



بررسی تجربی فرایند انبساطدهی لوله آلومینیومی با استفاده از واسط کشسان تحت بارگذاری‌های مختلف

بهنام عباسزاده¹، حسن مسلمی نائینی^{2*}، جواد شهبازی کرامی³، سید جلال هاشمی⁴، مهرداد نصرالله زاده⁵

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس دبیر شهید رجایی، تهران

4- استادیار، مهندسی مکانیک، مؤسسه آموزش عالی کار، قزوین

5- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 14115-333، moslemi@modares.ac.ir

چکیده

کلیدواژگان

در حال حاضر یکی از مسائل بسیار مهم در صنایع هوافضا و خودروسازی، کاهش وزن سازه‌ها و همچنین مقابله با پدیده خوردگی می‌باشد. استفاده از آلیاژهای آلومینیوم می‌تواند به سبک‌تر کردن قطعات و در نتیجه کاهش مصرف سوخت کمک کند. در این پژوهش، طراحی فرایند و ساخت نمونه با استفاده از فرایند انبساطدهی لوله با استفاده از یک واسط کشسان انجام گرفت. آلیاژ آلومینیوم بکار رفته برای تولید لوله از آلیاژ آلومینیوم AA1050A بوده و از میله پلی‌اورتان با سختی Shore A 85 به عنوان لاستیک استفاده شد. با انجام آزمون‌های تعیین خواص مکانیکی رفتار ماده آلومینیوم و همچنین پلی‌اورتان بدست آمد. آزمون‌های تجربی برای تولید نمونه بر روی دستگاه هیدروفرمینگ انجام شد. در آزمون‌های تجربی برای اعمال فشار داخلی و تغذیه محوری، تنها از حرکت سنبه‌های دستگاه استفاده شد. تغییر منحنی بارگذاری در این فرایند، با تغییر طول لوله و ثابت نگه داشتن طول میله پلی‌اورتان انجام شد. با تغییر طول لوله‌های اولیه و در نتیجه تغییر زمان شروع اعمال تغذیه محوری، تولید نمونه‌های سالم و بدون ترکیدگی امکان‌پذیر گردید. ملاحظه گردید با ایجاد چروکیدگی مفید در مرحله اول شکل‌دهی، می‌توان به محصولی با نسبت بالج بالاتر و حداکثر نازک‌شدگی پایین‌تر دست یافت. نمونه‌های نهایی تولید شده با استفاده از منحنی بارگذاری بهبود یافته، دارای حداکثر نسبت بالج 24/83 درصد و حداکثر نازک‌شدگی 6/5 درصد بودند.

انبساطدهی لوله آلومینیومی
شکل‌دهی با واسط کشسان
منحنی بارگذاری

Experimental investigation of aluminum tube bulging using a rubber-pad on different loading curves

Behnam Abbaszadeh¹, Hassan Moslemi Naeini^{1*}, Javad Shahbazi Karami², Seyed Jalal Hashemi³, Mehrdad Nasrollahzade¹

1- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

3- Faculty of Mechanical Engineering, Kar Higher Education Institute, Qazvin, Iran

* P.O.B. 14115-333, Tehran, moslemi@modares.ac.ir

Keywords

Aluminum tube bulging
Rubber-pad forming
Loading curve

Abstract

Nowadays, one of the very important issues in the aerospace and automotive industries is reduction of weight of structures and preventing the corrosion. The use of aluminum alloys could help a lot to produce lighter components, resulting in reduced fuel consumption. In this project, the process design and producing of a sample part using rubber-pad bulging process was done. Aluminum alloy used for the production of aluminum pipes was AA1050A alloy and polyurethane rod with Shore A 85 hardness was used as rubber. Mechanical properties of aluminum and polyurethane were obtained from mechanical tests. Experimental tests were conducted to produce sample part on the hydroforming machine. In the experimental tests, only the punches of the machine were used to apply both internal pressure and axial feeding. Applying different loading curves was possible with changing the initial tube length and using a urethane rod with a constant initial length. By varying the length of initial tubes and thus change in the onset of applying axial feeding, production of sample parts without fracture was possible. It was shown that with a beneficial wrinkling in first forming step, it is possible to produce a sample with higher bulging ratio and lower maximum thinning. Samples produced using the modified loading curve, had the maximum bulging ratio of 24.83 percent and maximum thinning of 6.5 percent.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

B Abbaszadeh, H Moslemi Naeini, J Shahbazi Karami, S J Hashemi, M Nasrollahzade, Experimental investigation of aluminum tube bulging using a rubber-pad on different loading curves, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 62-69, 2016 (in Persian)

1- مقدمه

بین لوله و میله پلی‌اورتان حاصل می‌شود، به دلیل تغذیه محوری ماده لوله به ناحیه تغییر شکل، منجر به نازک‌شدگی کمتر در دیواره لوله می‌شود.

