

اثر عملیات نورد قبل از پیرسازی مصنوعی بر افزایش سختی آلیاژ Al-0.49Mg-0.44Si

مرتضی زند رحیمی^۱ - علی رضوانی فر^۲

چکیده:

آلیاژهای Al-Mg-Si به دلیل دارا بودن نسبت استحکام به وزن بالا امروزه توانسته اند جانشین مناسبی برای فولاد باشند. سختی بالا در این آلیاژ با انجام عملیات حرارتی رسوب سختی امکان پذیر است هرچه بتوان مقادیر بالاتری از این پارامترها را در زمانهای کوتاهتری بدست آورد باعث کاربرد گسترده تر این آلیاژ خواهد شد. برای نیل به این هدف روشهای متفاوتی وجود دارد یکی از این روشها ایجاد تغییر فرم بلافاصله بعد از انجام عملیات محلول سازی می باشد. در این تحقیق ابتدا آلیاژ مورد نظر ریخته گری شد. بعد از انجام عملیات محلول سازی در دمای 560°C ، نمونه ها به میزان ۱۵، ۲۵ و ۴۰ درصد تحت عملیات نورد سرد قرار گرفتند دمای پیر سازی بین 240°C - 130°C انتخاب شد. نتایج نشان می دهند که با افزایش مقدار تغییر فرم، سختی به مقدار قابل توجهی افزایش یافته و سختی حداکثر در دماهای پایین تر و زمان های کوتاهتری ایجاد می شود نتایج حاصل از پراش اشعه ایکس نشان داد که عملیات پیر سختی، موجب جابجایی پیک های پراش به سمت زوایای کمتر می گردد.

کلمات کلیدی: آلیاژ Al-Mg-Si، نورد، پیرسازی، پراش اشعه ایکس

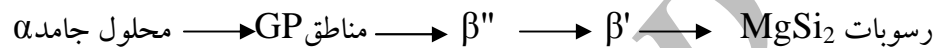
۱- استادیار بخش مهندسی مواد، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان rezvanifar@graduate.uk.ac.ir

مقدمه

ترکیبی از دانسیته پایین و استحکام بالا علت کاربرد گسترده آلیاژهای آلومینیم در صنایعی از قبیل هوا فضا و خودرو سازی که نسبت استحکام به وزن بالا در آنها مدنظر بوده، می باشد [۲ و ۱]. افزایش قابل توجه در استحکام این آلیاژها در طی فرایند پیرسختی اتفاق می افتد. در طی این فرایند میزان فوق اشباع بودن به مرور کاهش یافته و با افزایش دانسیته رسوبات کوهرنت و نیمه کوهرنت بسیار ریز استحکام افزایش می یابد [۳].

Miao و Laughlin [۴ و ۵] نشان دادند که ترتیب رسوب دهی در این آلیاژها به صورت:



برای بهینه کردن تغییر فرم پذیری و استحکام در آلیاژهای Al-Mg-Si دو روش را می توان بکار گرفت (۱: اصلاح آلیاژ ۲) انجام پیر سختی اولیه (Preaging) و یا تغییر شکل قبل از پیرسختی (Predeformation). تغییر شکل قبل از رسوب سختی یک روش برای بهبود خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم قابل پیر سختی می باشد. خواص مکانیکی آلیاژهای رسوب سختی شده به مقدار قابل توجه ای به درصد فازهای نیمه پایدار در میکروساختار بستگی دارد، از طرف دیگر تغییر شکل باعث تشکیل مقدار زیادی عیوب میکروساختاری از قبیل جاهای خالی و نابجایی ها می شود. امروزه انجام تغییر شکل قبل از عملیات پیرسختی به عنوان ابزاری برای افزایش خواص مکانیکی این آلیاژها استفاده می گردد [۴ و ۶].

