولی شدن دانه‌ها تاثیر کمتری را خواهد داشت [۱۵]. با توجه به این که در پژوهش حاضر کسر حجمی فاز مایع در دمای عملیات حرارتی ۶۴۰ درجه سانتی‌گراد کمتر می‌باشد، لذا در این مرحله دانه‌های جامد به راحتی با یکدیگر در تماس بوده و مکانیزم کوالسنس

با توجه به نتایج، تحولات ریزساختاری ایجاد شده در طی فرآیند SIMA را می‌توان به دو مرحله عمده تقسیم نمود: مرحله اول شامل بازیابی، تبلور مجدد و ذوب مجدد جزئی است که در دماهای حرارت‌دهی پایین‌تر اتفاق می‌افتد. در حین بازیابی و تبلور مجدد به منظور کاهش انرژی آزاد ذخیره شده و در نتیجه دریافت انرژی حرارتی کافی، جاهای خالی با یکدیگر ترکیب شده و نابجایی‌ها در اثر صعود یا لغزش متقاطع در وضعیت‌هایی با انرژی کمتر آرایش مجدد پیدا کرده و تشکیل مرزدهانه‌های فرعی را می‌دهند. در این مرحله دانه‌های شامل چگالی نابجایی بالا با دانه‌های فرعی جدید که چگالی نابجایی کمتری دارند جایگزین می‌شوند و همزمان به علت این که دمای نگهداری بالاتر از خط یوتکتیک می‌باشد، ذوب مجدد جزئی نیز صورت می‌گیرد. مشخص شده در صورتی که زاویه بین دانه‌های فرعی از حدود ۲۰ درجه بیشتر باشد، انرژی سطحی مرزدهانه‌ها از دو برابر انرژی فصل مشترک جامد/مایع بیشتر بوده $(\gamma_{gb} < \gamma_{sl})$ و در صورت تماس چنین مرزدهانه‌هایی با مذاب، مرزدهانه‌ها (به منظور کاهش انرژی داخلی سیستم) توسط لایه نازکی از مذاب جایگزین می‌شوند. اما زمانی که عکس شرایط مذکور برقرار گردد $(\gamma_{gb} > \gamma_{sl})$ مرزدهانه‌های کم انرژی به وجود خواهند آمد که در اثر عملیات حرارتی همدمایی در دمای نیمه‌جامد آلیاژ، توسط مذاب خیس نمی‌شوند و همچنان در ریزساختار باقی می‌مانند. اگر دو ذره

^۱ - Coalescence

^۲ - Ostwald

خوردگی کاسته شده و به کمترین مقدار خود، یعنی عدد $14/2 \mu A/cm^2$ می‌رسد. با افزایش بیشتر نسبت کار سرد از این مقدار دوباره جریان افزایش می‌یابد. دلیل افزایش و کاهش جریان در اثر افزایش نسبت کار سرد به ریزساختار نسبت داده شد. با توجه به تصاویر میکروسکوپی نوری شکل (۳)، با افزایش نسبت کار سرد تا ۳۰ درصد فاکتور شکل افزایش می‌یابد علاوه بر این در ریزساختار، دانه‌های روشن‌تر و رسوبات کمتری مشاهده می‌شود. به‌خوبی شناخته شده که بازده جریان بستگی به ساختار دارد. سالیانس [۱۲] نشان داد، رسوب و فاز α آلومینیوم تشکیل یک سلول خوردگی در خود آلیاژ را می‌دهد، بنابراین کاهش رسوب می‌تواند بهره‌وری آند را افزایش دهد. در نمونه ۳۰ درصد کار سرد شده توزیع مناسب عناصر Zn و In در ساختار آلیاژ، باعث جریان مطلوب و پتانسیل منفی‌تر در آند شده است. ثابت شده ساختار یکنواخت باعث افزایش بهره‌وری آند می‌شود [۱۸]. با توجه به نتایج جدول (۲) و دلایل ذکر شده در بالا، نمونه ۳۰ درصد کار سرد شده در فرآیند SIMA به دلیل جریان خوردگی کمتر نسبت به دیگر نمونه‌های کار شده، دارای خوردگی ذاتی کمتر و روند خوردگی یکنواخت‌تر است. سرعت خوردگی در این نمونه عدد $155 \mu m/y$ به‌دست آمد که نسبت به سایر نمونه‌های کار سرد شده کمتر می‌باشد. همچنین با توجه به پتانسیل خوردگی بالا (E_{corr}) این نمونه، افزایش بهره‌وری به عنوان آند فدا شونده تایید می‌شود.

