

بررسی تأثیر عملیات ترمومکانیکی بر زمان پیرسختی و مقاومت به خوردگی تنشی آلیاژ AI-7075

حمیدرضا فولادفر^۱، بابک هاشمی^۲، موسی یونسی^۱
۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی
۲- استادیار، دانشگاه شیراز
hamid_ff@yahoo.com

چکیده

در عملیات پیرسختی به روش معمول، از آنجایی که به توزیع ریز و پراکنده رسوبات نیازمندیم، ناچار به انجام عملیات پیرسازی در دمای پایین، به منظور تشکیل مناطق GP به عنوان مکان جوانه زنی رسوبات پایدارتر می‌باشیم. از سوی دیگر در ماکزیمم سختی به دست آمده، با افت مقاومت به خوردگی تنشی مواجه هستیم. در این تحقیق تأثیر انجام نورد سرد پیش از پیرسازی بر خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی تنشی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ بررسی شده است. این عملیات ترمومکانیکی با ثابت نگه داشتن درصد ازدیاد طول یکنواخت و کاهش زمان پیرسازی، باعث افزایش استحکام و ارتقاء قابل ملاحظه مقاومت به SCC آلیاژ شد. نابجایی‌های ایجاد شده طی مرحله نورد، جایگزین مناسبی برای مناطق GP به عنوان مکان جوانه زنی رسوبات فاز ثانویه بوده و امکان انجام پیرسازی در دماهای بالاتر از دمای انحلال مناطق GP که منجر به تشکیل رسوبات پایدارتر و مناطق عاری از رسوب کوچک‌تر را فراهم می‌آورد و در نتیجه باعث بهبود مقاومت به SCC و کاهش قابل ملاحظه زمان پیرسازی می‌شود.

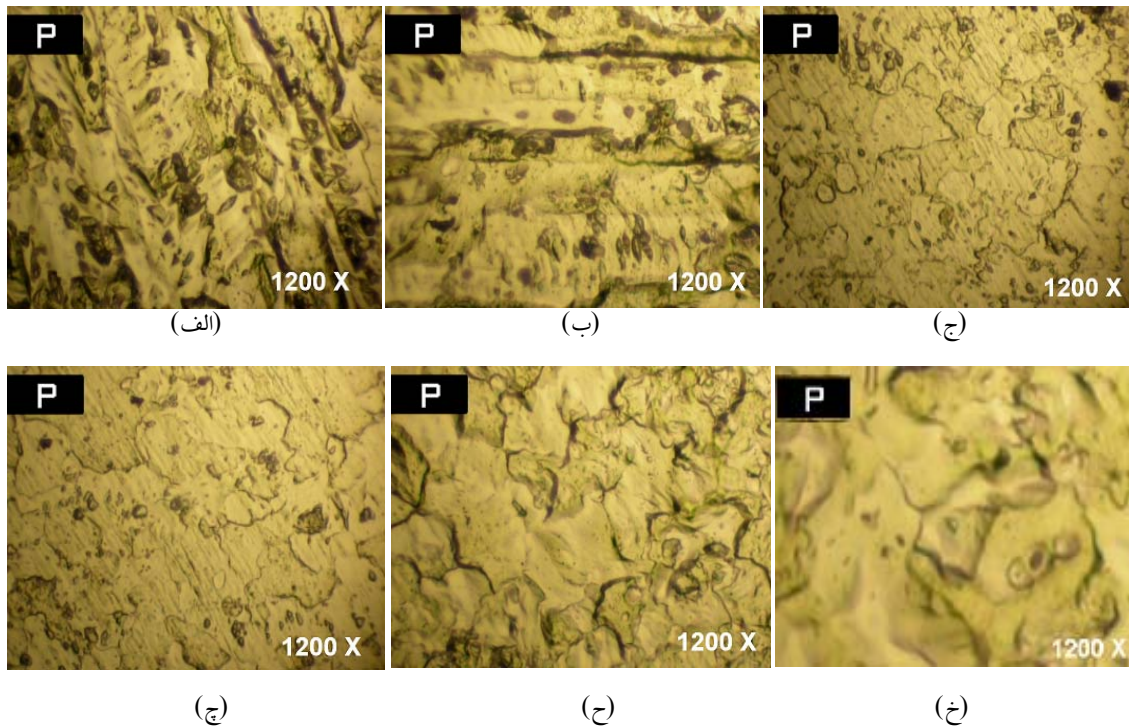
واژه‌های کلیدی:

پیرسختی، عملیات ترمومکانیکی، SCC، آلومینیوم ۷۰۷۵.

