آنیل انحلالی، پیرسازی دومرحلهای و بررسی خسارت هیدروژنی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵

سلمان قلی پور^{*}، سیدرحمان حسینی و رضا شجاعرضوی دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان

(دريافت مقاله: ۳/۲۶ /۱۳۹۳ – دريافت نسخه نهايي: ۱۳۹۳/۱۲/۲۵)

چکیده – هدف از انجام این پژوهش، بررسی خسارت هیدروژنی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۷۵، پس از انجام آنیل انحلالی و پیرسازی دومرحلهای است. آنیل انحلالی در دماهای ۵۰۰ تا ۵۷۵ درجه سانتی گراد بهمدت ۱ تا ۲۰ ساعت انجام شد. مرحله اول پیرسازی دومرحلهای، در دماهای ۱۸۰، ۲۰۰ و ۲۲۰ درجه سانتی گراد بهمدت ۳۰ دقیقه و مرحله دوم پیرسازی در دماهای ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه سانتی گراد بهمـدت ۱۰، ۱۵ و گرفت. بررسی ساختاری بهروش SEM و بررسی ترکیب شیمیایی رسوبها بهروش EDS صورت گرفت. افت استحکام کششی در فرایند ۲۶ پس از هیدروژن دهی ۱۵۰ مگاپاسگال بود ولی در فرایند دومرحله ای این کاهش به ۵۰ مگاپاسگال رسید. در مجموع، اسـتحکام کششی پس از شارژ هیدروژن، در فرایند پیرسازی دومرحلهای نسبت به فرایند ۶۲ بهشدت افزایش یافت.

واژگان کلیدی: پیرسازی دومرحلهای، آنیل انحلالی، آلومینیوم ۷۰۷۵، خسارت هیدروژنی

Evaluation of Hydrogen Damage in Aluminum 7075 Alloy after Dissolution Annealing and Two-stage Aging

S. Gholipour^{*}, S.R. Hosseini and R. Shoja Razavi

Faculty of Materials Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Shahin Shahr, Iran

Abstract: This study aims at investigation of the hydrogen damage after dissolution annealing and two-stage aging in aluminum 7075 alloy. Dissolution annealing was performed at 500 to 575 °C for duration of 1 to 20 hours. The first stage of two-stage aging was performed at 180, 200 and 220 °C for 30 minutes. The second stage was carried out at 120 and 150 °C for 10, 15 and 20 hours. Structural characteristics and chemical composition of precipitates was investigated using SEM and EDS methods,

^{*} مسئول مكاتبات پست الكترونيكي: S.gholipourr@gmail.com

respectively. Reduction of the tensile strength in T6 process after hydrogenation reached to 150 MPa, although it decreased only, about 50 MPa in the two-stage process. Overall, tensile strength after hydrogen charging was significantly increased in the twostage aging compared to the T6 process.

Keywords: Two-stage aging, Dissolution annealing, Aluminum 7075, Hydrogen damage

پیرسازی را در دمای ۱۰۰ تا ۱۶۰ درجه سانتی گراد انجام دادنـد و رابطهای میان سختی، استحکام کششی و هدایت الکتریکی پیدا نمودند به گونهای که با افزایش سختی پس از عملیات حرارتی ۲۶، هدایت الکتریکی کاهش یافت. اونورو [۳] در سال ۲۰۰۹ میلادی خوردگی تنشی آلیاژ آلومینیـوم ۷۰۷۵ را پـس از فراینـدهای RRA' و T۶ در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد و در محلول NaCl (• تا ۵ درصد) بررسی کرد. مقاومت به خوردگی تنشی پس از عملیات حرارتیRRA نسبت به فرایند ۲۶ افزایش یافت. دلیل افزایش مقاومت به خوردگی تنشی بـرای فراینـد RRA، فراپیرسـازی و درشت شدن رسوب های فاز دوم گزارش شد. آنتونی و همکارانش [۴] در سال ۲۰۱۱ میلادی روی رفتار خوردگی تنشی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در محیط کلریـد سـدیم در دمـای محیط تحت اعمال بارهای مکانیکی کششی و پیچشی بررسیهایی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که مقاومت به خوردگی تنشی در بارهای فشاری نسبت به تنش های کششی بیشترین مقدار است. سانگ و همکارانش [۵] در سال ۲۰۱۲ میلادی روی اثر نرخ سرد کردن آلیاژ، پس از انجام فرایند آنیـل انحلالی و اثر آن بر ریزساختار بررسی انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که با کاهش تأخیر در سرد کردن، رسوبهای فاز دوم همگن تر شد و استحکام کششی افـزایش یافـت. در سـال ۲۰۱۳ میلادی رانگانتا و همکارانش [۶] روی مقاومت به خـوردگی تنشـی آلیـاژ آلومینیـوم ۷۰۴۹ پـس از عملیـات حرارتی TV۳ ، T۶ و RRA پژوهشهایی انجام دادند و توانستند خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی تنشبی را توسط عملیات حرارتی چند مرحله ای افزایش دهند. در سال ۲۰۱۴ دكوئينو و همكارانش [٧] ريزساختار آلياژ آلومينيوم ٧٠٧۵ توليد شده بهروش روزنرانی (اکستروژن) را بررسی کردند. در یژوهش های صورت گرفته، رسوب های اکسیدی در روش