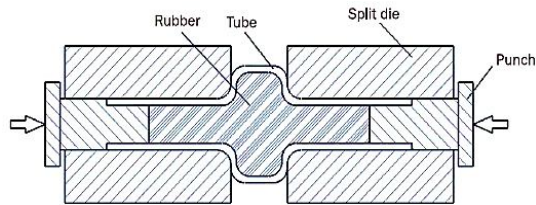


Fig. 1 Schematic of rubber-pad bulging process of a tube [1]

شکل 1 شماتیکی از فرایند انبساط‌دهی لوله با استفاده از واسط کشسان [1]

این افزایش تغذیه ماده می‌تواند از طریق افزایش طول میله پلی‌اورتان و یا افزایش اصطکاک بین لوله و میله پلی‌اورتان انجام شود. افزایش بیش از حد اصطکاک بین دیواره لوله و میله پلی‌اورتان منجر به ایجاد چروک‌هایی در لوله می‌گردد که ممکن است در ادامه فرایند قادر به اصلاح آن‌ها نباشد. بنابراین اصطکاک بین لوله و میله پلی‌اورتان باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا تغذیه محوری ماده به ناحیه‌ی تغییر شکل انجام گردد و محصول سالم تولید شود، اما نباید بقدری بزرگ باشد که منجر به چین‌خوردگی‌های دائمی در لوله شود.

جیرارد و همکاران [4] به بررسی عددی فرایند انبساط‌دهی لوله مسی با استفاده از میله پلی‌اورتان پرداختند. بدین ترتیب می‌توان اطلاعات کامل‌تری از فرایند، بخصوص در زمینه‌ی توزیع تنش و کرنش در محصول شکل داده شده، بدست آورد. در این مطالعه نتایج بدست آمده برای ارتفاع بالچ و توزیع ضخامت از شبیه‌سازی‌های اجزای محدود، با نتایج آزمون‌های تجربی مقایسه شد و صحت‌سنجی نتایج صورت پذیرفت. در مدل‌سازی این فرایند در نرم‌افزار شبیه‌سازی اجزای محدود، مدل مونی ریویلین برای توصیف رفتار ماده پلی‌اورتان بکار گرفته شد. رضانی و همکاران [5] با انجام کار تحلیلی به ارائه یک مدل اصطکاک استاتیک برای سطوح تماس لاستیک و فلز پرداختند. این مدل اصطکاک، برخلاف مدل کولمب، ثابت نیست و تابعی از شرایط تماس موضعی می‌باشد. ایشان مشاهده کردند خطای شبیه‌سازی عددی انجام شده با استفاده از مدل اصطکاک استاتیک جدید در توزیع ضخامت، در حدود نصف خطای ایجاد شده با استفاده از مدل کولمب بود.

غفوریان نصرتی و گردویی [6] به مطالعه تجربی و عددی اثر اصطکاک در فرایند انبساط‌دهی آزاد لوله فولادی زنگ نزن 304 با استفاده از بالشتک کشسان پرداختند. در این پژوهش تحلیل

فرایند شکل‌دهی با واسط کشسان یک فرایند شکل‌دهی با ابزار انعطاف‌پذیر است که از دهه چهل میلادی به شکل صنعتی در زمینه شکل‌دهی فلزات بکار گرفته می‌شود. از این فرایند برای تولید قطعات لوله‌ای شکل نیز استفاده می‌شود. در این فرایند، با اعمال فشار بر لاستیک کشسان، فشار جانبی بر لوله اعمال شده و آن را به شکل قالب پیرامونی در می‌آورد. در حال حاضر برای تولید قطعات لوله‌ای شکل از آلیاژهای آلومینیوم، به طور گسترده از فرایند هیدروفرمینگ استفاده می‌شود. مشکلات موجود در فرایند هیدروفرمینگ، از جمله مشکلات مربوط به آب‌بندی و نشت سیال با فشار بالا و همچنین هزینه بالای تجهیزات هیدرولیکی [1]، فرایند شکل‌دهی با واسط کشسان را به عنوان رقیبی برای این فرایند مطرح می‌کند.

در فرایند شکل‌دهی با استفاده از واسط کشسان، از لاستیک بجای سیال استفاده می‌گردد که این امر سبب حذف مشکلات مربوط به آب‌بندی می‌شود. همچنین در این فرایند، اصطکاک موجود بین دیواره‌ی داخلی لوله و سطح میله پلی‌اورتان باعث کشیده شدن لوله به محل تغییر شکل می‌شود و شروع نازک‌شدگی را به تاخیر می‌اندازد. از مزیت‌های دیگر این فرایند می‌توان به عدم نیاز به ماشین‌آلات پیچیده و همچنین عدم نیاز به ورود و تخلیه روغن از قطعه اشاره کرد. فرایند شکل‌دهی با استفاده از واسط کشسان در حال حاضر برای تولید قطعاتی مانند اتصالات T شکل و X شکل و همچنین انبساط‌دهی لوله استفاده می‌شود. شکل 1 شماتیکی از فرایند انبساط‌دهی آزاد لوله با استفاده از واسط کشسان را نشان می‌دهد.