۱- مقدمه

برای توجیه این کاهش مقاومت، پیشنهادهاى مختلفی ارائه شده ولی آنچه مسلم است، ارتباط شدید این نوع خوردگی با مناطق عاری از رسوب کنار مرزخانه و رسوبات روی مرزخانه است. هرچه رسوبات درشت‌تر و فاصله آنها بیشتر باشد، مقاومت به SCC بالاتر است.

آلیاژهای آلومینیوم سری Vxxx با توجه به استحکام بالا و دانسیته پایین، استفاده گسترده‌ای در صنایع هوایی داشته و همچنین از مستعدترین گروه‌های آلیاژی به عملیات پیرسختی هستند. ولی در ماکزیمم سختی به دست آمده طی عملیات حرارتی T₆، تا حدود زیادی مقاومت به خوردگی تنشی خود را از دست می‌دهند.



شکل (۱): ردیف بالا: نمونه‌های محلول‌سازی شده در دمای 470°C با مدت زمان‌های (الف) ۱ ساعت (ب) ۳ ساعت و (ج) ۴ ساعت؛ رسوبات قبل از ۴ ساعت در زمینه حل نشده و ساختار یکنواخت نیست. ردیف پایین: نمونه‌های نورد شده با کاهش سطح مقطع ۷۰٪ و محلول‌سازی شده در دمای 470°C با مدت زمان‌های (چ) ۱ ساعت (ح) ۳ ساعت و (خ) ۴ ساعت؛ نمونه‌ها پس از ۱ ساعت کاملاً یکنواخت شده و در ادامه فقط دچار رشد دانه می‌شوند.

در این تحقیق تأثیر انجام یک مرحله نورد سرد، پیش از پیرسازی بر خواص مکانیکی و دمای پیرسازی و نیز مقاومت به SCC آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ بررسی شده است.

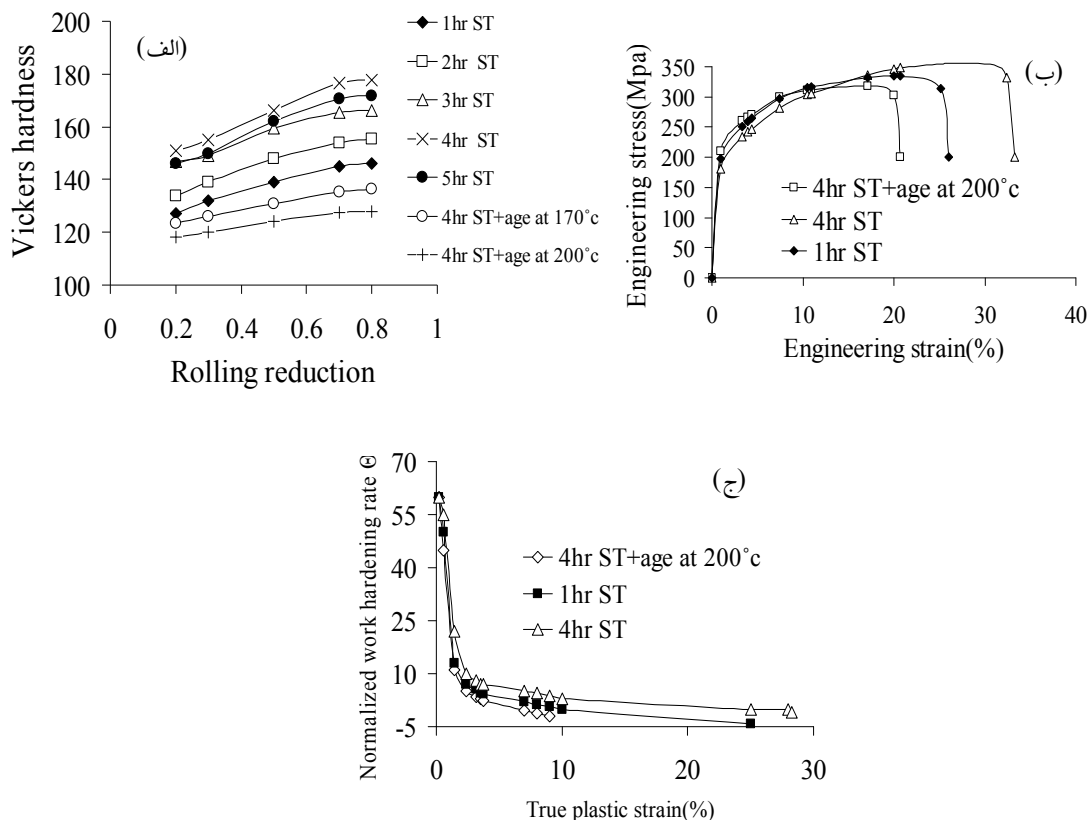
تلاش بر این بوده تا با جایگزینی نابعجایی‌های ایجاد شده در طی عملیات نورد به‌جای مناطق GP، به‌عنوان مکان جوانه‌زنی رسوبات فاز ثانویه، قابلیت انجام پیرسازی در دماهایی بالاتر از دمای انحلال مناطق GP به‌دست آید و رسوبات پایدارتر و بزرگتر و با فاصله بیشتر در مرز دانه تشکیل شوند.