۱ – مقدمه

آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ کاربرد بسیاری در صنایع مختلف از جمله صنايع هوايي، فضايي و هوافضا دارد. بدنه هواپيما، فضاپيما، موشکها و ماهوارهها از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ ساخته می شود. هیدروژن اتمی و سایر عوامل موجود در محیط کاری فضاپیماها و ماهوارهها باعث تخريب آلياژ آلومينيوم ٧٥٧٥ مي شود. از اين رو با انجام عملیات حرارتی و کاهش مناطقی کـه میـل بـالایی برای واکنش با هیدروژن دارند، میتوان استحکام کششی آلیاژ را پس از شارژ هیـدروژن کنتـرل کـرد. آلیـاژ آلومینیـوم ۷۰۷۵ بهدلیل استحکام بالا (در مقایسه با سایر آلیاژهای آلومینیوم) و قابلیت پذیرش انواع عملیات حرارتی سهم زیادی از کاربردهای صنعتی را بهخود اختصاص داده است. آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ قابلیت عملیات های حرارتی ۲۶، ۲۷۳، بازگشت و پیرسازی مجدد و همچنین پیرسازی دومرحلهای را دارد. مشاهده شده است که بیشـینه سـختی آلیـاژ ۷۰۷۵ در حضـور منـاطق GP و رسوب های '6 حاصل می شود [۱]. در نتیجه دما و زمانی که بتواند ترکیبی از این مناطق در زمینهی آلیاژ حاصل کند، موجب ايجاد بالاترين سختي و استحكام خواهد شد. انجام عمليات پیرسازی مصنوعی در دمایی که بالاتر از دمای تشکیل مناطق GP باشد، منجر به تشکیل مناطق 'θ و یا θ می شود و در نتیجـه فراپیرسازی رخ میدهد. ترتیب تشکیل رسوب در فرایند پيرسازي آلياژ آلومينيوم ٧٥٧٥ بهصورت زيراست [١]:

مناطق $GP \to (MgZn_2) \to (MgZn_2)$ (۱) مناطق $MgZn_2 \to (MgZn_2)$

عملیات حرارتی پیرسازی دومرحلهای تاثیر بهسزایی در رفتـار خـوردگی تنشـی آلیـاژ آلومینیـوم ۷۰۷۵ دارد. کـلارک و همكارانش [۲] روى خواص مكانيكي و فيزيكي آلياژ آلومينيـوم ۷۰۷۵ پساز عملیات حرارتی T۶ پژوهش هایی انجام دادند. آنها فرایند آنیل انحلالی را در دماهای ۴۲۰ تا ۵۳۰ درجه سانتی گراد و