افزایش میزان تغییر شکل باعث افزایش چگالی نابجایی ها می گردد. نابجایی ها از نظر انرژی مکان های مناسبی برای جوانه زنی رسوبات می باشند و مسیر های کوتاهی را برای نفوذ اتم های حل شونده فراهم می نمایند در نتیجه باعث تشکیل سریعتر رسوبات می گردند. از طرف دیگر نابجاییها به عنوان عیوب ساختاری بوده که باعث افزایش پایداری فازهای نیمه پایدار می شوند [۷ و ۸]. عقیده بر این است که عیوب میکروساختاری موجب انجام سریعتر فرایند پیر سختی می شود به طوریکه تمایل رسیدن به فازهای پایدار افزایش می یابد. Field و Yassar [۹] نشان دادند که با انجام تغییر شکل بر روی آلیاژ AA6022 فاز β' جانشین فاز β'' در حین عملیات پیر سختی می شود. Allen و Sande [۱۰] عقیده داشتند که در آلیاژ سری 7xxx رسوبات مستقیماً بر روی نابجایی ها به صورت فاز تعادلی η به جای فاز نیمه پایدار η' ظاهر می شوند. Gomiero و Reeves [۱۱] نیز بیان کردند که رشد رسوبات بر روی نابجایی ها سریعتر از مناطق عاری از عیب انجام می گیرد و توسط بزرگترین زاویه بین رسوب و خط نابجایی کنترل می شود.

در این تحقیق سعی شده است تاثیر مقدار تغییر فرم قبل از عملیات پیرسختی بر روی نحوه استحکام بخشی آلیاژ مورد نظر مورد بررسی قرار گیرد و تاثیر کرنش های الاستیک ناشی از تشکیل رسوبات بر موقعیت پیک های پراش اشعه ایکس بحث گردد.

مواد و روش تحقیق

آلیاز مورد نظر با ترکیب نشان داده شده در جدول ۱ در کوره مقاومتی ذوب شد. برای رسیدن به این منظور آلومینیم خالص به همراه آمیزان Al-Si و Al-Mg در داخل بوتله گرافیتی تحت عملیات ذوب قرار گرفتند، ریخته گری در قالب با ماسه سیلیسی انجام شد. اندازه قطعات ریخته شده $1\text{cm} \times 8\text{mm} \times 20\text{mm}$ بود. برای همگن نمودن ساختار ریخته گری نمونه ها در دمای 500°C به مدت ۱ ساعت حرارت داده شدند تا بازوهای بین دندریتی از بین رفته و ساختاری کاملاً همگن ایجاد شود.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیازهای ریخته گری شده

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Ti	Al
۰.۴۴	۰.۲۶۳	۰.۰۰۱	۰.۰۰۶	۰.۴۹	۰.۰۲۸	۰.۰۰۶	باقیمانده