شکل (۸) و (۹) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی با بزرگنمایی به ترتیب ۲۰۰ و ۱۰۰۰ برابر از سطح نمونه‌ها بعد از آزمون پلاریزاسیون تافل را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود نمونه ۳۰ درصد کار سرد شده در فرآیند SIMA به دلیل حداقل جریان خوردگی، سطح خوردگی یکنواخت‌تری پس از آزمون خوردگی نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. در سایر نمونه‌ها خوردگی عمدتاً در مرزدانه و مناطق حاوی غلظت بالای رسوبات اتفاق افتاده است. به طور کلی در آندهای فدا شونده در سیستم دوتایی Al-Zn عنصر روی تمایل به رانده شدن به مناطق بین دندریتی دارد که علت این مساله کمتر بودن نقطه ذوب روی نسبت به آلومینیوم است [۱۲ و ۱۸]. شکل (۱۰) آنالیز عنصری از محصولات خوردگی نشان داده شده در شکل (۹) را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج آنالیز عنصری

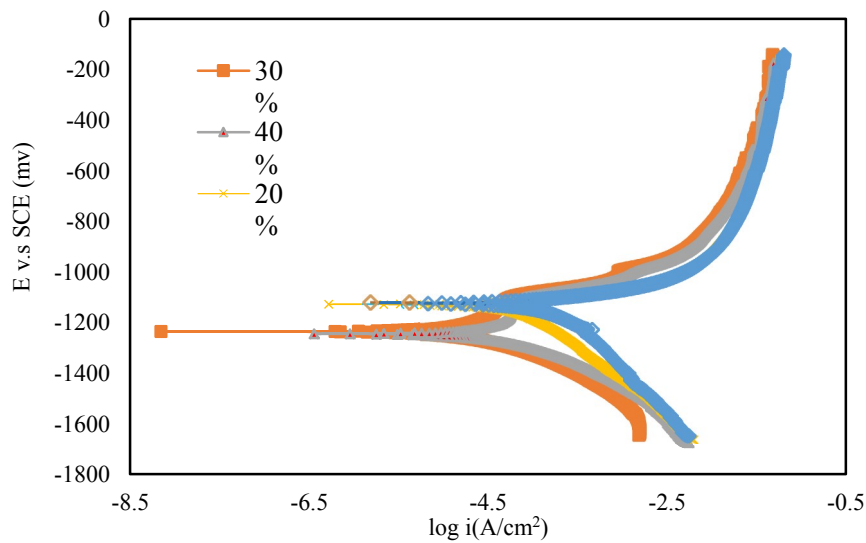
مکانیزم غالب در فرآیند درشت شدن ساختار با افزایش دما می‌باشد. صحت این موضوع را با توجه به تصاویر میکروسکوپی شکل ۵- الف، می‌توان دریافت. همچنین با توجه به تصاویر میکروسکوپی شکل ۵- ج، در دمای ۶۶۰ درجه سانتی‌گراد با افزایش کسر فاز مایع افزایش فاکتور شکل تا حدودی افزایش می‌یابد که نشانه فعال شدن مکانیزم استوالد در این دما می‌باشد. نفوذ ماده جامد از مناطق با انحنا زیاد به مناطق با انحنا کمتر نیروی محرکه لازم جهت کروی شدن ذرات جامد را فراهم می‌سازد [۱۱].

۳-۴ بررسی مقاومت به خوردگی

۳-۴-۱ اثر میزان کار سرد بر رفتار خوردگی

رفتار خوردگی نمونه‌ها در نسبت‌های مختلف کار سرد در فرآیند SIMA در منحنی‌های پلاریزاسیون تافل شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به منحنی‌های پلاریزاسیون در شکل (۷)، شدت جریان آندی در کلیه نمونه‌ها تقریباً ثابت ولی شدت جریان کاتدی متفاوت می‌باشد. بنابراین کنترل کننده خوردگی در این نمونه‌ها، واکنش کاتدی است. جدول (۲) نتایج حاصل از آزمون خوردگی با درصدهای مختلف کار سرد را نشان می‌دهد. به منظور بررسی رفتار آندی ابتدا پتانسیل خوردگی و سپس جریان خوردگی نمونه‌ها بررسی می‌شود. مطابق نتایج جدول (۲) و شکل (۷)، با اضافه شدن نسبت کار سرد بر فرآیند نمونه‌ها، پتانسیل خوردگی (E_{corr}) به سمت مقادیر منفی‌تر انتقال پیدا می‌کند. منفی‌ترین پتانسیل مربوط به نمونه با ۴۰ درصد کار سرد و برابر ۱۲۱۸- میلی ولت می‌باشد. این عدد نشان می‌دهد که افزایش درصد کار سرد در فرآیند SIMA می‌تواند باعث فعال‌سازی آند آلومینیوم شود که دلیل آن به اصلاح ساختار دانه‌ها نسبت داده شد. همچنین نمونه خام پتانسیل نجیب‌تری نسبت به نمونه‌های دیگر در کل جریان پلاریزاسیون دارد. از طرفی نیز جریان خوردگی (I_{corr}) به طور متداول به عنوان یک پارامتر بسیار مؤثر در ارزیابی‌های واکنش‌های خوردگی مطرح می‌باشد و نرخ خوردگی به‌طور معمول با چگالی جریان خوردگی متناسب می‌باشد، با توجه به جدول (۲) با انجام کار سرد به میزان ۱۰ درصد، جریان خوردگی عدد $168 \mu A/cm^2$ را نشان می‌دهد. در ادامه با افزایش درصد کار سرد تا نسبت ۳۰ درصد از شدت جریان