روزنرانی نسبت به سایر روشهای تولیدی بیشتر گزارش شده است. قطعاً رسوبهای اکسیدی بر دما و زمان عملیات حرارتی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ اثرگذارند. تـاکنون روی عملیـات حرارتی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ نوردی بررسیهای زیادی صورت گرفته است. دراین پژوهش عملیات حرارتی آلیاژ آلومینیـوم ۷۰۷۵ روزنرانی شده که اختلاف چشم گیری با عملیات حرارتی آلیاژ نوردی دارد، بررسی شده است. آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در بدنیه ماهواره و ماهوارهبی کاربرد دارد. بسته به مأموریتی که ماهواره در فضا دارد در بدنه ماهواره تخریب ایجاد می شود. یکی از عوامل مخرب در فضا بر بدنه ماهواره هیدروژن اتمی است. در طول شبانهروز، وقتی یک مـاهواره در مقابل نور خورشید قرار می گیرد، هیدروژن اتمی به بدنه آن نفوذ می کند. با نفوذ هیدروژن اتمی به بدنه ماهواره، تردی هیدروژنی در مرزهای دانـه و مرزهـای بـینفـازی کـه غلظـت عناصر مس و منیزیم در آنها بالا است ایجاد می شود. سـپس بـا ایجاد چالههای فضایی و یا طوفانهای خورشیدی، آلیاژ تحت تنش قرار می گیرد و باعث کاهش استحکام آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ میشود [۸]. در این پژوهش به اثـر هیـدروژن اتمـی بـر استحكام كششى آلياژ آلومينيوم ٧٠٧۵ پرداخته مي شود.

۲ – مواد و روش پژوهش

آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ به سکل تسمه با ابعاد ۵۰۰ × ۲۰۰ میلی متر تهیه شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ که توسط طیف سنج جرقه ای (SES)^۲ اندازه گیری و با استاندارد ISO B209 مقایسه شده است [۹]، در جدول ۱ آورده شده است. تصویر میکروسکوپی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در جهت روزنرانی در شکل ۱ نمایش داده شده است. با توجه به تصویر میکروسکوپی نمایان است که دانه ها در جهت روزنرانی کشیده شده اند. در این شکل، زمینه محلول جامد عناصر آلیاژی مانند روی، منیزیم و مس در آلومینیوم است که به آن فاز آلفا (۵) می گویند. فازهای تیره رسوبهای نامحلولند. این رسوبها بسته به ترکیب شیمیایی آلیاژ گونههای زیادی دارند [۱۰]. جهت گیری دانهها

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۵، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۵



شکل ۱– تصویر میکروسکـوپی نـوری از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ خام در جهت (RD)

در فرایند روزنرانی به شکل قالب و جهت اعمال نیرو بسـتگی دارد [٧]. برای انجام عملیات حرارتی نمونه هایی به ابعاد ۲۰×۲۰×۲۰ میلیمتر آمادهسازی شد. برای انجام فرایند عملیات حرارتی از کوره هواچرخشی نابرترم مـدل N30/A موجـود در آزمایشگاه عملیات حرارتی دانشگاه صنعتی مالکاشتر اصفهان استفاده شد. ابعاد کوره استفادهشده شامل طول ۳۴ سانتیمتر، عرض ۳۱ سانتی متر و عمق ۴۲ سانتی متر بود. برای انجام فرایند پیرسازی دومرحلهای ابتدا عملیاتحرارتی آنیل انحلالی انجام شد. بهمنظور انجام عملیاتحرارتی آنیل انحلالی نمونههایی در دماهای ۴۵۰، ۴۷۵، ۵۰۰، ۵۲۵، ۵۵۰ و ۵۷۵ درجه سانتی گراد هر کدام بهمدت ۱، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ساعت نگهداری شدند. برای ایجاد محلول جامد فوقاشباع نمونهها از کوره خارج شد و در زمان کمتر از ۵ ثانیه در محلول یخ و نمک سریع سرد شدند. با مخلوط یخ و نمک دمای محیط خنککننده به حدود ۱۵- درجـه سانتی گراد رسید. برای انجام مرحله اول فرایند پیرسازی دومرحلهای، پیرسازی در دماهای ۲۰۰ و ۲۲۰ درجه سانتی گراد بهمدت ۳۰ دقیقه انجام شد. در مرحله دوم، پیرسازی در دماهای ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه سانتی گراد بهمدت ۱ تا ۳۰ ساعت صورت گرفت. چرخه عملیات حرارتی برای پیرسازی دومرحلهای در دماهای مختلف در شکل ۲ آورده شده است. فرایند پیرسازی



جدول ۱– مقایسه ترکیب شیمیایی شمش و استاندارد آلمان برای آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ برحسب درصد وزنی



