

بررسی تجربی و عددی فرایند نوین تولید لوله‌های دولایه‌ای استحکام بالا با استفاده از روش کرش دهی لوله توسط لاستیک (RPTS)

امید شاپورگان (کارشناسی ارشد)

قادر فرجی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

جواد شهبازی کریمی (دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

ثمین صادقیان (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

مهندسی مکانیک شریف (پیاپی ۱۳۹۹)
دوره‌ی ۳-۲، شماره‌ی ۱، ص. ۱۳۰-۱۲۱

ناحیه‌ی اعمال کرش در روش استحکام دهی لوله توسط لاستیک (RPTS) به صورت لوزی طراحی شده است. یک ماندل که دارای قسمتی محدب به شکل لوزی است، به داخل لوله رانده می‌شود در حالی که یک حلقه لاستیک بیرونی آن را فرا گرفته است. در نتیجه، قطر لوله به طور موضعی افزایش یافته و با پایین رفتن ماندل، لاستیک فشرده می‌شود و لوله را به ابعاد اولیه‌اش برمی‌گرداند. استحکام لوله‌های دولایه در پاس سوم $180/6 \text{ MPa}$ است که نسبت به پایه‌ی آلومینیومی افزایش و نسبت به پایه‌ی مسی کاهش داشت. در حالی که سختی مس خام قبل از فرایند 92 HV اندازه‌گیری شد، سختی لایه‌ی مسی لوله‌ی دوجداره بعد از فرایند به 130 HV رسید. در نتیجه‌ی این تغییر، لایه‌ی آلومینیومی لوله‌ی دوجداره نسبت به نمونه‌ی خام آن، از 40 HV به 50 HV افزایش یافت. شبیه‌سازی نشان دهنده‌ی مزیت همگنی بالا در اعمال کرش‌های بالاست.

shapurgan@ut.ac.ir
ghfaraji@ut.ac.ir
Shahbazi.mech@gmail.com
Samin.sadeghian@ut.ac.ir

واژگان کلیدی: تغییر شکل خمیری شدید، لوله‌های دولایه، روش اجزاء محدود، خواص مکانیکی، لاستیک.

۱. مقدمه

شوند. سوراخ‌کاری دورانی^[۴]، ساخت غلتکی لوله^[۵]، روزن‌رانی مستقیم، معکوس و به صورت ساده یا هیدرولیک^[۶] از متداول‌ترین روش‌ها هستند. از روش‌های سنتی نیز می‌توان از ریخته‌گری گریز از مرکز^۴ یا پیوسته^۵ نام برد.^[۸] در این روش لوله‌ی مرکزی ریخته شده و سپس تحت ریخته‌گری گریز از مرکز و دوران حول محور خود، لایه‌ی بیرونی پوشش داده می‌شود. این روش با توجه به دمای ذوب دو جنس، دارای پارامترهای متعددی است. روش ایجاد لوله‌های دولایه‌ی مسی - آلومینیومی با روش روزن‌رانی به یک سازکار قابل اعتماد برای تولید تبدیل شده است.^[۹] یکی از روش‌های توسعه‌یافته استفاده از جریان الکتریکی برای ایجاد القای مغناطیسی با محدوده‌ی متأثر از دمای^۶ پایین برای اتصال دو لوله‌ی داخل هم تحت عنوان «اتصال با پالس مغناطیسی»^[۱۱] است. همچنین روش اتصال انفجاری^۸ با استفاده از مواد انفجاری کنترل شده معرفی شده است.^[۱۲] در این روش لوله‌ی جدار بیرونی توسط دیواره‌ی مقید می‌شود و مواد انفجاری داخل لوله‌ی داخلی قرار می‌گیرد که قطری به مراتب کوچک‌تر از لایه‌ی بیرونی دارد. با انجام انفجار، لایه‌ی بیرونی باز می‌شود و با شدت به دیواره‌ی داخلی لوله‌ی بیرونی برمی‌خورد. از ابرادات این روش عدم کنترل صحیح و یکنواختی تنش وارده بر اثر