در سال‌های گذشته پژوهش‌هایی در زمینه شکل‌دهی قطعات لوله‌ای شکل با استفاده از فرایند شکل‌دهی با واسط کشسان انجام گرفته است. القرشی [2] فرایند انبساط‌دهی لوله با استفاده از واسط کشسان را برای لوله‌هایی از جنس برنج، مس و فولاد انجام داد و توزیع کرنش در نمونه‌های تولید شده را بررسی کرد. وی مشاهده کرد نیروی بالای اصطکاک که بین پلی‌اورتان و لوله شکل می‌گیرد، سبب کشیده شدن ماده بیشتری به درون قالب شده و باعث کاسته شدن از طول لوله و ایجاد کرنش محیطی بزرگتر می‌شود. تیرووارودشلوان و تراویس [3] به انبساط‌دهی لوله‌های مسی با اعمال فشار داخلی در یک قالب بسته و با استفاده از میله‌های پلی‌اورتان با سفتی‌های مختلف و شرایط روانکاری مختلف پرداختند. اندازه‌گیری کرنش در لوله‌های انبساط‌دهی شده نشان داد تنش فشاری محوری بالا در لوله، که با ایجاد مقدار بیشتری از اصطکاک در سطح مشترک

2-2- تجهیزات استفاده شده برای فرایند انبساط‌دهی

برای انجام فرایند انبساط‌دهی لوله آلومینیومی با استفاده از واسط کشسان، از دستگاه انبساط‌دهی هیدروولیکی استفاده شد. این دستگاه که قابلیت استفاده برای انجام فرایند هیدروفرمینگ را دارا می‌باشد، در شکل 2 نشان داده شده است.

این مجموعه شامل قالب‌های دو طرف برای نگهداری لوله از پایین و بالا است که با استفاده از چهار عدد پیچ بر روی هم بسته می‌شوند تا بتوانند فشار ناشی از شکل‌دهی را تحمل کرده و از هم باز نشوند. جک‌های اعمال جابجایی که در دستگاه هیدروفرمینگ برای اعمال تغذیه محوری مورد استفاده قرار می‌گیرند، دیگر جزء اصلی این دستگاه هستند. در ابتدای فرآیند، میله پلی‌اورتان درون لوله آلومینیومی قرار داده می‌شود و سپس لوله درون قالب‌ها قرار می‌گیرد. قالب‌ها روی هم بسته شده و از دو انتها توسط سنبه‌ها، جابجایی و تغذیه محوری به میله پلی‌اورتان و لوله اعمال می‌شود.

لوله آلومینیومی استفاده شده در این تحقیق، دارای قطر خارجی 24 میلی‌متر و ضخامت 1 میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که اشاره گردید، طول لوله‌ها، بسته به بارگذاری مورد نظر تغییر می‌کند. در این پژوهش از لوله‌هایی با طول 110، 115، 120 و 125 میلی‌متر استفاده شده است. قطر خارجی قطعه نهایی در منطقه بالچ شده به 30 میلی‌متر می‌رسد. شکل 3 ابعاد قطعه نهایی مطلوب را نشان می‌دهد. میله پلی‌اورتان در آزمون‌های این پژوهش دارای طول و قطر ثابت می‌باشد. با توجه به ابعاد لوله‌ها و قالب، طول میله پلی‌اورتان 90 میلی‌متر و قطر آن 21/3 میلی‌متر انتخاب گردید. شکل 4 یکی از لوله‌های مورد آزمون و میله پلی‌اورتان بکار گرفته شده را نشان می‌دهد.

2-3- منحنی بارگذاری

در فرایند انبساط‌دهی لوله با استفاده از واسط کشسان، اعمال فشار داخلی و همچنین تغذیه محوری با استفاده از جابجایی جک‌های هیدروولیکی و سنبه‌های متصل به آن‌ها انجام می‌گیرد.



Fig. 2 Experimental setup used for rubber-pad bulging

شکل 2 تجهیزات استفاده شده برای انجام فرایند انبساط‌دهی با واسط کشسان

عددی و تجربی فرایند انبساط‌دهی آزاد لوله درزدار فولادی زنگ نزن 304، با استفاده از بالشتک کشسان از جنس پلی‌اورتان انجام گردید. در این پژوهش شکل‌دهی لوله‌های مدرج فولادی، با استفاده از بالشتک کشسان در شرایط مختلف روانکاری تا رسیدن به آستانه پارگی انجام و توزیع کرنش‌های طولی، محیطی و ضخامتی بدست آمد. نتایج نشان داد سیستم روانکاری مورد استفاده، بویژه بین لاستیک و لوله، نقش به‌سزایی در کنترل چروکیدگی، افزایش عمق بالچ، کاهش نیروی شکل‌دهی و انرژی تلف شده اصطکاکی فرایند خواهد داشت. همچنین مشخص شد قطعات سالم بدون چین‌خوردگی با استفاده از روانکار نایلون بین لاستیک و لوله، و روانکار روغن کشش بین لوله و قالب شکل داده می‌شود.

در پژوهش حاضر، شکل‌دهی لوله‌های آلومینیومی با استفاده از واسط کشسان انجام گرفت. انبساط‌دهی لوله‌ها در یک قالب بسته انجام شد و برای رسیدن به قطعه نهایی سالم، از لوله‌هایی با طول‌های مختلف استفاده گردید. تغییر طول لوله‌ها، با توجه به ثابت بودن طول میله پلی‌اورتان و هندسه قالب و سنبه‌ها، سبب تغییر منحنی بارگذاری می‌گردد. با تغییر منحنی بارگذاری می‌توان نقطه شروع و میزان اعمال تغذیه محوری و فشار داخلی را تغییر داد.

