

مطالعه تجربی تاثیر اتصال مکانیکی بر میزان جذب انرژی لوله‌های دو لایه تولید شده توسط فرآیند فلوفرمینگ

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
 دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
 دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
 دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

مرتضی هادیان
 حمید باصری*
 محمد جواد میرنیا
 مجید الیاسی

چکیده

لوله‌های جدار نازک به خاطر سبکی، ظرفیت جذب انرژی بالا و طول لهیدگی زیاد یکی از کارآمدترین سیستم‌های جذب انرژی می‌باشند. در این فرآیند به کمک یک غلتک می‌توان به صورت تدریجی لوله اولیه را به ضخامت و طول دلخواه تبدیل نمود. بر همین اساس در این پژوهش اتصال مکانیکی لوله‌های آلومینیومی و فولادی به منظور تولید لوله‌های دولایه و افزایش جذب انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. ایجاد قفل مکانیکی از طریق ایجاد تغییر شکل پلاستیک بین دو لایه تحت شرایط مشخص فرآیندی بررسی شده است. برای ایجاد قفل مکانیکی رزوه‌هایی با رزوه‌های درشت و ریز بین دو لایه ایجاد گردید تا لایه‌ها در یکدیگر پیچ شوند و به کمک فرآیند فلوفرمینگ گرم این اتصال را تقویت کرده تا فضای خالی بین لایه‌ها پر شود. با انجام تست برشی بر روی نمونه‌های حلقوی نتیجه گرفته شد که به کمک فرآیند فلوفرمینگ اتصال قوی بین دو لایه ایجاد می‌گردد همچنین آزمون لهیدگی لوله‌های دو لایه که به صورت پرسی در یکدیگر جا زده شده و به کمک فلوفرمینگ به یکدیگر متصل شدند مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد برای نمونه‌های پرس شده در حالتی که لایه آلومینیومی آنبیل شده است میزان جذب انرژی بهبود می‌یابد. همچنین برای لوله‌های فلوفرمینگ شده، نمونه‌ای که دارای اتصال مکانیکی با رزوه ریزتر است میزان لهیدگی و جذب انرژی بهتری دارد.

واژه‌های کلیدی: لوله دو لایه، اتصال مکانیکی، جذب انرژی، لهیدگی.

Experimental study of the Effect of Mechanical Joining on Energy Absorption of Bilayer Tubes Produced by flow Forming Process

M. Hadian Mechanical Engineering, Department, Babol noshirvani University of Technology, Babol, Iran
 H. Baseri Mechanical Engineering, Department, Babol University of Technology, Babol, Iran
 M. J. Mirnia Mechanical Engineering, Department, Babol University of Technology, Babol, Iran
 M. Elyasi Mechanical Engineering, Department, Babol University of Technology, Babol, Iran

Abstract

Thin walled tubes are the most efficient energy absorption systems due to their lightness, high energy absorption capacity, and large crushing distance. In this process, a primary tube can be gradually deformed in to the desired thickness and length using simple roller. In this study, mechanical joining of aluminum and steel tubes is investigated to manufacture the bilayer tubes. Mechanical locking through the plastic deformation between two layers has been investigated under specified process conditions. To create a mechanical locking, the two layers were threaded with coarse and fine threads, and then using the warm flow forming the bonding between them was enhanced. It was concluded from the shearing test that the strong bond between the two layers can be created using the flow forming process. Also crushing test of bilayer tubes prepared by pressing and flow forming, have been investigated and it was found that the pressed sample with annealed Al layer has better energy absorption. The flow formed tubes with fine threads have better crushing energy absorption.

Keywords: bilayer tube, mechanical connection, energy absorption, crushing.

در این فرآیند، ماده به صورت موضعی دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود و معمولاً از ضخامت آن کاسته و به طول آن افزوده می‌گردد. فلوفرمینگ می‌تواند بر روی دستگاه‌های مخصوص و یا بصورت ساده بر روی دستگاه تراش انجام شود. با پیشرفت صنایع مدرن استفاده از ساختارهای کامپوزیتی، به دلیل خواص ترکیبی آن‌ها، روز به روز افزایش یافته است [1، 2]. در

۱-مقدمه

فلوفرمینگ یک فرایند اقتصادی برای تولید قطعات جدار نازک می‌باشد. در این فرایند لوله اولیه بر روی یک مندرل با هندسه معین قرار گرفته و سپس مجموعه تحت سرعت دورانی مشخصی قرار می‌گیرد. سپس یک غلتک با حرکت تدریجی بر روی لوله مورد نظر، فرایند شکل‌دهی را تحت پاس‌های تغییر شکل متفاوت انجام می‌دهد.