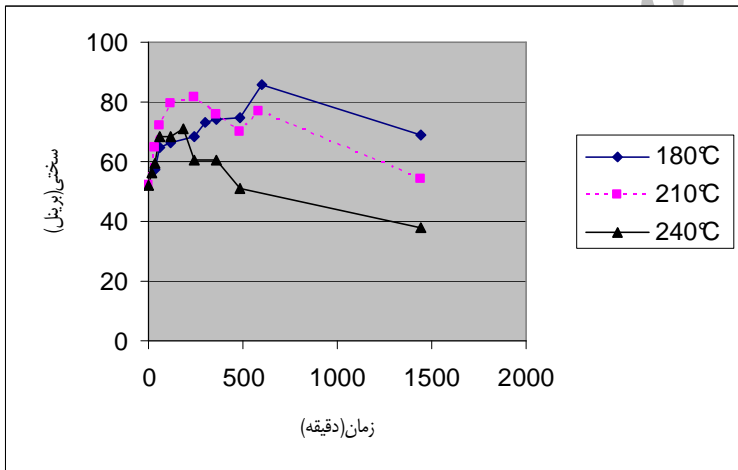
برای مطالعه تاثیر فرایند رسوب سختی بر روی آلیاز مورد نظر نمونه هایی با ابعاد $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 8\text{mm}$ و $1\text{cm} \times 5\text{mm} \times 8\text{mm}$ از قطعه ریخته گری شده جهت انجام عملیات پیرسختی و نورد تهیه شد. نمونه ها در کوره عملیات حرارتی تا دمای 560°C حرارت داده شده و به مدت ۱ ساعت در این دما نگاه داشته شدند. سپس سریعاً در آب با دمای محیط سرد شدند تا محلول جامد فوق اشباعی ایجاد گردد. برای جلوگیری از پیرسختی طبیعی نمونه ها با تاخیر حدود ۳۰ دقیقه در محیط آزاد، در دمای زیر صفر درجه نگهداری شدند. تعدادی از نمونه ها در یک دستگاه نورد آزمایشگاهی به میزان ۱۵، ۲۵ و ۴۰ درصد تحت عملیات نورد سرد قرار گرفتند. برای جلوگیری از ایجاد رسوب بعد از هر مرحله نورد نمونه ها در درجه حرارت اتاق سرد شدند. نمونه های نورد سرد شده به همراه نمونه های کوئنچ شده در آب در دماهای ۱۵۰ و ۱۸۰ و ۲۱۰ و ۲۴۰ درجه سانتیگراد برای زمانهای متفاوت (۱۵ دقیقه تا ۲۴ ساعت) در کوره تحت عملیات پیرسختی قرار گرفتند. از تمام نمونه ها تست سختی به عمل آمد. سختی توسط سختی سنج برینل با بار ۶۲.۵ Kg و زمان ۶۰ ثانیه انجام گرفت. بر روی هر نمونه ۴ تست سختی انجام شد و متوسط آنها به عنوان سختی معیار در نظر گرفته شد. از تمام نمونه ها در دستگاه XRD مدل فیلیپس با تابش $\text{Cu } k_{\alpha}$ ، دیفرکتومتر Pw1710، طول موج $\lambda = 0.154178$ ، گام (Step Size) 0.02° و زاویه پراش $140^\circ - 30^\circ$ در دمای اتاق الگوی پراش اشعه ایکس تهیه شد.

یافته ها

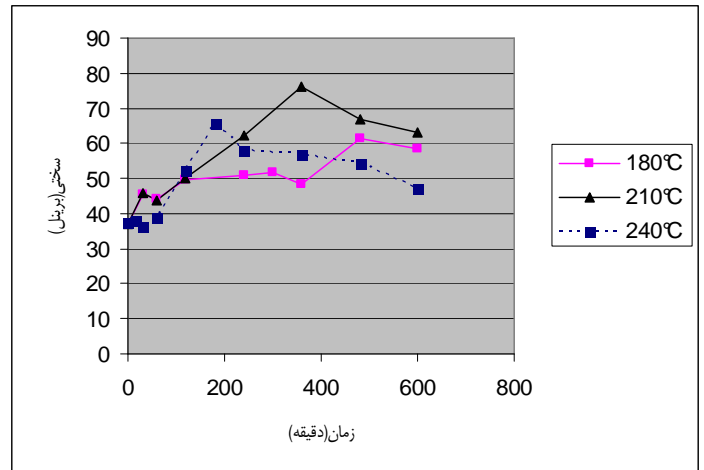
پیرسختی بر روی نمونه ها در هر دو حالت (۱) بدون هیچگونه تغییر فرم اولیه (۲) بعد از انجام عملیات نورد در دماهای $240^\circ\text{C} - 130^\circ\text{C}$ انجام گرفت، مشاهده شد تا قبل از دمای 180°C تغییرات منظمی در سختی مشاهده نمی شود که دلیل آن تاخیر در واکنش منظم شدن (Ordering) خوشه های Si و Mg (Cluster) به دلیل

نیرو محرکه کم برای نفوذ در دماهای پایین می باشد به همین دلیل از آوردن اطلاعات مربوط به دماهای زیر 180°C صرف نظر شده است. نمودار (۱) تغییرات سختی را در زمانهای متفاوت پیرسختی برای آلیاژ مورد نظر در درجه حرارت های 180°C - 240°C نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود در درجه حرارت 180°C ماکزیمم سختی بعد از ۸ ساعت و در 210°C و 240°C درجه سانتیگراد بعد از گذشت زمان ۶ و ۴ ساعت ایجاد شده است. حداکثر سختی در این آلیاژ در حدود 73.6 برینل بوده که در دمای 210°C و بعد از مدت زمان حدود ۶ ساعت بدست می آید.