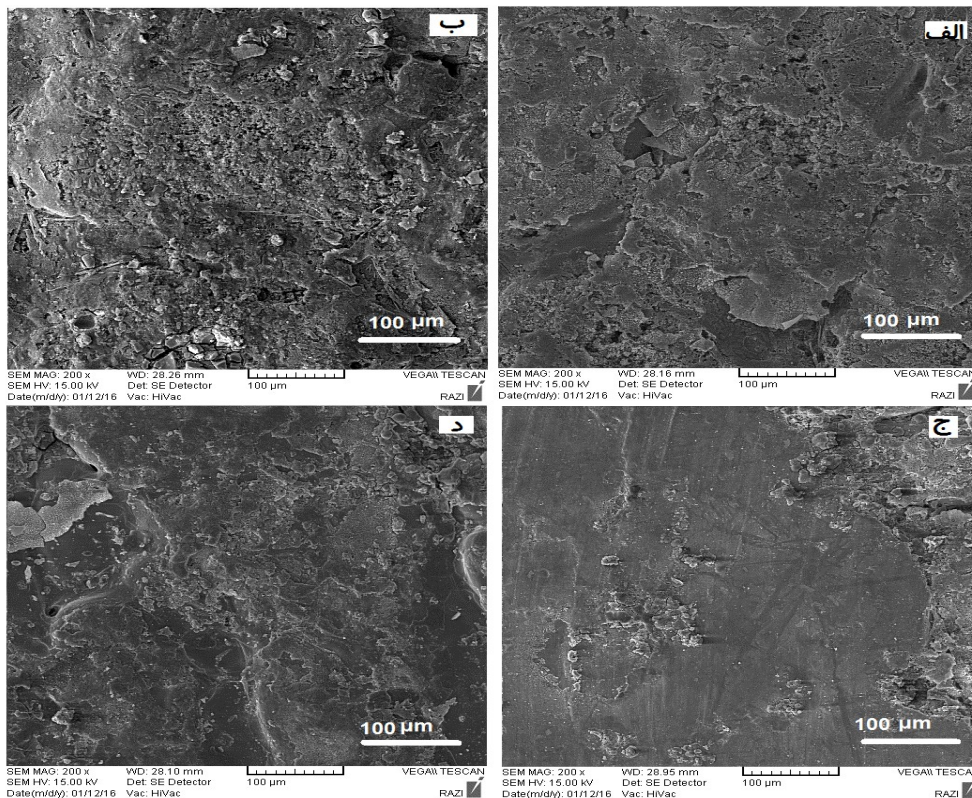
محصولات خوردگی عمدتاً از جنس ZnO و Al_2O_3 می باشد.



شکل ۷. نمودارهای پلاریزاسیون Tafel برای نمونه‌های تهیه شده با درصدهای مختلف کار سرد در فرآیند SIMA در محلول ۳/۵ درصد کلرید سدیم.

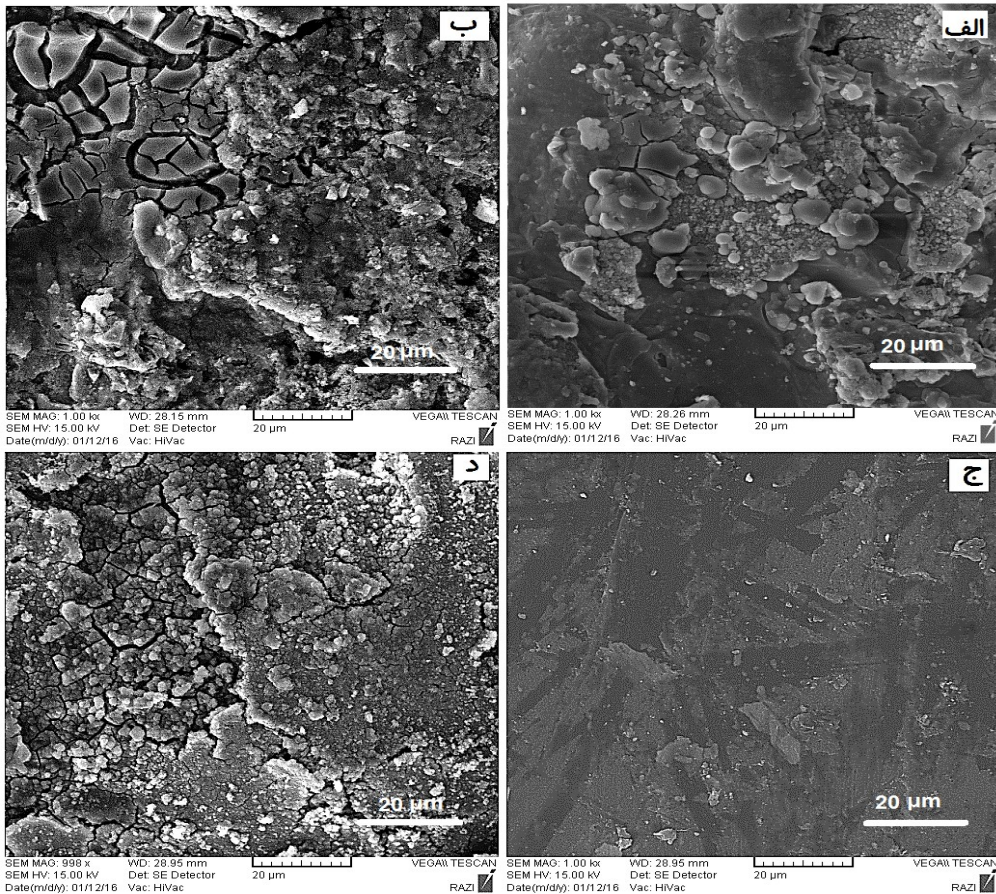
جدول ۲. نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون Tafel برای نمونه‌ها با درصدهای مختلف کار سرد در فرآیند SIMA.