2- مراحل تجربی

2-1- آزمون‌های تعیین خواص مکانیکی

برای انجام این پژوهش، پس از انتخاب مواد، آزمون‌های تعیین خواص مکانیکی بر روی نمونه‌های ایجاد شده انجام گرفت. برای شناخت خواص مکانیکی آلومینیوم AA1050A نمونه‌ها بر طبق استاندارد ASTM-E8M آماده‌سازی شده و آزمون کشش تک‌محوری بر روی آن‌ها انجام شد. منحنی تنش مهندسی برحسب کرنش مهندسی از نتایج آزمون استخراج شده و در ادامه منحنی تنش حقیقی برحسب کرنش پلاستیک حقیقی بدست آمد.

برای شناخت رفتار مکانیکی پلی‌اورتان بکار گرفته شده در این پژوهش، نمونه‌های آزمون کشش و فشار مواد هایپرلاستیک، به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM D412 و ASTM D575 تهیه شد. پس از انجام آزمون‌های کشش و فشار بر روی نمونه‌های پلی‌اورتان، نتایج آزمون‌ها به شکل منحنی تنش مهندسی برحسب کرنش مهندسی رسم گردید. در ادامه، برای نمایش بهتر نتایج، نتایج بدست آمده برای آزمون‌های کشش و فشار بر روی یک منحنی واحد رسم گردید.

می‌کند. محور عمودی نیز نشان دهنده میزان تغذیه محوری اعمال شده می‌باشد. در تمامی آزمون‌های تجربی که در سری اول با چهار طول مختلف اشاره شده انجام شد، جابجایی سنبه‌ها تا انتهای آزمون ادامه یافت.

با توجه به نتایج بدست آمده در سری اول آزمون‌های تجربی، منحنی بارگذاری برای لوله آلومینیومی با طول 125 میلی‌متر بهبود داده شد. در این منحنی بارگذاری، پس از اعمال تغذیه محوری به یک میزان محدود، با قرار دادن واسط‌هایی در قسمت جلویی سنبه‌ها، فشار نهایی برای رسیدن به قطعات سالم اعمال می‌گردد. منحنی بارگذاری بهبود یافته نیز در شکل 6 نشان داده شده است.

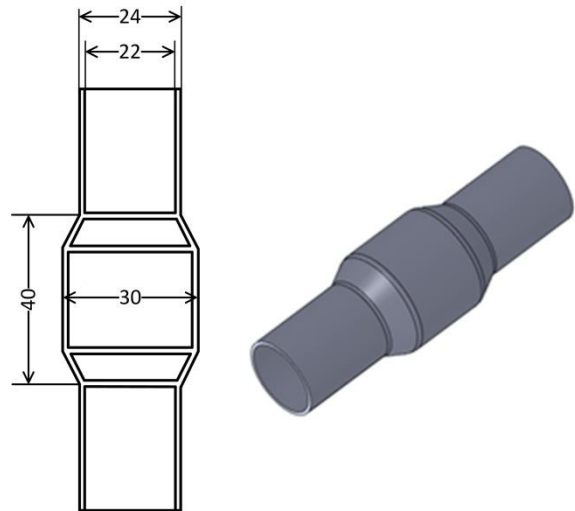


Fig. 3 Schematic view of final product and its dimensions

شکل 3 شماتیکی از قطعه نهایی مطلوب و ابعاد آن

2-4- اندازه‌گیری ضخامت

پس از انجام آزمون‌های تجربی و دستیابی به نمونه نهایی، نمونه با استفاده از فرایند برش سیمی برش داده شد. سپس با فاصله‌های 2 میلی‌متری بر روی لبه برش خورده علامت‌گذاری گردید (شکل 7).

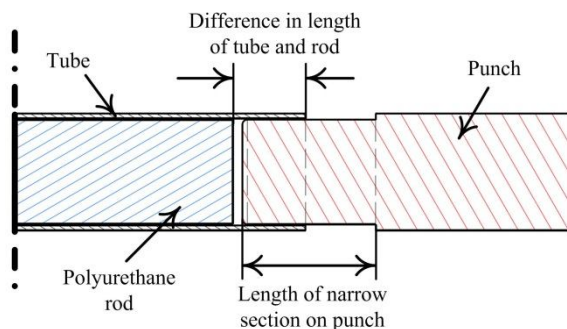


Fig. 5 A sectional view of aluminum tube, polyurethane rod and punch in bulging process

شکل 5 نمای برش خورده از لوله آلومینیومی، میله پلی اورتان و سنبه در فرایند انبساط‌دهی

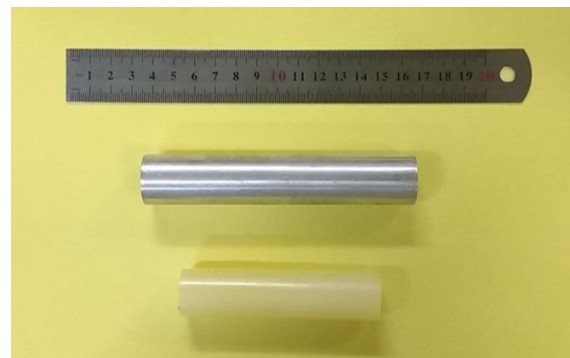


Fig. 4 Aluminum tube and polyurethane rod used in experiments

شکل 4 لوله آلومینیومی و میله پلی اورتان مورد استفاده در آزمون‌های تجربی

در این فرایند، با تغییر اختلاف طول لوله با میله پلی‌اورتان، می‌توان نقطه شروع اعمال تغذیه محوری را تغییر داد. بطوری که با کاهش اختلاف طول لوله با میله پلی‌اورتان، مقدار فشار داخلی اعمال شده قبل از اعمال تغذیه محوری افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، هر چقدر اختلاف طول لوله و میله پلی‌اورتان کمتر باشد، تغذیه محوری دیرتر اعمال می‌شود. شکل 5 بصورت شماتیک اختلاف طول لوله و میله پلی‌اورتان را در نمای برش خورده از فرایند نشان می‌دهد.

