

مطالعه ایجاد ساختار گلوبولی در ورق آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در فرآیند فعال سازی مذاب توسط کرنش (SIMA)

محمد محمودی^۱، مصطفی علیزاده^{۲*}

^۱دانشگاه صنعتی تحصیلات تکمیلی صنعتی و فن آوری پیشرفته، دانشکده علوم و فن آوری های نوین، گروه مهندسی، کرمان، ایران.
^۲دانشگاه صنعتی تحصیلات تکمیلی صنعتی و فن آوری پیشرفته، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، گروه فلزات، کرمان، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۵/۶/۹، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۵/۱۰/۲۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۵/۱۰/۲۷

چکیده فرآیند "فعال سازی مذاب توسط کرنش (SIMA)" یک فرآیند نیمه جامد است که به منظور تشکیل ساختار گلوبولی در آلیاژها به کار گرفته می شود. در این فرآیند، آلیاژ مورد نظر ابتدا تحت کرنش قرار می گیرد و سپس در دمای نیمه جامد به مدت مشخصی نگه داری می شود. در این پژوهش، از فرآیند SIMA برای تشکیل ساختار گلوبولی در آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ استفاده شده و تاثیر چهار عامل مقدار کرنش، دمای اعمال کرنش، دمای نگه داری نیمه جامد (کسر حجمی مذاب) و زمان نگه داری نیمه جامد بر روی اندازه متوسط دانه ها و هم چنین ضریب شکل آن ها مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور از میکروسکوپ های نوری و الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. نتایج نشان داد که نمی توان یک سازوکار خاص را برای گلوبولی شدن دانه ها در فرآیند SIMA در نظر گرفت. بلکه با توجه به مقدار کسر حجمی مذاب و مقدار کرنش، سازوکار غالب متفاوت خواهد بود و بیشترین رقابت بین تبلور مجدد و ذوب داخلی دانه ها اتفاق می افتد. هم چنین نتایج نشان داد که در فرآیند SIMA، درصد ازدیاد طول به طور قابل ملاحظه ای نسبت به حالت T6 افزایش می یابد در حالی که استحکام کاهش زیادی ندارد.

کلمات کلیدی: نورد، نیمه جامد، آلومینیوم ۷۰۷۵، ریزساختار گلوبولی.

Study on the Formation of Globular Microstructure in 7075-Al alloy during Strain Induced Melt Activated (SIMA) process

Mohamad Mahmodi¹, Mostafa Alizadeh^{2*}

¹Graduate University of Advanced Technology, Department of Materials Science and Engineering, Kerman, Iran.

²Graduate University of Advanced Technology, Institute of science and high technology and environmental sciences, Department of metals, Kerman, Iran.

Abstract Strain Induced Melt Activation (SIMA) process, is a semi-solid process to create globular grains in alloys. In this process, after applying a desired strain, the sample is heated up to semi-solid region and is hold for a desired time. In the present study, SIMA process was applied to form globular microstructure in 7075-Al alloy. The effects of strain value, strain temperature, semi-solid holding time and semi-solid holding temperature on the average grain size and shape factor were investigated. Optical and scanning electron microscopes were used to investigate the microstructure. The results revealed that, it is not possible to introduce a distinguished mechanism for generating the globular grains; while depending on the liquid fraction and strain value, there is a competition between recrystallization and internal melting of grains. Also, the results depicted that, in the SIMA process, the elongation would be increased with respect to T6 condition; while there is no considerable reducing in the strength.

Keywords: Rolling, Semi-Solid, Al-7075, Globular Microstructure.

۱- مقدمه

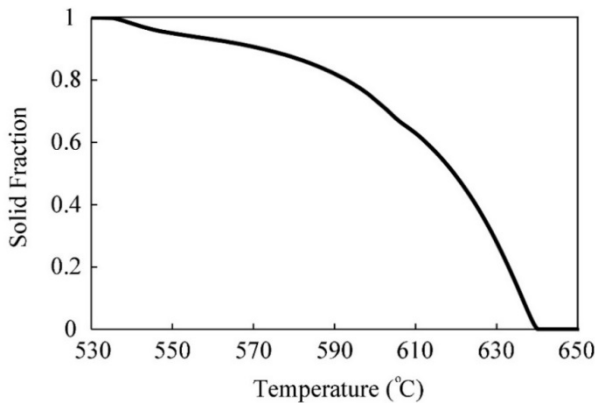
تبدیل ساختار دندردیتی به ساختار گلوبولی در آلیاژهای مختلف، خواص مکانیکی بهتری را موجب می‌شود. ایجاد ساختار گلوبولی از طریق فراوری نیمه‌جامد صورت پذیرفته و روش‌های متفاوتی در این خصوص وجود دارد. به‌طور مثال گوآن و همکاران [۱] با استفاده از یک سطح شیب‌دار لغزنده و خنک‌کننده، به تهیه ماده نیمه‌جامد با ساختار کروی پرداختند و به ساختار ریز کروی رسیدند. در تحقیقی دیگر، متان و همکاران [۲] با استفاده از روش هم‌زنی مغناطیسی مذاب آلیاژ Al-Si به ساختار ریز و یکنواخت رسیدند. هم‌چنین نتیجه گرفتند افزایش شدت هم‌زنی مغناطیسی علاوه بر توزیع همگن‌تر دانه‌ها، می‌تواند موجب تشکیل مناطق جدایشی بیشتری شود. چن و همکاران [۳] با استفاده از روش تبلور مجدد و ذوب جزئی (RAP)^۱، از طریق اعمال کرنش و عملیات حرارتی، در آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ ساختار کروی ایجاد کردند. هم‌چنین فرآیند SIMA توسط محققین بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله سیروننگ و همکاران [۴] از این روش برای ایجاد ساختار کروی در آلیاژ ۲۰۲۴ بهره بردند. به‌طور خلاصه می‌توان بیان کرد که برای ایجاد ساختار گلوبولی از طریق فرآیندهای نیمه‌جامد، به‌طور عمده از چهار روش ۱- هم‌زنی مکانیکی مذاب، ۲- هم‌زنی مغناطیسی مذاب، ۳- اعمال کرنش و تبلور مجدد و ۴- اعمال کرنش و فعال‌سازی مذاب (SIMA) استفاده کرد.