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: h.baseri@nit.ac.ir

بار را کاهش می دهد و شیارهای طولی نیز مقدار بالایی برای نیروی لهیدگی نشان می دهند. میر محمد صادقی و همکاران [9] لوله هایی با شیارهای دایروی در ابعاد متفاوت انتخاب کردند و به صورت تجربی و شبیه سازی آزمون لهیدگی آنها را انجام دادند. نتایج نشان داد می توان جذب انرژی را با انتخاب فاصله شیارها کنترل کرد. نیروی متوسط لهیدگی و انرژی جذب شده در واحد طول با افزایش فاصله شیارها افزایش می یابد. ژانگ و همکاران [10] جذب انرژی لوله با سطح مقطع دایروی و امتداد مخروطی با ضخامت مشخص را تحت بار محوری بررسی کردند. نتایج نشان داد که جذب انرژی در این لوله ها به طور قابل ملاحظه ای بیشتر از لوله مستقیم است. همچنین مشخص شد که اثر شکل دهی بر جذب انرژی قابل توجه است. در تحقیق پیش رو خواص لهیدگی لوله های جدار نازک دو لایه مورد بررسی قرار می گیرد. با ایجاد قفل مکانیکی بین لایه ها و توسط فرآیند فلوفرمینگ، لوله دو لایه تولید شده و اتصال بین آنها به صورت تجربی مطالعه می شود همچنین اثر اتصال مکانیکی بر میزان جذب انرژی لوله تولید شده بررسی می گردد.

۲- مواد و روش ها

برای انجام آزمایش های تجربی لوله هایی از جنس آلومینیوم سری 6000 و فولاد کم کربن انتخاب شد. از لوله آلومینیومی به عنوان لایه بیرونی و از لوله فولادی به عنوان لایه داخلی استفاده گردید. این انتخاب به این دلیل بوده که آلومینیوم استفاده شده شکل پذیر تر از فولاد است و از آنجا که غلتک در تماس با لایه بیرونی است، می تواند آلومینیوم را راحت تر شکل دهد. همچنین در برخی تست ها از آلومینیوم آنیل شده نیز استفاده شده است. برای عملیات آنیل کردن، لوله را به مدت دو ساعت و نیم در دمای 415°C درون کوره قرار داده و پس از خاموش کردن آن، لوله در داخل کوره خنک گردید. برای به دست آوردن خواص مکانیکی لوله ها، نمونه های استاندارد طبق استاندارد ASTM-E8-11 آماده شد و آزمون کشش انجام گردید. خواص مکانیکی دو ماده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی مواد

جنس	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	ازدیاد طول (%)
آلومینیوم ۶۰۰۰	۲۰۲/۱	۳۷۷/۵	۱۴/۷
آلومینیوم ۶۰۰۰ آنیل شده	۱۲۰/۷	۲۴۷/۷	۱۶/۲
فولاد کم کربن	۳۰۸/۹	۵۲۷/۱	۱۳/۶

برای ایجاد قفل مکانیکی بین دو لایه بر روی لایه داخلی آلومینیوم و لایه بیرونی فولاد رزوه هایی به عمق های 3 mm و 1 mm و گام های 3 mm و 1 mm ایجاد و دو لایه در یکدیگر پیچ شدند که منجر به یک اتصال مکانیکی مناسب بین لایه ها شد. نحوه اتصال مکانیکی و پیچ شدن لایه ها در شکل ۱ نشان داده شده است. لوله دو لایه اولیه دارای قطر داخلی 46.5 mm و قطر خارجی 56 mm می باشد.

این میان استفاده از لوله های دو جداره به منظور مقاومت در برابر خوردگی داخلی و استحکام و کم هزینه بودن فلز سطح خارجی مورد توجه قرار گرفته است.