گرفت که محیط سردکردن نمونهها پس از فرایند آنیل انحلالی اثر بهسزایی روی شکل رسوب، پس از پیرسازی دارد [۱۱]. هرچه سرعت سردکردن در فرایند آنیل انحلالی بیشتر باشد، رسوب ایجادشده پس از فرایند پیرسازی ریزتر است. برای بررسی ساختاری، سطح نمونهها توسط سنباده از جنس ذرات SiC تا شماره ۳۰۰۰ سنبادهکاری و توسط پودر آلومینا و T۶ پس از آنیل انحلالی در دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۵ تا ۲۰ ساعت انجام شد. در شکل ۳ چرخه عملیات حرارتی منتخب برای فرایند ۲۶ آورده شده است. تمامی نمونه ها پس از پیرسازی در محلول یخ و نمک با دمای حدود ۱۵- درجه سانتی گراد سرد شدند. باتوجه به بررسی های صورت گرفته توسط پژوهشگران می توان نتیجه

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۵، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۵

9.

جملوق ۲۰۰۰ تر نیب سیدیایی محلوق حال کاری کنر و کرانی محل کاری سیمیایی این اکو سیمیا ۲۰		
تركيب شيميايي	محلول حككاري	رديف
۲ میلیلیتر اسید فلوئوریدریک ۴۸ درصد + ۳ میلیلیتر اسید کلریدریک + ۵ میلیلیتر اسید نیتریک+ ۱۹۰ میلیلیتر آب مقطر	كلر	١
۱۵ میلیلیتر اسید نیتریک+ ۵/۰ میلیلیتر اسید فلوئوریدریک ۴۸ درصد+ ۳ گرم اکسید کروم (Cr ₂ O ₃)+ ۸۴ میلیلیتر آب مقطر	گراف	٢

جدول ۲- ترکیب شیمیایی محلول حککاری کلر و گراف برای حککاری شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵

پارچهای از جنس ماهوت^۳ که روی صفحهای درحال دوران نصب شده بود، صیقل کاری شد. برای مشاهده دانهها، رسوبها و مرزدانهها از دو نوع محلول حککاری کلر و گراف استفاده شد. ترکیب شیمیایی محلولهای حککاری در جدول ۲ آورده شده است. بررسی ساختاری توسط میکروسکوپ نوری المپیو[†] مدل BME3 انجام شد. بررسی سختی پیش و پس از عملیات حرارتی بهروش ویکرز و با فرورونده الماسی با سطح چهارگوش انجام شد. پس از تکمیل فرایندهای ۲۶ و دومرحلهای، خسارت هیدروژنی بهروش استاتیک بررسی شد. برای نمونهسازی آزمون کشش از استاندارد 10-E8 استفاده شد [۲۲]. برای انجام آزمون، نمونههایی به طور جداگانیه هیدروژن دهی شدند و تحت تنش با نرخ کرنش ^{1-S ۲}-۰۰×۲ قرار گرفتند.

۳– نتایج و بحث

در شکل ۴ نتایج سختی سنجی در جهت های RD، RD و TD پس از فرایند آنیل انحلالی در دماهای مختلف عملیات حرارتی نشان داده شده است. سختی در نمونه خام (عملیات حرارتی نشده) در جهت ND برابر با ۳±۱۳۰ ویکرز و در جهت های RD و TD برابر با ۳±۱۰ ویکرز بود. پس ازانجام عملیات حرارتی آنیل انحلالی در دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد، سختی در جهات RD، RD و TD تغییرنکرد. با افزایش دمای فرایند انیل انحلالی تا ۴۷۵ درجه سانتی گراد، سختی در جهت RD به اندازه ۱۰ ویکرز کاهش یافت و به ۳±۱۰ ویکرز رسید. با

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۵، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۵



دما برحسب درجه سانتی گراد شکل ۴– نمودار سختی برحسب دمای آنیل انحلالی برای آلیاژ آلومینیـوم ۷۰۷۵ در جهـت روزنرانـی (RD، TD و ND)

در جهتهای TD و ND تغییر چندانی نداشت. با بررسی ریزساختار آلیاژ پس از آنیل انحلالی در دمای ۴۷۵ درجه سانتی گراد، در جهت TD و RD دانه ها به شکل ستونی مشاهده شدند. سپس دمای فرایند آنیل انحلالی به ۵۰۰ درجه سانتی گراد افزایش یافت. با انجام فرایند آنیل انحلالی در دمای ۵۰۰ درجه