فرآیند SIMA روشی نوین جهت رسیدن به ساختار کروی و نسبی همگن است. این فرآیند به‌طور کلی شامل دو مرحله اصلی می‌باشد: ۱- ذخیره سازی کرنش با استفاده از روش‌های مختلف، ۲- نگهداری آلیاژ کرنش دیده در دماهای نیمه‌جامد برای تشکیل ساختار گلوبولی. روش انجام مرحله اول SIMA (یعنی اعمال کرنش اولیه) جزء تفاوت‌های مطالعات گذشته است. به عبارت دیگر محققین مختلف روش‌های متفاوتی را برای ذخیره سازی کرنش اولیه به‌کار گرفتند. برای مثال، ریخته‌گر و همکاران [۵] از اکستروژن گرم در دمای ۴۲۰°C برای آلیاژ ۷۰۷۵، سانگ-یونگ و همکاران [۶] و هم‌چنین بلوری و همکاران [۷] از اعمال کرنش سرد توسط

اعمال فشار برای آلیاژ ۷۰۷۵، سیروننگ و همکاران [۴] از نورد سرد برای آلیاژ ۲۰۲۴ و آرامی و همکاران [۸] از نورد گرم در دمای ۴۰۰°C برای آلیاژ A319 استفاده کردند. بلوری و همکاران [۷] و علیپور و همکاران [۹] به‌طور جداگانه به بررسی تاثیر مقدار کرنش اولیه بر اندازه دانه نهایی فرآیند SIMA برای آلیاژ ۷۰۷۵ پرداختند. آنها از ضریب شکل به عنوان معیاری برای بیان میزان کروی بودن ساختار استفاده کردند. به‌طوری‌که افزایش ضریب شکل نشان‌دهنده ساختار کروی‌تر می‌باشد. آنها نتیجه گرفتند که تمایل اصلی با افزایش مقدار کرنش اولیه، کاهش میانگین اندازه دانه‌ها و افزایش میزان کروی بودن است. علاوه بر این، سانگ-یونگ و همکاران [۶] با بررسی میزان کرنش اولیه فرآیند SIMA برای آلیاژ ۷۰۷۵ به بررسی ساختار نهایی پرداخته و نتیجه گرفتند که با افزایش درصد کار سرد مقدار اندازه دانه کاهش می‌یابد ولی یک کرنش بهینه برای این امر وجود دارد که وی شرایط بهینه ایجاد ساختار با قطر میانگین دانه ۳۰ μm را کرنش سرد ۵۲٪ و نگه‌داری در دمای ۵۹۰°C به مدت سه دقیقه بیان کرد. هم‌چنین کرنش ۲۷٪ را به عنوان حداقل کرنش مورد نیاز جهت ایجاد ساختار گلوبولی معرفی کرد. با توجه به مطالب فوق، می‌توان بیان کرد که به‌طور کلی مقدار کرنش اعمالی بر ساختار و خواص مکانیکی نمونه های گلوبولی شده در مراجع مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. به هر حال، به‌طور خاص، تاثیر دمای اعمال کرنش بر ساختار نهایی کمتر بررسی شده است. در مورد تاثیر مرحله دوم SIMA (یعنی نگهداری نیمه‌جامد) بر ساختار نهایی نیز مطالعات متعددی صورت گرفته است. از جمله سانگ-یونگ و همکاران [۶] برای آلیاژ ۷۰۷۵ نتیجه گرفتند که با افزایش زمان نگهداری نیمه‌جامد، اندازه میانگین دانه‌ها افزایش یافته و توزیع آنها غیریکنواخت‌تر می‌شود. هم‌چنین کاهش کسر جامد (افزایش کسر مذاب) در نگهداری نیمه‌جامد، موجب افزایش اندازه دانه نهایی می‌شود. بلوری و همکاران [۱۰] نیز به بررسی تاثیر زمان نگهداری نیمه‌جامد بر ساختار نهایی آلیاژ SIMA شده پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که افزایش زمان نگهداری نیمه‌جامد موجب ایجاد دانه‌های یکنواخت و هم‌محور می‌شود، و در کل اندازه دانه‌ها را افزایش می‌دهد. علیپور و همکاران [۹] با تغییر دما و زمان نگهداری نیمه‌جامد به بررسی اندازه دانه و ضریب شکل نهایی

¹ Recrystallization and Partial Melting

بین دما و کسر جامد ضروری است. به این منظور با استفاده از آزمون گرماسنجی افتراقی (DSC)^۱، ارتباط بین دما و کسر جامد برای آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ به دست آمد. این آزمون با سرعت گرمایش ۵°C/min و در محدوده دمایی ۵۱۰°C تا ۶۶۰°C انجام گرفت. منحنی ارتباط دما و کسر جامد در شکل (۱) مشاهده می شود.



شکل ۱. منحنی تغییرات کسر جامد با دما، به دست آمده از آزمون DSC.

در این تحقیق، از ۱۶ نمونه استفاده شد. ابتدا ۸ نمونه (نمونه‌های ۱ تا ۸) برای بررسی تاثیر میزان کرنش و همچنین دمای اعمال کرنش با شرایط ذکر شده در جدول ۲: تهیه شد. سپس ۸ نمونه (نمونه‌های ۹ تا ۱۶) برای بررسی اثر کسر جامد و زمان نگهداری در دمای نیمه جامد طبق جدول (۳) تولید شدند. در نهایت نمونه SIMA با ساختار کروی مناسب، با نمونه‌های آنیل شده و T6 مقایسه شد.

برای ایجاد کرنش اولیه در ورق‌های آلومینیومی از دستگاه نورد دو غلتکی با سرعت چرخش ۵ دور بر دقیقه استفاده شد. نمونه‌های ۱ تا ۸ در دماهای ۳۰°C، ۱۷۰°C، ۳۰۰°C و ۴۷۰°C و به مقدار ۵٪، ۲۰٪، ۴۰٪ و ۷۰٪ نورد شدند. در ادامه نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه درون کوره مقاومتی با دمای مربوط به کسر جامد ۰٫۷ (دمای ۶۰۳°C) قرار گرفتند. همچنین نمونه‌های ۹ تا ۱۶ پس از تحمل ۴۰٪ کرنش در دمای ۳۰۰°C به مدت ۵، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه درون کوره با دمای مربوط به کسر جامدهای ۱۰۰، ۹۰، ۷۰ و ۵۰ درصد قرار گرفتند.

برای بررسی ریزساختار، نمونه‌ها پس از پولیش، با استفاده از محلول 2mL HF(40%) + 3mL HCl(38%) + 5mL H₂O (Keller) (70%) + 190mL H₂O معروف به کلر (Keller)

پرداختند و گزارش کردند که با افزایش زمان نگهداری نیمه جامد، اندازه دانه‌ها ابتدا کاهش (تا ۲۰ دقیقه) و سپس افزایش می‌یابد، اگرچه دانه‌ها کروی می‌شوند. در این ارتباط، محمدی و همکاران [۱۱] گزارش کردند که چنانچه دمای نگهداری نیمه جامد بالا باشد خواص مکانیکی تضعیف خواهد شد.

یکی از عوامل تاثیرگذار بر شکل ریزساختار، نحوه توزیع کرنش در نمونه است که تاکنون کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این ارتباط، دمای اعمال کرنش روی توزیع کرنش در قطعه تاثیرگذار است؛ لذا اولین هدف پژوهش حاضر این است که در ابتدا دمای مناسب برای اعمال کرنش با توزیع نسبی یکنواخت از طریق نورد به دست آید و سپس تاثیر سه متغیر دیگر (مقدار کرنش، دما و زمان نگهداری نیمه جامد) مورد ارزیابی قرار گیرد. هدف اصلی بعدی این پژوهش استخراج سازوکار تشکیل ساختار گلبولی در شرایط مختلف کاری است. زیرا اگرچه درباره نحوه گلبولی شدن دانه‌ها سازوکارهای قابل قبولی در مراجع علمی بیان شده است، ولی این که در شرایط مختلف فرآیند SIMA کدام سازوکار غالب تر است، تاکنون روشن نشده است.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق از ورق آلومینیوم ۷۰۷۵ با ضخامت ۲، عرض ۳۰ و طول ۲۰۰ میلی‌متر و ترکیب شیمیایی نشان داده شده در جدول (۱) استفاده شد.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ مورد استفاده.

