

مقایسه ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ ۷۰۷۵ حاصل از دو روش متداول و اصلاح شده

SIMA

مصطفی کارآموز^{۱*}، مصطفی علیزاده^۲، علیرضا احمدی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۳۰، ش.ص ۱۴۷-۱۵۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۱۶)

چکیده

در این مطالعه، ریزساختارها و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ حاصل از دو روش فعالسازی مذاب در اثر اعمال کرنش (SIMA) متداول و SIMA اصلاح شده بررسی شده‌اند. می‌توان گفت که ریزساختار مطلوب برای شکل‌دهی نیمه‌جامد، ریزساختار غیردندریتی با کرویت مناسب است. در این مطالعه، نوعی اصلاح شده از روش SIMA برای مقایسه با نوع متداول آن بکار برده شد بطوری که نوار آنیل شده آلیاژ ۷۰۷۵ که پس از نورد در یک کوره الکتریکی در دمای 590°C به مدت زمان-های مختلف نگهداری شده و سپس تا 500°C سرد شده و در آب سرد سریعاً خنک گردید. سپس مرحله ذکر شده بدون انجام نورد تکرار شد. نتایج حاکی از بهبود محسوس ریزساختار و خواص مکانیکی محصول روش SIMA اصلاح شده بودند به گونه‌ای که در این روش، نه تنها ساختار گلوبولی ریزتر و همگن‌تر در آلیاژ تشکیل شد، بلکه سبب توزیع همگن‌تر فازهای ثانویه به صورت ناپیوسته در مرزدانه نیز گردید و ساختار یوتکتیک را در آلیاژ حذف نمود. این بهبود ساختار، منجر به بهبود خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی از 371 MPa به 442 MPa ، انعطاف‌پذیری از $4/2$ درصد به $13/1$ درصد گردید. همچنین، علی‌رغم کاهش میکروسختی بیشینه در مرزدانه، سطح میکروسختی در دانه‌ها ارتقاء یافته و شکل‌پذیری نیز بطور محسوسی بهبود پیدا کرد.

واژه‌های کلیدی: شکل‌دهی نیمه‌جامد، SIMA، آلیاژ ۷۰۷۵، خواص مکانیکی.

^۱-دانشجوی دکتری، پژوهشکده مواد، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

^۲-استادیار، پژوهشکده مواد، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

^۳- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

*- نویسنده مسول مقاله: ایمیل: ravari@alumni.ut.ac.ir

پیشگفتار

شکل‌دهی نیمه‌جامد^۱ (SSM) یکی از روش‌های جذاب فراوری مواد به عنوان روشی جایگزین برای روش‌های سنتی فورج یا ریخته‌گری است. مزایای شکل‌دهی SSM عبارتند از:

- ۱- ایجاد قابلیت بهتر برای مواد در پرکردن یک قالب؛
- ۲- عمر طولانی‌تر قالب؛
- ۳- ایجاد خواص مکانیکی بهتر برای خواص مکانیکی [۱].

شکل‌دهی نیمه‌جامد که بطور گسترده‌ای در حوزه صنعت خودروسازی، هوا و فضا نوردی بکار رفته است. یک روش بسیار مناسب برای فراوری مواد است. روش‌های متعددی برای اعمال شکل‌دهی نیمه‌جامد وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به تیکزوکستینگ^۲، تیکزومولدینگ^۳ و فعالسازی مذاب در اثر اعمال کرنش^۴ (SIMA) اشاره نمود.

در میان این روش‌ها، روش SIMA به دلیل سادگی خود، قابلیت عملکردی بهتری دارد و مورد توجه پژوهشگران زیادی برای فراوری آلیاژهای مختلف قرار گرفته است. برای نمونه، Sirong و همکاران [۱] تحولات میکروساختاری آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ را بر اثر فرایند SIMA بررسی نموده و یک مدل میکروساختاری برای این آلیاژ ارائه کردند. اساس مدل پیشنهادی آن‌ها، ارتباط بین اندازه دانه و کرنش و تاثیرات واردسازی نیروهای تک‌محوره پیش از بازگرمایش بر پایه تغییرات میکروساختاری بود. Yan و همکاران [۲]، تحولات میکروساختاری آلیاژ A356.2 را با انجام فرایند گرم نورد گوه‌ای عرضی پیش از فشرده‌سازی سرد در فرایند SIMA مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها چنین مشاهده کردند که پس از نورد گوه‌ای عرضی، دانه‌های ممتد درشت در میکروساختار وجود داشت؛ اما پس از انجام فرایند SIMA، دانه‌های ظریف‌کروی حاصل شد. Lin و

همکاران [۳]، قابلیت شکل‌پذیری دمابالای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ را به‌وسیله فرایند SIMA مطالعه کردند. در واقع، موضوع مورد بررسی آن‌ها یافتن ارتباط بین سیلان فلز و میکروساختار آلیاژ فراوری‌شده به روش SIMA بود. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که انجام فرایند SIMA نسبت به آنیل کامل، موجب شکل‌دهی فلز به شکل فشاری می‌شود. پرشیزفرد و همکاران [۴]، خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم A380 را در حالت ریخته‌گری‌شده با حالت فراوری‌شده با SIMA مقایسه نموده و نتیجه گرفتند که در حالت فراوری‌شده با SIMA، استحکام تسلیم، کششی و ازدیاد طول بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا کرد.