محبی و اکبرزاده [2, 3] فرآیندی جدید به عنوان اتصال چرخشی^۱ بر مبنای فرآیند فلوفرمینگ را پیشنهاد نموده که پتانسیل بالایی برای تولید لوله ها چند لایه دارد. این محققان اثر برخی پارامترها بر اتصال چرخشی آلومینیوم/آلومینیوم و آلومینیوم/مس بررسی کرده و مکانیزمی برای ایجاد اتصال ارائه کردند. آنها با استفاده از طراحی آزمایش، اثر میزان تغییر شکل، ضخامت و استحکام اولیه لایه روکش (آلومینیوم) بر استحکام اتصال را بررسی کردند. ژانگ و همکاران [4] توسط روش قاپی اتصال دو لوله را در اسپینینگ بررسی کردند و نشان دادند که در محدوده خاصی با ادامه افزایش در کاهش ضخامت و افزایش ضریب اصطکاک، کیفیت اتصال بهتر شده و اگر تنش تسلیم دو لوله به هم نزدیک باشد اتصال قویتری ایجاد می شود. ملاداودی و جوانرود [5] تاثیر کاهش ضخامت لوله آلومینیومی O-7075 را در فرآیند فلوفرمینگ به طور تجربی مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که کاهش تدریجی ضخامت باعث زبری سطح، کیفیت بهتر دانه های ماده شده و دقت هندسی نیز کاهش می یابد. همچنین با ۶۰٪ کاهش ضخامت، استحکام تسلیم ۱۴٪ و استحکام کششی ۶۴٪ افزایش و درصد ازدیاد طول ۷۱٪ کاهش می یابد. ژن و همکاران [6] فلوفرمینگ گرم آلیاژ منیزیم را انجام دادند و تاثیر پارامترهای دما، سرعت دورانی اسپیندل، پیشروی و کاهش ضخامت را بر ساختار دانه های و خواص مکانیکی آلیاژ AZ80 بررسی کردند و نتیجه گرفتند با افزایش دما، ابعاد دانه ها بزرگتر می شود. همچنین سرعت اسپیندل و پیشروی تاثیر کمی بر ساختار دانه های اما تاثیر زیادی بر خواص کششی دارد. با کاهش ضخامت بیشتر، ابعاد دانه ها کوچکتر می شود.

ضربه گیرها و جاذب های انرژی از جمله اجزایی هستند که در برخی سامانه ها برای جذب انرژی جنبشی و تبدیل آن به صورت دیگری از انرژی استفاده می شوند. از لوله های جدار نازک به خاطر سبکی، جذب انرژی بالا و طول لهیدگی زیاد به عنوان یکی از سیستم های جذب انرژی استفاده می شود.

سان و هو [7] به بررسی لوله های جدار نازک مخروطی در سه حالت توخالی، پر شده از فوم و دو لوله داخل هم پرداختند. آنها از روش های مختلف بهینه سازی استفاده کرده و این سه حالت را در زمینه جذب انرژی مخصوص و بیشینه نیروی برخورد با یکدیگر مقایسه نمودند. در جذب انرژی مخصوص لوله پر شده از فوم بهترین عملکرد را از خود نشان می دهد اما بیشینه نیروی آن خیلی بالاتر از دو مورد دیگر است. در مقایسه مقطع توخالی و دو مقطع داخل هم، حالت دو مقطع داخل هم در هر دو ویژگی جذب انرژی مخصوص و بیشینه نیروی برخورد عملکرد بهتری نسبت به مقطع توخالی دارد. عیوضیان و همکاران [8] تاثیر چین های محیطی و شیارهای طولی را بر رفتار لهیدگی و جذب انرژی لوله آلومینیومی با مقطع دایروی بررسی کردند. نتایج نشان داد چین های محیطی باعث افزایش نمودار نیرو-جابجایی تحت بار محوری شده است. همچنین اولین نقطه اوج

¹ Spin bonding

در این فرآیند برای آنکه رزوه‌ها بر روی یکدیگر لهیده شوند به اندازه 1.5 mm کاهش ضخامت برای نمونه صورت گرفت. این فرآیند طی ۱۵ پاس انجام شد که در هر پاس 0.1 mm کاهش ضخامت برای نمونه صورت گرفت و قطر خارجی لوله‌ها به 54.5 mm رسید.