۲- روش تحقیق

آزمایشات بر روی یک ورق با ضخامت ۶ mm از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ با قابلیت انجام عملیات حرارتی T_6 و با ترکیب $0.05\% \text{Ti}$ ، $0.6\% \text{Cu}$ ، $2.5\% \text{Mg}$ ، $5\% \text{Zn}$ انجام شد.

اولین راه‌کار برای بهبود مقاومت به SCC انجام یک مرحله پیرسازی در دمای بالاتر پس از عملیات T_6 است (T_{76}) که منجر به کاهش استحکام در حدود ۱۰ تا ۱۵٪ می‌شود [۱ و ۳]. عملیات دیگر، موسوم به بازگشت و پیرسازی مجدد (retrogression and reaging) است که عبارتست از نگه‌داشتن نمونه پیرشده به‌روشن معمول در دمای نسبتاً بالا برای مدت کوتاه و سپس پیرسازی مجدد در دمای پایین [۲]، که این روش به علت پایین بودن زمان نگهداری در دمای بالا، برای قطعات ضخیم مناسب نیست [۳].

تا کنون ادغام فرآیند پیرسختی با یک مرحله کار مکانیکی نظیر نورد، عبور از کانال‌های زاویه‌دار هم مقطع (ECAP) و ... غالباً برای ارتقاء خواص مکانیکی آلیاژها انجام شده است [۱۰ و ۴].



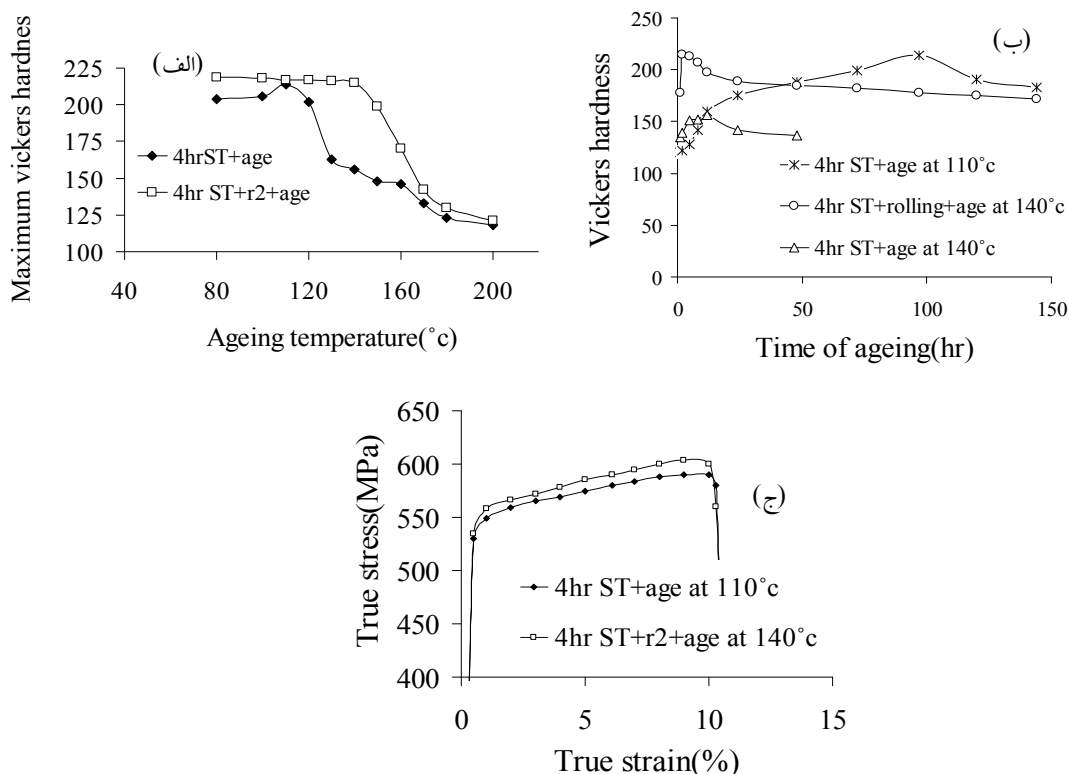
شکل ۲. (الف) نمودار سختی حاصل شده بعد از نورد بر حسب کرنش اعمالی برای مدت زمان‌های مختلف محلول‌سازی و دو نمونه پیرسازی شده در دماهای بالا (ب) نمودار تنش-کرنش مهندسی برای نمونه کامل محلول‌سازی شده، محلول‌سازی شده و پیر شده در دمای ۲۰۰°C و ناقص محلول‌سازی شده (ج) نمودار نرخ کارسختی بر حسب کرنش پلاستیک حقیقی برای سه نمونه مذکور.