فرایند SIMA از چهار مرحله جداگانه تشکیل می‌گردد. در مرحله نخست، قطعه برای حصول میکروساختار دندریتی ریخته‌گری می‌شود. در مرحله دوم، کار داغ برای دستیابی به یک میکروساختار جهت‌دار و نیز کاهش ضخامت قطعه ریختگی صورت می‌گیرد. سومین مرحله از اجرای کار سرد روی آلیاژ برای ایجاد یک سطح بحرانی از انرژی ذخیره شده تشکیل می‌گردد. در نهایت، آلیاژ تغییرشکل‌داده بطور ناقص در حالت نیمه‌جامد ذوب مجدد می‌شود و برای مدتی کوتاه بطور همدمان نگهداری می‌شود. در SIMA، پیش تغییرشکل برای ایجاد کرنش در ماده مورد نظر استفاده می‌شود [۵] و [۶]. بطور کلی در حین نگهداری همدمان، تبلور مجدد رخ داده و پس از تشکیل مذاب، مرزدانه‌ها تر شده و مذاب به درون آن نفوذ می‌کند که منجر به تشکیل دانه‌های هم‌محور/گلوبولی ظریف می‌شود [۷ و ۸]. روش‌های مختلفی از جمله نورد، فورجکاری و اکستروژن را می‌توان برای تغییرشکل ماده بکار برد؛ اما همه این روش‌ها دارای محدودیت‌هایی در مقدار کرنش و نیز همگی قابل اعمال در هر مرحله دارند. در نتیجه، برای غلبه بر این محدودیت‌ها، چند فرایند جدید در حال توسعه هستند

1- Semi solid forming

2- thixocasting

3-thixomoliding

4- Strain Induced Melt Activation

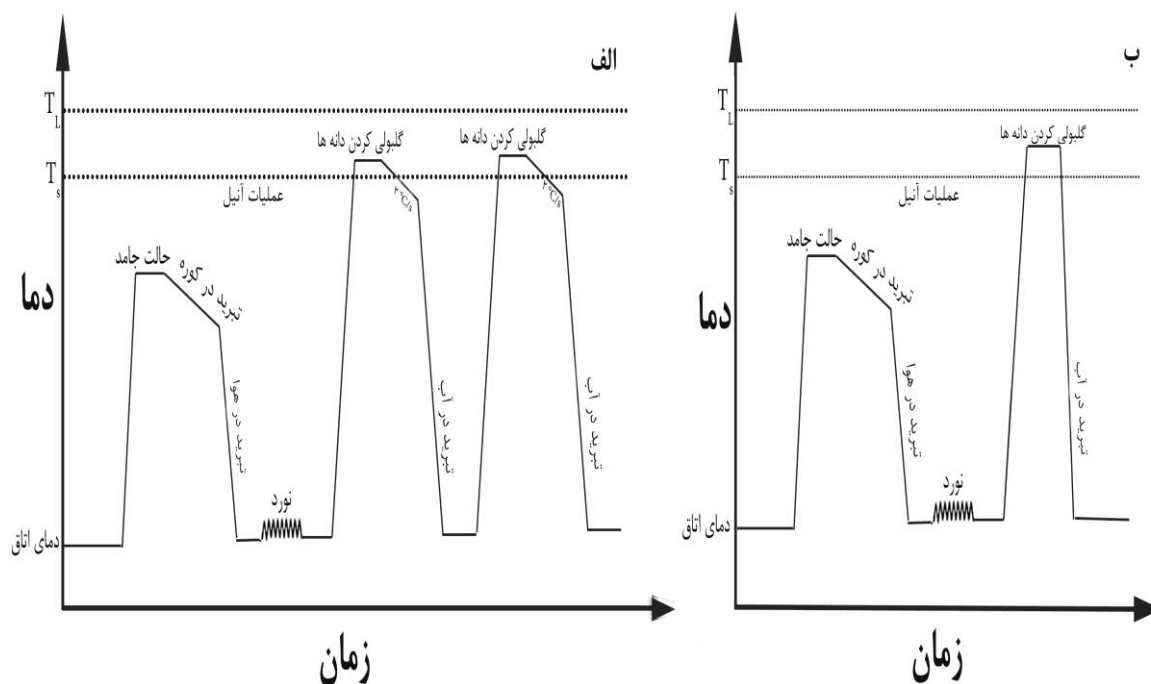
بدین ترتیب ساختار نیمه جامد کروی حاصل می‌شود. از آنجا که این روش اساساً بر پایه ذوب و کنترل انجماد قرار ندارد در نتیجه معایب موجود در روش‌های وابسته به آن را ندارد.

Yan et al. [۲] گزارش دادند که نسبت فشرده-سازی بالاتر، منجر به دانه‌های ریزتر و کرویت بهتر می‌شود. حق پرست و همکاران [۱۲] ثابت کردند که یک زمان نگهداری و دمای بهینه برای مرحله دوم فرایند SIMA وجود دارد که منجر به یکنواختی بهینه در دانه‌های گلبولی می‌شود؛ اما تهیه آلیاژ فلز نیمه جامد بسیار مهم است؛ زیرا یک ساختار گلبولی جامد مورد نیاز است که تاثیر مهمی بر خواص محصولات حاصل از شکل‌دهی نیمه جامد دارد. برای فرایند SIMA متداول، علی‌پور و همکاران [۱۳] بیان کرده‌اند که برای یک مقدار پیش-تغییر شکل ثابت، ترکیب‌هایی از اندازه متوسط گلبول و فاکتور شکل در دمای 590°C و زمان نگهداری ۲۰ دقیقه می‌توان به دست آورد. هم‌چنین، آن‌ها نشان دادند که بکارگیری SIMA متداول، منجر به ایجاد ساختار یوتکتیک در ریزساختار می‌شود. بنابراین، وجود این ساختار ترد در ریزساختار، منجر به تضعیف خواص مکانیکی آلیاژ می‌شود. در نتیجه، اگر فرایند SIMA به-گونه‌ای طراحی شود که منجر به عدم تشکیل ساختار یوتکتیک در ساختار گردد، خواص مکانیکی آلیاژ نیز بطور قابل توجهی بهبود می‌یابد. بنابراین، هدف از انجام این پژوهش، اصلاح روش SIMA متداول برای حذف مخلوط یوتکتیک در آلیاژ 7075 و بهبود خواص مکانیکی آن می‌باشد. انتخاب آلیاژ 7075 در این پژوهش به دلیل کاربردهای مهم این آلیاژ از جمله در صنایع هوافضا و نظامی است و نیز اینکه استحکام آن در حد فولاد بوده و در میان آلیاژهای آلومینیوم از بالاترین مقدار استحکام برخوردار است. در نتیجه، بهبود خواص این آلیاژ، می‌تواند به گسترش کاربردهای آن به دیگر حوزه‌های صنعتی نیز منجر گردد.

