



بررسی اثر باشینگر در لوله‌های اتوفرتاژ شده از جنس آلیاژ آلومینیوم A7075 با استفاده از داده‌های تجربی

کریم علی‌اکبری^{۱*} و خلیل فرهنگ‌دوست^۲

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ دانشیار مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۲۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۲/۵/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۲۸

چکیده

آلیاژ آلومینیوم A7075 جزء آلیاژهای پر استحکام در نوع خود محسوب می‌شود که مطابق با استاندارد ASTM B210M-05، در ساخت لوله‌های تحت فشار کاربرد دارد. پیدا کردن مدل مناسب جهت بررسی اثر باشینگر در آلیاژ آلومینیوم A7075 نقش مهمی در تحلیل فرآیند اتوفرتاژ لوله‌ها دارد. بدین منظور در این مطالعه از نتایج آزمایشگاهی تست‌های کشش-فشار تک محوره استفاده شده است. برای انجام آزمایش‌ها از یک دستگاه سروهیدرولیک اینسترون استفاده گردیده است. نمونه‌ها با قطر ۱۲/۵ میلیمتر ساخته شدند که مطابق با استاندارد ASTM E8M-97a می‌باشد. با توجه به اینکه در این آلیاژها معمولاً کرنش پلاستیک ایجاد شده به عنوان مشخصه باربرداری در نظر گرفته می‌شود، بنابراین برای مدل‌سازی رفتار این ماده لازم است آزمایش‌های مذکور با کرنش‌های پلاستیک متفاوت انجام گیرد. در این تحقیق، آزمایش‌ها تا کرنش کلی ۴/۳٪ انجام شده است. همچنین موارد مهمی از جمله تاثیر مقدار کرنش‌های پلاستیک ایجاد شده بر مدول یانگ و ضریب اثر باشینگر تست شدند. در این مقاله برای مشخص شدن اندازه تسلیم کششی و فشاری، مقدار افسست ۰/۱ درصد در نظر گرفته شده است.

کلمات کلیدی: لوله جدار ضخیم؛ اتوفرتاژ؛ اثر باشینگر؛ مدل سازی ماده؛ آلیاژ آلومینیوم A7075.

Investigation of Bauschinger effect in the autofrettaged tubes made from A7075 Aluminum alloy using experimental data

K. Aliakbari^{1,*} and Kh. Farhangdoost²

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Assoc. Prof., Mech. Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract

A7075 aluminum alloy is considered as a high-strength alloy which is used in manufacturing of under-pressure tubes according to ASTM B210M-05 standard. Finding an appropriate model for investigating Bauschinger effect factor in A7075 aluminum alloy behavior plays an important role in the analyzing the process of autofrettaged tubes. In this paper to do that, the results of experimental data of uniaxial tension-compression tests have been used. In order to carry out the tests, an Instron servo-hydraulic machine has been used. The samples were made having 12.5 mm based on ASTM standard E8M-97a. The fact that the plastic strain created in these alloys is considered as unloading characteristic, hence to model the material behavior, the experiments have been done by different amounts of plastic strain. In this research, the experiments were done at total strains up to 4.3%. Also, some important parameters including the effect of plastic strain on determining Young's modulus and Bauschinger effect factor were tested. In this paper, to determine the amount of tension-compression yield, the amount of offset has been considered as 0.01%.

Keywords: Thick-walled tube; Autofrettage; Bauschinger effect; Material modeling; A7075 aluminum alloy.

۱- مقدمه

و هانگ^۷ و کویی^۸ [۱۱] سعی کردند مدل‌های ریاضی را برای رفتار فولادهایی مانند ASTM A723، HB7 و DIN1.6959 ارائه دهند. از طرف دیگر جاهد و همکاران [۱۲ و ۱۳]، فرآیند اتوفرتاژ را مستقیماً و با استفاده از نتایج تست‌های آزمایشگاهی و بدون مدل‌سازی ریاضی بررسی کردند.

آلیاژ آلومینیوم A7075 جزء آلیاژهای پراستحکام است و مقاومت آن حتی از فولادهای متوسط بالاتر می‌باشد که این آلیاژ طبق استاندارد ASTM B210M-05، در ساخت لوله‌های تحت فشار کاربرد دارد. روش‌های عملیات حرارتی مختلف انجام شده بر روی آلیاژ آلومینیوم A7075 باعث ایجاد مقاومت بالا نسبت به خوردگی تنش‌ی در این آلیاژ می‌شود. این موضوع باعث شده است که آلیاژ آلومینیوم A7075 در بسیاری از کاربردهای بحرانی به عنوان یک جایگزین مناسب برای آلیاژهای آلومینیوم A2024، A2014 و A2017 در ساخت لوله‌ها استفاده شود. هدف اصلی از این مقاله ارائه یک مدل ریاضی مناسب برای رفتار آلیاژ آلومینیوم A7075 می‌باشد. علاوه بر این مواردی از جمله تاثیر مقدار کرنش‌های پلاستیک ایجاد شده بر مدول یانگ و ضریب اثر باشینگر به طریق تجربی مورد بررسی قرار گرفتند.