شکل ۲- مجموعه آزمایشگاهی فلوفرمینگ بر روی دستگاه تراش به همراه استفاده از شعله

۳- نتایج و بحث

برای نمونه با رزوه‌های درشت به کمک فرآیند فلوفرمینگ و با استفاده از گرما رزوه‌ها لهیده شده و کاملاً در یکدیگر محکم و فضای خالی بین آنها پر گردید که باعث ایجاد یک اتصال مناسب تر بین آن‌ها شد (شکل ۳).



شکل ۳- تقویت اتصال دو لایه به کمک فرآیند فلوفرمینگ

برای بررسی استحکام بین دو لایه عموماً از دو آزمون برشی و پوست کنی^۲ استفاده می‌شود. در آزمون برشی با اعمال نیرو توسط یک سنبه به لایه داخلی و ثابت نگه داشتن لایه بیرونی آن نمونه به کمک یک نگهدارنده، دو لایه تحت نیرویی از یکدیگر جدا می‌شوند که آن نیرو نشان دهنده استحکام بین دو لایه است [11].



شکل ۱- نحوه اتصال مکانیکی دو لوله توسط رزوه‌های داخلی و خارجی. الف- رزوه با گام بزرگ، ب- رزوه با گام کوچک

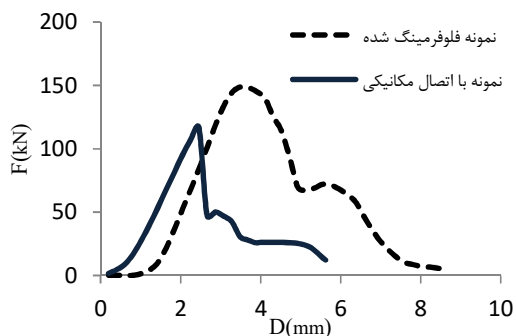
با قرار گرفتن لوله‌ها بر روی مندرل، فرآیند فلوفرمینگ بر روی دستگاه تراش و به کمک یک غلتک انجام شد. مجموعه تجهیزات نصب شده بر روی دستگاه تراش به منظور انجام فرآیند فلوفرمینگ در شکل ۲ نشان داده شده است. ابعاد و مشخصات غلتک و مندرل نیز در جدول ۲ درج شده است.

جدول ۲- ابعاد غلتک و مندرل

شعاع نوک غلتک (mm)	زاویه آزاد غلتک (درجه)	زاویه حمله غلتک (درجه)	قطر غلتک (mm)	قطر مندرل (mm)
۳	۳	۲۰	۱۰۰	۴۶/۵

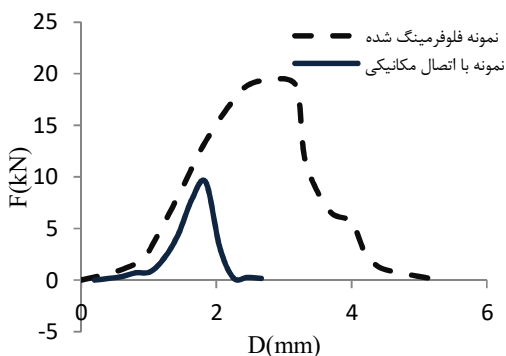
فرآیند فلوفرمینگ با سرعت دورانی 500 rpm انجام شد. انتخاب سرعت اسپیندل مهم است زیرا با افزایش سرعت، زمان اعمال فشار بر لایه‌ها کاهش می‌یابد همچنین با کاهش نرخ پیشروی، تغییر شکل آستانه کاهش و استحکام اتصال افزایش می‌یابد، بنابراین مقدار پیشروی 0.11 mm/rev تعیین شد.

برای شکل دهی بهتر لوله‌ها و ایجاد اتصال قوی تر مطابق شکل ۳ از شعله استفاده گردید. با کمک شعله دمایی حدود 200 °C ایجاد شد که آلومینیوم را وارد ناحیه‌ای که شکل پذیری بهتری داشته باشد، نمود. در نتیجه با کاهش ضخامت بهتر، رزوه‌ها بهتر لهیده شده و اتصال مناسبی ایجاد گردید.