استفاده از مواد دولایه^۱ می‌تواند ترکیب جالبی از خواص ساختاری و عملکردی ارائه کند. لوله‌های دولایه راه‌حلی اقتصادی برای رسیدن به خواص مکانیکی مطلوب از قبیل استحکام و کرش بالا و خواص فیزیکی نظیر هدایت حرارت و الکتریکی بالا در عین کاهش وزن است.^[۱۳] این امر مستلزم آن است که به جای استفاده از یک لوله با جنس مقاوم به مواد خورنده و مستحکم، هسته مرکزی از جنس لوله‌ی نگهداری و لایه‌ی محافظ بیرونی از جنس سبک‌تر که به لایه‌ی درونی متصل است انتخاب شود. به عنوان نمونه، لوله‌های دولایه‌ی آلومینیوم - مس مزایایی چون کاهش وزن 50% درصدهی به واسطه‌ی وجود آلومینیوم به عنوان محافظ بیرونی دارد و استفاده از غلاف لاغرتر مسی، در مقایسه با استفاده از لوله‌ی یکپارچه مسی، مقاومت به خوردگی و در نتیجه کاهش 30% تا 40% درصدهی هزینه را به ارمغان می‌آورد.^[۱۴] برای ایجاد یک لوله‌ی دوجداره، دو فلز اولیه‌ی جدا از هم باید با روش اتصال نفوذی^۲ یا شکل‌دهی^۳ به هم متصل

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۷/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۸/۱۰/۱۱، پذیرش ۱۳۹۸/۱۰/۱۷.

DOI:10.24200/J40.2020.54028.1522

ماهیت انفجاری آن است که باعث اعوجاج و عدم یکنواختی پس از اجرای فرایند می‌شود.^[۱۳]

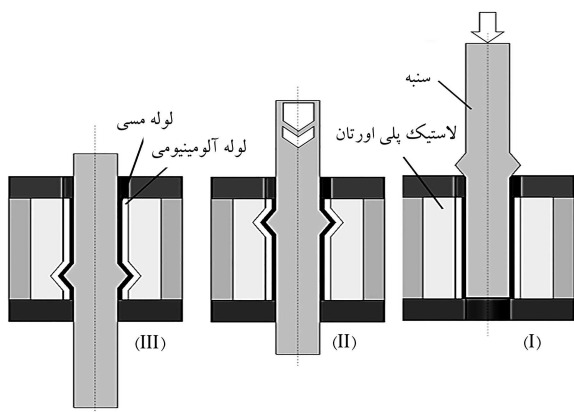
توسلی منش و همکاران بر مبنای روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^[۱۴] که عموماً برای اتصال صفحه‌های غیر هم‌جنس توسعه یافته بود، از سازوکاری جایگزین برای جوشکاری لوله‌های دولایه‌ی مس - آلومینیوم با استفاده از ابزار ثابت چرخان استفاده کردند. در روش ارائه شده، لوله‌ها داخل هم جا رفته و به وسیله‌ی ماندربلی از داخل قفل می‌شود و روی دستگاه تراش قرار می‌گیرد. با دوران لوله‌ها و استفاده از ابزار مخصوص ایجاد کننده‌ی اغتشاش، جوشکاری در لبه‌ها به صورت محیطی انجام می‌شود. از دیگر مشتقات روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، روشی است که در آن ابزاری سخت از جنس تیتانیوم وارد لوله‌ی درونی می‌شود و با دوران و ایجاد سایس اتصال برقرار می‌کند.^[۱۵]

روش‌های جدیدی نیز با کمک فرایندهای تغییر شکل خمیری شدید^{۱۰} برای اتصال حالت جامد ارائه شده است^[۱۶] که به طور هم زمان از طریق ریزدانه‌سازی استحکام را نیز بالا می‌برد. این نکته ثابت شده که روش‌های تغییر شکل خمیری شدید نیز می‌تواند سبب بهبود اتصال کامپوزیت‌های چندلایه‌ی فلزی شود.^[۱۷] یکی از این دست روش‌ها، ساخت ورق‌های دولایه با استفاده از روش ایجاد پیوند به وسیله‌ی نبرد انباشتی^[۱۸] و سپس عملیات خم‌کاری غلتکی برای رسیدن به لوله‌های درزدار چندلایه است.^[۱۹] اخیراً نیز استفاده از روش اکستروژن در کانال زاویه‌دار موازی^{۱۲} نیز برای تولید مقاطع گرد مطرح شده است.^[۲۰] استفاده از روش پیچش فشار بالای لوله^{۱۳} نیز در بالا بردن استحکام لوله‌ها روشی کارآمد محسوب می‌شود و مبنای بسیاری از روش‌هاست.^[۲۱]

