

# خواص مکانیکی و مطالعه برگشت فنری در فرایند شکلدهی خزشی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵

رسول علیپور مقدم و حمیدرضا شاهوردی\* گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۳/۹ – دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۸/۲/۲۵)

چکیده- فرایند شکلدهی خزشی از جمله فرایندهای نوینی است که بهدلیل بهبود خواص مکانیکی و کاهش هزینههای تولید در صنایع هوایی توسعه یافته است. شکلدهی خزشی بر اساس پدیده خزش و آزادسازی تنش در حین عملیات پیرسازی آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر آلومینیوم رخ میدهد. در این پژوهش، شکلدهی خزشی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در دماهای ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه سانتی گراد و زمانهای ۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت انجام شد و از آزمونهای کشش و سختی برای مشخصهیابی نمونهها استفاده شد. با اندازه گیری میزان برگشت فنری مشخص شد که این پاسخ تابع دما و زمان بوده و با افزایش دما و زمان شکلدهی خزشی، از ۲۰/۱۵ درصد به ۲۹/۵۱ سر می یابد. خواص مکانیکی نمونهها نشان داد که با افزایش زمان شکلدهی، استحکام و سختی افزایش می یابد که دلیل آن، می تواند تحولات ریزساختاری ناشی از فرایند رسوب گذاری در حین شکلدهی خزشی باشد. با توجه به نتایج، دو نمونه به عنوان نمونههای بهینه از نفزان می در برگشت فنری و خواص مکانیکی انتخاب شدند و رفتار کارسختی و مورفولوژی سطح شکست آنها بررسی شد.

واژههای کلیدی: شکلدهی خزشی، آلومینیوم ۷۵٬۷۵ برگشت فنری، خواص مکانیکی.

### Mechanical Properties and Spring -Back Investigation in Creep Age Forming Process of 7075 Al Alloy

R. Alipour Mogadam and H. R. Shahverdi\*

Materials Engineering Department, Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

**Abstract**: Creep age forming (CAF) process is a novel metal forming method with major benefits including improved mechanical properties and cost reduction for aviation industry applications. CAF happens due to creep phenomenon and stressrelease during the artificial aging of heat-treatable aluminum alloys. In this work, the creep age forming of 7075 Aluminum alloy at 120, 150 and 180 °C for 6, 24 and 48 h was done; tensile and hardness tests were used to characterize the samples. Results on spring-back revealed that it was influenced by time and temperature; by increasing the time and temperature, it was reduced from 54.1 to 39.51. Mechanical property evaluation also showed that by increasing the time, the strength and hardness could be enhanced due to microstructural evolution and precipitation during the CAF process. According to the mechanical and CAF results, two samples were selected as the optimum ones and their work hardening behavior and fracture surfaces were investigated

Keywords: Creep-age Forming, 7075 Aluminum Alloy, Springback, Mechanical Properties.

\* : مسئول مكاتبات، پست الكترونيكي: shahverdi@modares.ac.ir

۱ – مقدمه

آلیاژهای تجاری Al-Zn-Mg-Cu (سری ۷۰۰۰) بهسبب خواص مکانیکی عالی، نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به رشد ترک خستگی، چقرمگی شکست و مقاومت به خوردگی تنشی (SCC) مطلوب، به طور گسترده در سازه های هوایی و همچنین وسایل و تجهیزات نظامی استفاده می شوند [۳–۱]. در دهههای گذشته، گسترش آلیاژهای آلومینیوم سری ۷۰۰۰ با طراحی ترکیب عناصر آلیاژی اصلی (بیشتر عنصر روی) و نوآوری در فرايندهاي شكل دهي آنها منجر به دستيابي سطح استحكام بالاتر نسبت به قبل شده است [۴ و ۵]. روش های مکانیکی مرسوم شکلدهی برای ساخت پنلهای آلومینومی مانند نورد و فورج بر پایه تغییرشکل پلاستیک هستند و تـنش پسـماند زیـادی در قطعه تولید میکنند و زمانی که قطعه تحت بارگذاری دینـامیکی قرار می گیرد، حضور تنش پسماند باعث ناکارامدی قطعه می شود [۶]. برای مقابله با این مشکل، یک روش شکل دهـی جدید توسط شرکت سازههای هوایی تکسترون ٔ توسعه یافت که بهعنوان یک روش پیشرفته برای شکل دهی اجزا با انحناهای پیچیده و دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب شـناخته شـده است. این روش شکلدهی پیشرفته، شکلدهی خزشی<sup>۳</sup> (CAF) نامیده می شود. شکل دهی خزشی در مقایسه با روش های شکلدهی دیگر برای رفتار آزادسازی تنش در طی پیرسازی مصنوعي آلياژهاي آلومينيوم تحت تنش استفاده مي شود. شكل دہی خزشبی فرایندی است کے طبی آن یک ورق (معمولاً آلومینیومی) توسط سازوکار تغییر شکل خزشی، به شکل مورد نیازشکلدهی میشود. درحالی که فرایند رسوبگذاری نیز بهطور همزمان اتفاق میافتد. نکته قابل توجه این است که فرايند شکلدهـی خزشـی مـیتوانـد روی آلياژهـای آلومينيـوم عملیات حرارتی یذیر سری های ۲۰۰۰، ۶۰۰۰ و ۷۰۰۰ اعمال شود [۷]. یکی از چالشهای اصلی برای بهبود کارایی روش شکلدهی خزشی، پیشبینی مقدار برگشت فنری بهوجود آمده در طول فرایند است که بهدلیل محدودیت در استفاده از دمای بیشینه و زمان شکلدهی برای دستیابی به ریزساختار مورد نیاز