شکل ۶- نمودار نیرو-جابجایی برای گام و عمق 3 mm

برای نمونه‌های که دارای گام و عمق 1 mm باشد (شکل ۷) استحکام اتصال بین دو نمونه در حالتی که فلوفرمینگ شده و حالتی که تنها با اتصال مکانیکی است به میزان 10 kN اختلاف دارند.



شکل ۷- نمودار نیرو-جابجایی برای گام و عمق 1 mm

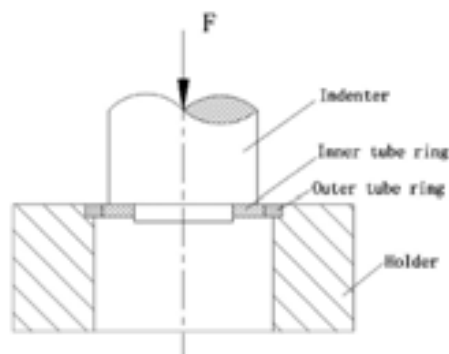
برای بررسی میزان جذب انرژی لوله‌ها از آزمون لهیدگی استفاده می‌شود. ابتدا لوله‌های آلومینیومی و فولادی استفاده شده به صورت تک لایه مورد بررسی قرار می‌گیرند. این لوله‌ها دارای قطر داخلی 48.5 mm و قطر خارجی 52 mm و طول 80 mm می‌باشند. سرعت لهیده کردن نیز برای تمام نمونه‌ها 10 mm/min انتخاب شده است. همانطور که در شکل ۸ مشخص است لوله آلومینیومی به دلیل تردی دچار شکست شده و قابلیت جذب انرژی و تحمل بار را ندارد اما در حالتی که لوله آلومینیومی آنیل می‌شود دچار شکست نشده و به صورت کاملاً متقارن لهیده می‌شود.

از شکل ۹ می‌توان نتیجه گرفت که لوله فولادی در مقایسه با لوله آلومینیومی آنیل شده، قابلیت تحمل بار بیشتر و جذب انرژی بالاتری دارد. اما طول لهیدگی لوله آلومینیومی آنیل شده بیشتر از لوله فولادی است. با توجه به شرایط آنیل که اثر کارسختی اولیه را از بین می‌برد، استحکام تسلیم در لوله آلومینیومی پایین‌تر بوده و انعطاف پذیری بیشتر می‌باشد. در نتیجه سطح نمودار لوله آلومینیومی آنیل شده پایین‌تر و طول لهیدگی بیشتر است.

در تحقیق پیش رو از آزمون برشی برای بررسی استحکام بین دو لایه استفاده شده است. مطابق شکل ۴ نمونه‌ای به عرض 5 mm و قطر داخل و خارج که به ترتیب 46.5 mm و 54.5 mm می‌باشد انتخاب شد. در آزمون برشی نمونه فلوفرمینگ شده به صورت استاندارد بریده شده و در قالب آزمون قرار داده شده است. سپس مطابق شکل ۵، این آزمون انجام گردید.