سانتی گراد، سختی در جهـتهـای ND و TD بـه ۳±۱۱۰ و در جهت RD به ۳±۱۰۷ ویکرز رسید. در دمای ۵۲۵ درجه سانتی گراد، پس از گذشت ۱۵ ساعت، فرایند آنیل انحلالی تکمیل شده، سختی در همه جهت ها به ۱۰۰ ویکرز کاهش یافت. در شکل ۵ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از آلياژ آلومينيوم ٧٠٧٥ پساز عمليات آنيل انحلالي نشان داده شده است. ترکیب شیمیایی رسوبهای فاز دوم پس از فرایند آنیل انحلالی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل ۵، پس از آنیل انحلالی گروهـی از رسـوبهـای فـاز دوم در سـاختار مشاهده شدند. پس از تعیین ترکیب شیمیایی رسوب توسط طیفسنج تفکیک انرژی مشخص شد که رسوبهای مشاهدهشده پایدار بوده، در فرایند ذوب و آلیاژسازی بهوجود آمدهاند. رسوب های فاز دوم موجود در شکل ۵ شامل ترکیب Al7Cu2Fe و CuAl2O4 هستند [۱۳]. در دماهای بیشتر از ۵۵۰ درجه سانتی گراد ذوب موضعی در نمونهها ایجاد شد. در شکل ۶ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از حفرات ایجادشده پس از ذوب موضعی مشاهده می شود. با افزایش دما و زمان آنیل انحلالی ازدمای ۵۵۰ درجـه سـانتی گـراد، تعـداد و اندازه حفرات افزایش پیدا کرد. باتوجه به شکل ۶-ب در دمای ۵۷۵ درجه سانتی گراد تعداد حفرات در مرزدانه به حدی رسیده که دانه ها از یک دیگر جدا شده اند. برای بررسی خواص مکانیکی آلیاژآلومینیوم ۷۰۷۵ پـس از عملیات پیرسازی دومرحلهای، از دو آزمون سختیسنجی و کشش استفاده شد. در شکل ۷ نمودار سختی برحسب زمان پیرسازی در دمای ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه سانتی گراد، برای فراینـد T۶ آورده شـده اسـت. در فرایند T۶ با پیرسازی در دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد، به مدت ۲۰ ساعت بیشترین سختی حاصل شد و سختی آلیاژ از ۳±۹۰ ویکرز به ۳±۱۵۰ ویکرز رسید و با ادامه پیرسازی، سختی آلیاژ كاهش پیدا كرد. به گونه دیگر می توان گفت، با افزایش زمان پیرسازی از ۲۰ ساعت، فراپیرسازی ایجاد شده است. با پیرسازی در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد، به مدت ۳۰ ساعت، سختی آلیاژ به ۳±۱۵۰ ویکرز رسید و در آلیاژ، فراپیرسازی



شکل ۵- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی (BSE) از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ پس از عملیات حرارتی آنیل انحلالی در دمای ۵۲۵ درجه سانتی گراد بهمدت ۱۷ ساعت



شکل ۶- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از حفرات ایجاد شده پس از آنیل انحلالی در دمای الف) ۵۵۰ و ب) ۵۷۵ درجه سانتیگراد

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۵، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۵



شکل ۷- نمودار سختی برحسب زمان پیرسازی برای فرایند عملیات حرارتی ۲۶ پیرسازی شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد

حاصل نشد. در فرایند T۶ استحکام و سختی آلیاژ نسبت به فرايند پيرسازي دو مرحلهاي افزايش مي يابد ولي آلياژ، مستعد به تردی هیدروژنی می شود. پیرسازی آلیاژ در دمای بالاتر از θ ادرجهی سانتی گراد باعث تشکیل مستقیم فاز θ' یا θ می شود که این امر موجب مقاومت مناسب آلیاژ در برابر تردی هیدروژنی میشود ولی استحکام کششی را کاهش میدهد [۱۴]. از طرفی، مدت نگهداری قطعه در کوره برای پیرسازی زياد است. باتوجه به دلايل گفتهشده عمليات پيرسازي دومرحلهای طراحی شـد. در شـکل ۸ نمـودار سـختی ویکـرز برحسب زمان پیرسازی، برای فرایند پیرسازی دومرحلهای در دمای ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه سانتی گراد آمده است. سختی آلیاژ پس از آنیل انحلالی به حدود ۲±۸۸ ویکرز رسید. با انجام پیرسازی مرحله اول در دمای ۲۰۰ و ۲۲۰ درجـه سانتی گـراد، سـختی تغییری نداشت و پس از پیرسازی مرحله اول از ۳±۸۸ ویکرز به حدود ۳±۹۵ ویکرز افزایش یافت. در مرحله دوم پیرسازی در دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد، سختی آلیاژ پس از پیرسازی در زمان حدود ۱۵ ساعت از ۳±۹۵ به ۳±۱۳ ویکرز رسید و با افزایش زمان پیرسازی از ۱۵ ساعت سختی کاهش یافت و بهعبارتی دیگر فراپیرسازی صورت گرفت. باتوجه به شکل ۸ با پیرسازی در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد، به مدت ۲۵ ساعت سختی تـا ۳±۱۲۶ ویکرز افـزایش یافـت و در ایـن فراینـد