اتفاق میافتد. از این رو، چگونگی کاهش میزان برگشت فنری همراه با خواص مکانیکی مطلوب در قطعات شکل دهی خزشی شده مشکل کلیدی است که برای توسعه کاربرد این روش نیاز به مرتفع شدن دارد چرا که برگشت فنری بالا باعث مشکلاتی در طول مونتاژ قطعات شکل دهی شده می شود.

در طول سالهای اخیر، تحقیقات گستردهای روی برگشت فنرى و خواص مكانيكي قطعات شكل دهمي خزشمي شده صورت گرفته است. ژان و همکاران [۸]، نشان دادند که میزان برگشت فنری در فرایند شکلدهی خزشی با افزایش دما و زمان شكلدهي تقريباً بهصورت خطى كاهش مييابد اما با افزايش شعاع خمش، افزایش مییابد. ژان و همکاران [۹]، با استفاده از آنالیزهای مختلف نتایج تجربی، بیان کردند که چهار متغیر مؤثر بر برگشت فنری عبارتند از: دمای شکلدهی، زمان بارگذاری، ضخامت قطعه و شعاع خمـش. بـرای پنـل.هـای آجدار، جيـا و همکاران [۱۰]، دریافتند که مقادیر برگشت فنری بهعلت بازیابی الاستیک لایه محصور بهوسیله کرنشهای پلاستیکی آج بهطور قابل توجهی کاهش مییابد. اعرابی و همکاران [۱۱]، پی بردنـد که عملیات حرارتی دو مرحلهای برای شکلدهی خزشی مطلوب نيست زيرا خواص مكانيكي بهطور قابل ملاحظهاي کاهش مییابد اگرچه برگشت فنری نیز بهمیزان کمی کاهش مییابد. ژانگ و همکاران [۱۲]، نشان دادند که برگشت فنری تحت تأثير شرايط شكلدهي است و همچنين به وضعيت تـنش داخلی مواد مربوط است و صفحات دارای دو انحنا، برگشت فنری کم و خواص مکانیکی بالاتری در مقایسه با صفحات تک انحنا دارند. هو و همکاران [۱۳]، از معادلات ساختاری خـزش برای شبیهسازی برگشت فنری در شکلدهمی خزشمی استفاده کردند. نتایج نشان داد که خزش بهطور عمده نزدیک سطوح بالایی و پایینی قطعـه اتفـاق مـیافتـد و میـزان برگشـت فنـری مي تواند با نسبت ناحيه خزش بيشتر ً به ناحيه خـزش كمتـر ٥ ارزيابي شود.

در دو دهه گذشته مطالعات متعددی روی شکلدهی خزشی آلیاژهای آلومینیوم صورت گرفته است که بیشتر آنها شکلدهی

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۸، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۸

جدول ۱– ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ برحسب درصد وزنی											
Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Cr	other	عنصر ألياژي			
Bal.	۵/۲۰	۲/۰۱	1/77	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۱۷	•/• <b>\</b>	درصد وزني			



شکل ۱- قالب مورد استفاده برای شکل دهی خزشی

خزشی آلیاژهای آلومینیوم – مس را بررسی کردهاند [۱۶–۱۴]. با این حال اطلاعات محدودی درباره شکل دهی خزشی آلیاژهای سری ۵۰۰۰ آلومینیوم وجود دارد. چرا که با عملیات پیرسازی مصنوعی این سری از آلیاژهای آلومینیوم، میتوان خواص مطلوبی به دست آورد. بنابراین شکل دهی خزشی میتواند به عنوان یک فرایند ساخت نوینی برای تولید قطعات استحکام بالای آلیاژهای ۵۰۰۰ مثل بدنه و پوسته بال هواپیما به کار رود [۱۷ و ۱۸]. هدف از این پژوهش نیز شکل دهی خزشی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در دماها و زمان های مختلف برای دستیابی به میزان برگشت فنری و خواص مکانیکی بهینه با توجه به کاربرد این مواد است.

۲ – مواد و روش تحقیق
۲ – ماده اولیه
ماده مورد استفاده در این پژوهش ورق از جنس آلیاژ آلومینوم

۷۰۷۵ به ضخامت ۳/۲ میلیمتر است. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول (۱) آمده است.