همان‌طور که اشاره گردید، لوله‌های آلومینیومی مورد آزمون دارای طول‌های مختلف می‌باشند. این امر باعث می‌گردد منحنی بارگذاری در آزمون‌های مختلف، متفاوت باشد. شکل 6 منحنی بارگذاری را برای آزمون‌های انجام شده برای چهار طول مختلف لوله نشان می‌دهد. محور افقی منحنی نشان دهنده میزان جابجایی سنبه در هر طرف لوله است که باعث فشرده شدن لاستیک شده و فشار داخلی مورد نیاز برای شکل‌دهی را تامین

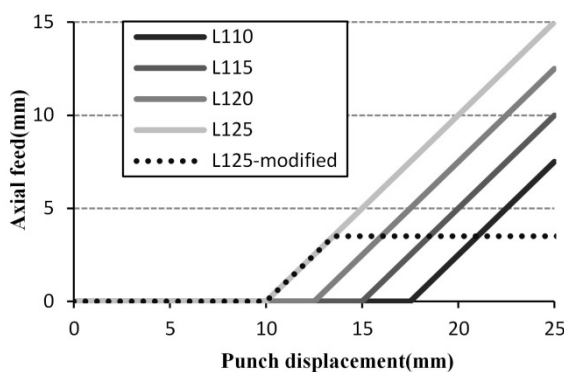


Fig. 6 Loading curves used in experiments for tubes with different initial lengths

شکل 6 منحنی‌های بارگذاری استفاده شده در آزمون‌های تجربی برای لوله‌هایی با طول‌های اولیه مختلف

تغذیه محوری اعمال شده به قدری است که موجب ایجاد چروک در نمونه نیز می‌گردد.

پس از انجام آزمون‌های تجربی، اندازه‌گیری قطر بالچ نمونه‌ها انجام شد و نتایج ثبت گردید (جدول 1). ملاحظه می‌گردد در آزمون‌های انجام شده با لوله‌هایی به طول اولیه 110 و 115 میلی‌متر، ارتفاع بالچ تقریباً یکسانی بدست آمده است. با توجه به نمودارهای مربوط به منحنی بارگذاری، مشخص می‌گردد این دو نمونه در مرحله ابتدایی بارگذاری که با اعمال فشار داخلی و بدون اعمال تغذیه محوری انجام می‌شود، دچار ترکیدگی می‌شوند.



Fig. 7 A cut sample with marked edge for thickness measurement

شکل 7 یک نمونه برش خورده و علامتگذاری شده در لبه جهت اندازه‌گیری ضخامت

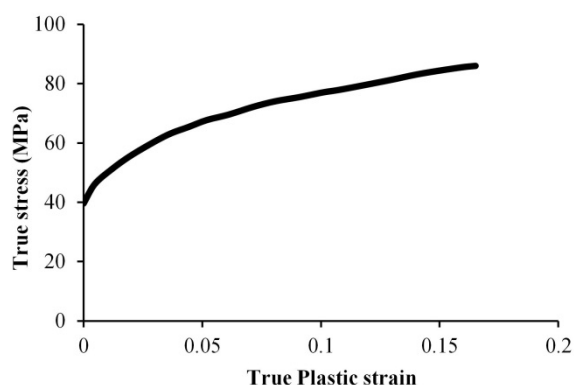


Fig. 8 True stress-true plastic strain curve for AA1050A

شکل 8 منحنی تنش حقیقی- کرنش پلاستیک حقیقی برای آلومینیوم AA1050A

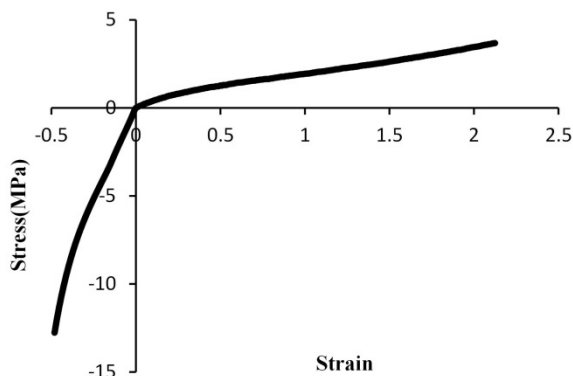


Fig. 9 Stress-strain curve for polyurethane used in the experiments

شکل 9 منحنی تنش-کرنش برای پلی‌اورتان مورد استفاده در آزمون‌های تجربی

اندازه‌گیری ضخامت لوله شکل داده شده در محل‌های علامتگذاری شده در دو لبه برش خورده، با استفاده از ریزسنج انجام گرفت و نتایج ثبت گردید.

3- نتایج و بحث

3-1- نتایج آزمون‌های تعیین خواص مکانیکی

برای شناخت بیشتر رفتار مواد بکار گرفته شده در این پژوهش، آزمون‌های تعیین خواص مکانیکی بصورتی که در بخش کارهای تجربی شرح داده شد، انجام گرفت.