در شکل ۲ نمودار سختی بر حسب دمای پیرسختی برای نمونه های که به اندازه 15% بعد از عملیات محلول سازی نورد سرد شده اند را نشان می دهد در دمای 180°C سختی به آهستگی شروع به افزایش کرده و بعد از زمان ۱۰ ساعت به مقدار حداکثر سختی 85.85 برینل می رسیم در دمای 210°C بعد از گذشت ۴ ساعت به مقدار سختی حداکثر در این دما می رسیم که برابر 81.7 برینل می باشد با افزایش دما تا 240°C سختی ماکزیمم بعد از گذشت ۳ ساعت حاصل شده و برابر 71.2 می باشد مشاهده می شود با افزایش دما سرعت رسیدن به پیک ماکزیمم سختی افزایش می یابد.



شکل ۲- تغییرات سختی بر حسب زمان پیرسختی - 15% نورد

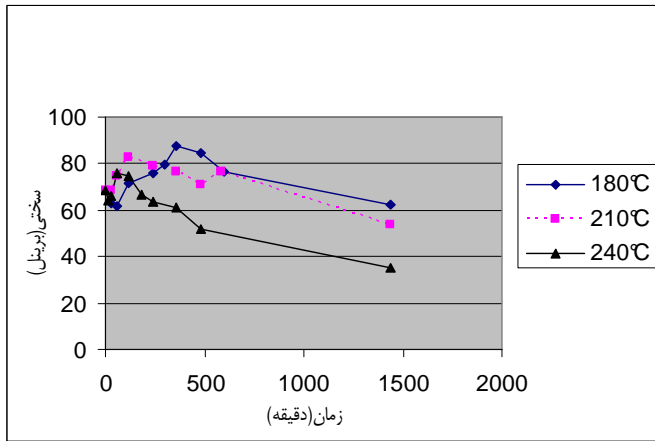


شکل ۱- تغییرات سختی بر حسب زمان پیرسختی - نورد

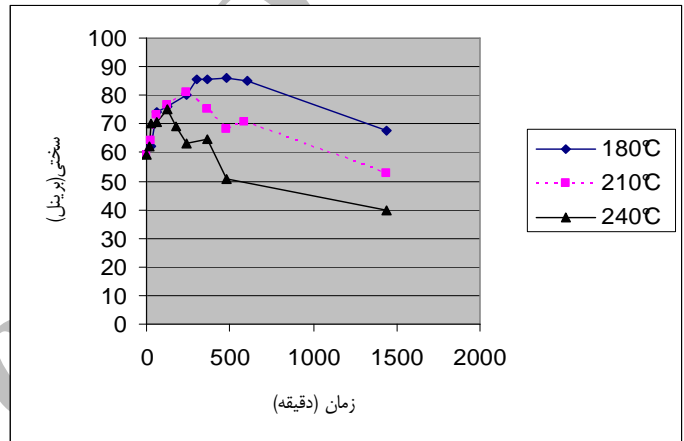
برای نمونه هایی که به میزان 25% نورد شده اند (شکل ۳) در دمای 180°C سختی با سرعت بیشتری نسبت به حالت قبل (15% نورد) شروع به افزایش کرده است. به طوریکه بعد از زمان ۸ ساعت سختی به مقدار حداکثر

۸۶.۱۶ برینل می رسد. با افزایش دما تا حدود 210°C بعد از ۴ ساعت و در دمای 240°C بعد از ۲ ساعت پیک سختی در این دما بدست می آید.

در نمونه های ۴۰٪ نورد شده (شکل ۴) حداکثر سختی در دمای 180°C بعد از گذشت زمان ۶ ساعت و به مقدار ۸۷.۴۶ برینل حاصل شده است. در دمای 210°C بعد از گذشت ۲ ساعت و در دمای 240°C بعد از فقط ۱ ساعت سختی به مقدار ماکزیمم در این دما می رسد.