### ۲-۲- شکل دهی خزشی

در این پژوهش، قالب طراحی شده برای دستگاه از نوع قالبهای سبک با مکش خلأ است. این قالب بهصورت یک تکه، با انحنای ۱/۹ بر متر و فاصله از سطح افق ۳ سانتیمتر به ابعاد ۳۵×۳۵ سانتیمتر مربع است (شکل ۱). برای شکل دهی خزشی، ابتدا نمونهها در دمای ۱۰۰±۰۸۰ درجه سانتیگراد بهمدت ۱۲۰ دقیقه در کوره نگهداری و سپس در آب ۲۵ درجه سانتیگراد کوئنچ شدند. هدف از این عملیات، محلولسازی عناصر آلیاژی از جمله روی، منیزیم و مس برای پیرسازی و شکل دهی در مرحله بعد بود. سپس ورق در حالت آنیل انحلالی روی قالب قرار داده شد. بدین صورت که با نیروی بسیار کم ورق روی اُرینگ نگهداشته میشود. در این حالت با

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۲۸، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۸

0 5, 5		-9.	
زمان (ساعت)	دما (درجه سانتیگراد)	شماره آزمایش	
6	170	١	
74	170	۲	
۴۸	170	٣	
8	10.	۴	
74	10.	۵	
۴۸	10.	۶	
6	١٨٠	٧	
74	١٨٠	٨	
۴۸	١٨٥	٩	

جدول ۲– سیکلهای حرارتی مورد استفاده در پژوهش

جهت نورد و در دمای اتاق با استفاده از دستگاه 20 SANTAM و سرعت حرکت یک میلی متر بر دقیقه انجام شد. در هر یک از سیکل های شکل دهی این آزمون سه بار برای هر یک از شرایط انجام شد. پس از انجام آزمون، میانگین استحکام تسلیم و کششی استخراج شد. آزمون سختی سنجی در دمای محیط مطابق با استاندارد ASTM E10 به روش برینل و با استفاده از ساچمهای با قطر ۲/۵ میلی متر و با نیروی ۶۲/۵ کیلوگرم نیرو انجام شد. سختی گزارش شده در هر سیکل حرارتی میانگین اندازه گیری سختی در سه نقطه مختلف است.

## ۳-نتایج و بحث ۱-۳- خواص شکلدهی خزشی

شکل (۲) منحنی سه بعدی تغییرات برگشت فنری برحسب دما و زمان شکل دهی را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، برگشت فنری تابعی از دما و زمان شکل دهی است و با افزایش دما و زمان شکل دهی، کاهش می یابد. به طوری که از ۵۴/۱ درصد در حالت ۶–۱۲۰ به ۳۹/۵۱ درصد در حالت ۴۸–۱۸۰ کاهش می یابد. از آنجا که خزش یک فرایند نفوذی و وابسته به دما و زمان است، به همین دلیل با افزایش این دو عامل میزان کرنش خزشی افزایش می یابد و از مقدار کرنش الاستیک کاسته می شود که درنهایت منجر به کاهش برگشت فنری می شود [۱۹]. شروع به کار پمپ هوای بین ورق روی اُرینگ و قالب کامل تخلیه و ورق تحت فشار وارده از خلاً کاملاً به قالب می چسبد. توزیع یکنواخت فشار روی ورق باعث ایجاد توزیع تنش یکنواخت می-شود. سپس در محفظه بسته شده و سیکل های حرارتی طراحی شده مطابق جدول (۲) روی ورق اعمال شد. منطق انتخاب دما و زمان بر اساس دمای پیرسازی این آلیاژ (محدوده دمایی ۱۸۰–۱۲۰ درجه سانتی گراد) و همچنین شرط لازم برای برای وقوع خزش در این آلیاژ حداقل دمای آزمایش در محدوده ۴,۰ دمای ذوب آلیاژ بود.

پس از باربرداری و آزادسازی قطعه، فاصله عمودی بین قطعه کار شکل داده شده و سطح ابزار، اندازه گیری و میزان برگشت فنری قطعه مطابق رابطه (۱) محاسبه شد.

$$R(\%) = \frac{\delta_{\text{max}}}{\delta_0} \times 100 \tag{1}$$

که در این رابطه،  $\delta$  ماکزیمم فاصله عمودی بین قطعه کار تغییر شکل نیافته اولیه و سطح ابزار و  $\delta_{max}$  ماکزیمم فاصله عمودی بین قطعه کار شکل داده شده و سطح ابزار است. میزان کرنش خزشی از رابطه (۲) محاسبه شد که R در این رابطه میزان برگشت فنری است (۲) Creep Strain(%) = (100 – R)

#### ۲-۳- مشخصه يابي

آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM E8 در دمای محیط در





شکل ۳- نمودار سه بعدی کرنش خزشی برحسب دما و زمان شکل دهی خزشی

منحنی سهبعدی کرنش خزشی در شرایط مختلف در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به نمودار، روند تغییر شکل خزشی در هر سه دمای شکلدهی مشابه یکدیگر است و با افزایش دما و زمان شکل دهی افزایش مییابد و در حالت ۸۹-۰۸۰ به مقدار بیشینه ۶۹/۴۹ درصد میرسد. همانطور که مشاهده می شود، منحنی های خزشی فقط شامل ناحیه خزش

حالت پایدار<sup>۶</sup> هستند که در این حالت نرخ خزش (شیب نمودار) ثابت است که ناشی از توازن بین فرایندهای کار سختی و بازیابی است [۲۰].