نسبت کار سرد (%)	E_{corr} v.s SCE (mV)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	b_a (mV/dec)	b_c (mV/dec)	C.R ($\mu m/y$)
۱۰	-۱۱۱۶	۱۶۸	۶۳	۳۳۷	۱۸۴۱
۲۰	-۱۱۲۵	۶۸/۳	۵۴	۲۵۶	۷۴۵
۳۰	-۱۲۱۱	۱۴/۲	۸۱	۱۳۷	۱۵۵
۴۰	-۱۲۱۸	۲۷/۸	۵۵	۱۴۱	۳۰۴

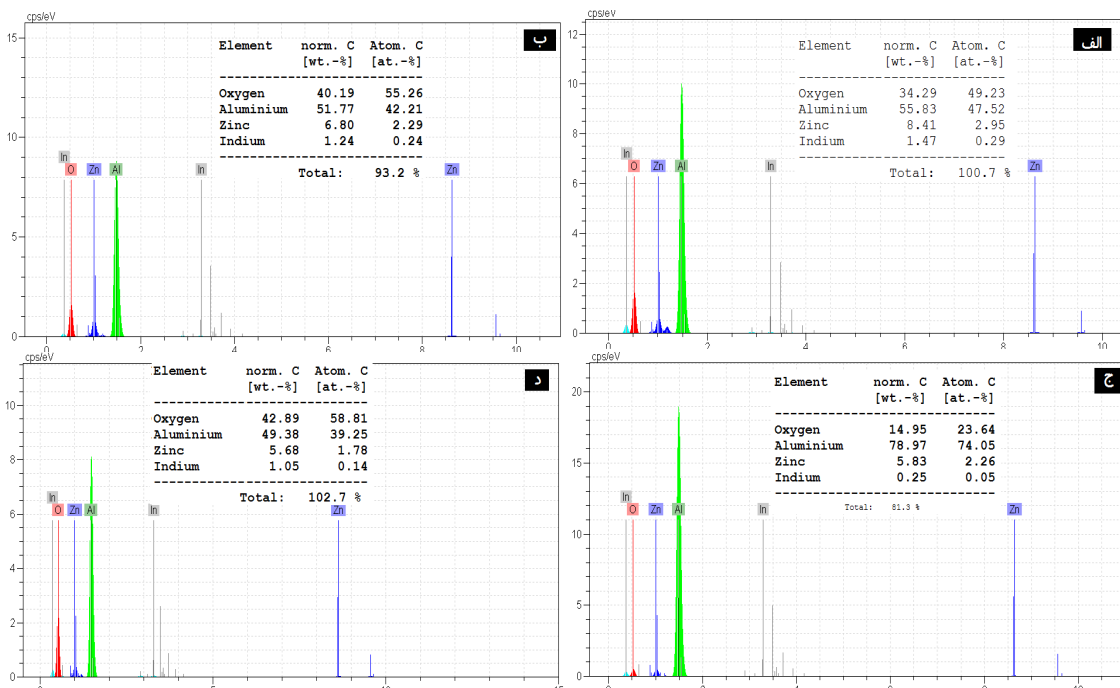


شکل ۸. تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی از سطح نمونه‌های تهیه شده در فرآیند SIMA با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر در نسبت‌های مختلف کار

سرد بعد از آزمون پلاریزاسیون Tafel: الف) ۱۰ درصد، ب) ۲۰ درصد، ج) ۳۰ درصد و د) ۴۰ درصد.



شکل ۹. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نمونه‌های تهیه شده در فرآیند SIMA در بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر در نسبت‌های مختلف کار سرد بعد از آزمون پلاریزاسیون تافل: الف) ۱۰ درصد، ب) ۲۰ درصد، ج) ۳۰ درصد و د) ۴۰ درصد.



شکل ۱۰. آنالیز عنصری EDS از محصولات خوردگی موجود در سطح نمونه‌های تهیه شده در فرآیند SIMA در نسبت‌های مختلف کار سرد بعد از آزمون پلاریزاسیون تافل: الف) ۱۰ درصد، ب) ۲۰ درصد، ج) ۳۰ درصد و د) ۴۰ درصد.