Al	Zn	Mg	Cu	Mn	Fe	Cr	Other
بقیه	۵/۷۰	۲/۳۵	۱/۴۷	۰/۱۷	۰/۱۵	۰/۲۰	<۰/۱۲۲

برای از بین بردن اثرات فرآیندهای پیشین، ورق‌های اولیه طبق استاندارد ASTM B918 [۱۲] آنیل شدند. ورق‌ها ابتدا به مدت دو ساعت در دمای ۴۰۷±۵°C نگهداری شدند؛ سپس در هوای آرام تا دمای ۲۰۴°C سرد شده و مجدداً به مدت چهار ساعت درون کوره با دمای ۲۳۲°C قرار گرفتند. همچنین برای پیرسازی مصنوعی T6، نمونه مورد نظر پس از محلول سازی در دمای ۴۷۰°C در آب تبرید شده و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۲۱°C پیرسازی شد.

برای انجام دقیق تر فرآیند SIMA، دانستن ارتباط دقیق

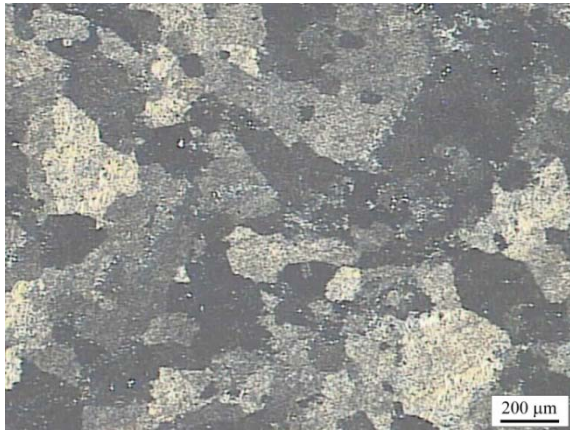
¹ Differential Scanning Calorimetry

حکاکی شدند.

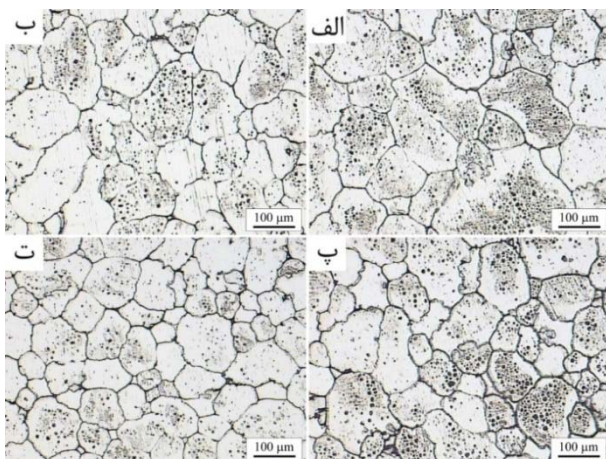
۳- نتایج و بحث

۳-۱ تاثیر دمای اعمال کرنش بر ساختار نهایی

تصویر ساختار آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در حالت آنیل در شکل (۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود این آلیاژ در حالت آنیل دارای مخلوطی از دانه های کشیده و هم محور درشت است و توزیع اندازه دانه ها یکنواخت نیست. تاثیر دمای اعمال کرنش بر ساختار نهایی، در شکل (۳) نشان داده شده است. هم چنین شکل (۴) تغییرات میانگین اندازه دانه و ضریب شکل بر حسب دمای اعمال کرنش را نشان می دهد. مشاهده می شود با افزایش دمای نورد، میانگین اندازه دانه محصول نهایی کوچک تر شده و ضریب شکل بزرگتر می شود؛ لذا ساختار گلوبولی تر شده است.



شکل ۲. تصویر میکروسکوپ نوری از ساختار آلیاژ ۷۰۷۵ در حالت آنیل کامل.



شکل ۳. ریزساختار نمونه های SIMA شده با کرنش اولیه ۴۰٪ در دماهای الف) محیط (۳۰°C)، ب) ۱۷۰°C، پ) ۳۰۰°C و ت) ۴۷۰°C، بعد از ۳۰ دقیقه نگه داری در کسر جامد ۰/۷ (۶۰۳°C)

با توجه به تصاویر شکل (۳) و هم چنین اندازه خطوط انحراف استاندارد داده ها در شکل (۴)، مشاهده می شود که با

جدول ۲: نمونه های تهیه شده به منظور بررسی تاثیر میزان کرنش اعمالی و دمای اعمال کرنش در مرحله اول SIMA (مرحله اعمال کرنش)

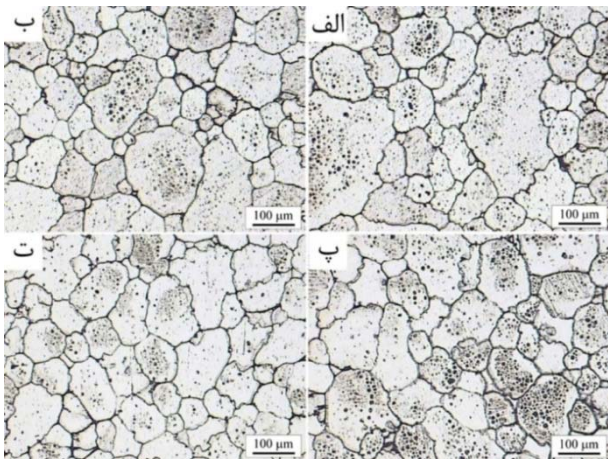
شماره نمونه	نام اختصاری	شرایط نورد اولیه در فرآیند SIMA	
		دمای نورد (°C)	کرنش وارده (%)
۱	SIMA 30°C	۳۰	۴۰
۲	SIMA 170°C	۱۷۰	۴۰
۳	SIMA 300°C	۳۰۰	۴۰
۴	SIMA 470°C	۴۷۰	۴۰
۵	SIMA 5%	۳۰۰	۵
۶	SIMA 20%	۳۰۰	۲۰
۷	SIMA 40%	۳۰۰	۴۰
۸	SIMA 70%	۳۰۰	۷۰

جدول ۳: نمونه های تهیه شده به منظور بررسی تاثیر کسر جامد و زمان نگه داری نیمه جامد در مرحله دوم SIMA (مرحله نگه داری نیمه جامد)

شماره نمونه	نام اختصاری	شرایط نگه داری نیمه جامد	
		کسر جامد	زمان نگهداری (min)
۹	SIMA 1	۱	۳۰
۱۰	SIMA 0.9	۰/۹	۳۰
۱۱	SIMA 0.7	۰/۷	۳۰
۱۲	SIMA 0.5	۰/۵	۳۰
۱۳	SIMA 5min	۰/۷	۵
۱۴	SIMA 15min	۰/۷	۱۵
۱۵	SIMA 30min	۰/۷	۳۰
۱۶	SIMA 60min	۰/۷	۶۰

تصاویر میکروسکوپی نوری و الکترونی روبشی (SEM) تهیه شده و توسط نرم افزار تحلیل گر تصویری بررسی شدند. سختی سنجی ویکرز توسط دستگاه اینسترون و با نیروی سه نیوتن انجام شد. هم چنین نمونه های کشش طبق استاندارد B557ASTM [۱۳] با طول سنجه ۲۵ میلی متر در امتداد جهت نورد و عرض شش میلی متر تهیه شدند. برای بررسی و مقایسه شکل دانه های هم محور، از ضریب شکل، یا به عبارت دیگر نسبت ابعادی استفاده شد. ضریب شکل، از میانگین اندازه گیری نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ برای چندین دانه (حدود ۵۰ دانه از تصاویر مختلف) به دست آمد. تغییرات ضریب شکل، بین صفر تا یک است به طوری که با نزدیکتر شدن ضریب شکل به یک، دانه ها گلوبولی تر می شوند.