۲-۳- خواص مکانیکی در شکل (۴) نحوه تغییرات خواص مکانیکی (استحکام کششی،

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۸، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۸



شکل ۴- تغییرات: الف) تنش تسلیم، ب) استحکام کششی و ج) درصد ازدیاد طول برحسب زمان در دماهای مختلف شکل دهی خزشی

۲۰ مگاپاسکال در دماهای بالاتر می رسد. در همین حال، زمان شکل دهی برای دستیابی به بیشینه استحکام با افزایش دما، شکل دهی برای دستیابی به بیشینه استحکام ی تواند به پیر سختی ناشی از کاهش می یابد. تغییرات استحکام می تواند به پیر سختی ناشی از شکل گیری خوشه های حل شده و رسوب گذاری و همچنین کرنش سختی به دلیل تغییر شکل خزشی نسبت داده شود [۲۱]. برای فهم بهتر قابل ذکر است که ترتیب رسوب گذاری در آلیاژهای آلومینیوم سری ۲۰۰ به مورت زیر است [۲۲]. آلیاژهای آلومینیوم سری ۲۰۰۰ به صورت زیر است [۲۲]: مناطق م محلول جامد و مالی در آلی محلول جامد و محلول جامد و آلیاژهای آلومینیوم سری ۲۰۰۰ به مورت زیر است آلیاژی در محلول جامد و محلول جامد و آلیاژهای آلی محلول جامد و محلول جامد و آلیاژی در آن، '۹ یک فاز انتقالی و ۹ رسوب تعادلی MgZn است.

تسلیم و درصد ازدیاد طول) و شکل (۵) نمودار تنش – کرنش نمونههای شکل دهی شده در دما و زمانهای مختلف نشان داده شده است. با توجه به منحنی های (۴ – الف) و (۴ – ب) در هر سه دما با افزایش زمان شکل دهی، در ابتدا تنش تسلیم و استحکام کششی افزایش مییابد و پس از ۲۴ ساعت حداکثر استحکام حاصل می شود و در ادامه با افزایش بیشتر زمان تا ۴۸ ساعت میزان استحکام تقریباً ثابت می ماند. مقایسه استحکام نمونه های شکل دهی شده نشان می دهد که استحکام تسلیم نمونه های شکل دهی شده نشان می ده در دماهای ۱۵۰ و ۱۰۰ درجه مانتی گراد تقریباً نزدیک به هم بوده و اختلاف کمی (۵ – ۱۰ مگاپاسکال) با یکدیگر دارند. در حالی که در مقایسه با نمونه شکل دهی شده در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد این اختلاف به

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۸، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۸

GP تشکیل می شوند که فصل مشترک این رسوبات با زمینه

DOI: 10.29252/jame.38.2.55 ]



همسیما است و در حدود یک تا دو اتم ضخامت دارند [۲۱]. بههمین دلیل انرژی فصل مشترک آنها کم و جوانهزنی آنها آسان است. در این مرحله تعداد مناطق GP به سرعت افزایش می یابد و استحکام تسلیم به دلیل جوانهزنی و رشد این رسوبات افزایش می یابد [۲۲].

با افزایش زمان شکل دهی تا ۴۸ ساعت استحکام ماده با افزایش اندازه رسوبات افزایش مییابد و رسوبات 'π نیمه همسیما با ساختار نزدیک به ساختار تعادلی ایجاد می شوند [۲۱]. پیرسختی در این مرحله به بیشترین مقدار می رسد که سبب ایجاد بیشترین استحکام می شود. از طرف دیگر در نمونه های شکل دهی شده در زمان شش ساعت که دارای رسوبات GP با فصل مشترک هم سیما با زمینه هستند. نابجایی ها قادر به برش رسوبات است، و به راحتی از آنها عبور می کنند، به همین دلیل استحکام ماده در این حالت نسبت به زمان های دیگر کمتر است. با افزایش

فصل مشترک رسوبات با زمینه غیر همسیما میشود. بنابراین در این مرحله سازوکار عبور نابجایی از رسوبات از طریق دورزدن و تشکیل حلقه است [۲۱].

شکل (۴- ج) تغییرات ازدیاد طول نمونههای شکل دهـ. شده را نشان میدهد. همانطور که مشاهده میشود، در هـر سه دما، تغییرات ازدیاد طول روند مشابهی دارد، بهطوری کـه زمان شش ساعت بیشترین میـزان ازدیاد طـول را دارد و با افزایش زمان، این مقدار کاهش مییابد. رونـد کـاهش ازدیاد طول با افزایش زمان توسط پژوهشگران دیگر نیز گزارش شده است. بهطوری که در پیرسازی خزشی آلیاژ Al-Li-S4 کـه توسط لیبین و همکاران صورت گرفته است [۲۳]. ازدیاد طول با افزایش زمان از ۲۱ درصد به هشت درصد کاهش مییابد. در پژوهش دیگری نیز که توسط ژانگ و همکاران انجام گرفته است [۲۱]، ازدیاد طول آلیاژ ۲۱۲۴ شکلدهیخزشی شده با افزایش زمان از ۲۳ درصد به هشت درصـد کاهش

DOI: 10.29252/jame.38.2.55

DOR: 20.1001.1.2251600.1398.38.2.1.4 ]