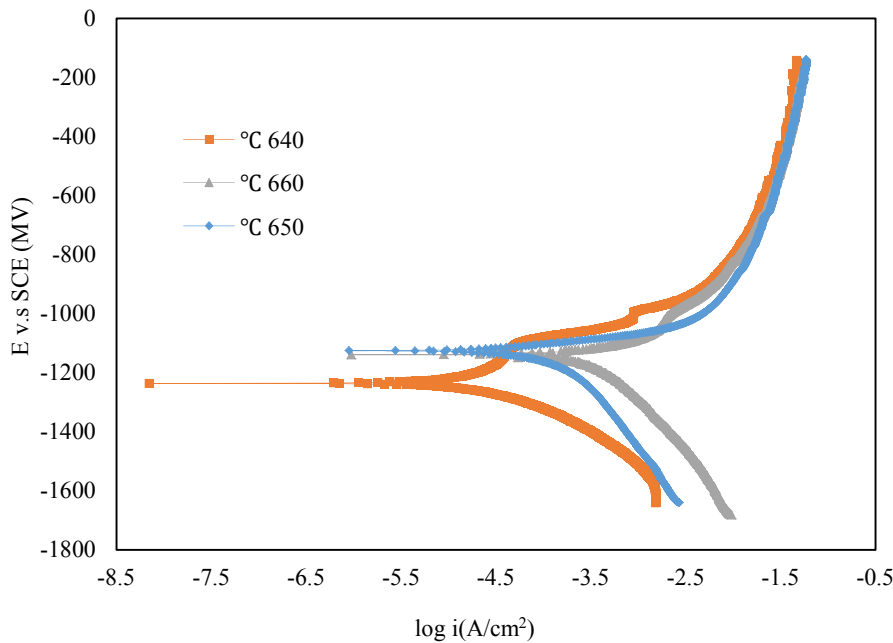
بر رفتار خوردگی نمونه‌های ۳۰ درصد کار شده در آزمون پلاریزاسیون تافل را نشان می‌دهد. در اینجا نیز به دلیل تفاوت

۳-۴-۲ اثر دما در فرآیند SIMA بر رفتار خوردگی

شکل (۱۱) اثر دمای عملیات حرارتی در فرآیند SIMA

تصاویر میکروسکوپ نوری شکل (۵) مشاهده شد، در دمای 640°C می‌توان ریزساختار همگنی از دانه‌های هم محور را مشاهده کرد. وقتی ساختار همگن باشد و گرادیان غلظتی کمتر باشد، خواص الکتروشیمیایی در کل ساختار یکسان خواهد بود و خوردگی عمومی اتفاق می‌افتد و تغییرات پتانسیل با زمان کم می‌شود ولی زمانی که ریزساختار ناهمگن باشد و تجمع عناصر آلیاژی رخ دهد با تغییرات زمان، آند خواص الکتروشیمیایی متفاوتی از خود نشان می‌دهد.

در شدت جریان کاتدی، کنترل کننده خوردگی در این نمونه‌ها، واکنش کاتدی است. نتایج حاصل از این آزمون در جدول (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود چگالی جریان خوردگی برای نمونه عملیات حرارتی شده در دمای 640°C نسبت به سایر نمونه‌ها دارای کمترین مقدار می‌باشد. همچنین مقدار پتانسیل خوردگی در این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها منفی‌تر می‌باشد. منفی‌ترین پتانسیل خوردگی کمترین جریان خوردگی نشان از افزایش بهره‌وری و خوردگی یکنواخت آند در این شرایط می‌باشد [۱]. همان‌طور که در



شکل ۱۱. نمودارهای تافل برای نمونه‌های تهیه شده در دماهای مختلف در فرآیند SIMA (۳۰ درصد کار سرد شده) در محلول ۳/۵ درصد کلرید سدیم.

جدول ۳. نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون تافل برای نمونه‌ها با درصد‌های مختلف کار سرد در فرآیند SIMA.