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۵، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۵



شکل ۸- نمودار سختی برحسب زمان پیرسازی برای عملیاتحرارتی پیـرسـازی دو مـرحلـهای، پـس از مـرحلـه اول و مـرحلـه دوم

فراپیرسازی انجام نشد. دلیل افزایش سختی آلیاژ، کاهش اندازه و افزایش تعداد رسوبهای فاز دوم در ریزساختار است. در شکل ۹ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از آلیاژ پـس از انجام فرایند پیرسازی دومرحلهای آورده شده است. باتوجه به شکل ۹، در ریز ساختار دونوع رسوب ریز و درشت مشاهده می شود. رسوب های درشت در مرحله اول پیرسازی به وجود آمده، در مرحله دوم پیرسازی رشد کردهاند. رسوبهای ریزتـر در مرحله دوم فرایند عملیات حرارتی به وجود آمده اند. استحکام کششی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ پـساز فراینـد پیرسـازی دومرحلهای بررسی شد و آزمون کشش برای نمونه های خام، آنیل انحلالی، T۶ و پیرسازی دومرحلهای انجام شد. نتایج مربوط به آزمون کشش پـس از هيـدروژندهـي قبـل و پـساز عملیات حرارتی در شکل ۱۰ آورده شده است. با توجه به شکل ۱۰ می توان گفت پس از فرایند پیرسازی دومرحلهای استحکام به حدود ۴۳۰ مگاپاسگال رسیده است. مجد و همکارش [۱۳] در سال ۲۰۰۱ اثر رسوب های فاز دوم بر چگونگی شکست را بررسی کردند. این پژوهش نشان داد که رسوب های فاز دوم، محلی برای ایجاد جوانه تـرکانـد. انـدازه رسوب های فاز دوم و نرخ کرنش تاثیر بسزایی روی نوع شکست آلیاژ دارد. باتوجه به پژوهش های مجد، یک گروه ترک در زیر رسوبهای فاز دوم ایجاد می شوند که ضمن تشدید



از آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ پس از فرایند پیرسازی دومرحلهای (رسوبهای سیاه رنگ از نوع MgZn2 هستند)



ترکدار شدن در اثر حضور هیدروژن، موجب می شوند که تنش در حوزه اطراف رسوبهای فاز دوم پخش شود. پس هرچه تعداد رسوبهای فاز دوم در ریزساختار بیشتر باشد، استحکام کششی آلیاژافزایش می یابد. در عملیات حرارتی T۶ بهدلیل اندازه ریز و توزیع یکنواخت رسوبها، استحکام

کششی بالاترین مقدار بوده، از ۳۵۰ به ۴۳۰ مگاپاسکال رسیده است.