۲- ماده و روش تست آزمایشگاهی

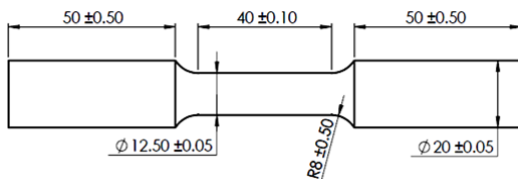
ماده مورد استفاده در این تحقیق^۹ آلیاژ آلومینیوم A7075 می‌باشد که ترکیب شیمیایی آن مطابق با استاندارد ASTM E1251-07:2010 تعیین شده و در جدول ۱ لیست شده است. ترکیب شیمیایی فوق معادل با آلیاژ A7075 در استاندارد AA آمریکا می‌باشد که در دسته Al-Zn-Mg-Cu قرار می‌گیرد. که از ویژگی‌های این آلیاژ، استحکام بسیار بالا، جلوه آنودایز بسیار خوب، قابلیت شکل‌پذیری نسبتاً خوب و مقاومت به خوردگی متوسط است. برای ساخت ورق، مفتول، میله، بیلت، مقاطع مختلف، لوله، اجزاء سازه‌های هواپیما، بدنه سلاح‌های انفرادی و مواردی که استحکام بالا و مقاومت به خوردگی متوسط مورد نیاز است، از آلیاژ آلومینیوم A7075 استفاده می‌شود [۱۴].

امروزه لوله‌های جدار ضخیم به طور گسترده در صنایع شیمیایی، راکتورهای هسته‌ای، تجهیزات نظامی، انتقال سیالات، سیستم سوخت رسانی خودروهای دیزلی و صنایع غذایی کاربرد دارند [۱]. در بیشتر مواقع فشار در لوله‌ها از نوع سیکنی بوده و می‌تواند سبب شروع و انتشار ترک‌های حاصل از خستگی شده که نهایتاً باعث نشی سیال تحت فشار و یا ترکیدن لوله‌ها گردد [۲]. یکی از روش‌های موثر برای بالا بردن ظرفیت فشار در لوله‌های جدار ضخیم، فرآیند اتوفرتاژ می‌باشد. در این روش، پلاستیک کردن جداره لوله ساده تا یک شعاع معین توسط یک فشار داخلی (فشار هیدرولیکی یا ماندل) انجام می‌گیرد. پس از رها کردن فشار داخلی (فشار باربرداری) یک توزیع تنش پسماند در لوله باقی می‌ماند و در نتیجه ظرفیت بارپذیری و مقاومت در مقابل رشد ترک‌های داخلی افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه فرآیند اتوفرتاژ تحت تاثیر یک سیکل بارگذاری- باربرداری می‌باشد، بنابراین رفتار ماده باید به دقت بررسی گردد [۳]. اولین مدل تحلیلی فرآیند اتوفرتاژ در سال ۱۹۵۰ توسط هیل^۱ پیشنهاد شد [۴]. در این مدل حالت کرنش صفحه‌ای با فرض ماده الاستیک- پلاستیک کامل، معیار ون- میسز و شرط تراکم ناپذیری بدون اثر باشینگر در نظر گرفته شد. نسبت بین تنش تسلیم کاهش یافته در بارگذاری معکوس به مقدار تنش تسلیم اولیه حاصل از تغییر شکل پلاستیک در بارگذاری، ضریب اثر باشینگر^۲ نامیده می‌شود. این اثر توسط باشینگر در سال ۱۸۸۱ کشف شد. از آنجایی که فرآیند اتوفرتاژ تحت تاثیر تغییر شکل پلاستیک سیکل بارگذاری- باربرداری قرار می‌گیرد، بنابراین تحلیل فرآیند اتوفرتاژ نیاز به محاسبه ضریب باشینگر دارد [۵]. پری^۳ و همکاران [۶] اثر باشینگر را به قسمت‌های دیگری از رفتار باربرداری نیز تعمیم می‌دهند و آنها را نیز ناشی از این اثر می‌دانند که از آن جمله می‌توان به ضریب یانگ و نسبت پواسون اشاره کرد.

محققانی از جمله پارکر^۴ و همکاران [۷]، فرهی و همکاران [۸]، تریانو^۵ و همکاران [۹]، مجاهد^۶ و عباس [۱۰]