شکل ۴- اجزای آزمون برشی

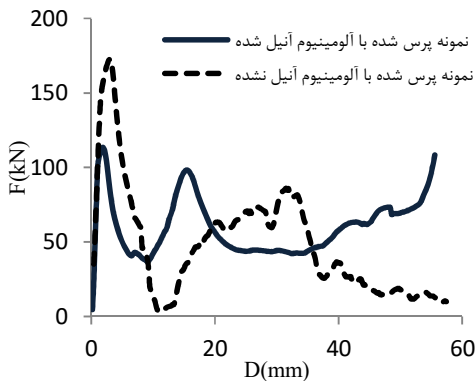


شکل ۵- آزمون برشی

شکل ۶ نمودار نیرو-جابجایی برای دو نمونه فلوفرمینگ شده و با اتصال مکانیکی که دارای گام و عمق 3 mm هستند را نشان می‌دهد. طبق شکل ۶، دو نمودار با یک شیب مشخص افزایش یافته و پس از رسیدن به بیشترین نیرو کاهش می‌یابند که این بیشترین نیرو، نشان دهنده نیرویی است که در آن دو لایه از یکدیگر جدا می‌شوند. نمونه‌ای که دارای رزوه‌های درشت می‌باشد و فرآیند فلوفرمینگ برای آن صورت گرفته دارای استحکامی معادل 150 kN می‌باشد اما نمونه‌ای که تنها دارای اتصال مکانیکی به صورت رزوه و بدون فلوفرمینگ است دارای استحکامی معادل 120 kN می‌باشد که نشان دهنده آن است که برای نمونه آزمایش شده با انجام فرآیند فلوفرمینگ گرم استحکام اتصال آن به میزان 30 kN افزایش می‌یابد. همچنین لایه‌های نمونه‌ای که فرآیند فلوفرمینگ برای آن صورت نگرفته است با جابجایی کمتری از یکدیگر جدا می‌شوند.

همانطور که مشاهده می‌شود در نمونه‌ای که آلومینیوم آنیل نشده است، آلومینیوم دچار شکست می‌شود و لایه فولادی به تنهایی نیرو را تحمل کرده و لهیده می‌شود اما در نمونه‌ای که آلومینیوم آنیل شده است، شکست رخ نمی‌دهد و لایه آلومینیومی و فولادی با هم نیروها را تحمل کرده و به شکل الماسی لهیده می‌شوند. مطابق شکل ۱۱ نمونه با آلومینیوم عملیات حرارتی نشده در ابتدای اعمال بار نیروی بیشتری را تحمل می‌کند اما به دلیل شکست آلومینیوم، با افت شدید بار همراه است. اما نمونه با آلومینیوم عملیات حرارتی شده طی دو مرحله متوالی حداکثر نیرو را تحمل کرده و انرژی را جذب می‌کند که نشان دهنده لهیدگی مناسب‌تر آن می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد، نمونه دو لایه با آلومینیوم آنیل نشده، ماکزیمم نیروی اولیه زیادی دارد که این امر باعث شکست آن شده است. با کاهش ماکزیمم نیروی اولیه در نمونه با آلومینیوم آنیل شده، این نمونه جذب انرژی پایدارتری دارد.

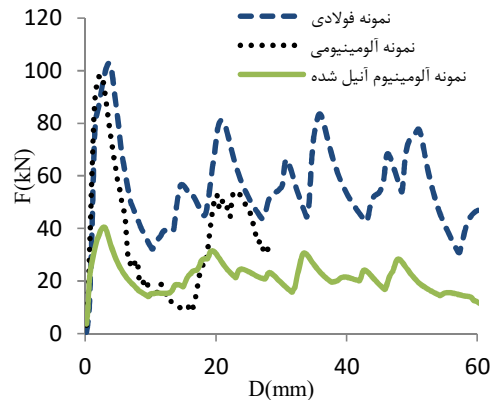
برای ادامه بررسی‌ها لایه فولادی در لایه آلومینیومی پیچ می‌شود تا دارای اتصال مکانیکی باشند و به کمک فلورفرمینگ اتصال بین آن‌ها کاملاً تقویت می‌گردد. رزوه‌ها نیز در دو حالت با گام و عمق 3 mm و گام و عمق 1 mm انتخاب شدند. لوله‌های استفاده شده دارای قطر داخلی و خارجی به ترتیب 48.5mm و 54.5mm و طول 80 mm هستند. مطابق شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، در آزمون لهیدگی نمونه فلورفرمینگ شده با رزوه درشت، لوله از ناحیه میانی بار را تحمل کرده و خم شده است.



شکل ۱۱- نمودار نیرو-جابجایی لوله‌های پرس شده



شکل ۸- آزمون لهیدگی لوله‌های تک لایه، الف- فولاد، ب- آلومینیوم، ج- آلومینیوم آنیل شده