که می‌توان از آن‌ها در کاربردهای تجاری و مهندسی استفاده نمود [۹].

افزایش مقدار مذاب در مرز دانه‌ها با افزایش دمای گلبولی کردن در فرایند SIMA قابل انتظار است. به دلیل اثرات کشش سطحی و انحنای فصل مشترک، لبه‌های محدب دندریت‌ها ذوب شده و مساحت فصل مشترکی دندریت‌ها را می‌کاهند که منجر به انرژی آزاد کم‌تر می‌شود. به علاوه، به دلیل غلظت بالاتر عنصر حل‌شونده در قسمت‌های مقعر، مقدار مذاب در این بخش‌های دانه افزایش می‌یابد. هنگامی که مذاب‌های دو بخش مقعر به هم می‌رسند، دانه‌ها به دانه‌های کوچک جداگانه تقسیم می‌شوند. شایان ذکر است که انحلال بیش‌تر یوتکتیک‌ها و کروی شدن دانه‌های $\alpha\text{-Al}$ ، نتیجه افزایش دمای عملیات حرارتی می‌باشند. به دلیل افزایش ظرفیت نفوذ و حل‌شوندگی عناصر در $\alpha\text{-Al}$ در دماهایی بالاتر از دمای یوتکتیک، فاز یوتکتیک بطور کامل حل شده و اتم‌ها به دانه‌های $\alpha\text{-Al}$ نفوذ می‌کنند. از آنجا که بازوهای ثانویه کوچک هستند، هنگامی که یوتکتیک‌های بین این بازوها بطور کامل ذوب می‌شوند، این بازوها درشت شده بهم می‌پیوندند و در نهایت ناپدید می‌شوند [۹ و ۱۰]. بلوری و همکاران [۱۱]، افزایش در سطح عناصر آلیاژی در مرز دانه‌ها و قطرات مذاب بدام افتاده را نشان دادند. آن‌ها هم‌چنین نشان دادند که فاز یوتکتیک غنی از ZnCu در مرز دانه‌ها، منجر به تضعیف خواص مکانیکی به‌ویژه انعطاف‌پذیری گردید.

طرحواره فرایند SIMA متداول در شکل ۱(الف) نشان داده شده است. بر خلاف بیش‌تر روش‌های تولید مواد نیمه جامد که بر کنترل ریزساختار در حین انجماد ماده (یعنی شکستن دندریت‌ها و جلوگیری از تشکیل ساختار دندریتی) تمرکز دارند در این روش، نیروی محرکه لازم برای تبلور مجدد دانه‌های جدید هم‌محور فراهم می‌شود که در ادامه گرمایش ماده، ذوب در مرزهای شبه‌کروی ساختار تبلور مجدد یافته جوانه زده و



شکل ۱- طرحواره فرایندهای انجام شده: الف- روش ۱: SIMA اصلاح شده ب- روش ۲: SIMA متداول