⁵ Troiano⁶ Megahed⁷ Huang⁸ Cui⁹ Current work¹ Hill² Bauschinger³ Perry⁴ Parker

در این تحقیق برای مدل‌سازی رفتار آلیاژ آلومینیوم A7075 از نتایج آزمایشگاهی تست‌های کشش- فشار تک محوره استفاده شد. با توجه به اینکه رفتار باربرداری در این آلیاژها معمولا تابع کرنش پلاستیک ایجاد شده می باشد، بنابراین برای مدل‌سازی رفتار این ماده لازم است آزمایش- های مذکور به ازای کرنش‌های پلاستیک ایجاد شده متفاوت انجام گیرد. برای انجام چنین آزمایش‌هایی باید نمونه‌های تست کشش- فشار تهیه شود. بدین منظور از یک شمش آلومینیوم به قطر ۶۰ mm، قطعاتی به طول ۱۶۵ mm برش داده شد. سپس این قطعات به چهار قسمت مساوی تقسیم شد و در نهایت پس از ماشینکاری توسط ماشین تراش CNC، بیست نمونه گرد با قطر ۱۲/۵ mm تهیه شد تا خواص مکانیکی در نتایج آزمایش و مدل‌سازی بر روی آنها بررسی شود (مطابق شکل ۱). ابعاد این نمونه‌ها بر اساس ابعاد اصلاح شده استاندارد ASTM E8M-97a^۲، توسط فرهی و همکارانش [۸] تعیین شد. استاندارد ASTM E8M-97a، روش تست کشش مواد فلزی را تعیین می‌کند. نکته حائز اهمیت در هنگام ماشینکاری آلیاژ آلومینیوم A7075 این بود که پلیسه‌های آن به راحتی شکسته شده و صافی سطح خوبی ایجاد می‌کرد.



شکل ۱- ابعاد هندسی نمونه‌های mm ۱۲/۵ [۸]

برای انجام آزمایش‌ها از یک دستگاه سروهیدرولیک اینسترون مدل ۸۵۰۲ با ظرفیت سی تن استفاده شد. روش آزمایش مشابه روش‌های ارائه شده در مراجع [۶ و ۹]، در حالت کنترل سیکلیک بار^۳ انجام و نتایج به شکل نیرو- جابجایی ذخیره شد. تعداد نمونه برداری در هر ثانیه برابر ۲ بود. جابجایی طول نمونه‌ها توسط اکستنسومتری^۴ با طول

شرکت آلومینیوم کایسر^۱ در ایالت متحده آمریکا و تعدادی از شرکتها در کشور چین و کشورهای دیگر، لوله های بدون درز با انواع آلیاژهای آلومینیومی از جمله آلیاژ آلومینیوم A7075 تولید می کنند. این لوله ها با انواع روشهای عملیات حرارتی از ضخامت ۰/۵ تا ۴۰ میلیمتر و قطر خارجی ۶ تا ۴۵۰ میلیمتر مطابق با استاندارد ASTM-B210M-05 تولید می شوند که برای تجهیزات نیروگاهی، هوافضا، وسایل نقلیه، صنایع مکانیک، کشاورزی و غیره مورد استفاده قرار می گیرند. خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم A7075 در این تحقیق و A7075 استاندارد در جدول ۲ لیست شده است.

جدول ۱- ترکیب‌های شیمیایی A7075 تحقیق حاضر

عنصر	A7075 (تحقیق حاضر)	A7075 (استاندارد)
Al	پایه	پایه
Si	۰/۳۶	۰/۴۰ ≤
Fe	۰/۳۷	۰/۵۰ ≤
Cu	۱/۳	۲/۰ - ۱/۲
Mn	۰/۲۲	۰/۳۰ ≤
Mg	۲/۱۱	۲/۱۹ - ۲/۱
Cr	۰/۱۹	۰/۱۸ - ۰/۲۸
Ni	۰/۰۱۳	-
Zn	۵/۲۱	۵/۱ - ۶/۱
Ti	۰/۰۳۱	۰/۲۰ ≤
Pb	۰/۰۲۸	-
V	۰/۰۰۷	-
Zr	۰/۰۰۳	-

جدول ۲- خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم A7075 تحقیق حاضر و A7075 استاندارد

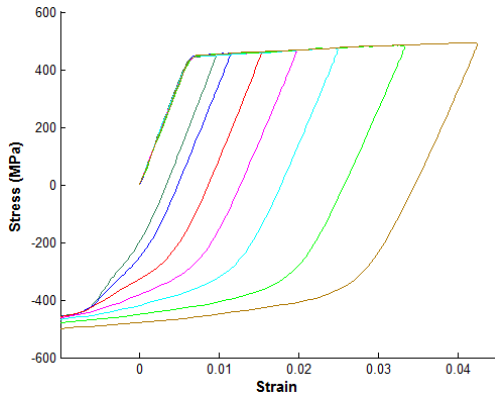
A7075 (استاندارد)	A7075 (تحقیق حاضر)	
≥۳۸۵	۴۵۰/۷۱	تنش تسلیم ۰/۲ (MPa)
≥۴۵۵	۵۰۰	استحکام کششی (MPa)
≥۱۲	۱۲/۹	درصد ازدیاد طول
-	۲۶/۷۳	درصد کاهش سطح
۷۱	۷۰/۱۹	مدول یانگ (GPa)

^۲ASTM E8M-97a- Standard test methods for tension testing of metallic materials[metric]

^۳Load cycling control

^۴Extensometer

^۱KAISER



شکل ۳- منحنی‌های تنش- کرنش مهندسی آلیاژ آلومینیوم A7075

۳- مدل سازی فاز بارگذاری^۱

بارگذاری خطی (O-A): ماده از نقطه O تا نقطه تسلیم A، رفتاری الاستیک دارد و از قانون هوک به صورت زیر تبعیت می‌کند (شکل ۲).

$$\sigma^L = E^L \varepsilon^L \quad (1)$$

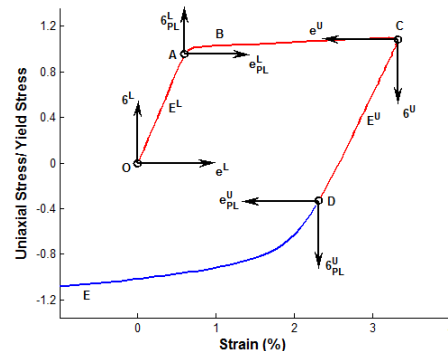
E^L و σ^L به ترتیب تنش عمودی، کرنش عمودی و ضریب یانگ بارگذاری می‌باشند.