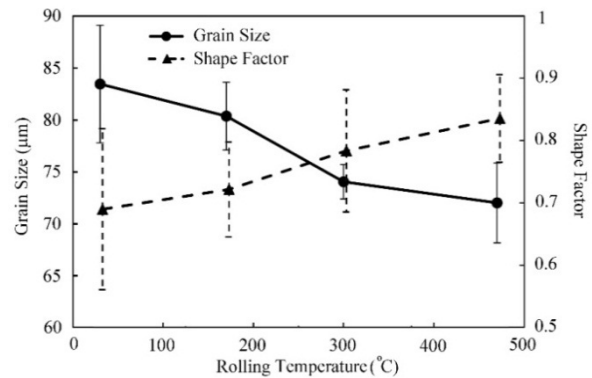
ساختار نهایی غیریکنواخت و درشت است. علاوه بر این، در ساختار دانه‌های نسبی کوچک مشاهده می‌شود که نشان می‌دهند پدیده تبلور مجدد شروع شده است. تعداد دانه‌های تبلور مجدد یافته در نمونه‌ای که ۲۰٪ کرنش را تجربه نموده است (شکل (۵) -ب) به مراتب افزایش یافته است که دلیل آن کرنش ذخیره شده بیشتر می‌باشد. به هر حال، با توجه به شکل (۵) -ب، پس از اعمال کرنش به میزان ۲۰٪، ساختار همچنان غیرهمگن بوده و دارای دانه‌های نسبی درشت (دانه‌های با مرز ذوب شده) در کنار دانه‌های ریز (دانه‌های تبلور مجدد یافته) است ولی همان‌طور که شکل (۶) نشان می‌دهد، کروی شدن دانه‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش مقدار کرنش اعمالی از ۲۰٪ به ۴۰٪ (شکل (۵) -ج)) میانگین اندازه دانه‌ها به سرعت کاهش می‌یابد که این موضوع از روی شکل (۶) نیز قابل ملاحظه است. به هر حال میزان کروی شدن دانه‌ها با همان سرعت قبلی زیاد می‌شود (شکل (۶)).



شکل ۵. ریزساختار نمونه‌های SIMA با کرنش اولیه الف) ۵٪ ب) ۲۰٪ پ) ۴۰٪ و ت) ۷۰٪ در دمای ۳۰۰°C و ۳۰ دقیقه نگه‌داری در کسر جامد ۰/۷ (۶۰۳°C).

در واقع با فرض این‌که سازوکار تبلور مجدد رخ دهد، افزایش کرنش موجب افزایش انرژی ذخیره شده در ساختار از طریق ایجاد عیوب شبکه مثل جاهای خالی و نابجایی‌ها می‌شود. لذا می‌توان نتیجه گرفت از میان مقادیر کرنش اعمال شده، در کرنش ۴۰٪ انرژی رانش کافی برای تبلور مجدد را تامین کرده و موجب ایجاد ساختار کروی و همگن مورد انتظار می‌شود. با افزایش بیشتر کرنش اعمالی به میزان ۷۰٪، شیب کاهش اندازه دانه و افزایش ضریب شکل کمتر شده و ساختار فقط اندکی ریزتر و کروی‌تر می‌شود.

افزایش دمای نورد، ساختار یکنواخت‌تر و کروی‌تر شده است، به طوری‌که نمونه نورد شده در دمای ۴۷۰°C یکنواخت‌تر از نمونه‌های دیگر است. این رفتار را می‌توان به این صورت توضیح داد که با افزایش دمای نورد کرنشی که در ماده ذخیره می‌شود یکنواختی بیشتری دارد و در نهایت ساختار SIMA یکنواختی زیادتری را دارد.



شکل ۴. تغییرات میانگین اندازه دانه و ضریب شکل با تغییر دمای اعمال کرنش.

۲-۳ تاثیر مقدار کرنش بر ساختار نهایی

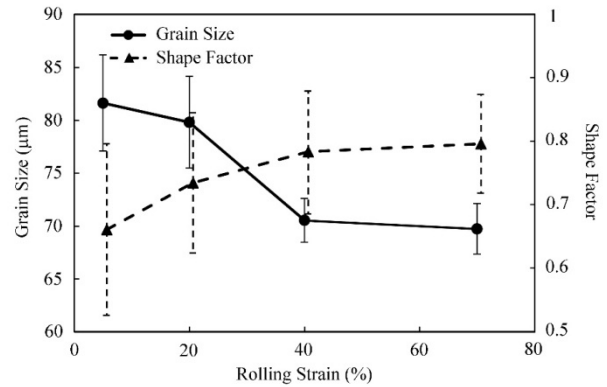
برای بررسی تاثیر مقدار کرنش اعمالی، چهار نمونه با کرنش ۵٪، ۲۰٪، ۴۰٪ و ۷۰٪ در دمای ۳۰۰°C نورد شده و به مدت ۳۰ دقیقه در کسر جامد ۰/۷ (دمای ۶۰۳°C) نگهداری شدند. شکل (۵) ریزساختار حاصل از این چهار نمونه را نشان می‌دهد. هم‌چنین شکل (۶) بیانگر تغییرات میانگین اندازه دانه و ضریب شکل با تغییر مقدار کرنش می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با اعمال کرنش به میزان ۵٪، ضریب شکل کوچک بوده و دانه‌ها به طور کامل گلوبولی نشده‌اند. هم‌چنین پراکندگی زیادی در ضریب شکل ملاحظه می‌شود. البته این نمونه، با وجود کرنش اعمالی ناچیز، ساختاری متفاوت با حالت آنیل شکل (۲) دارد که نشان می‌دهد در صورت وجود ۳۰ درصد مذاب، حتی مقدار کم کرنش نیز سبب تغییر ساختار و تشکیل مقداری دانه‌های گلوبولی می‌شود. طبق مدل ارائه شده توسط دوهرتی و همکاران [۱۴] در طول زمان نگهداری نیمه‌جامد، مذاب به مرزدانه‌های پرانرژی نفوذ کرده و آنها را ذوب می‌کند. لذا می‌توان نتیجه گرفت در ساختارهای با انرژی ذخیره شده کم نیز امکان ذوب شدن مرزدانه‌ها وجود دارد و دانه‌ها اندکی هم‌محور می‌شوند. البته به علت کرنش اعمالی کم، دانه‌های اولیه دچار شکستگی‌های قابل توجهی نشده و