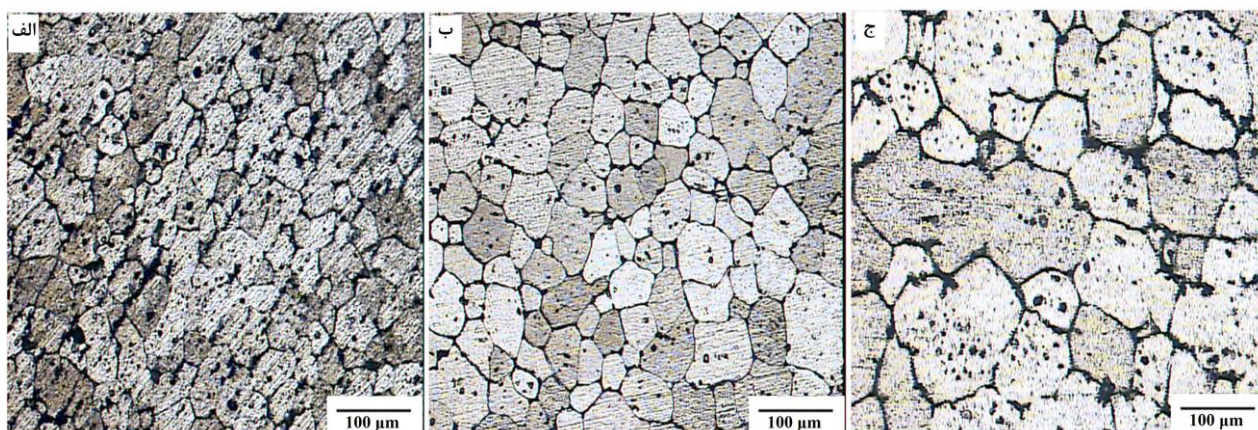
روش دوم که همان فرایند SIMA است، نمونه نورد شده در دمای 590°C به مدت ۲۰ دقیقه نگهداری شده (زمان و دمای نگهداری بهینه بر اساس مرجع [۱۳]) و سپس بلافاصله در آب سرد خنک گردید. به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها، بعد از انجام فرایندهای مذکور نمونه‌ها با کاهش ضخامت ۳۰٪ نورد شده و رفتار آن‌ها در ایجاد و رشد ترک مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی‌های ریزساختاری، نمونه‌های به‌دست آمده به صورت مکانیکی پولیش گردیده و سپس در محلول شیمیایی کلر اچ گردیدند. به منظور مشاهدات دقیق‌تر، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, Cam Scan MV2300) مجهز به دستگاه آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^۲ (EDS) استفاده شد. جهت مقایسه ریز ساختاری از دو پارامتر میانگین اندازه دانه و فاکتور شکل استفاده گردید که این امر توسط نرم افزار آنالیز تصویری کلیمکس (Clemex) مطابق با استاندارد ASTM E-12 مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین، تست کشش نیز با نرخ کرنش اولیه $1/66 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، نوار آنیل شده آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ به‌عنوان ماده اولیه مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌هایی با ابعاد $6 \times 10 \times 20$ میلی‌متر از نوار اولیه برش داده شد و سپس فرایند نورد با کاهش ضخامت ۳۰٪ (ماشین نورد با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و قدرت ۱۸ تن) انجام گرفت. بعد از فرایند نورد، دو فرایند مختلف روی نمونه‌ها انجام گرفت. با توجه به شکل (الف)، در روش اول که روشی دو مرحله‌ای بود، نمونه‌های نورد شده در یک کوره الکتریکی در دمای 590°C درجه سانتیگراد (دمای نیمه جامد) به مدت زمان‌های مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه نگهداری شده و سپس تا دمای 500°C درجه سانتیگراد با سرعت سرمایش ثابت $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ سرد و در انتها در آب سرد، سریعاً خنک شدند. لازم به ذکر است که کاهش دما به‌وسیله دستگاه داده‌بردار^۱ ثبت شد. در مرحله دوم، مرحله اول دوباره تکرار شد، با توجه به این موضوع که مرحله نورد اولیه دیگر انجام نگرفت. در

^۲ Energy-dispersive X-ray spectroscopy

^۱ Data-logger



شکل ۲- ریزساختار نمونه‌های حاصل از روش ۱ در مدت زمان‌های مختلف نگهداری: الف- ۵ دقیقه، ب- ۱۰ دقیقه و ج- ۱۵ دقیقه

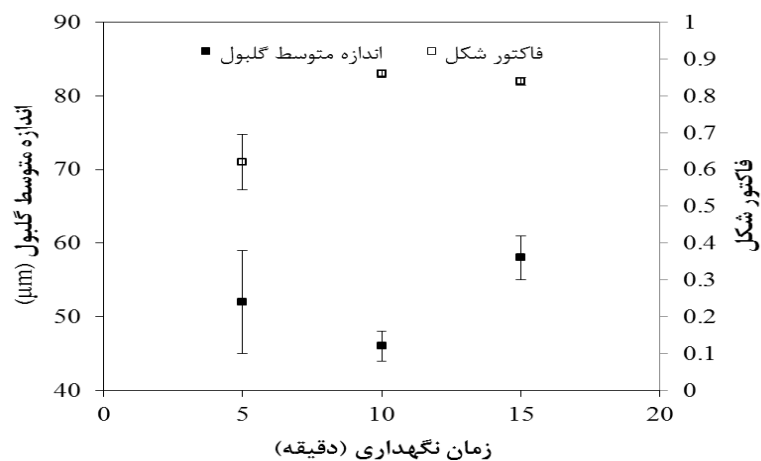
سپس ثابت می‌شود و اندازه دانه به حداقل مقدار ۴۵ میکرومتر در مدت زمان ۱۰ دقیقه رسیده و سپس افزایش می‌یابد.

با توجه به نتایج آنالیز تصویری، بهترین زمان نگهداری برای حالت بهینه اندازه دانه و فاکتور شکل (یا به عبارتی بهترین میکروساختار) مدت زمان ۱۰ دقیقه می‌باشد. شکل ۴ میکروساختار نوری آلومینیوم ۷۰۷۵ بعد از انجام روش ۲ (فرایند SIMA) را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، با انجام آن ساختار گلبولی شده و ساختار تغییر شکل یافته از بین می‌رود. میانگین اندازه دانه و فاکتور شکل برای هر دو روش در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، می‌توان ملاحظه کرد که اندازه دانه روش ۲ به مراتب بزرگ‌تر از روش ۱ بوده و همچنین دانه‌های گلبولی در روش ۱ همگن‌تر و کروی‌تر نسبت به روش ۲ در ساختار مشاهده می‌شود. در واقع علت ریزش دانه‌ها در روش ۱ را می‌توان به این موضوع نسبت داد که رشد دانه براساس زمان به صورت تصاعدی رشد می‌کند و هنگامی که در روند رشد دانه وقفه ایجاد شود، زمان کافی برای رشد دانه وجود ندارد. در نتیجه، پتانسیل لازم برای رشد حداکثری دانه کاهش پیدا می‌کند. ضمناً، میله‌های انحراف میانگین^۱ هم در آنالیز اندازه دانه و هم فاکتور شکل در روش ۱ کوتاه‌تر از روش ۲ می‌باشد که این نیز نشان از تکرارپذیری بیش‌تر روش ۱ دارد.