بررسی مدول یانگ در بارگذاری: در سال‌های اخیر بسیاری از محققان نشان داده‌اند که منحنی تنش- کرنش تک محوره در باربرداری غیر خطی است و در نتیجه مدول یانگ یک مقدار ثابت نیست. پری و همکارانش [۶] روش‌های مختلف تعیین مدول یانگ را مورد بررسی قرار داده و روش مدول یانگ میانگین را برای مدل سازی رفتار عملی ماده معرفی کردند. روش معرفی شده توسط آنها استفاده از میانگین شیب منحنی تنش- کرنش بارگذاری یا باربرداری می‌باشد. آنها در این روش به دلیل اینکه دو انتهای منحنی تنش- کرنش بارگذاری یا باربرداری حالت نسبتاً غیر خطی بالایی دارد، ۵٪ ابتدا و انتهای منحنی را حذف کرده و مدول یانگ میانگین را در امتداد بقیه منحنی محاسبه کردند. در تحقیق حاضر، در بارگذاری و باربرداری از روش مدول یانگ میانگین استفاده شده است که مقدار آن در بارگذاری ۷۰/۱۹ GPa می‌باشد.

سنجه ۲۷/۵ mm انجام پذیرفت. برای انجام آزمایش، سرعت حرکت گیره‌های دستگاه نسبت به هم برابر ۰/۳۰ میلیمتر در دقیقه تنظیم شد. این آزمایش‌ها تا کرنش کلی ۰/۴۳ انجام شد.

شکل ۲ بخش‌های مهم فاز بارگذاری- فاز باربرداری در تست کشش- فشار تک محوره در آلیاژ آلومینیوم A7075 با مقدار کرنش پلاستیک ایجاد شده ۳/۳۲۷ درصد را نشان می‌دهد که برای مدل‌سازی رفتار آلیاژ آلومینیوم A7075 در تحلیل فرآیند اتوفرتاژ مورد استفاده قرار می‌گیرد. فاز بارگذاری (کشش)، شامل رفتار الاستیک خطی، O-A، و کرنش‌سختی، A-B-C، است. و فاز باربرداری (فشاری)، شامل رفتار الاستیک خطی، C-D، و سخت‌شوندگی غیر خطی، D-E، می‌باشد.

در فرآیند اتوفرتاژ، در فاز بارگذاری، تنش‌های معادل لوله در مسیر O-A-B-C و در فاز باربرداری، تنش‌های معادل لوله در مسیر C-D-E قرار می‌گیرند. بنابراین یک سری سیکل- های O-A-B-C-D-E که هر کدام تابع کرنش پلاستیک ایجاد شده و موقعیت شعاعی هستند، تنش‌های معادل مورد نیاز برای تحلیل فرآیند اتوفرتاژ را تعریف می‌کنند [۷].



شکل ۲- منحنی تنش نرمالیزه شده- کرنش برای توصیف رفتار ماده در بارگذاری و باربرداری

شکل ۳ نتایج تعدادی از تست‌های تک سیکلی را در یک نمودار نمایش می‌دهد که هر آزمایش به طور مستقل بر روی یک نمونه انجام شده است.

^۱ Loading phase

محدوده A-C رفتاری غیر خطی دارد ولی در محدوده B-C دارای رفتاری خطی با شیب بسیار کم می‌باشد. پارکر و همکاران [۷]، برای توصیف رفتار پلاستیک در دستگاه مختصات $\varepsilon^L A \sigma^L$ رابطه ای را به صورت زیر ارائه داده اند (شکل ۲).

$$\sigma_{PL}^L / \sigma_Y = B_1 \text{Tanh}(B_2 e_{PL}^L) + B_3 e_{PL}^L \quad (2)$$

توجه شود که e_{PL}^L درصد کرنش پلاستیک است. بخش اول رابطه، فاز غیر خطی A-B و بخش دوم رابطه کرنش سختی B-C می باشد. که B_1 ، B_2 و B_3 ضرایب معادله (۲) هستند و بستگی به رفتار ماده دارند.