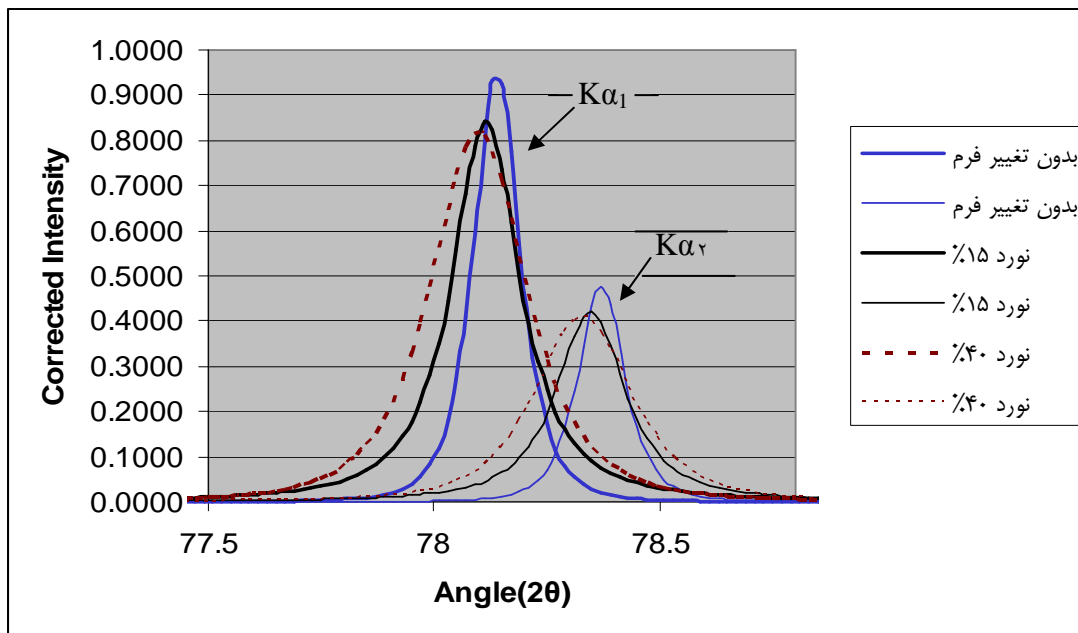


شکل ۴- تغییرات سختی بر حسب زمان پیرسختی - ۴۰٪ نورد



شکل ۳- تغییرات سختی بر حسب زمان پیرسختی - ۲۵٪ نورد

تغییر مکان در موقعیت پیک های پراش اشعه ایکس نشان دهنده کرنش های الاستیک است [۱۲] اما بدلیل همپوشانی پیک ها ($K\alpha_1$, $K\alpha_2$) و خطای دستگاه باید از توابع مناسبی برای تجزیه پیک های اصلی استفاده کرد تا بتوان به طور دقیق مکان پیک را مشخص کرد در اینجا از تابع Pearson VII استفاده شده است نتایج حاصل از پیک پراش صفحه (۳۱۱) آلومینیم بدست آمد، مشاهده شد که با افزایش میزان نورد بر روی نمونه ها بلافاصله بعد از محلول سازی خطوط پراش به سمت چپ جابجا می شوند (شکل ۵)، همچنین همانطور که در جدول ۲ (الف-ج) نشان داده شده است با انجام عملیات پیر سختی برای نمونه های نورد نشده تا قبل از رسیدن به حداکثر سختی (۶ ساعت) کرنش های ناهمخوانی افزایش یافته و موجب جابجا شدن پیک ها به سمت زوایای کمتر گشته اما بعد از آن دوباره افزایش می یابد. برای نمونه های نورد شده زاویه پیک تا قبل از رسیدن به حداکثر سختی در ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد و در مراحل فرآوری دوباره افزایش نشان می دهد.