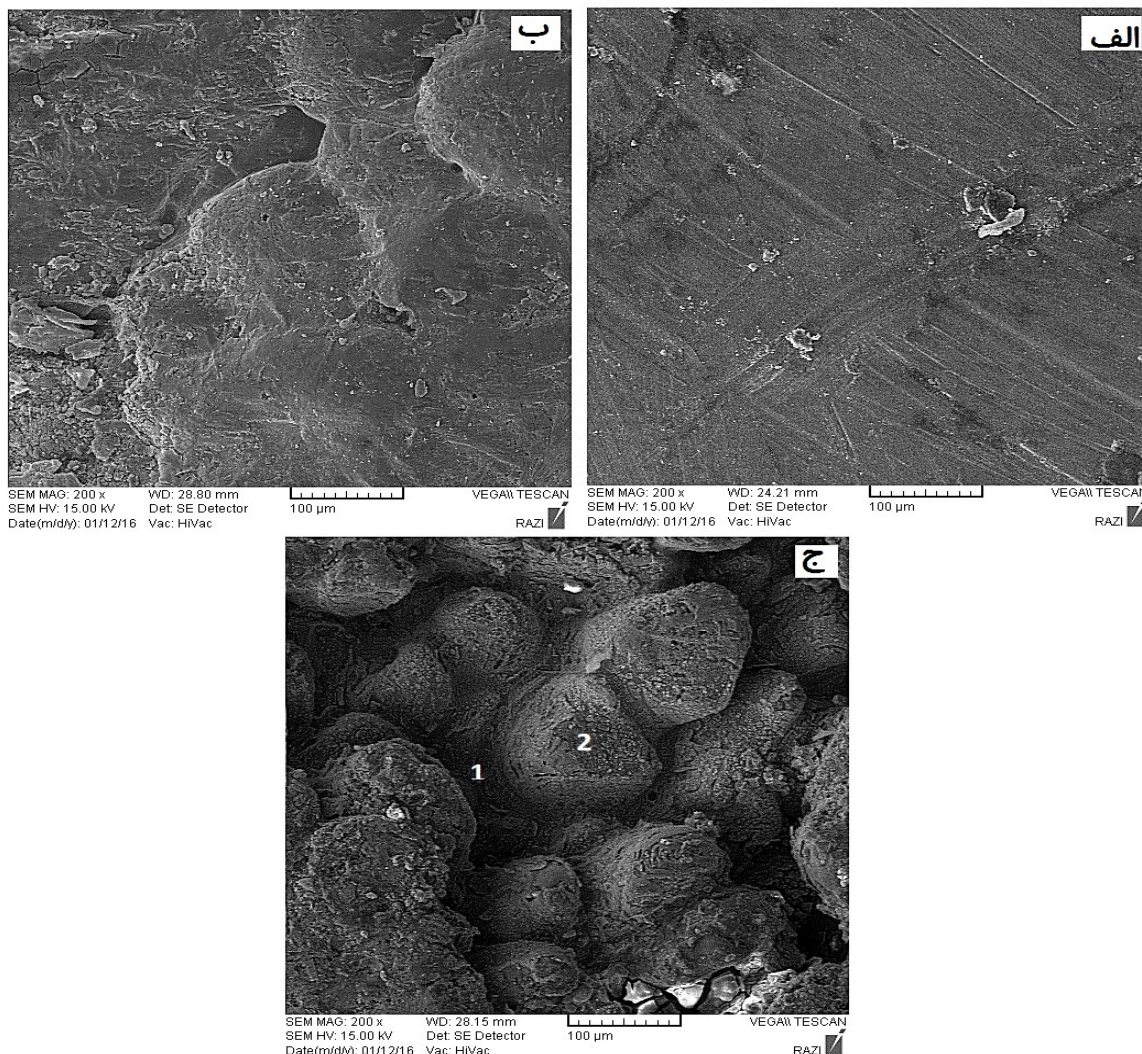
دمای عملیات حرارتی	E_{corr} V.S SCE (mV)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	b_a (mV/dec)	b_c (mv/dec)	C.R ($\mu\text{m}/\text{y}$)
640°C	-۱۲۱۱	۱۴/۲	۸۱	۱۳۷	۱۵۵
650°C	-۱۱۰۲	۱۳۲	۴۱	۳۹۸	۱۴۴۸
660°C	-۱۱۴۵	۳۵۴	۱۳۳	۳۲۵	۳۸۷۰

درجه سانتی‌گراد را بعد از آزمون خوردگی نشان می‌دهد. با توجه به این تصویر، خوردگی بین دانه‌های به دلیل غلظت بالای عناصر آلیاژی در این نواحی به دلیل نزدیکی به دمای ذوب و پس زده شدن عناصر آلیاژی از درون دانه‌ها به خوبی قابل مشاهده است. شکل (۱۳) آنالیز عنصری EDS از بین دانه‌ها و درون دانه تصویر شکل (۱۲-ج) را نشان می‌دهد (به ترتیب با شماره ۱ و ۲ مشخص شده‌اند). با مقایسه مقدار عناصر آلیاژی

در شکل (۱۲) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نمونه‌ها بعد از انجام آزمون خوردگی تافل در بزرگنمایی ۲۰۰ برابر نشان داده شده است. با افزایش دمای حرارت‌دهی در فرآیند SIMA از خوردگی یکنواخت در سطح کاسته شده و بر میزان خوردگی ترجیحی (موضعی) در نزدیکی ذوب (۶۶۰ درجه سانتی‌گراد) افزوده می‌شود. شکل (۱۲-ج)، سطح نمونه عملیات حرارتی شده در دمای 660°C

انتخاب شد. بیشتر از این دما به سبب مهاجرت عناصر آلیاژی به مرزدهانه‌ها و تشکیل مناطق یوتکتیک، خوردگی موضعی اتفاق می‌افتد.

در درون دانه و بین دو دانه، مشخص می‌شود که غلظت عناصر آلیاژی در درون دانه نسبت به بین دو دانه، کاهش چشمگیری داشته است. با توجه به نتایج، دمای عملیات حرارتی جهت دستیابی به ساختاری با روند خوردگی یکنواخت 640°C



شکل ۱۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نمونه‌های تهیه شده در فرآیند SIMA در دماهای مختلف عملیات حرارتی بعد از آزمون پلاریزاسیون تافل: الف) 640°C ، ب) 650°C و ج) 660°C .

نمونه‌ی ۳۰ درصد کار سرد شده، بیشترین فاکتور

شکل و یکنواختی در ریزساختار مشاهده شد.

۳- با افزایش دمای عملیات حرارتی میانگین اندازه

دانه‌ها کاهش و بر مقدار فاکتور شکل افزوده شد.