جدول ۳- استحکام تسلیم آلیاژ آلومینیوم A7075 بر حسب (MPa) به ازای مقادیر مختلف افست بر حسب درصد

مقدار افست (درصد)				
	٪۰/۱	٪۰/۰۵	٪۰/۰۳	٪۰/۰۱
تنش تسلیم	۴۴۸/۴۴	۴۴۴/۴۶	۴۳۸/۹۱	۴۲۴/۹۴
	۴۵۰/۷۱			

رابطه (۳)، برای رفتار آلیاژ آلومینیوم A7075 با برازش بر اطلاعات آزمایشگاهی به صورت زیر بدست آمده است.

$$\sigma_{PL}^L / \sigma_Y = 0.128 \text{Tanh}(8.402 e_{PL}^L) + 0.032 e_{PL}^L \quad (3)$$

۴- مدل سازی فاز باربرداری^۴

رفتار الاستیک خطی (C-D): ماده از نقطه C تا نقطه تسلیم D رفتاری الاستیک دارد و از قانون هوک تبعیت می‌نماید که در دستگاه مختصات جدید ($\varepsilon^U C \sigma^U$) به صورت زیر می‌باشد.

$$\sigma^U = E^U \varepsilon^U \quad (4)$$

ε^U و E^U به ترتیب تنش عمودی، کرنش عمودی و ضریب یانگ باربرداری می‌باشند. E^U تابعی از e_{PL}^L است که با کاهش e_{PL}^L ، افزایش می‌یابد و e_{PL}^L حداکثر کرنش پلاستیک ایجاد شده می‌باشد. این کرنش پلاستیک در حقیقت حداکثر کرنش پلاستیکی است که قبل از باربرداری نمونه در آن ایجاد می‌شود. در کلیه فرمول‌های ارائه شده در این تحقیق بر حسب درصد می‌باشد.

بررسی استحکام تسلیم: برای بررسی مسایل پلاستیسیته، تعریف نقطه تسلیم بسیار مهم است که این نقطه عموماً به صورت مقدار افست کرنش پلاستیک تعریف می‌شود. افست، میزان کرنش پلاستیک قابل قبولی است که پس از باربرداری بدست می‌آید. عموماً در کاربردهای مهندسی، مقادیر افست کرنش پلاستیک ۰/۱٪ یا ۰/۲٪ استفاده می‌شود [۶]. پری و همکارانش [۶]، روش‌های مختلف تعیین نقطه تسلیم با افستهای مختلف را مورد بررسی قرار دادند و روش جدیدی به نام مقدار/افست دقیق صفر^۱ تعریف کردند. در این روش، نقطه تسلیم با استفاده از نقطه تغییر ناگهانی^۲ در منحنی ضریب مماسی^۳ بدست می‌آید.

با توجه به اینکه ضریب مماسی منحنی بعضی از مواد به صورت ناگهانی تغییر نمی‌کند بنابراین به روش مذکور نمی‌توان نقطه تسلیم را در بعضی از مواد پیدا کرد. از طرف دیگر تعداد نقاط نمونه برداری شده آزمایشگاهی در حوالی نقطه تسلیم، تاثیر زیادی در تعیین نقطه تغییر ناگهانی دارد. فرهی و همکارانش [۸] پیشنهاد کردند که برای تعیین استحکام تسلیم از افست کوچک ۰/۰۱ درصد استفاده شود مگر آنکه ماده دارای نقطه تسلیم تیز باشد، که در این صورت باید از افست صفر استفاده کرد.

جدول ۳ مقادیر استحکام تسلیم، σ_Y ، آلیاژ آلومینیوم A7075 را به ازای افست‌های مختلف نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که مقدار افست، در تعیین استحکام تسلیم در آلیاژ آلومینیوم A7075 اهمیت دارد. به ازای افست‌های مختلف، مقادیر عددی استحکام تسلیم متفاوتی بدست می‌آید. دلیل این تفاوت در رفتار غیر خطی قسمت انتقالی، A-B، در آلیاژ آلومینیوم A7075 می‌باشد. بر این اساس اندازه استحکام تسلیم میانگین آلیاژ آلومینیوم A7075 به ازای مقدار افست ۰/۰۱٪ برابر ۴۲۴/۹۴ MPa می‌باشد (جدول ۳).

بارگذاری غیرخطی (A-B-C): در این بخش، رفتار ماده پلاستیک است و دارای رفتار سخت‌شوندگی غیرخطی می‌باشد. آلیاژ آلومینیوم A7075 مانند بسیاری از مواد در

¹ Exact zero offset value

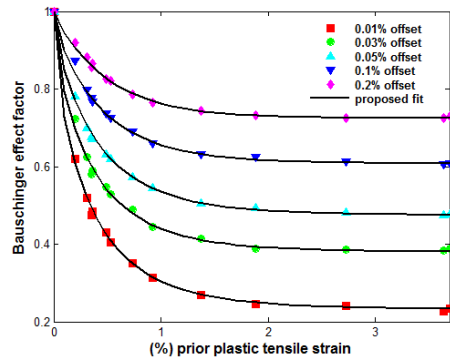
² Knee-point

³ Tangent Modulus

⁴ Unloading phase

دارد. از طرف دیگر مقدار افست تاثیر زیادی در تعیین استحکام تسلیم کششی و فشاری و در نتیجه در تعیین ضریب باشینگر دارد.