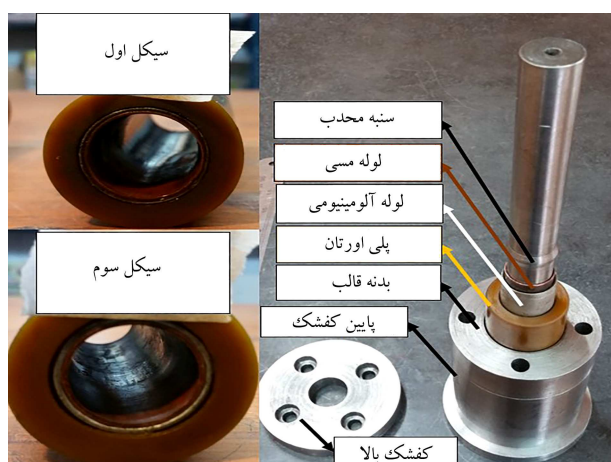
روش‌های یاد شده بر اساس اعمال تنش‌های برشی ناشی از اصطکاک در شرایط هیدرواستاتیکی عمل می‌کنند. از روش فشردن در کانال مساوی زاویه‌دار^{۱۴} نیز برای تولید لوله‌های دولایه‌ی مس - آلومینیوم ریزساختار استفاده شده است.^[۲۲] بدین ترتیب که درون لوله‌ی داخلی را از سرب که فلزی نرم و شکل‌پذیری است پر کرده و آن را با استفاده از سنبله داخل کانالی ال شکل می‌رانیم. کرنش برشی اعمال شده سبب اتصال نفوذی و افزایش استحکام قطعات می‌شود. روش دیگری نیز با نام اتصال چرخشی انباشتی^{۱۵} ارائه شده^[۲۳] که در آن، لایه‌ی داخلی و بیرونی بر هم سوار شده و به وسیله‌ی حرکت محوری یک غلتک دوار با لبه‌ی گوه‌بی تحت فشار قرار می‌گیرد. استفاده از روش چرخشی دورانی^{۱۶} با الگوگیری از همین روش ارائه شده است که در آن برعکس روش قبل، لوله‌ها ثابت‌اند و قالبی دوار با قابلیت تنظیم فشار، در حالی دور لوله‌ی خارجی می‌گردد که لوله‌ی داخلی ثابت نگه داشته شده تا از طریق اصطکاک اتصال لازم ایجاد شود.^[۲۴]

بسیاری از این روش‌ها محدودیت‌های فناورانه، متالورژیکی و اقتصادی دارند. برای مثال روش‌های اتصال مکانیکی نیازمند نیروی بالا و تجهیزات پیچیده‌ی است در حالی که روش‌های متالورژیکی می‌تواند در قطعه تنش پسماند به جای بگذارد و حتی سبب خوردگی تنش شود. لذا چالش برای یافتن روشی مناسب هنوز در جریان است.

در پژوهش قبلی با عنوان «کرنش دهی لوله با استفاده از لاستیک»^[۲۷]، استفاده از سنبله‌ی کروی مبتنی بر آلومینیوم خالص تجاری بود که در پژوهش پیشرو با سنبله‌ی لوزی شکل برای بالا بردن نواحی کرنش برشی و استفاده از لوله‌ی دوجداره جایگزین شد. با توجه به شمایک اجرای فرایند در مراحل مختلف شکل ۱ سنبله‌ی محدب به وسیله‌ی پرس به داخل لوله‌ها رانده می‌شود. در نتیجه‌ی فشار قسمت محدب سنبله و خاصیت کشسانی لاستیک استفاده شده، لوله دچار تغییر شکل موضعی می‌شود. بنابراین به دلیل انحنای سنبله در محدوده‌ی ذکر شده، قطر لوله



شکل ۱. شماتیک قالب و نمونه در روش RPTS برای تولید لوله‌های دولایه.



شکل ۲. چیدمان حقیقی فرایند تولید لوله‌ی دولایه.

بیشینه می‌شود؛ با پایین رفتن سنبله ناحیه‌ی تغییر شکل نیز در طول لوله جابه‌جا می‌شود. در خلال تغییر شکل، فشار پستی لاستیک سبب می‌شود تا پس از پایین رفتن قسمت محدب لوله به قطر اول خود بازگردد. فرایند یاد شده ممکن است با چرخه‌های متعدد رفت و برگشتی تکرار شود. این مسئله امکان تولید لوله‌های ریزساختار با طول زیاد و ضخامت کمتر را فراهم می‌کند. مطابق شکل ۲ مجموعه‌ی قالب و نمونه تحت فشار قرار گرفت و توسط رم، سنبله به داخل لوله به پایین رانده شد.

برای کاهش اصطکاک بین سنبله و لوله از روان‌کار مولیبدن دی‌سولفات^{۱۸} استفاده شد. پس از اجرای فرایند نمونه‌های خام و نمونه‌های تحت فرایندی یک، دو و سه پاس آماده شد. در مرحله‌ی بعد پس از آماده‌سازی بررسی خواص مکانیکی و متالورژیکی آزمایشات تجربی ارائه شده روی آنها انجام شد.