دستگاه Instron 8802 با نرخ کرنش $2 \times 10^{-3} \text{Sec}^{-1}$ قرار گرفتند. نمونه‌های تست کشش طبق استاندارد ASTM B557M و با طول سنجه ۲۵ mm و سطح مقطع (ضخامت 6 mm) ماشین کاری و آماده شدند. اندازه‌گیری مقاومت به خوردگی تنشی به وسیله تست کشش با نرخ کرنش پایین (SSRT) در هوا و محلول ۳/۵٪ کلرید سدیم انجام شد. نمونه‌هایی مشابه تست کشش با کرنش معمول ماشین کاری و پولیش شد و با نرخ کرنشی معادل $3 \times 10^{-6} \text{Sec}^{-1}$ در دمای اتاق تست شدند. از میکروسکوپ الکترونی عبوری با مشخصات (۱۰۹A، ۲۰۰K، TEM۲۰۱۰، JEOL) و میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۱۲۰۰X برای بررسی ریزساختار استفاده شد.

تعدادی نمونه در ابتدا تحت عملیات نورد با مجموع کاهش در سطح مقطع ۷۰٪ طی چند مرحله، که کرنش در هر مرحله حدود ۲۰٪ بود، قرار گرفته (t_1) و به همراه نمونه‌های نورد نشده، در کوره‌ای با دمای 470°C و با مدت زمان‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ ساعت، تحت عملیات محلول‌سازی (Solution Treatment) قرار گرفتند (ST). دسته‌ای از نمونه‌ها در این مرحله مجدداً تحت عملیات نورد مشابهی با مرحله t_1 قرار گرفته (t_2) و به همراه دسته نمونه‌های نورد نشده، در دماها و زمان‌های مختلف (از ۸۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و از ۱ تا ۲۰۰ ساعت) پیرسازی شده و تست سختی ویکرز بر روی آنها انجام شد. نمونه‌هایی که نتایج خوبی در تست سختی داشتند، تحت تست کشش یک بعدی با

جدول (۱): نتایج تست SSRT برای نمونه T₆ و 4hr ST+r₂+age

| Treatment | UTS (Mpa) | | Elongation (%) | | Esol/Eair |
|-------------------------------------|-----------|--------------|----------------|--------------|-----------|
| | In air | In 3.5% NaCl | In air | In 3.5% NaCl | |
| T ₆ | ۵۸۳ | ۵۷۶ | ۱۱/۲ | ۷/۵ | ۶۶/۹ |
| 4hr ST+r ₂ +age at 140°C | ۵۹۷ | ۵۸۹ | ۱۰/۷ | ۹/۹ | ۹۲/۵ |



شکل ۳. (الف) نمودار ماکزیمم سختی به دست آمده بعد از پیرسازی بر حسب دمای پیرسازی برای دو نمونه نورد شده و نورد نشده (ب) نمودار سختی بر حسب زمان پیرسازی در دو دما (۱۱۰°C و ۱۴۰°C)، برای نمونه نورد شده و نورد نشده و (ج) نمودار تنش- کرنش مهندسی نمونه‌های مذکور.

۳- نتایج و بحث

می‌رسند که این کاهش به دلیل ضریب نفوذ بالاتر نابعایی‌های ایجاد شده در مرحله نورد قبل از محلول‌سازی، نسبت به زمینه آلیاژ است [۱۱]. گاهی انجام عملیات محلول‌سازی ناقص و باقی گذاشتن مقداری از رسوبات در زمینه و یا ایجاد رسوبات یکنواخت و نسبتاً درشت

شکل (۱(a-f)) تصویر ریزساختار نمونه‌ها را بعد از عملیات محلول‌سازی نشان می‌دهد. مشخص است که نمونه‌های ST، بعد از ۴ ساعت و نمونه‌های ST+r₁ بعد از یک ساعت به ساختار محلول و یکنواخت که آمادگی ورود به مرحله بعد را داراست

بعد از محلول‌سازی، در مرحله بعد و در حین عملیات نورد، موجب بالا بردن تغییر فرم موضعی در اطراف رسوبات باقی مانده و در نتیجه تولید نابجایی بیشتر در این نواحی می‌شود [۱] که می‌تواند در مرحله پیرسازی آخر مفید باشد.