روش‌های مختلف تعیین ضریب اثر باشینگر توسط پری و همکارانش [۶ و ۱۶] مورد بررسی قرار گرفت. آنها نسبت استحکام تسلیم فشاری به استحکام تسلیم کششی اولیه با مقدار افست صفر را برای توصیف ضریب باشینگر تعریف کردند. با توجه به اینکه رسیدن به افست صفر عملاً بسیار سخت و یا غیرممکن است بنابراین با تبعیت از روش پارکر و همکاران [۷] و بررسی‌های صورت گرفته در مرجع [۸]، مقدار افست بسیار کوچک ۰.۰۱٪ برای توصیف ضریب اثر باشینگر در آلیاژ آلومینیوم A7075 در این تحقیق بکار گرفته شد.



شکل ۵- ضریب اثر باشینگر آلیاژ آلومینیوم A7075 بر حسب کرنش پلاستیک ایجاد شده- مقایسه بین مقادیر افست های مختلف - انطباقات پیشنهادی

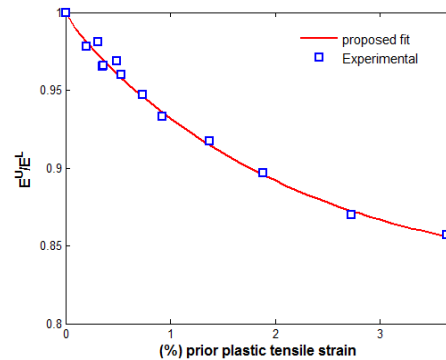
شکل ۵ ضریب اثر باشینگر آلیاژ آلومینیوم A7075 را که تابعی از کرنش پلاستیک ایجاد شده است، در درصدهای مختلف افست نشان می‌دهد. همانطوری که در شکل مشاهده می‌شود، با کاهش مقدار افست و افزایش مقدار کرنش پلاستیک ایجاد شده، ضریب اثر باشینگر کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش e_{PL}^* ، BEF به ازای مقادیر افست های مختلف، به سوی مقادیر حدی خاص میل می‌کند. در حالت کلی می‌توان گفت که پیش بینی نسبتا دقیق تسلیم معکوس در اتوفرتاژ، تنها با مقادیر بسیار کم افست امکان پذیر است. معادله (۶) انطباق پیشنهادی^۲ برای توصیف ضریب اثر

² Proposed fit

معادله پیشنهادی (۵) رفتار آلیاژ آلومینیوم A7075 را در این محدوده نشان می‌دهد که با برازش بر نتایج آزمایشگاهی بدست آمده است. در این معادله E^U نرمالایز شده است.

$$E^U/E^L = 1.0 - 0.1728 \operatorname{Tanh}(0.4172 (e_{PL}^*)^{0.8166}) \quad (5)$$

شکل ۴ نتایج آزمایشگاهی رفتار آلیاژ آلومینیوم A7075 و همچنین انطباق پیشنهادی برای E^U/E^L را بر حسب کرنش پلاستیک ایجاد شده نشان می‌دهد. همچنان که از شکل مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار کرنش پلاستیک ایجاد شده، نسبت E^U/E^L کاهش می‌یابد. فرهی و همکارانش [۱۵] بررسی کردند که میزان مدول الاستیسیته در آلیاژ آلومینیوم A5083 در حالت کشش و در حالت باربرداری با یکدیگر برابر هستند. در صورتیکه در بسیاری از فولادها نظیر A723، PH 13 و HY 180 و DIN1.6959 میزان کاهش مدول الاستیسیته در هنگام باربرداری بیشتر از حالت کشش است [۸ و ۹].



شکل ۴- نتایج آزمایشگاهی و انطباق پیشنهادی برای ضریب یانگ باربرداری در آلیاژ آلومینیوم A7075

بررسی ضریب اثر باشینگر: نسبت استحکام تسلیم فشاری به استحکام تسلیم کششی اولیه را ضریب باشینگر، BEF^۱، می‌گویند. این اثر زمانی اتفاق می‌افتد که جسم در کشش اولیه، وارد محدوده پلاستیک شده باشد. ضریب باشینگر بیشترین تاثیر را بر مدل‌سازی رفتار مواد پر استحکام دارد و این اثر باعث کاهش اثر مفید اتوفرتاژ خواهد شد. بنابراین تحلیل فرآیند اتوفرتاژ نیاز به محاسبه ضریب باشینگر

¹ Bauschinger effect factor

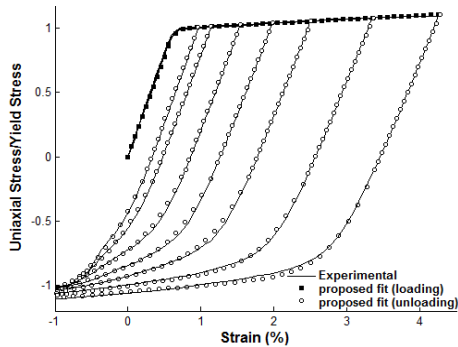
تابعی از e_{PL}^L هستند که در رابطه فوق BEF همان ضریب باشینگر است. معادله (۷) توسط پارکر و همکاران [۷] به طور گسترده‌ای برای مدل‌سازی A723 و چندین فولاد دیگر بکار رفته است. رابطه (۸) با برازش از داده‌های تجربی برای مدل‌سازی رفتار آلیاژ آلومینیوم A7075 در بخش، D-E، پیشنهاد می‌شود. در حالت کلی می‌توان گفت که رابطه (۸) یک انطباق مناسب برای مدل‌سازی آلیاژ آلومینیوم A7075 است و توانایی مدل‌سازی مولفه‌های مختلف رفتار آلیاژ آلومینیوم A7075 را در بارگذاری و باربرداری دارد و به صورت زیر ارائه می‌شود.