۴- افزایش دمای عملیات حرارتی در فرآیند SIMA

موجب افزایش کسر فاز مایع و افزایش گرادیان

غلظتی در ریزساختار شد.

۵- نتایج حاصل از آزمون خوردگی تافل نشان داد، با

افزایش درصد کار سرد پتانسیل خوردگی افزایش

می‌یابد و کمترین نرخ خوردگی در نمونه با ۳۰

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر فرآیند SIMA بر رفتار خوردگی آند

فدا شونده پایه آلومینیوم Al-Zn-In بررسی و نتایج ذیل حاصل شد:

۱- ریزساختار نمونه‌های تولید شده به روش SIMA

دارای دانه‌بندی ریزتر و میزان کرویت بیشتری در

مقایسه با ریزساختار اولیه آلیاژ می‌باشد.

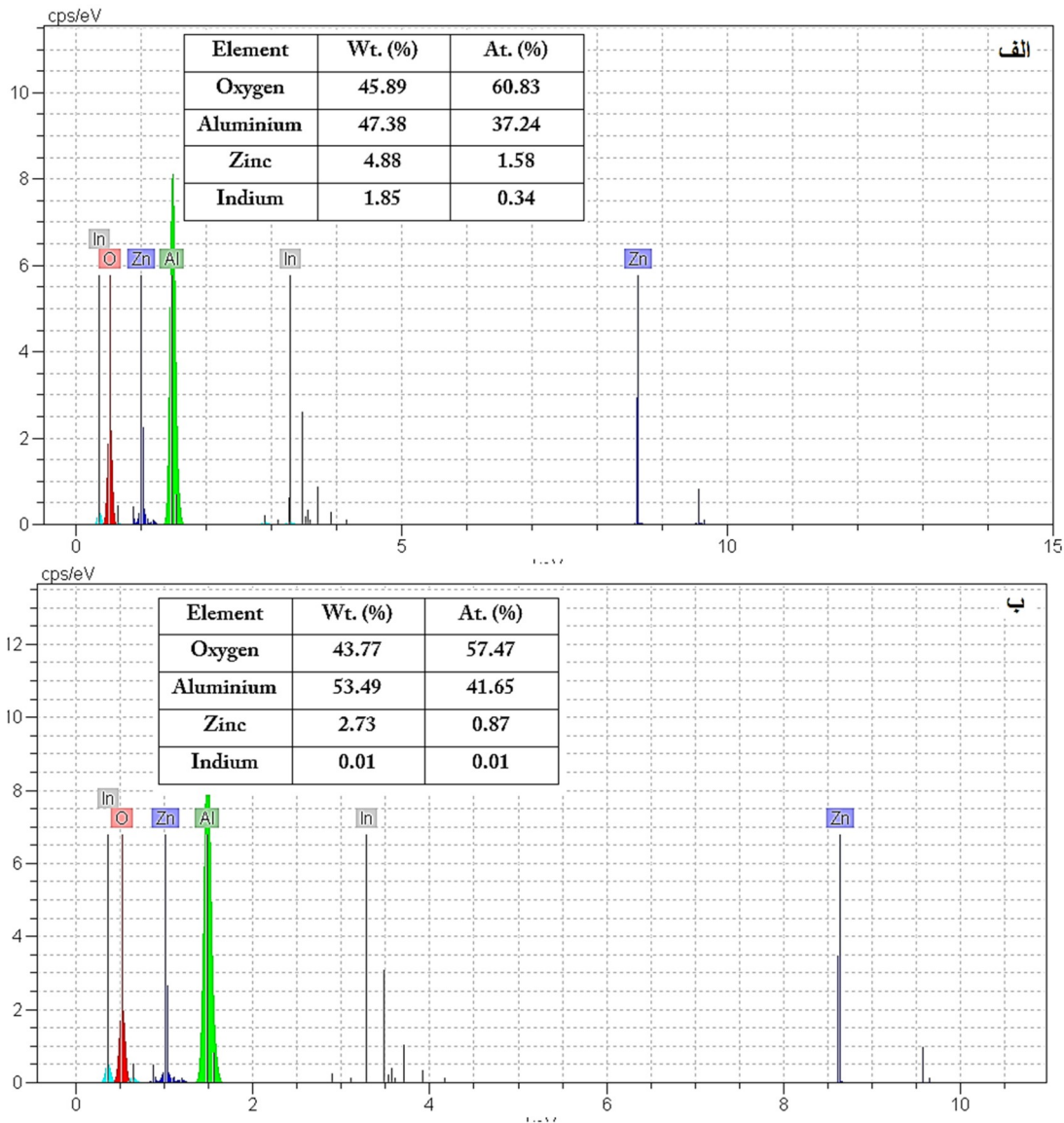
۲- با افزایش نسبت کار سرد به میزان ۲۰ درصد کمترین

مقدار اندازه دانه به دست آمد، در حالی که در

حرارتی شده در دمای ۶۴۰ درجه سانتی‌گراد با ۳۰ درصد کار سرد، به دلیل پتانسیل خوردگی بالا و از طرفی سطح خوردگی یکنواخت به عنوان نمونه بهینه در فرآیند SIMA در نظر گرفته شد.