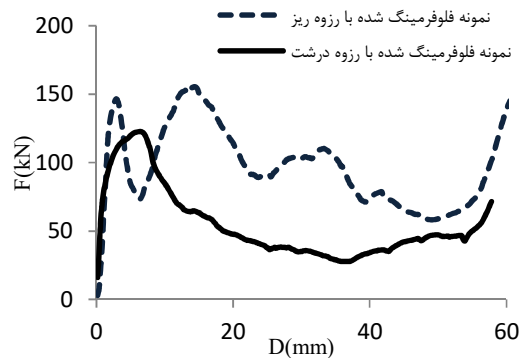


شکل ۹- نمودار نیرو-جابجایی لوله‌های تک لایه

حال میزان جذب انرژی لوله‌های دو لایه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در یک مورد لایه فولادی در لایه آلومینیومی به صورت پرسی قرار داده می‌شود، که در یک حالت عملیات حرارتی آنیل بر روی آلومینیوم انجام شده است و در حالت دیگر این عملیات انجام نشده است. قطر داخلی این لوله‌ها 48.5 mm و قطر خارجی آن‌ها 54.5 mm و طول آن‌ها نیز 80 mm می‌باشد. شکل نهایی نمونه‌ها در شکل ۱۰ آمده است.



شکل ۱۰- لهیدگی نمونه‌های پرس شده در یکدیگر، الف- نمونه با آلومینیوم آنیل نشده، ب- نمونه با آلومینیوم آنیل شده



شکل ۱۴- نمودار نیرو-جابجایی لوله‌های دو لایه فلوفرمینگ شده

جدول ۳- میزان جذب انرژی و درصد لهیدگی لوله‌های دو لایه

نمونه‌ها	جذب انرژی (kJ)	درصد لهیدگی (δ/L)
پرس شده با آلومینیوم آنیل نشده	۲/۷۲	۷۱/۷
پرس شده با آلومینیوم آنیل شده	۳/۳۳	۶۹/۴
فلوفرمینگ شده با رزوه درشت	۳/۰۴	۷۲/۲
فلوفرمینگ شده با رزوه ریز	۵/۸۳	۷۵/۶

۴- نتیجه گیری

در تحقیق انجام شده لوله‌های دولایه همراه با اتصال مکانیکی بین لایه‌ها که به کمک فلوفرمینگ اتصال بین آن‌ها تقویت شد، ساخته شده و میزان استحکام بین لایه‌ها بررسی شد. در ادامه نیز میزان جذب انرژی این لوله‌ها همراه با لوله‌هایی که به صورت پرسی در یکدیگر قرار گرفته‌اند مورد بررسی قرار گرفت.

۱- با ایجاد قفل مکانیکی به صورت رزوه بین دو لایه و پیچ کردن لوله‌ها در یکدیگر و به کمک فرآیند فلوفرمینگ گرم می‌توان لوله دو لایه با اتصالی قوی تولید کرد. با انجام آزمون برشی برای نمونه فلوفرمینگ شده با رزوه‌های ریز و درشت میزان استحکام اتصال بین لایه‌ها در مقایسه با حالت بدون فلوفرمینگ شده به ترتیب به اندازه 10 kN و 30 kN افزایش می‌یابد.

۲- در آزمون لهیدگی لوله‌های تک لایه استفاده شده، مشخص می‌شود که لوله آلومینیومی در ابتدای بارگذاری دچار شکست شده و لهیده نمی‌شود اما در حالتی که عملیات حرارتی آنیل بر روی آن صورت گرفت توانایی جذب انرژی و لهیده شدن بهبود یافته، البته لوله فولادی در مقایسه با آن توانایی جذب انرژی بالاتری دارد.

۳- در بررسی لهیدگی لوله‌های دو لایه که در یکدیگر پرس شده‌اند، در حالتی که لایه آلومینیومی آنیل شده است، درصد لهیدگی ۲/۳ درصد کاهش و میزان جذب انرژی نیز 0.607 kJ در مقایسه با



شکل ۱۲- آزمون لهیدگی لوله فلوفرمینگ شده با رزوه درشت

اما بر اساس شکل ۱۳ نمونه با رزوه ریز در ابتدا به صورت متقارن لهیده شده و سپس از انتهای لوله خم شده و دچار لهیدگی شده است.

مطابق شکل ۱۴ نمونه فلوفرمینگ شده با رزوه درشت در جابجایی 7mm نیروی 120 kN را تحمل کرده و در ادامه میزان جذب انرژی آن کاهش می‌یابد اما نمونه فلوفرمینگ شده با رزوه ریز در سه نقطه بیشترین نیرو را تحمل می‌کند. نمودار نمونه فلوفرمینگ شده با رزوه ریز دارای موج‌های منظم‌تری است و در واقع در سه مرحله انرژی ضربه را جذب می‌کند که این امر مطلوب‌تر است.