شکل (۲(a)) نمودار سختی ایجاد شده بعد از نورد بر حسب میزان کرنش اعمالی در حین نورد را برای نمونه‌های محلول‌سازی شده در زمان‌های مختلف و همچنین دو نمونه که به منظور ایجاد رسوبات درشت، در دماهای بالا (۱۷۰°C و ۲۰۰°C) پیرسازی شده‌اند، نشان می‌دهد. مشخص است همه نمونه‌ها با افزایش کرنش نورد، سختی بالاتری پیدا می‌کنند و هر چه محلول‌سازی کامل‌تر و بهتر انجام شده‌باشد، این افزایش سختی بیشتر خواهد بود. نمونه‌های پیرسازی شده در دمای بالا، کمترین سختی‌ها را دارند. شکل (۲(b)) نمودار تنش-کرنش مهندسی را برای نمونه‌های ناقص و کامل محلول‌سازی شده و نیز نمونه پیرسازی شده در دمای بالا (۲۰۰°C) نشان می‌دهد. شکل (۲(c)) نمودار نرخ کارسختی نرماله بر حسب کرنش پلاستیک حاصل از نتایج تست کشش را برای همان نمونه‌ها نشان می‌دهد. نرخ کارسختی که با حرف اختصاری Θ نمایش داده می‌شود از منحنی تنش-کرنش و براساس معادله (۱) به دست می‌آید [۱۲].

$$\Theta = \frac{1}{\sigma} \times \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right)_\varepsilon \quad (1)$$

مشاهده می‌شود که نرخ کار سختی در نمونه‌ای که کامل محلول‌سازی شده، از همه بیشتر و نمونه پیرسازی شده در دمای بالا از همه کمتر است. نرخ کارسختی بالاتر نمونه کامل محلول‌سازی شده در نمودار شکل (۲(c)) بیانگر این است که حل شدن رسوبات فاز ثانویه در زمینه، در بالا بردن نرخ کارسختی و در نتیجه سختی به دست آمده بعد از نورد، عامل مؤثرتری است.

نمونه پیرسازی شده در دمای بالا، به علت فقیر بودن زمینه از عنصر آلیاژی، کمترین نرخ کارسختی و در نتیجه کمترین

سختی به دست آمده بعد از نورد را بین نمونه‌ها داشته‌است. ماکزیمم سختی‌های به دست آمده بر حسب دمای پیرسازی برای نمونه‌های ۴hrST+age، ۴hrST+r₂+age در شکل (۳(a)) نمایش داده شده‌است. نمونه‌های ۴hrST+age در دمای ۱۱۰°C ماکزیمم سختی به اندازه ۲۱۴ VHN داشته و مقدار این ماکزیمم، با گذر از دمای ۱۲۰°C، کاهش محسوس و شدیدی دارد، درحالی‌که در نمونه‌های ۴hrST+r₂+age، ماکزیمم سختی بالاتری رخ می‌دهد، وابستگی مقدار ماکزیمم سختی به دمای پیرسازی کمتر شده، دیگر خبری از کاهش سختی بعد از دمای ۱۲۰°C نیست و تنها در دماهای خیلی بالا شاهد افت محسوس سختی هستیم. شکل (۳(b)) نمودار سختی بر حسب مدت زمان پیرسازی را برای نمونه ۴hrST+age در دمای ۱۱۰°C (که ماکزیمم سختی در حالت پیرسازی معمولی را نشان می‌دهد) و نمونه ۴hrST+r₂+age در دمای ۱۴۰°C، نشان می‌دهد. برای مقایسه، نمونه‌ای نورد نشده نیز در دمای ۱۴۰°C پیرسازی شد. نمونه پیرسازی شده در دمای ۱۱۰°C درجه با گذشت مدت زمان ۹۷ ساعت به ماکزیمم سختی خود می‌رسد و سپس با گذشت زمان کاهش سختی پیدا می‌کند. نمونه نورد شده و پیرسازی شده در دمای ۱۴۰°C با گذشت تنها ۲ ساعت به ماکزیمم سختی معادل ۲۱۵ VHN رسیده و سختی آن در ادامه با نرخ کاهنده‌ای افت می‌کند. نمونه پیرسازی شده در دمای ۱۴۰°C به روش معمول، با سرعتی نسبتاً زیاد به ماکزیمم سختی به مراتب کمتر از دو نمونه قبل می‌رسد و سپس افت سختی پیدا می‌کند. افت سختی برای نمونه ۴hrST+age، در نمودار شکل (۳(a)) بیانگر این است که دما از محدوده دمای GP zone Solves بالاتر رفته و از آنجایی که جوانه‌زنی رسوبات از مناطق GP شروع نشده، توزیع رسوبات نامناسب شده و در نتیجه افت شدید استحکام را بعد از دمای ۱۲۰°C شاهد هستیم. در نمونه ۴hrST+r₂+age نابجایی‌ها جایگزین مناطق GP به‌عنوان