$$\sigma_{PL}^L / \sigma_Y = (1 + B_1 - BEF) \operatorname{Tanh}(\gamma_1 e_{PL}^U) + \gamma_2 B_3 e_{PL}^U \quad (8)$$

$$\gamma_1 = 1.41 (e_{PL}^L)^{-0.13}$$

$$\gamma_2 = 44.464 - 42.264 \operatorname{Tanh}(0.903 e_{PL}^L)$$

در معادله (۸)، ضرایب γ_1 و γ_2 کرنش سختی غیرخطی پیشنهاد شده برای آلیاژ آلومینیوم A7075 هستند که تابعی از حداکثر کرنش پلاستیک ایجاد شده e_{PL}^L می‌باشند. شکل ۶ مدل ریاضی کامل آلیاژ آلومینیوم A7075 و نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. آن گونه که از شکل پیداست، تطابق نسبتاً خوبی بین مدل ریاضی پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد.



شکل ۶- مدل ریاضی کامل آلیاژ آلومینیوم A7075 - مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و انطباقات پیشنهادی

۵- نتیجه گیری

تست‌های کشش- فشار تک محوره بر روی تعدادی نمونه با قطر ۱۲/۵ mm برای مدل‌سازی رفتار آلیاژ آلومینیوم A7075 با یک دستگاه سروهیدرولیک اینسترون انجام شد و نتایج زیر بدست آمد:

باشینگر در آلیاژ آلومینیوم A7075 می‌باشد که با برازش بر داده‌های تجربی و به ازای مقدار افسست‌های ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ بدست آمده است.

$$BEF = 1 + a \operatorname{Tanh}(b(e_{PL}^L)^c) \quad (6)$$

که پارامترهای a، b و c در جدول ۴ لیست شده‌اند.

جدول ۴- پارامترهای معادله (۵)

مقدار افسست (درصد)	a	b	c
۰/۰۱	-۰/۷۶۹	۱/۴۹۳	۰/۶۰۵
۰/۰۳	-۰/۶۲۱	۱/۴۸۱	۰/۶۳۲
۰/۰۵	-۰/۵۲۶	۱/۳۹۴	۰/۶۷۳
۰/۰۱	-۰/۳۹۳	۱/۳۵۴	۰/۷۱۲
۰/۰۲	-۰/۲۷۶	۱/۲۹۱	۰/۷۹۸

باربرداری غیرخطی (D-E): مدل‌سازی ناحیه رفتار سخت شونده‌گی غیرخطی^۱، D-E، مواد پراستحکام بسیار سخت و دشوار می‌باشد. پارکر و همکاران [۷ و ۹] مدل مجانب دار ارائه شده توسط چاوش^۲ را برای توصیف رفتار فولادها در این ناحیه مرور کرده‌اند. آنها مدل بهبود یافته‌ای را پیشنهاد دادند که اثر باشینگر را دخالت می‌دهد و دارای دو مشخصه مهم است. اول آنکه، توانایی آن را دارد که بر کلیه سری منحنی‌های این بخش، که تابعی از کرنش پلاستیک ایجاد شده هستند، انطباق لازم را ایجاد نمایند. و دوم آنکه، برای مقادیر بزرگ کرنش فشاری، به شکلی مجانب گونه به سمت یک باند حرکت می‌نمایند (به شکل ۳ مراجعه شود). همچنین فرهی و همکاران [۸]، یک مدل ریاضی را برای توصیف رفتار فولاد DIN1.6959 در این ناحیه ارائه دادند. با توجه به دو مشخصه مهم مدل پارکر و همکاران [۷]، باربرداری غیر خطی پیچیده مذکور می‌تواند توسط رابطه (۷) مدل‌سازی شود.

$$\sigma_{PL}^L / \sigma_Y = (1 + B_1 - BEF) \operatorname{Tanh}(\gamma e_{PL}^U) + BEF + B_3 e_{PL}^U \quad (7)$$

در این رابطه، e_{PL}^U و σ_{PL}^U به ترتیب تنش و کرنش عمودی در دستگاه مختصات $(e_{PL}^U, \sigma_{PL}^U)$ هستند. همچنین B_1 و B_3 ضرایب موجود در معادله (۷) می‌باشند و γ هر دو