در جدول ۳ میزان جذب انرژی و درصد لهیدگی نمونه‌های دو لایه قرار گرفته است. برای محاسبه درصد لهیدگی δ به عنوان میزان لهیدگی و L به عنوان طول اولیه در نظر گرفته شده است.

مطابق جدول ۳ بین دو نمونه‌ای که در یکدیگر پرس شده‌اند، با آنیل کردن لایه آلومینیومی، در حالی که لهیدگی آن ۲/۳ درصد کاهش می‌یابد، میزان جذب انرژی آن به میزان 0.607 kJ افزایش می‌یابد. همچنین برای نمونه‌هایی که با اتصال مکانیکی به یکدیگر متصل شده‌اند و به کمک فلوفرمینگ اتصال بین آن‌ها تقویت شده لهیدگی نمونه با رزوه کوچکتر، ۳/۴ درصد افزایش داشته است. با توجه به آنکه در این نمونه رزوه‌ها کوچکتر شده‌اند، ضخامت آلومینیوم و فولاد در پشت رزوه‌ها بیشتر شده و به همین دلیل میزان جذب انرژی آن به اندازه 2.793 kJ افزایش یافته است.



شکل ۱۳- آزمون لهیدگی لوله فلوفرمینگ شده با رزوه ریز

حالتی که لایه آلومینیومی آویل نشده، بیشتر شده است. همچنین برای نمونه‌های فلوفرمینگ شده همراه با اتصال مکانیکی با رزوه‌های کوچکتر، از آنجایی که ضخامت آلومینیوم و فولاد پشت رزوه‌ها بیشتر شده، میزان لهیدگی و جذب انرژی آن‌ها به ترتیب ۳/۴ درصد و 2.793 kJ در مقایسه با حالتی که رزوه‌های بزرگتری دارند افزایش می‌یابد. در بین نمونه‌های دولایه، نمونه فلوفرمینگ شده با رزوه و گام ۱ میلیمتر میزان لهیدگی و جذب انرژی بالاتری دارد.

۵- مراجع

- [1] Li L., Nagai K., Yin F. X., Progress in cold roll bonding of metals, *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol. 9, No. 2, 2008.
- [2] Mohebbi M. S., Akbarzadeh A., Fabrication of copper/aluminum composite tubes by spin-bonding process: experiments and modeling, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 9-12, pp. 1043-1055, 2011.
- [3] Mohebbi M. S., Akbarzadeh A., A novel spin-bonding process for manufacturing multilayered clad tubes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 3, pp. 510-517, 2010.
- [4] Zhang Z., Xu W., Shan D., An analytical model on spin-bonding of composite tube, *Procedia Engineering*, Vol. 81, pp.2024-2029, 2014.
- [5] Molladavoudi H. R., Djavanroodi F., Experimental study of thickness reduction effects on mechanical properties and spinning accuracy of aluminum 707 during flow forming, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.52, pp.949-957, 2011.
- [6] Cao Z., Wang F., Wan Q., Zhang Z., Jin L., Dong J., Microstructure and mechanical properties of AZ80 magnesium alloy tube fabricated by hot flow forming, *Materials and Design*, Vol.67, pp.64-71, 2015.
- [7] Hou S., Han X., Sun G., Long S., Li W., Yang X., Li Q., Multiobjective optimization for tapered circular tubes, *Journal of Thin-Walled Structures*, Vol.49, pp.855-863, 2011.
- [8] Eyvazian A., Habibi M. K., Hamouda A. M., Hedayati R., Axial crushing behavior and energy absorption efficiency of corrugated tubes, *Materials and Design*, Vol.54, pp.1028-1038, 2014
- [9] Mirmohammadsadeghi S. E., Khalili Kh., Ahmadi S. Y., Hosseinipour S. J., Experimental and finite element simulation investigation of axial crushing of grooved thin-walled tubes, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.77, pp.1627-1643, 2015.
- [10] Zhang X., Zhang H., Wen Z., Axial crushing of tapered circular tubes with graded thickness, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.92, pp.12-23, 2015
- [11] Yu H., Fan Z., Li C., Magnetic pulse cladding of aluminum alloy on mild steel tube, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.214, pp.141-150, 2014.