شکل ۵- موقعیت پیک (۳۱۱) آلومینیم بعد از عملیات محلول سازی

جدول ۲- موقعیت پیک (۳۱۱) آلومینیم الف) نمونه‌های نورد نشده ب) ۱۵٪ نورد ج) ۴۰٪ نورد

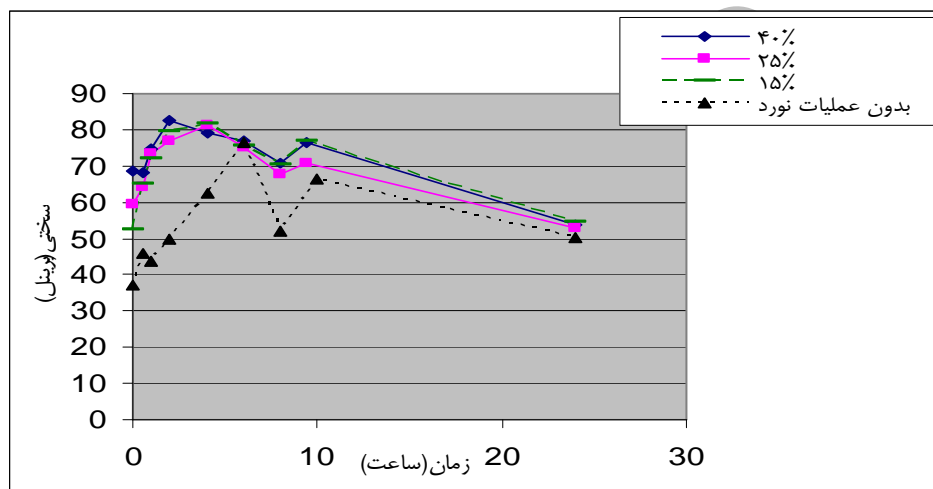
		زمان پیرسختی (الف)	۱ ساعت	۶ ساعت	۸ ساعت	۲۳ ساعت
$K\alpha_1$ (درجه)			۷۸.۱۱	۷۸.۰۹	۷۸.۰۹	۷۸.۱۷
$K\alpha_2$ (درجه)			۷۸.۳۳	۷۸.۳۱	۷۸.۳۳	۷۸.۳۹

زمان پیرسختی (ب)	۱ ساعت	۴ ساعت	۸ ساعت	۲۳ ساعت	زمان پیرسختی (ج)	۲ ساعت	۸ ساعت	۲۳ ساعت
$K\alpha_1$ (درجه)	۷۸.۲۱	۷۸.۱۳	۷۸.۱۳	۷۸.۱۸	$K\alpha_1$ (درجه)	۷۸.۱۳	۷۸.۱۷	۷۸.۱۹
$K\alpha_2$ (درجه)	۷۸.۴۳	۷۸.۳۷	۷۸.۳۷	۷۸.۳۹	$K\alpha_2$ (درجه)	۷۸.۳۷	۷۸.۳۹	۷۸.۴۱

بحث

. با افزایش دما زمان رسیدن به پیک سختی کاهش یافته است, زیرا افزایش دما موجب تشکیل تعداد بیشتری جاهای خالی می گردد در نتیجه مناطق GP و فاز " β " با سرعت بیشتری شکل می گیرند.
 با مقایسه نتایج سختی نمونه های نورد شده، با افزایش درصد نورد مقدار سختی بیشتری در حین عملیات پیر سختی بدست آمده است. علاوه بر این زمان رسیدن به حداکثر سختی و استحکام کاهش یافته و سختی بالاتر در زمان های کوتاهتری به دست می آید از طرف دیگر پایداری سختی با افزایش درصد نورد افزایش می

یابد (شکل ۶) زیرا با افزایش درصد نورد، چگالی نابجاییها افزایش می یابد که مکان های مناسبی از نظر انرژی برای جوانه زنی ناهمگن رسوبات می باشند و مسیرهای کوتاهی را برای نفوذ اتمهای حل شونده فراهم کرده و تشکیل رسوبات را تسریع می کنند از طرف دیگر نابجاییها به عنوان عیوب ساختاری عمل کرده و پایداری فازهای نیمه پایدار را افزایش می دهند.