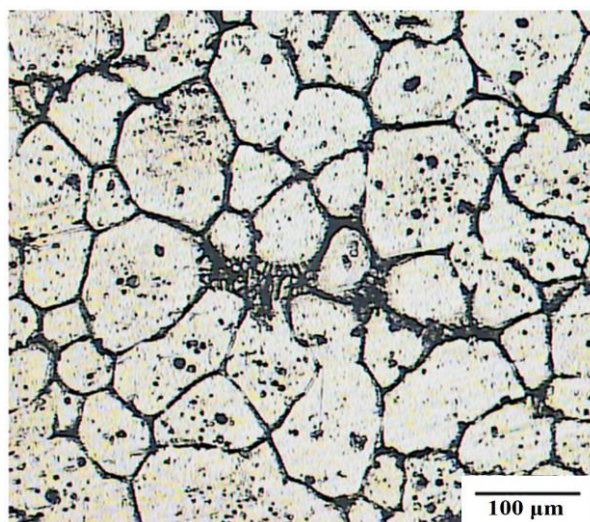
نتایج و بحث

شکل ۲ میکروساختار نمونه‌های روش ۱ در زمان‌های مختلف نگهداری در دمای ثابت 59.0°C را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، بهترین زمان نگهداری از لحاظ ریزدانگی و همگنی ساختار گلبولی متعلق به شکل ۲ (ب) با مدت زمان نگهداری ۱۰ دقیقه می‌باشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در مدت زمان‌های نگهداری کم‌تر (۵ دقیقه)، اگرچه ساختار کمی گلبولی شده است؛ اما هنوز ساختار تغییر شکل یافته اولیه توسط فرایند نورد در ریزساختار مشاهده شده و دانه‌های گلبولی شده به طور مشخص تشکیل نشده است (شکل ۲ الف). با افزایش زمان نگهداری (۱۰ دقیقه)، ضخامت فیلم مایع به طور قابل توجهی افزایش یافته و دانه‌های اولیه و تغییر شکل یافته به صورت قابل ملاحظه‌ای کروی شده و به دانه‌های گلبولی ریزتر و با ساختار همگن‌تری تبدیل می‌شود (شکل ۲ ب). البته در زمان‌های نگهداری بالاتر رشد دانه اتفاق افتاده که دانه‌های بزرگ‌تر رشد کرده و دانه‌های کوچک‌تر به نفع دانه‌های بزرگ‌تر حل می‌گردد (شکل ۲ ج). شکل ۳ تغییرات اندازه میانگین دانه و فاکتور شکل را براساس مدت زمان نگهداری در دمای 59.0°C بعد از انجام روش ۱ نشان می‌دهد. با افزایش زمان نگهداری، اندازه دانه ابتدا کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد و فاکتور شکل نیز ابتدا افزایش یافته و در زمان‌های بالاتر ثابت می‌شود. با توجه به شکل، فاکتور شکل به مقدار حداکثری ۰/۸۵ در زمان نگهداری ۱۰ دقیقه رسیده و

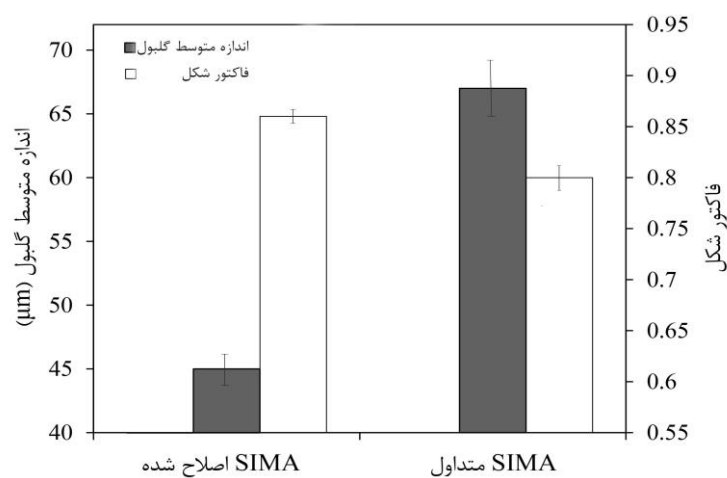
^۱-Error bar



شکل ۳- تغییرات اندازه میانگین دانه و فاکتور شکل بر حسب مدت زمان نگهداری در دمای ۵۹۰ °C بعد از انجام روش اصلاح شده SIMA



شکل ۴- ریزساختار نوری آلومینیوم ۷۰۷۵ بعد از انجام فرایند SIMA متداول



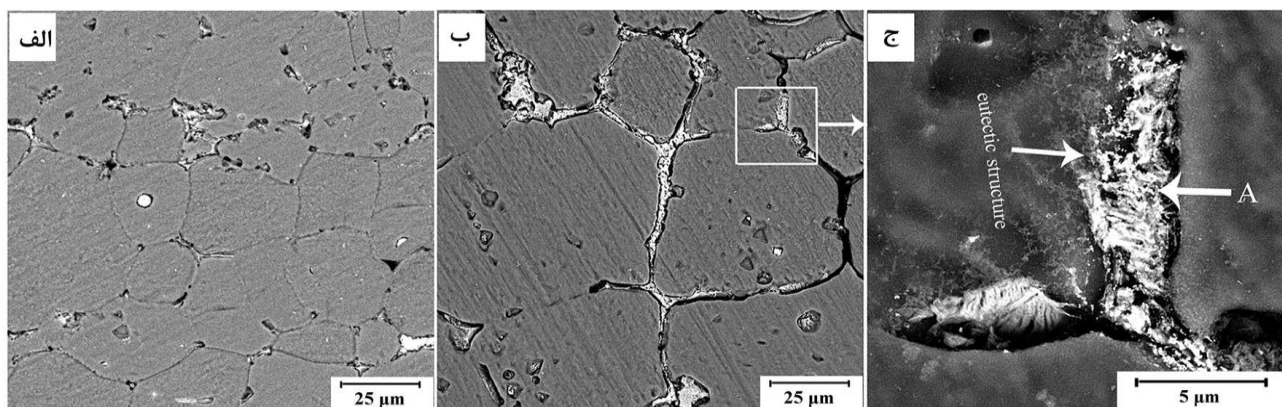
شکل ۵- میانگین اندازه دانه و فاکتور شکل برای هر دو روش انجام شده در این پژوهش