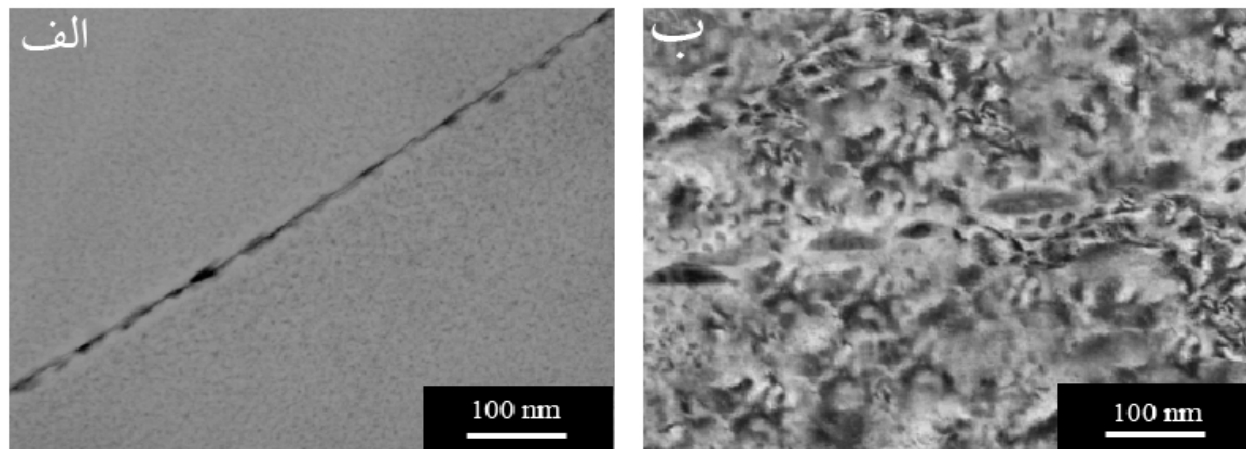
بعد از محلول‌سازی، در مرحله بعد و در حین عملیات نورد، موجب بالا بردن تغییر فرم موضعی در اطراف رسوبات باقی مانده و در نتیجه تولید نابجایی بیشتر در این نواحی می‌شود [۱] که می‌تواند در مرحله پیرسازی آخر مفید باشد.

شکل (۲(a)) نمودار سختی ایجاد شده بعد از نورد بر حسب میزان کرنش اعمالی در حین نورد را برای نمونه‌های محلول‌سازی شده در زمان‌های مختلف و همچنین دو نمونه که به منظور ایجاد رسوبات درشت، در دماهای بالا (۱۷۰°C و ۲۰۰°C) پیرسازی شده‌اند، نشان می‌دهد. مشخص است همه نمونه‌ها با افزایش کرنش نورد، سختی بالاتری پیدا می‌کنند و هر چه محلول‌سازی کامل‌تر و بهتر انجام شده‌باشد، این افزایش سختی بیشتر خواهد بود. نمونه‌های پیرسازی شده در دمای بالا، کمترین سختی‌ها را دارند. شکل (۲(b)) نمودار تنش-کرنش مهندسی را برای نمونه‌های ناقص و کامل محلول‌سازی شده و نیز نمونه پیرسازی شده در دمای بالا (۲۰۰°C) نشان می‌دهد. شکل (۲(c)) نمودار نرخ کارسختی نرماله بر حسب کرنش پلاستیک حاصل از نتایج تست کشش را برای همان نمونه‌ها نشان می‌دهد. نرخ کارسختی که با حرف اختصاری Θ نمایش داده می‌شود از منحنی تنش-

$$\Theta = \frac{1}{\sigma} \times \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right)_\varepsilon \quad (1)$$

مشاهده می‌شود که نرخ کار سختی در نمونه‌ای که کامل محلول‌سازی شده، از همه بیشتر و نمونه پیرسازی شده در دمای بالا از همه کمتر است. نرخ کارسختی بالاتر نمونه کامل محلول‌سازی شده در نمودار شکل (۲(c)) بیانگر این است که حل شدن رسوبات فاز ثانویه در زمینه، در بالا بردن نرخ کارسختی و در نتیجه سختی به دست آمده بعد از نورد، عامل مؤثرتری است.