۶١



شکل ۶– تغییرات سختی نمونههای شکلدهی شده برحسب دما و زمان شکلدهی خزشی

می یابد. مطابق شکل (۴- ج) درصد ازدیاد طول برای هر سه دما در زمان ۶ ساعت به طور تقریبی یکسان بوده و مقدار میانگین ۲۱/۴۶ درصد را دارد و کمترین ازدیاد طول نیز برای نمونه ۴۸–۱۸۰ با مقدار ۱۵/۵ درصد است. بهنظر می رسد که نمونههای شکل دهمی شده در زمان شش ساعت رسوبات ریزتری داشته و درنتیجه میزان تمرکز تنش موضعی در مرزدانه ها کمتر است. از طرف دیگر چون میزان رشد رسوبات در این زمان کمتر است، عرض نواحی خالی از رسوب که تابع دما و زمان شکل دهمی است و با افزایش دما و زمان افزایش می یابد، نسبت به دماهای دیگر کمتر است [۲۱]. این عوامل باعث می شوند، که جوانهزنی تـرک بـه تعویـق افتـد و نمونه انعطاف پذیری بیشتری از خود نشان دهد. درحالی که برای نمونههای ۲۴ و ۴۸ ساعت چون اندازه رسوبات بزرگتر میشوند، میزان تمرکز تنش موضعی و عرض نواحی خالی از رسوب بیشتر است و ترک سریعتر جوانهزنی میکند درنتیجه ميزان انعطاف پذيري نمونهها كاهش مي يابد.

شکل (۶) نمودار تغییرات سختی برحسب زمان شکل دهی در دماهای مختلف را نشان میدهد. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش زمان در هر سه دما، سختی افزایش مییابد،

تا به مقدار بیشینه خود برسد و سپس با گذشت زمان تقریباً ثابت میماند. در فرایند شکل دهی خزشی تنش اعمالی و دمای پیرسازی تأثیر قابل توجهی روی سختی دارند. چون هر دو تشکیل فازهای رسوبی را بهشدت ترویج میکنند. در مراحل اولیه پیرسازی سختی بهدلیل تشکیل سریع رسوبات هم سیمای GP افزایش مییابد. با افزایش زمان پیرسازی مناطق GP به فازهای 'η تبدیل می شوند. این فازهای انتقالی باعث افزایش سختی تا نقطه اوج پیری می شوند. با این حال سختی پس از پیک پیری با افزایش دما شروع به کم شدن میکند چون ماده در حالت فراپیری قرار می گیرد [۲۴]. لازم به ذکر است که حالت فراپیری در این پژوهش مشاهده نشد.

بهعنوان شاخص شکل پذیری و جذب انرژی مواد، حاصل ضرب درصد ازدیاد طول و استحکام کششی نهایی به صورت شاخصی تقریبی در صنایع استفاده می شود [۲۵]. همان-طور که در شکل (۷) مشاهده می شود، در زمان ثابت، با افزایش دمای شکل دهی، این شاخص برای آلیاژ ۷۰۷۵ شکل دهی خزشی شده کاهش می یابد. شاخص شکل پذیری برای شرایط مختلف شکل دهی، مقادیری بین ۷۸۳۴ و ۱۰۷۴۵ مگاپاسکال درصد دارد که این مقادیر در محدوده سایر آلیاژهای



۰۰۰۰ ألومينيوم هستند [۲۰، ۲۶ و ۲۷].

در حال حاضر شکل دهی خزشی به طور گستردهای در صنایع فضایی به خصوص برای ساخت پوسته و پنل های بال و بدنه هواپیما مورد استفاده قرار می گیرد. از طرف دیگر، با توجه به اجتناب ناپذیر بودن برگشت فنری در این فرایند، همچنین نیاز به شکل پذیری بالا، لازم است تا قطعات تولید شده به این روش هم خواص مکانیکی بهتر و هم برگشت فنری کمتری داشته باشند. بنابراین، طبق نتایج به دست آمده، دو نمونه ۲۴–۱۰۵۰ و ۴۸–۱۸۰ که به ترتیب خواص مکانیکی و شکل پذیری بالا و کمترین برگشت فنری را دارند، به عنوان نمونه های بهینه انتخاب شده و بر دادامه به بررسی رفتار کارسختی و سطح شکست این نمونه ها پرداخته می شود.

#### ۳–۳– کارسختی

منحنی کارسختی برای نمونههای ۲۴ –۱۵۰ و ۴۸–۱۸۰۰در شکل (۸) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، در هر دو منحنی یک کاهش اولیه خیلی سریع وجود دارد که به انتقال الاستیک- پلاستیک مربوط است. همچنین منحنیها یک رفتار موجی شکل داشته و دارای مشخصه دره و قله پس از نقطه انتقالی هستند. بر اساس تغییرات شیب منحنیها، می توان رفتار

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۸، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۸

کارسختی نمونهها را به سه مرحله تقسیمبندی کرد:

کاهش نےرخ کارسےختی در مرحلے اول در واقع تےأثیر نابجایی های جزئی در قالب دو قطبی هاست که در نرخ ثابت انباشته شدهاند. برای ایـن مرحلـه، پیرسازی مصنوعی نقـش عمدهای داشته و به اندازه رسوبات و کسر حجمی آنها وابسته است. با توجه به شکل (۷)، برای نمونه ۱۵۰-۲۴ بهدلیل کم بودن دما و زمان شکلدهی، اندازه رسوبات کوچکتر بوده و موانع کمتری در مسیر حرکت نابجایی ها وجود دارد [۲۱]، درنتیجه میزان انباشت نابجاییها در پشت موانع کمتر خواهد بود، بههمین دلیل کارسختی به تأخیر میافتد. ولی برای نمونه ۴۸-۱۸۰ بهدلیل از بین رفتن رسوبات ریز، بههم پیوستن رسوبات اتفاق میافتد و این رسوبات در طول ضخامت رشد مىكنند [٢١]. درنتيجه ميزان تجمع نابجايىها پشت موانع بيشتر میشود و در اثر اندرکنش بین رسوبات و نابجاییها مرحله دوم کار سختی زودتر شروع میشود. بهطور کلی، نرخ کارسختی در مرحله دوم نسبت به مرحله اول بیشتر است. سه سازوکار احتمالی برای توصيف اين مرحله پيشـنهاد شـدهاسـت: لغـزش ثانویه٬ جنگل نابجاییها^ و لغزش موضعی٬ که از بین اینها، مدل لغزش موضعی بهنظر میرسد، کـه گـزارش بهتـری بـرای کارسختی مرحله دوم در مقایسه با دیگر مدل هاست.



قسمتهای با علامت مخالف حلقه های نابجایی در صفحات لغزش مختلف، یکدیگر را حذف میکنند و بنابراین یک سازوکار بازیابی دینامیکی شکل میگیرد [۲۹]. مدتزمان مراحل دوم و سوم با میزان کرنش نسبت عکس با یکدیگر دارند [۲۸] و این امر برای هر دو نمونه، صادق است. به عبارت دیگر در حالت ۲۴–۱۵۰ افزایش در میزان کرنش مرحله دوم با کاهش طول مرحله سوم همراه است. برای نمونهٔ ۴۸–۱۸۰ نیز کاهش در میزان کرنش مرحله دوم با افزایش طول مرحله سوم همراه است

۴-۳- شکست نگاری

تصاویر سطح شکست نمونه های شکل دهی شده در دو حالت ۲۴-۱۵۰ و ۴۸-۱۸۰ در شکل (۹) نشان داده شده است. در سطح شکست نمونه ها حفرات و خطوط رودخانه ای<sup>۱۱</sup> مشاهده می شود که چگالی و اندازه حفرات برای شرایط مختلف متفاوت است.

همان طور که در شکل (۹- الف) و (۹- ج) مشاهده می شود نمونه ۲۴-۱۵۰ تعداد حفرات بیشتری در مقایسه با نمونه ۴۸-۱۸۰ دارد. تعداد زیادی از حفرات کوچک به عنوان نشانه ای از افزایش ازدیاد طول درنظر گرفته می شود [۲۳]. بنابراین نمونه

رسوبات داخل زمینه باعث نوسان در چگالی نابجایی ها می شوند. بنابراین اندازه و توزیع آنها (که برای شرایط مختلف پیرسازی متفاوت است) نقشے اساسے در فاصلهای کے نابجاییهای متحرک می توانند بپیمایند و از این موانع عبور كنند، دارد. ذرات فاز ثانويه بسته به اندازه آنها با حركت نابجاییها قابل برش هستند (مناطق GP و 'η) یا غیرقابل بـرش (ذرات ۱۹) [۲۸]. نتایج نشان میدهد، که زمان (میزان کرنش) مرحله دوم به زمان پیرسازی در دماهای پیرسازی حساس است. مطابق منحنیهای کارسختی، زمان مرحله دوم در نمونه ۲۴-۱۵۰ افزایش می یابد. این مرحله شاهدی از سختی حرکت نابجاییها است که منجر به تنش تسلیم بالاتر و تـنش برشی بحرانی و همچنین مقدار بیشتر کرنش میشود. طول مرحله دوم در حالت ۱۸۰–۴۸ کاهش می یابد. چون با درشت شدن ذرات ۹ و کمشدن تعداد آنها، برش ذرات، دیگر امکانپذیر نیست؛ بنابراین حلقه گذاری دور ذرات سازوکار غالب در حرکت نابجایی هاست [۲۸]. این منجر به کاهش عمده میزان کرنش مرحله دوم برای این نمونه می شود. مرحله سوم به وسیله کاهش یکنواخت نرخ کارسختی با افزایش تنش مشخص می شود، که به بازیابی دینامیکی مرتبط است، که بستگی کمتری به زمان نسبت به دما دارد. مرحله سوم با لغزش متقاطع مرتبط است، و



شکل ۹- سطح شکست نمونههای شکلدهی خزشی شده در بزرگنماییهای مختلف: الف) و ج) نمونه ۱۵۰–۲۴، ب) و د) نمونه ۴۸–۱۸۰