درصد کار سرد اتفاق می‌افتد. همچنین افزایش دمای عملیات حرارتی از ۶۴۰ درجه سانتی‌گراد به بالا موجب خوردگی موضعی در آلیاژ می‌شود.

۶- با توجه نتایج آزمون خوردگی تافل و تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی، نمونه عملیات



شکل ۱۳. نتایج آنالیز عنصری از ریزساختار نمونه نشان داده شده در شکل (۱۰-ج): الف) بین دو دانه و ب) مرکز دانه.

Materials Science, 2010, 124, 124-179.

- Saklakoglu, N., Saklakoglu, I.E., Tanoglu, M., Oztas, O., Cubukcuoglu, O., Mechanical Properties and Microstructural Evaluation of AA5013 Aluminum Alloy Treated in the Semi-Solid State by SIMA Process, *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 148, 103-107.
- Koeune, R., Ponthot, J.P., An Improved Constitutive Model for the Numerical Simulation of Semi-Solid Thixoforming, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2010, 234, 2287-2296.
- Yilmaz, E., Cadirli, E., Acerc, E., Gunduz, M., Microstructural Evolution and Mechanical Properties in Directionally Solidified Sn-10.2 Sb Peritectic Alloy at a Constant Temperature Gradient, *International Journal of Materials Research*, 2016, 19, 370-378.
- Rosa, D.M., Spinelli, J.E., Osorio, W.R., Garcia, A., Effects of Cell Size and Macroseggregation on the

مراجع

- Keyvani, A., Emany, M., Saremi, M., Sina, H., Mahta, M., Influence of Casting Temperature on Electrochemical Behavior of Al-Zn-In Sacrificial Anodes, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 2005 24, 1-8.
- Bessone, B.J., Rafael, A., Sea Water Testing of Al-Zn, Al-Zn-Sn, and Al-Zn-In Sacrificial Anodes, *National Association of Corrosion Engineers*, 1981, 37, 533-540.
- Mohammadi, H., Ketabchi, M., Investigation of Microstructural and Mechanical Properties of 7075 Al Alloy prepared by SIMA Method, *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, 2013, 10, 3, 32-43.
- Kirkwood, D.H., Suery, M., Kapranos, P., Atkinson, H.V., Young, K.P., Semisolid Processing of Alloys, *Springer in*

- Corrosion Behavior of a Dilute Pb-Sb Alloy, *Journal of Power Sources*, 2006, 162, 696-705.
9. Haghparast, A., Nourimotlagh, M., Alipour, M., Effect of the Strain-Induced Melt Activation (SIMA) Process on the Tensile Properties of a New Developed Super High Strength Aluminum Alloy Modified by Al₅Ti₁B Grain Refiner, *Journal of Materials Characterization*, 2012, 71, 6-18.
 10. Alipour, M., Emamy, M., Eslami, R., Siadati, M. H., Khorsandi, H., Effect of a Modified SIMA Process on the Structure, Hardness and Mechanical Properties of Al-12Zn-3Mg-2.5Cu Alloy, *Journal of Materials Science & Engineering*, 2015, 12, 77-88.
 11. Yan, G., Zhao, S., Ma, S., Shou, H., Microstructural Evolution of A356.2 Alloy Prepared by the SIMA Process, *Journal of Materials Characterization*, 2012, 69, 45-51.
 12. Salinas, D.R., Garcia S.G., Bessone, J.B., Influence of Alloying Elements and Microstructure on Aluminium Sacrificial Anode Performance: Case of Al-Zn, *Journal of Applied Electrochemistry*, 1999, 29, 1063-1071.
 13. Clarke, A., Imhoff, S., Gibbs, P., Cooley, J., Morris, C., Merrill, F., Hollander, B., Mariani, F., Ott, T., Barker, M., Tucker, T., Lee, W.K., Fezzaa, K., Deriy, A., Patterson, B., Clarke, K., Montalvo, J., Field, R., Thoma, D., Smith, J., Teter, D., Proton Radiography Peers into Metal Solidification, *Journal of Scientific Reports*, 2013, 3, 1-6.
 14. Rokni, M.R., Zarei-Hanzaki, A., Abedi, H.R., Haghdad, N., Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Backward Thixoextruded 7075 Aluminum Alloy, *Journal of Materials and Design*, 2012, 36, 557-563.
 15. Zhang, L., Liua, Y.B., Cao, Z.Y., Zhang, Y.F., Zhang, Q. Q., Effects of Isothermal Process Parameters on the Microstructure of Semisolid AZ91D Alloy Produced by SIMA, *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209, 792-797.
 16. Bolouri, A., Shahmiri, M., Kang, C.G., Study on the Effects of the Compression Ratio and Mushy Zone Heating on the Thixotropic Microstructure of 7075 Aluminum Alloy Via SIMA Process, *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509, 402-408.
 17. Birol, Y., Thixoforming of EN AW-2014 Alloy at High Solid Fraction *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211, 1749-1756.
 18. Keyvani, A., Saremi, M., Saeri, M.R., Anodic Behavior of Al-Zn-In Sacrificial Anodes at Different Concentration of Zinc and Indium, *International Journal of Materials Research*, 2012, 103, 12, 1533-1538.