۳-۳ تاثیر دمای نگه داری نیمه جامد (کسر جامد) بر ساختار

نهایی

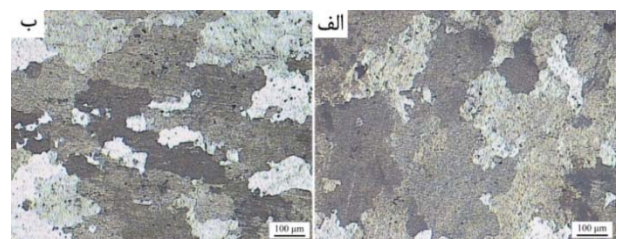
برای بررسی اثر کسر جامد (یا مقدار مذاب) بر تحولات ساختاری در فرآیند SIMA، چهار نمونه پس از اعمال ۴۰٪ کرنش در دمای 300°C ، به مدت ۳۰ دقیقه در کسر جامدهای ۱) (530°C) ، ۰٫۹) (572°C) ، ۰٫۷) (603°C) و ۰٫۵) (519°C) نگه داری شده سپس در آب تبرید شدند. تصاویر متالوگرافی این نمونه‌ها در شکل (۸) نشان داده شده است. هم‌چنین شکل (۹) تغییرات اندازه متوسط دانه‌ها و ضریب شکل را برای این دسته از نمونه‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در کسر جامد یک به‌طور تقریب دانه کروی مشاهده نمی‌شود در حالی که کرنش اعمالی مقدار نسبی بالایی دارد و هم‌چنین زمان نگه داری نیز قابل توجه است. این مشاهده بیانگر این موضوع است که برای کروی شدن، به مقداری مذاب نیاز است. به خوبی واضح است که اگر کسر جامد برابر با یک باشد، یا مذاب تشکیل نمی‌شود و یا این‌که قطرات کوچکی از مذاب در مکان‌هایی که به خوبی طی عملیات آنیل یکنواخت نشده است تشکیل می‌شود. البته مقایسه ریزساختار شکل (۸-الف) با شکل (۷-الف) نشان می‌دهد که نمونه SIMA شده در کسر جامد یک ساختاری متفاوت با ساختار نورد شده دارد. به طوری که ساختار نورد شده در دمای 300°C درجه، هم درشت‌تر است و هم دارای دانه‌های نسبتاً کشیده می‌باشد؛ در حالی که ساختار شکل (۸-الف) به مراتب ریزتر است. دلیل این نوع ساختار، تبلور مجدد می‌باشد که بعد از اعمال کرنش، به دلیل نگه داری در دمای 530°C درجه اتفاق افتاده است. این مقایسه اثبات می‌کند، اگرچه نورد در دمای بالا انجام شده است ولی به قدر کافی انرژی کرنشی ذخیره شده جهت انجام تبلور مجدد و ریزدانه شدن در نمونه نورد شده وجود دارد. براساس تصاویر نمونه‌های دیگر در شکل (۸) زمانی که کسر جامد کمتر از ۹۰٪ باشد، تغییر قابل ملاحظه‌ای در ساختار مشاهده شده و ساختار کروی می‌شود.

تصویر نمونه SIMA 0.9 در شکل (۸-ب) نشان می‌دهد با وجود این‌که در ساختار این نمونه تنها ۱۰٪ مذاب وجود دارد، شکل نهایی دارای ساختار نسبی کروی و هم‌محور است. همان‌طور که سیرونگ و همکاران [۴] نیز اشاره کرده‌اند، با افزایش انحنا دانه‌ها نقطه ذوب تعادلی کاهش می‌یابد. اگر



شکل ۶. تغییرات میانگین اندازه دانه و ضریب شکل با تغییر مقدار کرنش اعمالی.

با فرض رخ دادن سازوکار شکستن ساختار در مرحله اعمال کرنش نیز، می‌توان این نتایج را توجیه کرد. در کرنش‌های ۵٪ و ۲۰٪ ساختار دندریتی اولیه، به‌طور کامل دچار شکستگی و خردشدگی نمی‌شود. لذا ساختار نهایی دارای دانه‌های درشت و غیر گلوبولی خواهد بود. اما با افزایش کرنش اعمالی به مقدار ۴۰٪، در حین نورد، دانه‌ها کشیده شده و دچار شکستگی‌های متعددی می‌شوند. این دانه‌های شکسته شده، در طول گرمایش در محدوده نیمه‌جامد، توسط مذاب احاطه شده و گلوبولی می‌شوند. با توجه به شکل (۷) مشاهده می‌شود که با افزایش کرنش از ۴۰٪ به ۷۰٪/ساختار پس از نورد دچار شکستگی بیشتری می‌شود، لذا باید شکل نهایی نمونه SIMA 0.7 نسبت به نمونه SIMA 0.4 ریزدانه‌تر شود. اما براساس شکل (۵) و (۶) نتایج به دست آمده برخلاف این انتظار هستند. علت این مساله شاید این است که ذرات شکسته شده ریزتر، طی عملیات حرارتی نیمه‌جامد ذوب شده و به مذاب می‌پیوندند. در واقع، ذرات ریزتر به علت انرژی سطح به حجم بالاتر، در مقایسه با ذرات بزرگ‌تر دارای پایداری کمتری بوده و سریع‌تر ذوب می‌شوند. بنابراین ذرات شکسته شده در کرنش‌های بالاتر، طی مرحله نگه داری نیمه‌جامد ذوب شده و توانایی ایجاد دانه‌های ریزتر را ندارند.



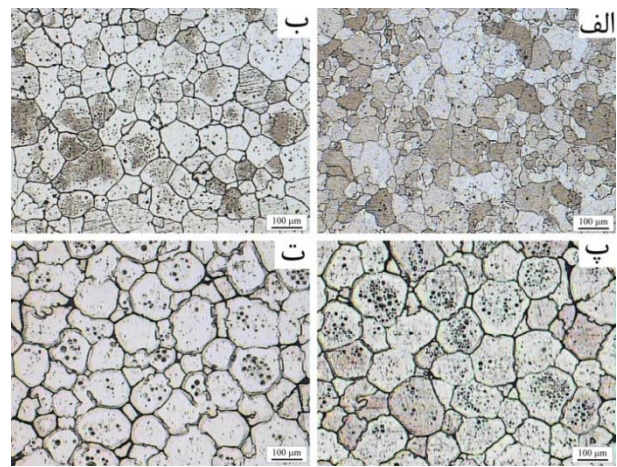
شکل ۷. ساختار اولیه پس از نورد در دمای 300°C با مقدار کرنش اعمالی (الف) ۴۰٪ و (ب) ۷۰٪ قبل از نگه داری نیمه‌جامد.