> ۲۴-۱۵۰ ازدیاد طول بیشتری در مقایسه با نمونه ۲۸-۱۸۰ ساعت نشان می دهد، که این نتیجه گیری با نتایج اندازه گیری شده در شکل (۴-ج) همخوانی دارد. وقتی دمای شکل دهی به ۱۸۰ درجه سانتی گراد می رسد، فرایند رسوب گذاری و رشد رسوبات پیرسازی می تواند تا حد زیادی تسریع شود. به دلیل ناساز گاری بین رسوبات و زمینه آلومینیومی، حرکت نابجایی ها درطی تغییر شکل کششی به دلیل حضور رسوبات سخت خواهد بود و یک تنش القایی اطراف رسوبات ایجاد می شود. وقتی تنش مترکز به مقدار بحرانی برسد، بین رسوبات گسیختگی آتفاق می افتد و باعث پیدایش حفرات کوچک اطراف تحمل مؤثر<sup>۲۱</sup> نمونه کشش کاهش می یابد، که باعث جوانه زنی و رشد ریز حفرات<sup>۳۱</sup> می شود. وقتی منطقه تحمل مؤثر به یک

بهعلاوه، جوانهزنی و رشد ترکهای ثانویه باعث تسریع شکست آلیاژ میشود. درنتیجه، ازدیاد طول آلیاژ مورد بررسی، با افزایش دمای شکلدهی کاهش مییابد [۲۳].

۴- نتیجه گیری

شکلدهی خزشی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در دما و زمانهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. خلاصهای از مهمترین نتایج بهدست آمده، بهصورت زیر است: ۱- برگشت فنری تابع دما و زمان شکلدهی بوده و با افزایش دما و زمان شکلدهی خزشی میزان برگشت فنری از ۵۴/۱

درصد به ۳۹/۵۱ کاهش مییابد. ۲- ماکزیمم سختی و خواص کششی در شکلدهی خزشی ورق آلومینیوم ۷۰۷۵ در سیکل ۲۴–۱۵۰ بهدست آمد. ۳)- با توجه به تغییرات برگشت فنری، شکلپذیری و خواص

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۸، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۸

۶۵

با افزایش دمای شکلدهی ازدیاد طول نمونهها کاهش یافته و چگالی حفرات ریز در سطح شکست نمونهها کمتر میشود و رفتار شکست نمونهها رفتهرفته از نرم به ترد گرایش مییابد.

مکانیکی، شکلدهی خزشی ورق آلومینیوم ۷۰۷۵ بــا ضــخامت ۳/۲ میلیمتر، در دمــای ۱۵۰ درجــه ســانتیگـراد و بــازه زمـانی ۲۴–۴۸ ساعت پیشنهاد میشود.

واژەنامە

- 1. stress corrosion cracking
- 2. textron
- 3. creep age forming
- 4. significant creep region
- 5. less creep region
- 6. steady state creep
- 7. secondary slip
- 1. Dursun, T., and Soutis, C., "Recent Developments in Advanced Aircraft Aluminium Alloys", Materials & Design, Vol. 56, pp. 862-871, 2014.
- Heinz, A., Haszler, A., Keidel, C., Moldenhauer, S., Benedictus, R., and Miller, W. S., "Recent Development in Aluminium Alloys for Aerospace Applications", Materials Science and Engineering, Vol. 280, pp. 102–107, 2000.
- Knight, S. P., Pohl, K., Holroyd, N. J. H., Birbilis, N., Rometsch, P. A., Muddle, B. C., Goswami, R., and Lynch, S. P., "Some Effects of Alloy Composition on Stress Corrosion Cracking in Al-Zn-Mg-Cu Alloys", Corrosion Science, Vol. 98, pp. 50-62, 2015.
- Lin, Y. C., Zhang, J. L., Liu, G., and Liang, Y. J., "Effects of Pre-Treatments on Aging Precipitates and Corrosion Resistance of a Creep-Aged Al-Zn-Mg-Cu Alloy", Materials & Design, Vol. 83, pp. 866-875, 2015.
- Lin, Y. C., Jiang, Y. Q., Zhang, X. C., Deng, J., and Chen, X. M., "Effect of Creep-Aging Processing on Corrosion Resistance of an Al-Zn-Mg-Cu Alloy", Materials & Design, Vol. 61, pp. 228-238, 2014.
- Timoshenko, S., and Woinowsky-Krieger, S., *Thoery* of *Plates and Shells*, McGraw-Hill, Inc., Vol. 591. 1959.
- Zhan, L., Lin, J., and Dean, T. A., "A Review of the Development of Creep Age Forming: Experimentation, Modelling and Applications", International Journal of Mechanics & Tools Manufacturing, Vol. 51, pp. 1–17, 2011.
- Han L. H., Tan S. G., Huang M. H., and Xuhua, Y., "Spring Back for 2124 Aluminum Alloy During Creep Aging Forming", *Materials for Mechanical Engineering*, Vol. 01, pp. 21-24, 2013.
- 9. Zhan, L. H., Tan, S. G., Huang, M. H., and Niu, J., "Creep Age-Forming Experiment and Springback

- 8. forest dislocations9. areal glide10. dimples11. river marks12. effective bearing area
- 13. micro voids

مراجع

Prediction for AA2524", *Advance Materials Research*, Vol. 457-458, pp. 122-129, 2012.