مرزدانه و همچنین ساختار یوتکتیک شروع به حل شدن در زمینه می‌نماید. هنگامی که مدت زمان نگهداری افزایش می‌یابد، ساختار غیرتعادلی یوتکتیک به تدریج در زمینه حل شده و مقدار فازهای باقیمانده نیز به تدریج کاهش می‌یابد. همچنین، هنگام سرمایش از ناحیه نیمه جامد به ناحیه جامد (۵۹۰ درجه سانتیگراد به ۵۰۰ درجه سانتیگراد در روش ۱) سرعت سرد کردن تقریباً نزدیک به حالت تعادلی بوده و در نتیجه سبب می‌شود که در هنگام سرمایش هم در منطقه مذاب و هم جامد نفوذ کامل صورت گیرد و در نهایت از تشکیل فازهای غیر تعادلی مانند فاز یوتکتیک در مرزدانه‌ها جلوگیری شود. در ضمن باید به این نکته توجه شود که دلیل تکرار آخرین مرحله روش ۱ برای جلوگیری از رشد دانه می‌باشد. می‌توان گفت که به دلیل غلظت بالای عناصر آلیاژی در آلیاژ ۷۰۷۵ و نیز انجماد غیرتعادلی در فرایندها، یوتکتیک‌های با نقطه ذوب پائین در مرزدانه‌ها تشکیل شدند. پس از نگهداری در 590°C ، بخش‌هایی از فازهای ثانویه و یوتکتیک‌هایی خاکستری رنگ شبکه‌ای آلیاژ شروع به حل شدن درون زمینه کردند. با افزایش زمان نگهداری، انحلال تدریجی یوتکتیک‌های یا نقطه ذوب کم و نیز کاهش آهسته اندازه فازهای پسماند رخ داد. در فرایند سیمای جدید، پس از انحلال ساختار یوتکتیک در 590°C ، چون شرایط نزدیک به تعادل بود و نفوذ در جامد و مذاب کامل بود، یوتکتیک‌های غیرتعادلی با نقطه ذوب کم در مرزدانه‌ها در حین فرایند تبرید تشکیل نشدند.

شکل ۶ میکروگراف میکروسکوپ الکترونی را برای دو روش به کار رفته نشان می‌دهد. در روش ۱ (شکل ۶ الف) در مقایسه با روش ۲ (شکل ۶ ب)، علاوه بر ایجاد ساختار گلبولی، دانه‌ها ریزتر شده، مرزدانه افزایش یافته و ضخامت این مرزها کاهش می‌یابد. همچنین در روش ۱ برخلاف روش ۲ (رسوبات پیوسته در مرز دانه)، رسوبات به صورت ناپیوسته و همگن در ساختار ایجاد شده و ساختار یوتکتیک به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و حتی در ساختار مشاهده نمی‌گردد. در حالی که مطابق با شکل ۶ (ب)، روش ۲ منجر به تشکیل رسوبات درشت و پیوسته در مرزدانه گردیده و علاوه بر آن میزان قابل توجهی ساختار یوتکتیک در مرزهای سه‌گانه نیز تشکیل می‌شود. شکل ۶ (ج)، منطقه A در شکل ۶ (ب) را در بزرگنمایی بالاتر نشان می‌دهد.

برای بررسی دقیق‌تر، آنالیز EDS بر روی فازهای ثانویه انجام گرفت که در جدول ۱ فهرست شده‌اند. مطابق با این جدول، هر دو ساختار یوتکتیک با ترکیب شیمیایی $\text{Al}/\eta(\text{MgZn}_2)$ و $\text{Al}/\text{S}(\text{Al}_2\text{CuMg})$ گزارش شده در مرجع [۱۴ و ۱۵] که در شکل ۶ (ج) در منطقه A قابل رویت می‌باشند.

هنگام انجماد، در فرایند SIMA متداول (روش ۲)، ساختار یوتکتیک با نقطه ذوب پایین در مرزدانه‌ها تشکیل می‌شود. این مساله به دلیل تجمع زیاد عناصر آلیاژی در این مناطق و همچنین انجماد غیرتعادلی در حین فرایند می‌باشد. در روش ۱، بعد از نگهداری قطعه در دمای 590°C بخش‌هایی از فازهای موجود در



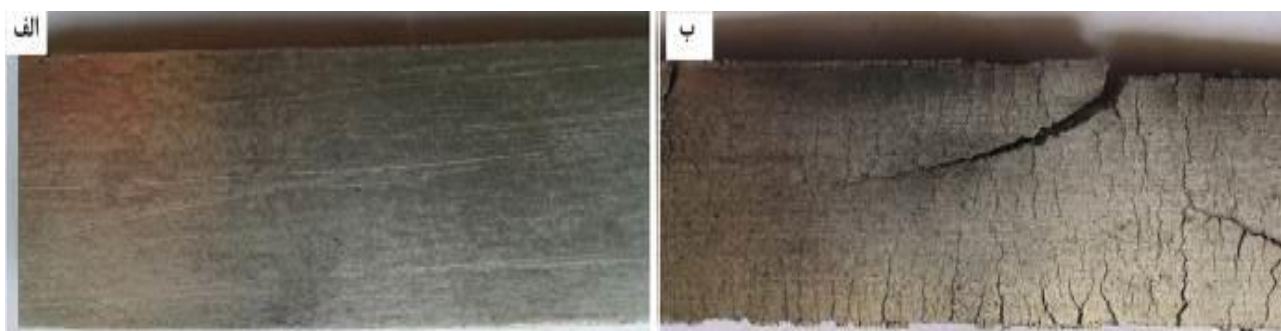
شکل ۶- میکروگراف میکروسکوپ الکترونی حاصل از دو روش SIMA متداول و SIMA اصلاح شده. الف- روش SIMA اصلاح شده ب- روش SIMA متداول ج- قسمت ب در بزرگنمایی بالاتر