نمونه پیرسازی شده در دمای بالا، به علت فقیر بودن زمینه از عنصر آلیاژی، کمترین نرخ کارسختی و در نتیجه کمترین



شکل (۴): تصویر TEM مرزخانه و مناطق مجاور آن برای نمونه (الف) T₆ و (ب) ۴hr ST+r₂+age.

شکل (۳(c)) نشان داده شده است. نمونه نورد شده و سپس پیرسازی شده درحالی که نرخ کارسختی و درصد ازدیاد طول مشابه با نمونه پیرسازی شده به روش معمول نشان می‌دهد، از استحکام تسلیم و کششی بالاتری نسبت به آن برخوردار است. مقایسه تست کشش دو نمونه فوق مشخص می‌کند که این افزایش استحکام، کاهش درصد ازدیاد طول به همراه ندارد و دو نمونه تقریباً از چکش‌خواری یکسانی بهره‌مند می‌باشند.

جدول (۱) نتایج تست SSRT را برای نمونه T₆ و نمونه ۴hrST+r₂+age در دمای ۱۴۰°C نشان می‌دهد. ازدیاد طول یکنواخت نمونه‌ها در هوا و در محیط محلول نمکی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که هر دو نمونه ازدیاد طول تقریباً مشابهی در دمای محیط از خود نشان می‌دهند. نسبت E_{sol}/E_{air} به‌عنوان معیار مقاومت به مقاومت به SCC در نظر گرفته شد که هرچه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد مقاومت به SCC بالاتر است. نمونه ۴hrST+r₂+age مقاومت به SCC شکل (۴) تصویر TEM مرزخانه‌ها را در دو نمونه فوق نشان می‌دهد. در نمونه ۴hrST+r₂+age، رسوبات روی مرزخانه نسبتاً درشت‌تر و فواصل آن‌ها بیشتر است و از آنجایی که رسوبات نسبت به مناطق عاری

مکان‌های جوانه زنی رسوبات شده و وابستگی نمونه به دمای GP zone Solves را از بین می‌برند و دیگر شاهد کاهش سختی در آن محدوده دمایی نخواهیم بود. تنها در دماهای بالا، به علت پیش افتادن تبلور مجدد نسبت به فرآیند پیرسازی، نابیجایی‌ها قبل از ایفای نقش خود به‌عنوان مکان جوانه‌زنی، از بین می‌روند و شاهد کاهش استحکام می‌باشیم.

آخرین دمایی که در آن سختی قابل قبولی داریم دمای ۱۴۰°C با سختی ۲۱۵ VHN است که نسبت به ماکزیمم سختی نمونه نورد نشده در همین دما (۱۵۶ VHN) حدود ۳۸٪ افزایش نشان می‌دهد. نمونه نورد شده، به‌علت ضریب نفوذ بالاتر نابیجایی‌ها و نیز داشتن قابلیت پیرسازی در دماهای بالاتر، تنها با گذشت دو ساعت در دمای ۱۴۰°C به ماکزیمم سختی خود می‌رسد در حالی که این مدت زمان برای رسیدن به ماکزیمم سختی در نمونه‌های پیرسازی شده در دمای ۱۱۰°C و ۱۴۰°C به روش معمول به ترتیب ۹۷ و ۱۲ ساعت به طول می‌انجامد در ضمن اینکه ماکزیمم سختی در نمونه پیرسازی شده در دمای ۱۴۰°C درجه به روش معمول بسیار پایین‌تر از نمونه نورد شده است شکل (۳(b)). نمودار تنش- کرنش مهندسی برای دو نمونه ۴hrST+age در ۱۱۰°C و ۴hrST+r₂+age در ۱۴۰°C در