- 10. Jia, S. -F., Zhan, L. -H., and Xu, X.-L., "Experimental Research on the Springback in Creep Age Forming of Aluminum Alloy Panel with Stiffeners", Suxing Gongcheng Xuebao", *Journal of Plasticity Engineering*, Vol. 20, p. 3969, 2013.
- Arabi Jeshvaghani, R., Zohdi, H., Shahverdi, H. R., Bozorg, M., and Hadavi, S. M. M., "Influence of Multi-Step Heat Treatments in Creep Age Forming of 7075 Aluminum Alloy: Optimization for Springback, Strength and Exfoliation Corrosion, *Matereials Characterization*, Vol. 73, pp. 8-15, 2012.
- 12. Zhang, J., Deng, Y. L., Li, S. Y., Chen, Z. Y., and Zhang, X. M., "Creep Age Forming of 2124 Aluminum Alloy with Single/Double Curvature", *Transaction of Nonferrous Metals. Society of China* (English Ed.), Vol. 23, pp. 1922-1929, 2013.
- Ho, K. C., Lin, J., and Dean, T. A., "Modelling of Springback in Creep Forming Thick Aluminum Sheets", *International Journal of Plasticity*, Vol. 20, pp. 733-751, 2004.
- 14. Lam, A. C. L., Shi, Z., Yang, H., Wan, L., Davies, C. M., Lin, J., and Zhou, S., "Creep-Age Forming AA2219 Plates with Different Stiffener Designs and Pre-Form Age Conditions: Experimental and Finite Element Studies", *Journal of Materials Process Technology*, Vol. 219, pp. 155-163, 2015.
- 15. Yang, Y., Zhan, L., Shen, R., Yin, X., Li, X., Li, W., Huang, M., and He, D., "Effect of Pre-Deformation on Creep Age Forming of 2219 Aluminum Alloy: Experimental and Constitutive Modelling", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 683, pp. 227-235, 2017.
- Xu, Y., Zhan, L., and Li, W., Effect of Pre-Strain on Creep Aging Behavior of 2524 Aluminum Alloy", *Journal of Alloys and Compound*, Vol. 691, pp. 564-571, 2017.

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۲۸، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۸

- Arabi Jeshvaghani, R., Emami, M., Shahverdi, H. R., and Hadavi, S. M. M., "Effects of Time and Temperature on the Creep Forming of 7075 Aluminum Alloy: Springback and Mechanical Properties", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, pp. 8795-8799, 2011.
- 18. Zhang, J., Wang, Y., Deng, Y., and Zhang, X., "Effect of Deformation Degree on the Creep Age Forming of 7475 aLuminum Alloy: The Feasibility of the Extended Deformation Range", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 664, pp. 126-134, 2016.
- Li, H. Y., and Lu, X. C. "Springback and Tensile Strength of 2A97 Aluminum Alloy During Age Forming", *Transaction of Nonferrous Metals. Society of China* (English Ed.), Vol. 25, pp. 1043-1049, 2015.
- 20. Lei, C., Yang, H., Li, H., Shi, N., and Zhan, L. H., Dependences of Microstructures and Properties on Initial Tempers of Creep Aged 7050 Aluminum Alloy", *Journal of Material Process Technology*, Vol. 239, pp. 125-132, 2017.
- 21. Arabi Jeshvaghani, R., Shahverdi, H. R., and Hadavi, S. M. M., "Investigation of the Age Hardening and Operative Deformation Mechanism of 7075 Aluminum Alloy under Creep Forming", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 552, pp. 172-178, 2012.
- 22. Ho, K. C., Lin, J., and Dean, T. A., "Constitutive Modelling of Primary Creep for Age Forming an Aluminium Alloy", Journal of Materials Process Technology, Vol. 153-154, pp. 122-127, 2004.

- 23. Hu, L., Zhan, L., Shen, R., Liu, Z., Ma, Z., Liu, J., Yang, Y., "Effects of Uniaxial Creep Ageing on the Mechanical Properties and Micro Precipitates of Al-Li-S4 Alloy", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 688, pp. 272-279, 2017.
- Merica, P. D., "Precipitation Hardening", *Meterials Progress*, Vol. 27, pp. 31-35, 1935.
- 25. Mccallum, S., "Upper Body Structure Design Strategies Upper Body Structure Design Strategies Implemented on the 2011 Chevrolet Volt, Strategies. 2011.
- 26. Reda, Y., Abdel-Karim, R., and Elmahallawi, I., "Improvements in Mechanical and Stress Corrosion Cracking Properties in Al-Alloy 7075 via Retrogression and Reaging", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 485, pp. 468-475, 2008.
- 27. Feng, J., Li, Z., Peng, W. C., Xing L. I., Z. Qiang J., W., Jing Chen, Z., and Qiao, Zh., "Mechanical Properties, Corrosion Behaviors and Microstructures of 7075 Aluminium Alloy with Various Aging Treatments", *Transaction of Nonferrous Metals. Society of China* (English Ed.), Vol. 18, pp. 755-762, 2008.
- Alexopoulos, N. D., Velonaki, Z., Stergiou, C. I., and Kourkoulis, S. K., "Effect of Ageing on Precipitation Kinetics, Tensile and Work hardening Behavior of Al-Cu-Mg (2024) Alloy", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 700, pp. 457-467, 2017.
- 29. Ratheneau, G. W., "Report of the Conference on Defects in Crystalline Solids", *Acta Crystallographica*, Vol. 8, pp. 855-856, 1955.