در شکل ۱۱ نمودار تنش کرنش پس از عملیات حرارتی پیرسازی دومرحلهای در زمان های مختلف هیدروژن دهی (۰، ۱، ۴، ۸ و ۱۲ ساعت) آورده شده است. استحکام آلیاژ آلومینیوم در عملیات حرارتی پیرسازی دومرحلهای پس از هیدروژندهی بهمدت ۱۲ ساعت از ۴۳۰ به ۴۰۰ مگاپاسکال کاهش یافت. پژوهشها نشان داده است که انجام فرایند دومرحلهای باعث می شود که رسوب های موجود در مرزهای دانه از حالت پیوسته خارج و به شکل پیوسته ظاهر شوند [16]. با ازبین رفتن پیوستگی رسوب،ای فاز دوم در مرزدانه، مکانیزم تردی هیدروژنی از نوع مرزدانهای بـه درون دانـهای تبـدیل مـیشـود. در شکل ۱۲ نمودارتنش کرنش پس از فرایند عملیات حرارتی ۲۶ در زمانهای مختلف هیدروژندهمی مشاهده میشود. در فرایند عملیات حرارتی ۲۶ پـس از هیـدروژندهـی بـهمـدت ۱۲ سـاعت استحکام کششی از ۴۵۰ مگاپاسکال به ۳۵۰ مگاپاسکال رسید. دلیل کاهش استحکام کششی پس از هیدروژندهی در فرایند T۶، افزایش مرزهای بین فازی است. با افزایش تعداد و کاهش اندازه رسوب های فاز دوم، مرزهای بین فازی افزایش مییابد [18]. در شکل ۱۳ تصویر SEM از سطح شکست نمونه پس از فرایند پیرسازی دومرحلهای و هیدروژنده_ی آمـده اسـت. باتوجـه به شکل ۱۳، در سطح شکست نمونیه گروهی ازفرورفتگیهای فنجانی شکل مشاهده شد. در تصویر ترک هایی دیده می شود که اطراف رسوبها ایجاد شدهاند و دهانه ترکها باز شده است. باز شدن دهانه ترکها یکی از نشانههای شکست نرم است. می توان گفت یک ترک بینفازی در ریزساختار ایجاد می شود که بهدلیل دور بودن رسوبها از یکدیگر دهانه ترک باز و انرژی آن گرفته می شود. وانگ و همکارانش [۱۶] در سال ۲۰۱۴ روی تأثیرات عملیات حرارتی بازگشت و پیرسازی مجدد (RRA) در آلیاژ آلومینیوم ۷۰۵۰ بررسی کرده، حرکت ترک را در ریزساختار شناسایی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که پس از عملیات حرارتی RRA و TV۳ رسوب های فاز دوم در مرزدانه ها ایجاد





شده است. پس از ورود هیدروژن به درون آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ بهدلیل تجمع رسوب های فاز دوم در مرزدانه ها و میل ترکیبی بالای هیدروژن با رسوب ها، در مرزهای دانه تردی هیدروژنی اتفاق می افتد. در نهایت در اثر اعمال نیرو، ترک هایی از اطراف رسوب های فاز دوم جوانه زده، شروع به رشد می کند.

۴- نتیجهگیری استحکام کششی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ هیدروژندهی شـده پـس





شکل ۱۳– تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM) از سطح شکست پس از پیرسازی دومرحلهای و هیدروژندهی

از انجام عملیات حرارتی دومرحله ای نسبت به فرایند T۶ افزایش یافت. در فرایند دومرحله ای پس از شارژ هیدروژن، استحکام ۵۰ مگاپاسکال و در فرایند T۶ پس از شارژ هیدروژن استحکام در حدود ۱۵۰ مگاپاسکال کاهش یافت.

عملیات حرارتی پیرسازی دومرحلهای تـأثیر بـهسـزایی بـر سختی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ روزنرانی شده دارد. سختی پـساز عملیات حرارتی پیرسازی دومرحلهای به حدود ۲±۱۳۰ ویکرز و پس از فرایند ۲۶ به حدود ۲±۱۵۰ ویکرز رسید.

در پیرسازی دومرحلهای دونوع رسوب ریز و درشت در ریزساختار مشاهده شد. رسوبهای درشت در مرحله اول و رسوبهای ریز در مرحله دوم پیرسازی ایجاد شدهاند.

دمای تبلور مجدد در آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ روزنرانی شده، حدود ۵۲۵ درجه سانتی گراد بود و در دمای بیش تر از ۵۵۰ درجه سانتی گراد در نمونهها ذوب موضعی ایجاد شد.

ساز و کارخوردگی در شرایط تنشی پس از تزریق هیدروژن در آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ تردی هیدروژنی است و در مرزدانه ها و مرزهای بینفازی که غلظت مس، منیزیم و روی بالاست، تردی هیدروژنی اتفاق میافتد. ترکها از مرزهای بینفازی جوانه زده ، رشد میکنند.