جدول ۱- نتایج آنالیز EDS آلیاژ ۷۰۷۵ مورد بررسی

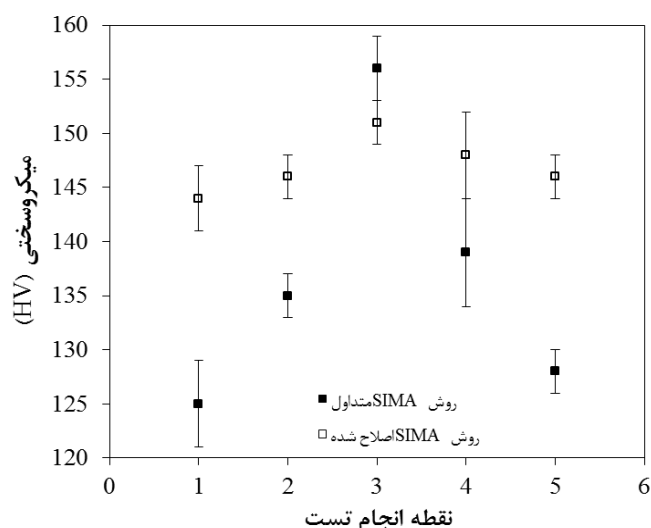
مقدار عنصر (درصد وزنی)						ناحیه مورد بررسی
Al	Fe	Zn	Cu	Mn	Mg	A
۷۸/۲۹	۰/۳۵	۹/۲۰	۸/۵۶	۰/۱۵	۳/۴۵	

سنجش میکروسختی در هر دو روش نشان داده شده است. شکل ۹ و جدول ۲، نتایج حاصل از تست کشش را نشان می‌دهند.

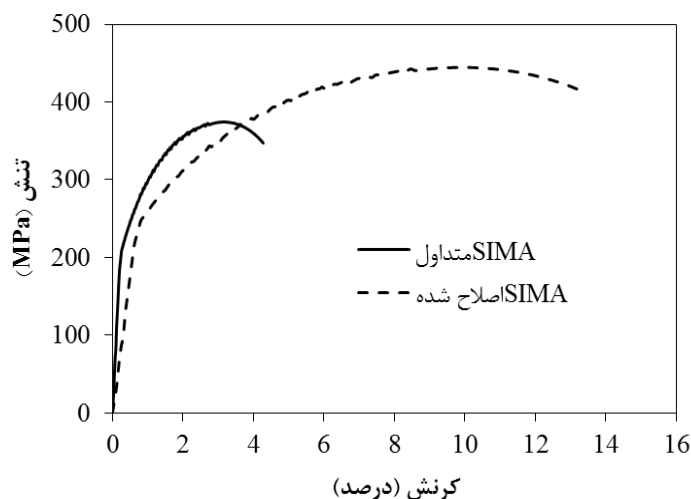
شکل ۷، نمونه‌های نورد شده را نشان می‌دهد که ثابت می‌کند در روش SIMA اصلاح شده، شکل‌پذیری آلیاژ ۷۰۷۵ بطور محسوسی بهبود یافته و هیچ شکست و ترکی نیز ایجاد نشده است. همچنین در شکل ۸، نتایج



شکل ۷- نمونه‌های نورد شده حاصل از فرایند الف - SIMA اصلاح شده ب - SIMA متداول



شکل ۸- میکروسختی نمونه‌های حاصل از دو روش SIMA اصلاح شده و SIMA متداول (نقاط ۱، ۲، ۴ و ۵ درون دانه و نقطه ۳ در مرز دانه واقع شده بودند)



شکل ۹- مقایسه منحنی تنش-کرنش برای نمونه‌ای فراوری شده به دو روش SIMA اصلاح شده و SIMA متداول

جدول ۲- نتایج حاصل از تست کشش برای دو روش بکار رفته در این پژوهش

درصد ازدیاد طول	UTS (MPa)	نوع روش
$13/1 \pm 0/4$	442 ± 4	روش ۱ (SIMA اصلاح شده)
$4/2 \pm 1$	$371 \pm 6/8$	روش ۲ (SIMA متداول)

مورفولوژی و نحوه توزیع آن‌ها در ساختار آلیاژ می‌تواند به طور چشمگیری خواص مکانیکی آلیاژ را تحت تاثیر قرار دهد. همچنین، نتایج تست میکروسختی نشان می‌دهد اگر چه نتایج به دست آمده در روش ۲ در نقطه ۳، اندکی بالاتر بوده است؛ اما مقادیر میکروسختی حاصل از روش ۱، در دیگر نقاط بالاتر بوده و همچنین از یکنواختی بسیار بیشتری نیز برخوردار بوده است که علت آن حذف تقریبی ساختار یوتکتیک و توزیع یکنواخت‌تر فازهای بین‌فلزی در روش SIMA اصلاح شده است.

نتیجه‌گیری

۱- در روش SIMA اصلاح شده (روش ۱)، برای تغییر شکل اولیه ۳۰٪ و نگهداری در دمای ثابت ۵۹۰ درجه

واضح است که خواص مکانیکی از جمله شکل‌پذیری، استحکام کششی، انعطاف‌پذیری آلیاژهای فلزی به ساختار مرزدانه و نحوه قرارگیری رسوبات و ساختار یوتکتیک در آن وابسته می‌باشد. بنابراین، از جمله دلایل اصلی برای بهبود خواص مکانیکی یاد شده در روش ۱ نسبت به روش ۲ را می‌توان ۱- کاهش اندازه دانه؛ ۲- توزیع فازهای ثانویه به صورت ناپیوسته و همگن در مرزدانه؛ ۳- کاهش و حذف ساختار ترد و شکننده یوتکتیک در مرزدانه دانست.