دانه‌های کوچک تر، کاهش یافته و موجب کاهش انرژی آزاد سیستم می‌شوند. در نهایت با انجام این سازوکار در زمان‌های طولانی، ساختار دارای دانه‌های رشد کرده و کروی تر خواهد شد [۱۵]. کاهش کسر جامد از ۰/۷ به ۰/۵ موجب می‌شود دانه‌ها رشد بیشتری کنند اما ضریب شکل اندکی کاهش می‌یابد. علت درشت‌تر شدن دانه‌ها در این نمونه، هم‌چنان انجام سازوکار تکامل استوالد است. هم‌چنین در نگه‌داری نیمه‌جامد با درصد مذاب بالا، مذاب موجود در ساختار روی دانه‌های دیگر جوانه زده و رشد می‌کند و سبب درشت شدن دانه‌ها پس از انجماد می‌شود. طبق شکل (۱۰-الف) مذاب موجود در منطقه B روی سطح کروی دانه جامد A جوانه زده و منجمد می‌شود. فصل مشترک دانه A به دلیل انحنا سطحی مثبت، دمای ذوب کمی داشته و هنگام رشد دانه جدید، ذوب می‌شود. لذا دانه A مقعر شده و دانه B رشد می‌کند و این رخداد موجب کاهش ضریب شکل در کسر جامد ۰/۵ می‌شود. هم‌چنین باعث می‌شود که دوباره دانه‌های کوچک‌تر در کنار دانه‌های درشت‌تر دیده شوند. یکی دیگر از دلایل کاهش کروی شدن و افزایش تعداد کوچک‌تر در کنار دانه‌های درشت‌تر در کسر مذاب ۰/۵ را می‌توان شکسته شدن دانه‌ها در اثر ذوب داخلی دانست.

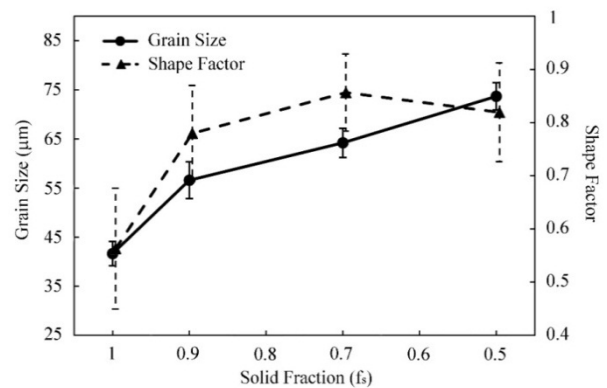
در نهایت این‌طور نتیجه‌گیری می‌شود که در فرآیند SIMA، کسر جامد تاثیر مهمی بر سازوکار کروی شدن ساختار دارد. در کسر جامد بالا (مثل ۰/۹)، طبق مدل سیروننگ و همکاران [۴]، مرزهای پرانرژی دمای ذوب را کاهش داده و سریع‌تر ذوب می‌شوند. اما در کسر جامدهای کمتر، سازوکار تکامل استوالد از طریق انحلال ذرات ریزتر موجب رشد و افزایش ضریب شکل ساختار می‌شود. البته در کسر جامدهای خیلی کمتر (مثل ۰/۵)، به علت جوانه‌زنی و انجماد مذاب روی دانه‌های با سطح کروی، شکل دانه‌ها تغییر کرده و ضریب شکل اندکی کاهش می‌یابد. با توجه به این نتایج می‌توان کسر جامد ۰/۷ را مقدار بهینه برای کروی کردن آلیاژ ۷۰۷۵ در نظر گرفت.

هم‌چنین مشاهده می‌شود که با افزایش دمای نگه‌داری نیمه‌جامد ضخامت مرز دانه‌ها افزایش می‌یابد. دلیل این مشاهده، به پدیده جدایش میکروسکوپی در مرز دانه‌های مذاب برمی‌گردد. با افزایش دمای نگه‌داری، میزان مذاب تشکیل شده

چه در نمونه SIMA 0.9 کسر حجمی مذاب قابل توجه نمی‌باشد (کمتر از ۱۰ درصد مذاب)، ولی تبلور مجدد به دلیل کرنش کافی به سرعت انجام می‌شود و دانه‌های ریز با سطوح انحنا دار و گوشه‌های تیز تشکیل می‌گردد که دارای نقطه ذوب کمی می‌باشند. لذا در تشکیل فاز مذاب این نقاط و گوشه‌ها در اولویت بوده و دانه‌های نسبی گرد با گوشه‌ای تیز که محصول تبلور مجدد سریع هستند به دانه‌های کروی تبدیل می‌شوند. ولی به دلیل کم بودن کسر مذاب، دانه‌های ریز زیادی در ساختار دیده می‌شوند و غیریکنواختی زیاد است.



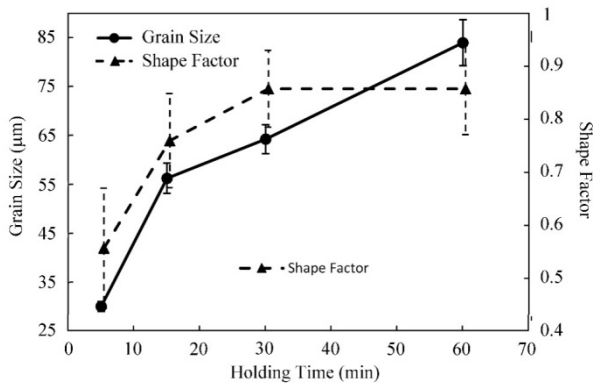
شکل ۸. تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌های SIMA در کسر جامدهای الف) ۱، ب) ۰/۹، پ) ۰/۷، ت) ۰/۵ و طی زمان ۳۰ دقیقه.



شکل ۹. تغییرات میانگین اندازه دانه و ضریب شکل با تغییر کسر جامد نگه‌داری نیمه‌جامد.

با کاهش کسر جامد به ۰/۷، اندازه دانه‌ها زیاد می‌شود ولی دانه‌ها کروی‌تر می‌شوند. علت رشد بیشتر و کروی‌تر شدن دانه‌ها با افزایش مقدار مذاب، می‌تواند توسط سازوکار تکامل استوالد توجیه شود. طبق گزارش بلوری و همکاران [۱۰]، سازوکار تکامل استوالد در کسر جامدهای کمتر و زمان‌های بیشتر رخ می‌دهد. طبق این سازوکار، فصل مشترک‌های با انحنا زیاد از طریق رشد دانه‌های بزرگ‌تر و از بین رفتن

می‌شود، نمونه با زمان نگهداری پنج دقیقه، ساختار گلوبولی نداشته و دارای اندازه دانه و ضریب شکل کوچک است. اما با افزایش زمان نگهداری، دانه‌ها بیشتر گلوبولی و یکنواخت می‌شوند. این مساله نشان‌دهنده اثر سازوکار تکامل استوالد در زمان‌های طولانی‌تر است به طوری که با افزایش زمان نگهداری نیمه‌جامد، علاوه بر رشد اندازه دانه، دانه‌ها کروی‌تر شده‌اند.