نتایج بدست آمده از آزمون کشش تک‌محوری بر روی نمونه لوله آلومینیومی در ابتدا بصورت نمودار تنش مهندسی برحسب کرنش مهندسی رسم گردید. در ادامه با استفاده از روابط موجود، منحنی تنش حقیقی برحسب کرنش پلاستیک حقیقی رسم شد (شکل 8).

آزمون‌های کشش و فشار نیز طبق توضیحات داده شده در قسمت قبل انجام گردید. نتایج این دو آزمون بر روی یک نمودار جمع گردید که در شکل 9 نشان داده شده است.

3-2- نتایج آزمون‌های تجربی انبساط‌دهی

آزمون‌های تجربی با لوله‌هایی که دارای طول اولیه مختلف بودند انجام گرفت. همان‌طور که در شکل 6 نشان داده شده است، در مرحله اول بارگذاری، جابجایی سنبه‌ها بدون اعمال تغذیه محوری انجام می‌گیرد. در انجام آزمون‌های تجربی مشاهده گردید، نمونه‌هایی با طول 110، 115 و 120 میلی‌متر با اعمال فشار توسط جابجایی سنبه‌ها، در همان مرحله دچار ترکیدگی شدند. این مسأله بدلیل اعمال فشار بیش از حد بدون اعمال تغذیه محوری کافی روی می‌دهد. عدم تغذیه محوری مناسب سبب می‌گردد نمونه‌ها قبل از رسیدن به ارتفاع بالچ مورد نظر، دچار نازک‌شدگی و ترکیدگی شوند. در صورتی که اعمال تغذیه محوری بدرستی انجام گیرد، جریان مواد کافی از نواحی انتهای لوله به محل تغییر شکل انجام می‌شود و از نازک‌شدگی و ترکیدگی لوله جلوگیری می‌کند. شکل 10 نمونه‌های مورد آزمون با طول‌های مختلف را نشان می‌دهد.

افزایش طول اولیه لوله سبب می‌شود نمونه‌ها، قبل از ترکیدگی، تا ارتفاع بیشتری بالچ شوند. با افزایش طول لوله‌ها تا طول اولیه 125 میلی‌متر، اعمال تغذیه محوری با اختلاف زمانی کمتر نسبت به آغاز فرایند انجام می‌شود. این امر سبب جریان بیشتر مواد به محل اعمال تغییر شکل انبساط‌دهی شده، و از بروز ترکیدگی در نمونه جلوگیری می‌کند. در این نمونه مقدار

در آن‌ها مشاهده گردید، از نتایج بدست آمده برای این نمونه‌ها برای اعمال یک بارگذاری جدید استفاده شد. در بارگذاری بهبود یافته، پس از اعمال فشار داخلی و تغذیه محوری اولیه که منجر به چروکیدگی در نمونه با طول اولیه 125 میلی‌متر می‌شود، یک فشار داخلی ثانویه بدون اعمال تغذیه محوری به نمونه وارد می‌گردد. با اعمال فشار داخلی ثانویه، چروکیدگی ایجاد شده در مرحله تغذیه محوری برطرف شده و نمونه به شکل قالب و با قطر خارجی مورد نظر بدست آمد. نمونه‌های نهایی بدست آمده با این منحنی بارگذاری، کاملاً سالم بوده و دچار ترکیدگی نشده‌اند. اندازه‌گیری قطر بالج نمونه‌های شکل داده شده با این منحنی بارگذاری بهبود یافته نشان داد با استفاده از این روش قطر بالج نمونه‌ها به 29/96 میلی‌متر رسیده است که نسبت بالج آن برابر با 24/83 درصد است. شکل 11 یکی از نمونه‌های تولید شده با منحنی بارگذاری بهبود یافته را در کنار نمونه تولید شده با منحنی بارگذاری اولیه که دچار چروکیدگی شده است، نشان می‌دهد.

یکی از نمونه‌های نهایی تولید شده با استفاده از منحنی بارگذاری بهبود یافته، برش داده شد و پس از علامت‌گذاری، اندازه‌گیری ضخامت بر روی آن انجام گرفت. نتایج اندازه‌گیری ضخامت نمونه در شکل 12 نشان داده شده است.

ملاحظه می‌گردد با انجام فرایند انبساط‌دهی بر روی نمونه‌هایی با طول اولیه 125 میلی‌متر و با اعمال منحنی بارگذاری بهبود یافته، نمونه‌ای با حداقل ضخامت 0/935 میلی‌متر تولید شده است. بیشترین کاهش ضخامت در راستای طولی لوله در ناحیه انتقال قطر لوله یا همان محل شروع بالج روی می‌دهد. بیشترین درصد نازک‌شدگی در نمونه در این ناحیه و به مقدار 6/5 درصد محاسبه گردید.

در ناحیه ابتدا و انتها تغییر ضخامت زیادی روی نداده است. در ناحیه میانی لوله نیز کاهش ضخامت روی داده است ولی مقدار آن کمتر از کاهش ضخامت روی داده در ناحیه شروع بالج است. شکل موج ایجاد شده در ناحیه میانی این مسأله را توجیه می‌کند. بدین صورت که نقاطی که ارتفاع پایین‌تری در موج اولیه ایجاد شده دارند، پس از اعمال فشار نهایی کاهش ضخامت کمتری از خود نشان می‌دهند.