- 1. retrogression and re-aging
- 2. spark emission spectroscopy

- Clark, R., Coughran, B. and Traina, I., "On the Correlation of Mechanical and Physical Properties of 7075-T6 Al Alloy", *Engineering Failure Analysis*. Vol. 12, pp. 520–526, 2005.
- Oñoro, J., "The Stress Corrosion Cracking Behavior of Heat-Treated Al-Zn-Mg-Cu Alloy in Modified Salt Spray Fog Testing", *Ingeniería Y Ciencia De Los Materiales*, Vol. 12, pp. 280-285, 2009.
- 4. Anthony, W., Meller, P. and Bernstein, I. M., 'Stress Corrosion Cracking in Equiaxed 7075 Aluminum Under Tension and Torsion Loading", *Metallurgical Transactions A.*, Vol. 20a, pp.2564-2573, 2011.
- Song-Yi, Ch., Kanghua, Ch., Guosheng, P., Xin, L. and Xue-hai, Ch., Effect of Quenching Rate on Microstructure and Stress Corrosion Cracking of 7085 Aluminum Alloy", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, pp. 47-52, 2012.
- Ranganatha, R., kumar, V.A., Nandi, V.S., Bhat R.R. and Muralidhara, B.K., "Multi-Stage Heat Treatment of Aluminum Alloy AA7049", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 23, pp. 1570-1575, 2013.
- Deaquino, R., Gutiérrez, E., Estrada, I., Hinojosa, G., García, E., Herrera, J.M., Pérez, R. and Martínez, R., 'Structural Characterization of Aluminium Alloy 7075–Graphite Composites Fabricated by Mechanical Alloying and Hot Extrusion", *Materials and Design*, Vol. 53, pp. 1104–1111, 2014.
- Matsumoto, R., Taketomi, S., Matsumoto, S. and Miyazaki, N., "Atomistic simulations of hydrogen embrittlement", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp. 9576–9584, 2009.
- 9. ASTM International, "B209 Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate", *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 02, 2002.

- 3. mahout textiles
- 4. Olympus
- مراجع ۱۰. نصر اصفهانی، م.، عسکری پیکانی، م. و مرآتیان، م.، "عملیات حرارتی ۲۷۳ آلیاژ آلومینیوم ۲۵ ۷۰ – ۲۶ پوشش دار "، مجموعه مقالات نهمین سمینار ملی مهندسی سطح و عملیات حرارتی مقالات نهمین سمینار ملی مهندسی سطح و عملیات حرارتی ۱۳۸۷.

واژەنامە

- Jian-Guo, T., Hui, C., Xin-Ming, Z., Sheng, L., Wen-Jun, L., Hui, O. and Hong-Ping, L., "Influence of Quench-Induced Precipitation on Aging Behavior of Al-Zn-Mg-Cu Alloy", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, pp.1255-1263, 2012.
- 12. ASTM International, "E8-01 Tension Testing of Metallic Materials", *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 01.02, 2001.
- Abolhasani, A., Zarei, A., Abedi,H.R. and Rokni, M. R., "The Room Temperature Mechanical Properties of Hot Rolled 7075 Aluminum Alloy", *Materials and Design*, Vol. 34, pp. 631–636, 2012.
- 13. Magd, E. and Brodman, M., "Influence of Precipitates on Ductile Fracture of Aluminium Alloy AA7075 at High Strain Rates", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 307, pp. 143–150, 2001.
- 14. Wang, D., Ma, Z.Y. and Gao, Z.M., "Effects of Severe Cold Rolling on Tensile Properties and Stress Corrosion Cracking of 7050 Aluminum Alloy", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 117, pp. 228– 233, 2009.
- 15. Jin-Feng, L., Zhuo-Wei, P., Chao-Xing, L., Zhi-Qiang, J., Wen-Jing, C. and Zi-Qiao, Z., "Mechanical Properties, Corrosion Behaviors and Microstructure of 7075 Aluminium Alloy with Various Aging Treatments", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 18, pp. 755_762, 2008.
- 16. Wang, Y., Pan, Q., Wei, L., Li, B. and Wang, Y., 'Effect of Retrogression and Re-aging Treatment on the Microstructure and Fatigue Crack Growth Behavior of 7050 Aluminum Alloy Thick Plate", *Materials and Design*, Vol. 55, pp. 857–863, 2014.

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۵، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۵