¹ Nonlinear hardening behavior

² Chaboche

- ۱- با توجه به اینکه میزان افست در تعیین استحکام های تسلیم در فازهای بارگذاری و باربرداری تاثیر دارد و رسیدن به مقدار افست صفر دشوار است، پیشنهاد می شود که برای تعیین استحکام های تسلیم در هر دو فاز برای آلیاژ آلومینیوم A7075، از افست کوچک ۰/۰۱ درصد استفاده گردد.
- ۲- نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش مقدار کرنش پلاستیک ایجاد شده، نسبت E^U/E^L در آلیاژ آلومینیوم A7075 کاهش می‌یابد.
- ۳- معادله (۵) همراه ضرایب تعیین شده از برازش داده‌های تجربی انطباق مناسبی برای توصیف ضریب باشینگر در آلیاژ آلومینیوم A7075 می‌باشد که پنج افست ۰/۰۱٪، ۰/۰۳٪، ۰/۰۵٪، ۰/۰۸٪ و ۰/۰۲٪ را پوشش می‌دهد.
- ۴- نتایج تجربی نشان می‌دهد که با افزایش مقدار کرنش پلاستیک ایجاد شده، ضریب اثر باشینگر در آلیاژ آلومینیوم A7075 کاهش می‌یابد.
- ۵- با توجه به خصوصیات ذکر شده آلیاژ آلومینیوم A7075 از جمله استحکام بالا و مقاومت بالا نسبت به خوردگی تنشی و ویژگیهایی مانند صافی سطح نسبتا خوب در ماشینکاری و برابری قیمت آن با سری آلیاژهای آلومینیوم دیگر، پیشنهاد می‌شود که این آلیاژ جایگزین آلیاژهای آلومینیوم A2014، A2017 و A5083 و فولادهایی شود که در ساخت لوله‌ها در محیط خورنده و کاربردهای بحرانی مورد استفاده قرار می‌گیرند.
- ### قدردانی
- نویسندگان این مقاله مایلند که از جناب آقای مهندس زهره وند تکنسین آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشگاه صنعتی امیرکبیر که تلاش زیادی در انجام آزمایش به عمل آوردند، قدردانی نمایند. همچنین از جناب آقای مهرآوران دانشجوی مهندسی ساخت و تولید آموزشکده فنی شهید محمد منتظری مشهد که تلاش زیادی در تهیه نمونه های آزمایشگاهی با دقت بالا به عمل آورده اند، تشکر می‌شود.
- ### مراجع
- [1] Perl M, Ostraich B (2005) The effect of autofrettage on uniform arrays of three-dimensional unequal-depth cracks in a thick-walled cylindrical vessel. ASME Journal of Pressure Vessel Technol 127: 423-429.
- [2] Herz E, Thumser R, Bergmann JW, Vormwald M (2006) Endurance limit of autofrettaged Diesel-engine injection tubes with defects. Engineering Fracture Mechanics 73: 3-21.
- [3] Perl M, Levy C, Rallabhandy V (2006) The influence of the Bauschinger effect on 3D stress intensity factors for internal radial cracks in a fully or partially autofrettaged gun barrel. ASME Journal of Pressure Vessel Technol 128: 233-239.
- [4] Hill R (1950) The mathematical theory of plasticity. Clarendon Press, Oxford.
- [5] Bauschinger J (1881) Ueber die veränderung der elasticitätsgrenze und dea elasticitätamoduls verschiedener metalle. Zivilingenieur 27: 289-348.
- [6] Perry J, Perl M, Shneck R, Haroush S (2006) The influence of the Bauschinger effect on the yield stress, Young's modulus, and Poisson's ratio of a gun barrel steel. ASME J Pressure Vessel Technol 128: 179-184.
- [7] Parker A P, Troiano E, Underwood JH, Mossey C (2001) Characterization of steels using a revised kinematic hardening model incorporating the Bauschinger effect. ASME J. Pressure Vessel Technol 125: 277-281.
- [8] Farrahi GH, Hosseini E, Assempour A (2009) On the material modeling of the autofrettaged pressure vessel steels. ASME Journal of Pressure Vessel Technol 131: 1-6.
- [9] Troiano E, Parker AP, Underwood JH, Mossey C (2003) Experimental data, numerical fit and fatigue life calculations relating to Bauschinger effect in high strength armament steels. ASME Journal of Pressure Vessel Technol 125: 330-334.
- [10] Megahed MM, Abbas AT (1991) Influence of reverse yielding on residual stresses induced by autofrettage. Int J Mech Sci 33: 139-150.
- [11] Huang X (2005) Effect of Bauschinger effect and yield criterion on residual stress distribution of autofrettaged tube. ASME J Pressure Vessel Technol 128: 212-216.
- [12] Jahed H, Ghanbari G (2003) Actual unloading behaviour and its significance on residual stress in machined autofrettaged tube. ASME J Pressure Vessel Technol 125: 321-235.
- [13] Jahed H, Ahmadi B, Shambouli M (2006) Re-autofrettage. ASME J Pressure Vessel Technol 128: 223-226.
- [14] Polmear IJ (1995) Light alloys & metallurgy of the light metals. Third Edition, Melbourne.
- [15] Mohammadi M, Farrahi GH, Hoseini SH (2007) Bauschinger effect investigation of an aluminum alloy, and its application in autofrettaged and compound tubes. ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference.
- [16] Perry J, Aboudi J (2003) Elasto-plastic stresses in thick walled cylinders. ASME J Pressure Vessel Technol 125: 248-252.