شکل ۶- تغییرات سختی بر حسب زمان پیر سختی در دمای 210°C با افزایش میزان تغییر شکل

در تمامی درصدهای نورد (اشکال ۴-۲) مشاهده می شود که با افزایش دما سختی با شتاب بیشتری افزایش می یابد اما مقدار سختی ماکزیمم با افزایش دما کاهش می یابد در حالی که در نمونه های سری اول (شکل ۱) که هیچگونه تغییرشکلی قبل از عملیات پیر سختی در آنها ایجاد نشده بود مشاهده شد که در دماهای بالاتر مقادیر سختی بیشتری بدست می آید. با افزایش دما تعداد جاهای خالی (vacancy) افزایش می یابد و خود نیرو محرکه ای برای جدا شدن اتمهای منیزیم و سیلیسیم و تشکیل سریعتر مناطق GP و رسوبات β'' می باشد در نتیجه نرخ افزایش سختی تسریع شده و مقدار آن نیز افزایش خواهد یافت (باستثنای دمای خاصی که ماکزیمم سختی در آن بدست می آید). همانطور که گفته شد با افزایش درصد نورد دانسیته نابجاییها افزایش می یابد و خود نابجاییها باعث ایجاد جاهای خالی شده و مکانهایی برای جوانه زنی رسوبات می باشند. می توان گفت در دماهای پایین مکانیزم کنترل کننده افزایش سختی در عملیات پیر سختی نابجاییها می باشند اما با افزایش دما تاثیر نابجاییها کاهش می یابد. در واقع جاهای خالی ایجاد شده به واسطه افزایش دما مکانیزم غالب برای افزایش استحکام خواهند بود. در نمونه های بدون نورد ایجاد جاهای خالی و تشکیل رسوبات تحت کنترل تغییرات دما می باشد اما در نمونه های نورد شده افزایش سختی در ابتدا ناشی از افزایش دانسیته

نابجاییها بوده و در دماهای بالا افزایش سختی بیشتر به دلیل ایجاد جاهای خالی ناشی از تغییرات دما بوده تا وجود نابجاییها، چون در دماهای بالا نابجاییها اثر یکدیگر را خنثی کرده و به عنوان مکانهای ضعیفتری عمل می کنند.

همچنین پایداری پیک سختی با افزایش دما کاهش می یابد در دماهای پایین که افزایش سختی بیشتر تحت کنترل عیوب خطی (نابجاییها) می باشد سختی پایداری بیشتری دارد و با افزایش دما پایداری سختی کاهش یافته و بعد از بدست آمدن ماکزیمم سختی افت سریعتری در مقدار آن ایجاد می گردد.

با انجام عملیات نورد به طور همزمان مقداری کرنش الاستیک و پلاستیک در نمونه ایجاد می شود کرنش های پلاستیک موجب پهن شدگی (Broadening) پیک های پراش و کرنش های الاستیک باعث جابجا شدن پیک ها می شود به همین دلیل با افزایش درصد نورد پهن شدگی افزایش یافته و جابجایی پیک ها به سمت زوایا کمتر افزایش می یابد. با افزایش زمان پیرسختی کرنش های ناهمخوانی افزایش یافته و این موجب ایجاد کرنش های الاستیک می گردد و خطوط پراش به سمت زاویه های کمتر جابجا می شود اما در حالت فرایر سازی به دلیل درشت شدن رسوبات و کاهش کوهرنسی زوایا پیک ها افزایش می یابد (جدول ۲) در نمونه های نورد شده در ابتدا اعمال حرارت (پیر سختی) موجب آزاد شدن انرژی های ذخیره شده می شود و پیک ها به سمت زوایا بیشتر جابجا می شوند یعنی در واقع آزاد شدن انرژی های ذخیره شده در اثر نورد بر کرنش های ناشی از فازهای انتقالی غالب خواهد بود اما با افزایش زمان گرمادهی (تا قبل از رسیدن به حداکثر سختی) افزایش کرنش های کوهرنسی باعث جابجا شدن پیک ها به سمت زوایا کمتر می شود.