۵- مراجع

- [1] Polmear, I., Light alloys, 4th Ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 240-245, 2006.
- [2] F. Viana, A.M.P. Pintob, H.M.C. Santosa, A.B. Lopes, 'Retrospection and re-ageing of 7075 aluminium alloy: microstructural characterization', Materials Processing Technology. 92, 54-59, 1999.
- [3] D.Wang, D.R. Ni, Z.Y. Ma, 'Effect of pre-strain and two-step aging on microstructure and stress corrosion cracking of 7050 alloy', Materials Science and Engineering A. 494, 360-366, 2008.
- [4] Hyoun-wook Kim, Suk-Bong Kang, Nobuhiro Tsuji and Yoritoshi Minamino, 'Elongation increase in ultra-fine grained Al-Fe-Si alloy sheets', Acta Materialia, 53 (2005) 1737-1749 .
- [5] David Witkin, Z. Lee, R. Rodriguez, S. Nutt and E. Lavernia, "Al-Mg alloy engineered with bimodal grain size for high strength and increased ductility", Scripta Materialia, 49 (2003) 297-302 .
- [6] Lee YB, Shin DH, Park KT and Nam WJ, "Enhancement of high strain rate superplastic elongation of a modified 5154 Al by subsequent rolling after equal channel angular pressure", Scripta Materialia, 51, 55-60, 2004.
- [7] Kunihiro Ohashi, Takeshi Fujita, Kenji Kaneko, Zenji Horita and Terence G. Langdon, "The aging characteristics of an Al-Ag alloy processed by equal-channel angular pressing", Materials Science and Engineering A, 240-247, 2006.
- [8] W. J. Kim, C. S. Chung, D. S. Ma, S. I. Hong and H. K. Kim, "Optimization of strength and ductility of 2024 Al by equal channel angular pressing (ECAP) and post-ECAP aging", Scripta Materialia, 49, 333-338, 2003.
- [9] N.Gao and et al, "Influence of prior deformation on the age hardening of a phosphorus containing Cu-0.61wt%Cr alloy", Materials Science and Engineering A, 270-278, 2003
- [10] S. K. Panigrahi and R. Jayaganthan, "A study on the mechanical properties of cryorolled Al-Mg-Si alloy", Materials Science and Engineering A, 139-145, 2007.

دیوید-آ-پورتر و کنت-ای-ایسترنینگ، دگرگونی فازها در فلزات و آلیاژها، ترجمه دکتر ابوالقاسم دهقان، دکتر عباسعلی نظربند و دکتر بابک هاشمی، ۱۳۸۵ شیراز، انتشارات دانشگاه شیراز.

- [1] Dieter GE, Mechanical metallurgy, 3rd Ed., McGraw Hill, pp 289, 1986.

از رسوب مجاور مرزدانه (PFZ) آند محسوب می‌شوند، بزرگ شدن آن‌ها سطح مناطق الکترونده را بیشتر کرده و خوردگی آن‌ها را کندتر می‌کند. علاوه بر این منطقه PFZ در نمونه 4hrST+r₂+age، نسبت به نمونه T₆ کوچکتر است که علت آن بالاتر بودن ضریب نفوذ نابجایی نسبت به bulk ماده است که باعث می‌شود نسبت رسوبات روی مرزدانه به رسوبات داخل دانه، در نمونه 4hrST+r₂+age کمتر از نمونه T₆ باشد و در مجموع در نمونه 4hrST+r₂+age کاند کوچکتر و آند بزرگتری نسبت به نمونه T₆ داریم که منجر به بالا رفتن مقاومت به SCC می‌شود.

۴- نتیجه گیری

دانشیته بالایی از نابجایی‌ها که به وسیله یک مرحله نورد سرد قبل از عملیات پیرسازی ایجاد می‌شود، می‌تواند جایگزین مناسبی برای مناطق GP به عنوان مکان‌های جوانه زنی رسوبات فاز ثانویه باشد، که امکان پیرسازی در دماهای بالاتر با مدت زمان کوتاه تر را به ما می‌دهد و ایجاد رسوبات درشت تر با فاصله بیشتر را به همراه دارد که این امر منجر به بالا رفتن مقاومت به SCC آلیاژ می‌شود.

وجود نابجایی‌ها، به علت داشتن ضریب نفوذ بالاتر از bulk ماده، باعث ایجاد منطقه Z کوچکتر برای نمونه‌هایی که پیش از پیرسازی نورد شده‌اند می‌شود. عملیات محلول سازی ناقص و یا ایجاد رسوبات درشت به وسیله پیرسازی در دمای بالا، از آنجایی که باعث می‌شود رسوبات، کامل در زمینه حل نشوند و در نتیجه آلیاژ نرخ کارسختی کمتری داشته باشد، تأثیر مثبتی در سختی به دست آمده بعد از عملیات نورد ندارد. انجام یک مرحله نورد، قبل از عملیات محلول سازی به علت ایجاد شبکه‌ای از نابجایی‌ها، منجر به تسریع در نفوذ و کاهش مدت زمان مدت زمان محلول سازی به یک چهارم زمان معمول می‌شود.