3-3- مقایسه نتایج آزمون‌های تجربی با نتایج فرایند هیدروفرمینگ

هاشمی قیری [7] فرایند هیدروفرمینگ گرم لوله‌های آلومینیومی را در دماهای مختلف انجام داده است.

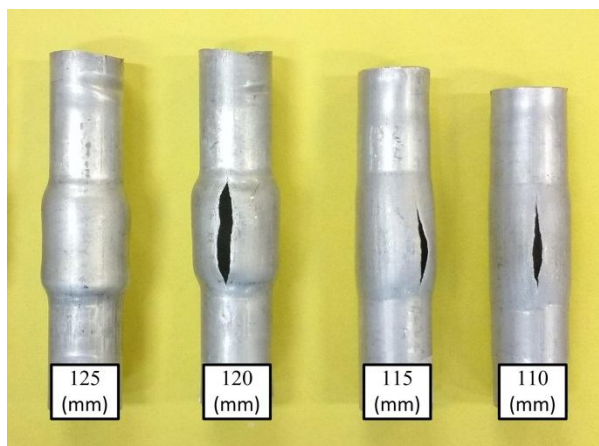


Fig. 10 Rubber-pad bulged samples with different initial lengths

شکل 10 نمونه‌های انبساط‌دهی شده با استفاده از واسط کشسان دارای طول‌های اولیه مختلف

جدول 1 قطر بالج و نسبت بالج نمونه‌های تولید شده در آزمون‌های تجربی
Table 1 Bulge diameter and bulge ratio of samples produced in experiments

نسبت بالج (%)	قطر بالج (mm)	طول اولیه (mm)	نام آزمون
9/20	26/21	110	L110
10/08	26/42	115	L115
16/92	28/06	120	L120
19/33	28/64	125	L125

افزایش طول لوله به 120 میلی‌متر، موجب تغییر منحنی بارگذاری شده و اعمال سریع‌تر تغذیه محوری را ممکن می‌سازد. این امر موجب می‌شود ارتفاع بالج بدست آمده برای این نمونه افزایش یابد. با این وجود اعمال تغذیه محوری بدین شکل نتوانسته است مانع از ترکیدگی لوله گردد. با افزایش دوباره طول اولیه نمونه‌ها، قطر بالج افزایش می‌یابد. بیشترین قطر بالج در نمونه‌ای با طول اولیه 125 میلی‌متر مشاهده می‌گردد که نسبت بالج در آن به 19/33 درصد می‌رسد. در این نمونه، بارگذاری قطعه منجر به بروز ترکیدگی نمی‌شود. افزایش طول نمونه تا 125 میلی‌متر موجب می‌شود تغذیه محوری از دو انتهای لوله در زمانی انجام شود که ماده مورد نیاز برای انبساط لوله را در ناحیه تغییر شکل تامین کند و ترکیدگی رخ ندهد. در عین حال اعمال این تغذیه محوری موجب ایجاد چروکیدگی در نمونه‌هایی با طول اولیه 125 میلی‌متر می‌شود. با توجه به اینکه بارگذاری این نمونه منجر به ایجاد چروک در آن می‌گردد، با افزایش طول اولیه لوله به مقداری بیش از 125 میلی‌متر، نمی‌توان قطر بالج را افزایش داد. زیرا افزایش طول اولیه لوله تنها موجب ایجاد چروکیدگی بیشتر در نمونه خواهد شد.

با توجه به اینکه نمونه‌های با طول اولیه 125 میلی‌متر با اعمال فشار و تغذیه محوری دچار ترکیدگی نشدند و چروکیدگی

گرفته و حداکثر نسبت بالج $24/83$ درصد بدست آمده است. با توجه به اینکه فرایند هیدروفرمینگ لوله در دمای پایین منجر به تولید نمونه سالم نشده است و حداکثر نسبت بالج بدست آمده نیز مقدار پایینی دارد، یک حلقه فولادی در حفره قالب قرار داده شده تا باعث کوچکتر شدن حفره قالب شود. با استفاده از این حلقه امکان تولید قطعه بدون عیب با نسبت بالج 16 درصد در فرایند هیدروفرمینگ لوله وجود آمده است. با بررسی نتایج گزارش شده در این پژوهش مشاهده می‌گردد که نمونه تولید شده در آزمون تجربی هیدروفرمینگ لوله، که نسبت بالج آن 16 درصد است، دارای حداکثر درصد نازک‌شدگی در حدود 14 درصد است. این درحالیست که نمونه نهایی تولید شده در فرایند انبساط‌دهی با واسط کشسان، دارای نسبت بالج $24/83$ درصد و حداکثر نازک‌شدگی $6/5$ درصد می‌باشد.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش فرایند انبساط‌دهی لوله آلومینیومی با استفاده از میله پلی اورتان، برای لوله‌هایی با قطر اولیه 24 میلی‌متر و ضخامت 1 میلی‌متر، در قالب بسته جهت دستیابی به قطر بالج 30 میلی‌متر انجام شد. برای دستیابی به قطعه مورد نظر، منحنی‌های بارگذاری مختلف بر روی نمونه‌ها اعمال شد. برای اعمال منحنی‌های بارگذاری مختلف، در آزمون‌های تجربی از لوله‌هایی با طول‌های اولیه مختلف استفاده شد. اهم نتایج بدست آمده بصورت زیر می‌باشد:

- مشاهده گردید با افزایش طول لوله از 110 میلی‌متر به 120 میلی‌متر، قطر بالج بدست آمده افزایش می‌یابد، اما نمونه قبل از رسیدن به بالج نهایی مورد نظر دچار ترکیدگی می‌گردد.