نتیجه گیری

۱- سختی حداکثر در نمونه بدون نورد ۷۶.۳ و نمونه های با درصد نورد ۱۵، ۲۵ و ۴۰ به ترتیب ۸۵.۸۵، ۸۶.۱۶ و ۸۷.۴۶ برینل بدست آمد، که با افزایش درصد نورد زمان رسیدن به این سختی کاهش پیدا می کند.

۲- در دماهای پایین مکانیزم کنترل کننده افزایش سختی، نابجاییها هستند که به عنوان مکان هایی برای جوانه زنی رسوبات عمل می کنند، اما با افزایش دما تاثیر نابجاییها کمتر شده و تشکیل رسوبات بیشتر تحت تاثیر ایجاد جاهای خالی ناشی از تغییرات دما می باشد.

۳- در نمونه های نورد شده با انجام عملیات پیرسختی در ابتدا آزاد شدن انرژی های ذخیره شده مکانیزم غالب بوده و باعث جابجایی پیک های پراش به زوایای بیشتر شده است، اما با افزایش زمان

پیرسختی، کرنش های ایجاد شده ناشی از کوهیرنسی باعث کشیده شدن پیک ها به زوایا کمتر می شود.

مراجع

1. G. Liu, G. J. Zhang, X. D. Ding, J. Sun, K. H. Chen, Mater. Sci. and Eng., A344 (2003) 113-124.
2. M.A. van Huis a,b,* , J.H. Chen a,b , M.H.F. Sluiter, H.W. Zandbergen /Acta Materialia 55(2007) 2183-2199
3. N. Afify, A. Gaber, M.S. Mostafa, Gh. Abbady, Alloys and Compounds/(2007) 1-26
4. Miao WF, Laughlin DE. Metall Mater Trans A 2000; 31:361.
5. Miao WF, Laughlin DE. Scripta Mater 1999;40:873.
6. Matsuda K, Terasaki M, Tada S, Ikeno S. J Jpn Inst Light Met 1995; 45:95.
7. Larche´ FC. Dislocation in solids, vol. 4. Amsterdam: North Holland; 1979. p. 135.
8. Deschamps A, Livet F, Bre´chet Y. Acta Mater 1999; 47:281.
9. Reza S. Yassar, David P. Field, Hasso Weiland. Scripta Materialia 53 (2005) 299-303
10. Allen RM, Sande V. Metall Trans A 1978; 28:1185.
11. Gomiero, P., Reeves, A., Pierre, A., Bley, F., Livet, F. and Vichery, H., in Proc. of the 4th ICAA, Atlanta, GA. Georgia Institute of Technology, 1994, p. 644.).
12. B. D. Cullity, Element of x-ray diffraction, 1978, Massachusetts, California, Addison-Wesley

The effect of cold rolling before the artificial ageing on the increase in hardness of Alloy Al-0.49Mg-0.44Si

M.Zandrahimi¹, A. Rezvanifar²
University of Sahid Bahonar of Kerman

Abstract

Alloys of Al-Mg-Si due to having high ratio of strength to weight are desirable substitutes for steel. High hardness in this alloy could be achieved by heat treatment. The application of the alloy will be wider if this high strength to weight ratio could be achieved in shorter period of time. In order to achieve this aim there are a number of different methods. In this research the alloy was casted first. After solutionizing at 560 °C, samples were cold rolled with 15, 25 and 40 % thickness reduction. For heat treatment aging temperature of 130-240 °C was chosen. Results show that by increasing the amount of deformation the hardness increases to a considerable value. The maximum hardness is achieved at lower temperature and shorter aging time. Result of x-ray diffraction shows that age hardening results in moving the x-ray peaks toward smaller angle.

Keyword: Al-Mg-Si alloys, rolling, ageing, x-ray diffraction

1-Associated professor, M.Zandrahimi@hotmail.com

2 -M.Sc. Student, ali.rezvanifar@graduate.uk.ac.ir

Surf and download all data from SID.ir: www.SID.ir

Translate via STRS.ir: www.STRS.ir

Follow our scientific posts via our Blog: www.sid.ir/blog

Use our educational service (Courses, Workshops, Videos and etc.) via Workshop: www.sid.ir/workshop