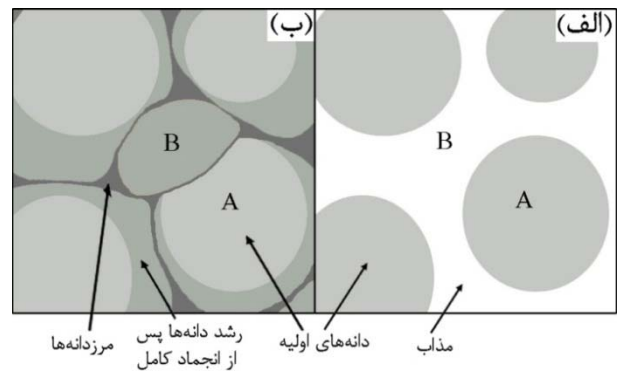
شکل ۱۲. نمودار تغییرات میانگین اندازه دانه و ضریب شکل با تغییر زمان نگهداری نیمه‌جامد.

۳-۵ مقایسه خواص مکانیکی نمونه SIMA شده با نمونه های T6 و آنیل

اگرچه این پژوهش روی سازوکار تاثیر SIMA بر ریزساختار متمرکز شده است، ولی بررسی خواص مکانیکی ورق‌های SIMA شده در مقایسه با حالت‌های معمول استفاده از این آلیاژ (T6 و آنیل) امری ضروری می‌باشد. زیرا نشان می‌دهد که استفاده از فرآیند SIMA در شرایط بهینه تا چه اندازه مفید می‌باشد. برای بررسی رفتار مکانیکی آلیاژ ۷۰۷۵ با ساختار گلوبولی، نمونه SIMA 0.7-30min با شرایط ذکر شده در جدول (۳) تهیه شد. زیرا بررسی‌های قبلی نشان داد که این نمونه می‌تواند به عنوان نمونه‌ای که در شرایط بهینه تهیه شده است در نظر گرفته شود. شکل (۱۳) نتایج حاصل از آزمون کشش این سه نمونه را نشان می‌دهد.

خلاصه اطلاعات به‌دست آمده از آزمون کشش در نمودار ستونی شکل (۱۴) به همراه نتایج سختی‌سنجی سه نمونه آنیل، T6 و SIMA نشان داده شده است. با توجه به این نتایج مشاهده می‌شود که به‌طور کلی خواص مکانیکی نمونه SIMA از نمونه آنیل بهتر است ولی نسبت به نمونه T6 دارای استحکام کم‌تری است. دلیل آن را می‌توان به حضور حفرات موجود در مرزدانه‌ها مربوط دانست که در تصویر SEM شکل

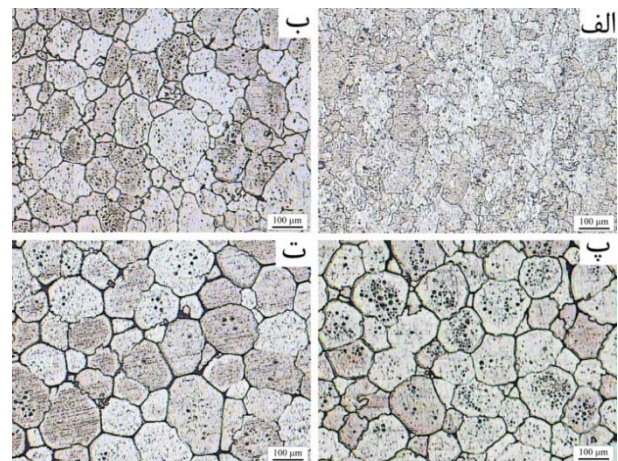
بیشتر می‌شود (به عبارتی کسر جامد کاهش می‌یابد) و به‌طور طبیعی مقدار جدایش نیز افزایش می‌یابد و این پدیده باعث می‌شود که مرزدانه‌ها ضخیم‌تر دیده شوند.



شکل ۱۰. طرح واره نحوه انجماد مذاب پس از فرآیند SIMA. (الف) ساختار حالت نیمه‌جامد (کسر جامد ۰/۵) (ب) ساختار آلیاژ پس از انجماد.

۳-۴ تاثیر زمان نگهداری نیمه‌جامد بر ساختار نهایی

برای بررسی اثر زمان نگهداری نیمه‌جامد بر ساختار نهایی، چهار نمونه شماره ۹ تا ۱۲ طبق شرایط جدول (۳) تهیه شدند. نمونه‌ها پس از اعمال ۴۰٪ کرنش در دمای ۳۰۰°C، در زمان‌های ۵، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه در کسر جامد ۰/۷ (۶۰۳°C) نگهداری شدند. شکل (۱۱) تصاویر متالوگرافی این چهار نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌های SIMA در کسر جامد ۰/۷ و در زمان‌های (الف) ۵، (ب) ۱۵، (پ) ۳۰، (ت) ۶۰ دقیقه.

شکل (۱۲) تغییرات میانگین اندازه دانه و ضریب شکل با تغییر زمان نگهداری نیمه‌جامد را نشان می‌دهد. از نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش زمان نگهداری نیمه‌جامد، میانگین اندازه دانه‌ها، با سرعت زیادی افزایش می‌یابد. در عین حال ضریب شکل ساختار نیز با افزایش زمان نگهداری نیمه‌جامد افزایش یافته و ساختار کروی‌تر می‌شود. همان‌طور که ملاحظه

۴- نتیجه گیری

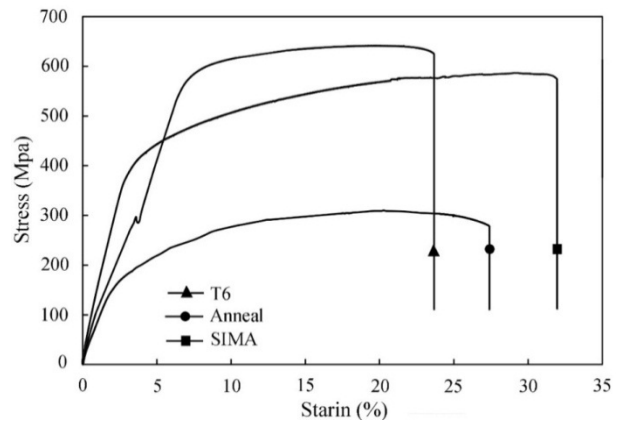
در این تحقیق فرآیند ترمومکانیکی SIMA برای ایجاد ساختار گلبولی در ورق آلومینیوم ۷۰۷۵ مورد استفاده قرار گرفت و تاثیر متغیرهای مهم جهت ارزیابی سازوکار بررسی شده و به طور خلاصه نتایج زیر حاصل شد:

به طور کلی مهم ترین دلیل گلبولی شدن دانه ها در فرآیند SIMA، ذوب شدن و تحلیل رفتن گوشه های تیز و قسمت های پرانحنای مرز دانه در دمای نیمه جامد می باشد. ولی حضور کرنش کافی در چنین ساختاری (دارای دانه های پر انحنا در دمای نیمه جامد) امری ضروری است. زیرا در ساختاری که کرنش آن پنج درصد بود ساختار گلبولی مشاهده نشد یا به عبارت دیگر تعداد دانه های گلبولی شده بسیار کم بود. حضور کرنش از دو جهت ضروری است: اول کرنش سبب می شود که پتانسیل دانه ها (از طریق تشکیل مرزهای فرعی و عیوب بلوری) برای ذوب شدن و شکسته شدن دانه ها در دمای نیمه جامد افزایش یابد، دوم سبب ذخیره شدن انرژی کافی برای تبلور مجدد می شود. لذا اولین قدم در تشکیل دانه های گلبولی ایجاد دانه های ریز با مرز دانه های پرانحنای می باشد که با دو سازوکار تبلور مجدد و ذوب درونی دانه ها اتفاق می افتد. نتایج این تحقیق نشان داد که در کسر حجمی های مذاب کم سازوکار تبلور مجدد غالب است و در کسر حجمی های مذاب زیاد سازوکار ذوب داخلی دانه ها غالب است. هم چنین نتایج حاکی از آن است که نقش زمان مشابه اثر کسر حجمی مذاب است. اگرچه اعمال کرنش در دمای بالا میزان کرنش ذخیره شده را کم می کند ولی به دلیل یکنواختی بیشتر کرنش اثر مطلوب تری دارد. زیرا دانه ها دارای اندازه یکسان تر خواهند بود و سازوکار استوالد کم تر رخ می دهد. بنابراین در نهایت با افزایش دمای نورد دانه بندی ریزتر خواهد شد.

سپاسگزاری

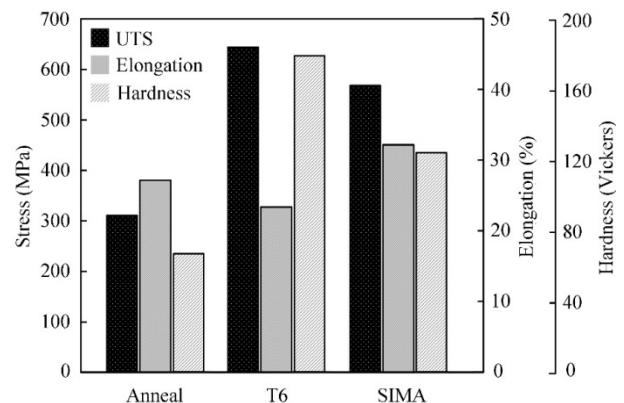
نویسندگان این مقاله از مسئولین حوزه پژوهشی دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فن آوری پیشرفته به سبب حمایت های مالی خود از این تحقیق مراتب قدردانی و تشکر خود را ابراز می نمایند.

(۱۵) قابل ملاحظه است. به هر حال این اختلاف قابل توجه نیست.

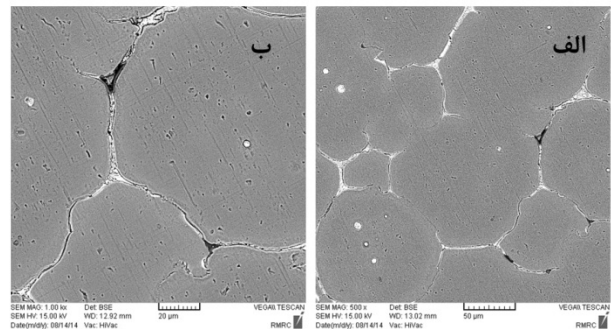


شکل ۱۳. نتایج آزمون کشش برای سه نمونه T6، SIMA و آنیل.

هم چنین مشاهده می شود که درصد ازدیاد طول نسبی در نمونه SIMA به طور قابل ملاحظه ای نسبت به نمونه T6 بیشتر است. لذا نمونه SIMA در مواردی که به درصد ازدیاد طول بیشتری نسبت به T6 مورد نیاز باشد می تواند مورد استفاده قرار گیرد. مقایسه سختی نمونه ها نشان می دهد با این که نمونه SIMA پیرسخت نشده است ولی سختی آن به میزان ۸۵٪ از نمونه آنیل بهتر است.



شکل ۱۴. خواص مکانیکی برای سه نمونه T6، SIMA و آنیل.



شکل ۱۵. (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه SIMA 0.7-30 نشان

دهنده مرز دانه ها. (ب) همان تصویر در بزرگ نمایی بالاتر.

مراجع

1. Guan, R., Zhao, Z., Chao, R., Feng, Z., Liu, C., Microstructure evolution and solidification behaviors of A2017 alloy during cooling/stirring and rolling process, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 22 (2012) 2871-2876.
2. Metan, V., Eigenfeld, K., Rübiger, D., Leonhardt, M., Eckert, S., Grain size control in Al-Si alloys by grain refinement and electromagnetic stirring, Journal of alloys and compounds, 487 (2009) 163-172.
3. Chen, G., Jiang, J., Du, Z., Cao, Q., Li, H., Zhang, X., Formation of Fine Spheroidal Microstructure of Semi-solid Al-Zn-Mg-Cu Alloy by Hyperthermally and Subsequent Isothermally Reheating, Journal of Materials Science & Technology, 29 (2013) 979-982.
4. Sirong, Y., Dongcheng, L., Kim, N., Microstructure evolution of SIMA processed Al2024. Materials Science and Engineering: A, 420 (2006) 165-170.
5. Rikhtegar, F., Ketabchi, M., Investigation of mechanical properties of 7075 Al alloy formed by forward thixoextrusion process, Materials & Design, 31 (2010) 3943-3948.
6. Sang-Yong, L., Jung-Hwan, L., Young-Seon, L., Characterization of Al 7075 alloys after cold working and heating in the semi-solid temperature range, Journal of materials processing technology, 111 (2001) 42-47.
7. Bolouri, A., Shahmiri, M., Kang, C., Study on the effects of the compression ratio and mushy zone heating on the thixotropic microstructure of AA 7075 aluminum alloy via SIMA process, Journal of Alloys and Compounds, 509 (2011) 402-408.
8. Arami, H., Khalifehzadeh, R., Keyvan, H., Khomamizadeh, F., Effect of predeformation and heat treatment conditions in the SIMA process on microstructural and mechanical properties of A319 aluminum alloy, Journal of Alloys and Compounds, 468 (2009) 130-135.
9. Alipour, M., Emany, M., Ebrahimi, S., Azarbarmas, M., Karamouz, M., Rassizadehghani, J., Effects of predeformation 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, 528 (2011) 4482-4490.
10. Bolouri, A., Shahmiri, M., Cheshmeh, E., Microstructure evolution during semisolid state strain induced melt activation process of aluminum 7075 alloy, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 20 (2010) 1663-1671.
11. Mohammadi, H., Ketabchi, M., Investigation of microstructure and mechanical properties of 7075 Al alloy prepared by SIMA method, Iranian Journal of Materials Science & Engineering, 10 (2013) 32-43.
12. Standard B918: Practice for Heat Treatment of Wrought Aluminum Alloys, Annual Book of ASTM Standards (2009).
13. Standard B557: Standard methods of tension testing wrought and cast aluminium and magnesium alloy products, Annual Book of ASTM Standards, (1993).
14. Doherty, R., Lee, H.I., Feest, E., Microstructure of stir-cast metals, Materials Science and Engineering, 65 (1984) 181-189.
15. Ratke, L., Voorhees, P.W., Growth and coarsening: Ostwald ripening in material processing, First Edition, Berlin: Springer, (2002).