- با انبساط‌دهی نمونه‌هایی با قطر اولیه 125 میلی‌متر به قطعاتی با قطر بالج بیشتر، بدون ترکیدگی و دارای چروکیدگی دست یافته شد.

- با استفاده از نتایج نمونه دارای طول 125 میلی‌متر، منحنی بارگذاری آن بهبود داده شد و یک مرحله فشار داخلی خالص پس از اعمال تغذیه محوری به آن افزوده شد. با استفاده از این منحنی بارگذاری، نمونه‌های سالم با قطر بالجی در حدود قطر بالج نهایی قالب تولید شد. نمونه نهایی تولید شده دارای قطر بالج $29/96$ میلی‌متر معادل با نسبت بالج $24/83$ درصد می‌باشد.

- اندازه‌گیری ضخامت در راستای طولی نمونه نهایی نشان داد درصد نازک‌شدگی نمونه در بیشترین حالت به $6/5$ درصد



Fig. 11 Rubber-pad bulged samples with same initial length of 125 millimeters and with L125 (right) and L125-modified (left) loading curves

شکل 11 نمونه‌های انبساط‌دهی شده با استفاده از واسط کشسان دارای طول‌های اولیه یکسان 125 میلی‌متر و منحنی بارگذاری L125 (راست) و L125-modified (چپ)

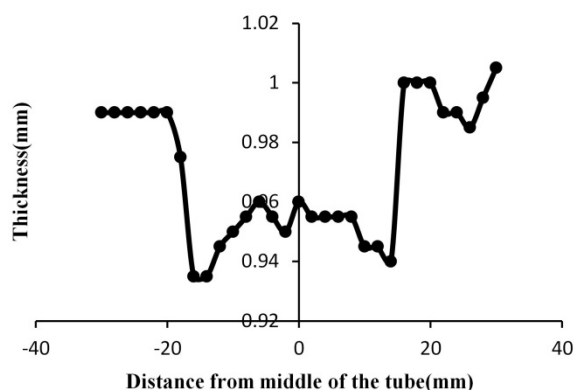


Fig. 12 Thickness distribution of final formed tube in longitudinal direction

شکل 12 توزیع ضخامت در راستای طولی برای نمونه نهایی شکل داده شده

پژوهش ایشان با استفاده از لوله‌هایی با جنس و ابعاد یکسان با پژوهش حاضر انجام شده است. در هر دو پژوهش از قالب‌های یکسان برای انبساط‌دهی لوله آلومینیومی با جنس و ابعاد یکسان استفاده شده است. از اینرو، برای نشان دادن میزان موفقیت فرایند انبساط‌دهی با لاستیک، نتایج بدست آمده با نتایج پژوهش انجام شده با فرایند هیدروفرمینگ مقایسه گردید.

با انجام فرایند هیدروفرمینگ در دمای محیط، به حداکثر نسبت بالج $10/5$ درصد دست یافته شده است. با انجام فرایند در دماهای بالاتر، حداکثر نسبت بالج $24/4$ درصد در دمای 190 درجه سانتی‌گراد بدست آمده است. این درحالیست که با بکارگیری فرایند انبساط‌دهی با استفاده از واسط کشسان برای شکل‌دهی لوله مشابه، لوله مطابق هندسه نهایی مورد نظر شکل

Technology, Vol. 23, pp. 195-209, 1990.

می‌رسد.

[4] A.C. Girard, Y.J. Grenier, Mac B.J. Donald, Numerical simulation of axisymmetric tube bulging using a urethane rod, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, No. 3, pp. 346-355, 2006.

- مقایسه نتایج بدست آمده از این فرایند، با نتایج حاصل از فرایند هیدروفورمینگ گرم، برای جنس و هندسه یکسان، بهبود قابل ملاحظه‌ای را در نسبت بالج و بیشترین درصد نازک‌شدگی نشان می‌دهد.

[5] M. Ramezani, Z. Mohd Ripin, R. Ahmad, A static friction model for tube bulge forming using a solid bulging medium, *International journal of advanced manufacturing technology*, Vol. 43, No. 3, pp. 238-247, 2009.

5- مراجع

[6] H. Ghaforian Nosrati, M. Gerdooei, Experimental and numerical study of friction in free bulging 304 stainless steel seamed tube using elastic pad, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 30-40, 2015 (In Persian)

[1] M. Ramezani, Z. Mohd Ripin, *Rubber-pad forming processes, Technology and applications*. Woodhead Publishing. 2012.

[7] S. J. Hashemi Ghiri, *Design and Simulation of Warm Tube Hydroforming Process and Production of a Sample*, MSc thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2009. (in Persian فارسی)

[2] H. A. Al-Qureshi, factors affecting the strain distribution of thin-walled tubes using polyurethane rod, *international journal of mechanical sciences*, Vol. 13, pp. 403-413, 1971.

[3] S. Thiruvarudchelvan, F. W. Travis, tube bulging using a urethane rod, *Journal of Materials Processing*