لازم به ذکر است که هم ترکیبات بین فلزی و هم ساختار یوتکتیک ترد و شکننده بوده و آن‌ها می‌توانند به عنوان مناطق مساعد برای ایجاد و گسترش ترک حین فرایند نورد باشند. به همین دلیل حضور، اندازه،

می‌بخشد. در این روش، نه تنها ساختار گلبولی ریزتر و همگن‌تر در آلیاژ تشکیل شد، بلکه سبب توزیع همگن‌تر فازهای ثانویه به صورت ناپیوسته در مرزخانه نیز گردید و ساختار یوتکتیک را در آلیاژ حذف نمود.

۴- روش ۱ شکل‌پذیری و خواص مکانیکی آلیاژ ۷۰۷۵ از جمله میکروسختی، استحکام کششی و ازدیاد طول را نسبت به روش SIMA متداول (روش ۲) بهبود داد به طوری که بعد از انجام فرایند نورد، بر خلاف روش ۱ هیچگونه ترک و اعوجاجی در قطعه ایجاد نگردید.

سانتیگراد، ساختار بهینه در مدت زمان نگهداری ۱۰ دقیقه به دست آمد.

۲- در روش SIMA متداول (روش ۲)، اگر چه دانه‌های گلبولی تشکیل می‌شود؛ اما ساختار ترد و شکننده یوتکتیک و ترکیبات بین فلزی به صورت پیوسته در مرزخانه‌ها تشکیل می‌شود که سبب کاهش خواص مکانیکی قطعه می‌گردد.

۳- روش ۱ ساختار آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ را نسبت به روش SIMA متداول به میزان قابل توجهی بهبود

References:

- 1- Y. Sirong, L. Dongcheng, N. Kim, " Microstructure evolution of SIMA processed Al2024", Materials Science and Engineering: A, Vol. 420, pp. 165-170, 2006.
- 2- G. Yan, S. Zhao, S. Ma, H. Shou, " Microstructural evolution of A356.2 alloy prepared by the SIMA process", Materials Characterization, Vol. 69, pp. 45-51, 2012.
- 3- C. W. Lin, F. Y. Hung, T. S. Lui, L. H. Chen, "High-temperature deformation resistance and forming behavior of two-step SIMA-processed 6066 alloy", Materials Science and Engineering: A, Vol. 659, pp. 143-157, 2016.
- 4- E.Parshizfarda, S.G.Shabestari, "An investigation on the microstructural evolution and mechanical properties of A380 aluminum alloy during SIMA process", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 509, pp. 9654-9658, 2011.
- 5- C. W. Lin, F. Y. Hung, T. S. Lui, L. H. Chen, "Microstructure evolution and high-Temperature compressibility of modified two-Step strain-induced melt activation-processed Al-Mg-Si aluminum alloy", Metals, Vol. 6, pp. 113-125, 2016.
- 6- J.G. Wang, P. Lu, H.Y. Wang, J.F. Liu, Q.C. Jiang, "Semisolid microstructure evolution of the predeformed AZ91D alloy during heat treatment", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 395, pp. 108-112, 2005.
- 7- O. Lashkari, R. Ghomashchi, "The implication of rheology in semi-solid metal processes: An overview", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 182, pp. 229-240, 2007
- 8- A. Bolouri, M. Shahmiri, E.N.H. Cheshmeh, "Microstructural evolution during semisolid state strain induced melt activation process of aluminum 7075 alloy", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 20, pp. 1663-1671, 2010.
- 9- N. Haghdad, A. Zarei-Hanzaki, S. Heshmati-Manesh, H. Abedi, S. Hassas- Irani, "The semisolid microstructural evolution of a severely deformed A356 aluminum alloy", Materials & Design, Vol. 49, pp. 878-887, 2013.
- 10- C. Mondal, A. Mukhopadhyay, "On the nature of T(Al2Mg3Zn3) and S(Al2CuMg) phases present in as-cast and annealed 7055 aluminum alloy", Materials Science and Engineering: A, Vol. 391, pp. 367-376, 2005.

- 11- A. Bolouri, M. Shahmiri, C.G. Kang, "Coarsening of equiaxed microstructure in the semisolid state of aluminum 7075 alloy through SIMA processing", *Journal of Materials Science*, Vol. 47, pp. 3544–3553, 2012.
- 12- A. Haghparast, M. Nourimotlagh, M. Alipour, " 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 ", *Materials Characterization*, Vol. 71, pp. 6-18, 2012.
- 13- M. Alipour, M. Emamy, S.H.S. Ebrahimi, M. Azarbarmas, M. Karamouz, J. Rassizadehghani, " Effects of pre-deformation and heat treatment conditions in the SIMA process on properties of an Al–Zn–Mg–Cu alloy modified by Al–8B grain refiner", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, pp. 4482-4490, 2011.
- 14- M.R. Rokni, A. Zarei-Hanzaki, H.R. Abedi, N. Haghdadi, " Microstructure evolution and mechanical properties of backward thixoextruded 7075 aluminum alloy ", *Materials & Design*, Vol. 36, pp. 557-563, 2012.
- 15- S. Chayong, H. Atkinson, P. Kapranos, " Multistep induction heating regimes for thixoforming 7075 aluminium alloy", *Materials science and technology*, Vol. 20, pp. 490-496, 2004.