۲. آزمایش‌های تجربی

لوله‌های مورد استفاده در این آزمایش از جنس مس خالص و ابعادی با قطر خارجی ۲۲ mm و ضخامت ۰/۸۵ mm و همچنین برای لوله‌ی آلومینیوم از گرید ۱۱۰° با قطر داخلی ۲۲ mm و ضخامت ۱ mm استفاده شد که پس از برش در اندازه‌های طولی ۱۱۰ mm درون قالب قرار گرفتند. برای آماده‌سازی، نمونه‌ها آویل شدند بدین ترتیب که لوله‌های آلومینیومی در فر به دمای ۳۴۳°C رسیده و ۱

لوله‌ها با احتساب فواصل مساوی از هشت نقطه در ضخامت تحت بار 20° گرم و به مدت 10 ثانیه انجام گرفت.

۱.۲. شبیه‌سازی اجزا محدود

روش اجزای محدود درجه اول روشی توانمند برای امکان‌سنجی‌ها و بررسی عملکردهای فرایندی و سپس بررسی تحلیل کنش‌ها و واکنش‌ها به قطعه و سایر اجزا از قبیل تنش، نیرو و کرنش است. برای بررسی عملکردی در مطالعه‌ی انجام شده از نرم‌افزار آباکوس بهره گرفته شده است. با توجه به هندسه‌ی اجزا مدل‌سازی بر اساس فرایند تقارن محوری صورت گرفت. (شکل ۵)

جنس لوله‌ی تحت فرایند نیز آلومینیوم سری $1xxx$ و مس $1Cxx$ است که با نظریه‌ی کشسانی - خمیری مدل‌سازی شده است. مدل ایجاد شده از یک سنبه و قالب از نوع تحلیلی صلب^{۱۹}، لاستیک و لوله‌های آلومینیومی و مسی از نوع مدل‌سازی پوسته‌ی تغییرشکل پذیر^{۲۰} تشکیل شده است. با فرض مشابهت خواص مکانیکی لوله در راستای طولی و ضخامتی، ضریب ناهمسان‌گردی ۱ در نظر گرفته شده است. فرایند مدل‌سازی شامل سه مرحله‌ی ۱ ثانیه‌ی به منظور شبیه‌سازی سه پاس رفت و برگشتی سنبه - به صورت دینامیکی - در نظر گرفته شد.

سطوح برخوردی از نوع تماس سینماتیک^{۲۱} و اصطکاک بین آنها نیز از روش پناثی^{۲۲} تعریف شد. ضریب اصطکاک بین لوله‌ی مسی و سنبه و همچنین به مقدار مشابه بین لوله‌ی مسی و آلومینیومی، معادل 0.05 انتخاب شده است. ضریب اصطکاک بین دیواره‌ی بیرونی لوله‌ی آلومینیومی و لاستیک 0.2 تعریف شد. اندازه‌ی اجزای مربوط به لاستیک 0.3 انتخاب شد در حالی که این مقدار برای قطاع مسی و آلومینیومی به ترتیب برابر 0.1 و 0.15 است. با توجه به ابعاد مقطع لاستیک و لوله‌های مسی و آلومینیومی تعداد اجزای حاصل شده به ترتیب 6239 ، 8800 و 5131 حاصل شد. مش‌بندی المان‌ها در آباکوس نیز تحت $R4CAX$ انجام شد.

۲.۲. مدل‌سازی رفتار لاستیک

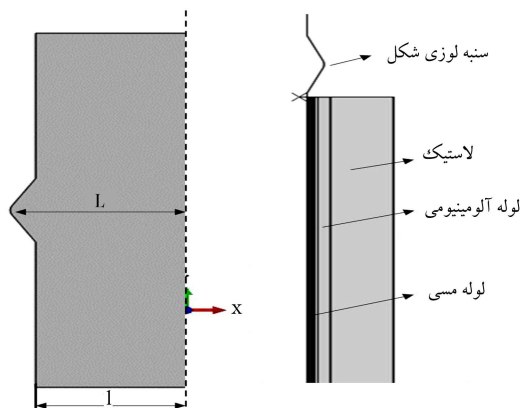
پیش‌بینی رفتار مکانیکی لاستیک‌های زیر بار به کمک مدل‌های ریاضی همواره مورد توجه پژوهشگران مختلف بوده است. علت اصلی این موضوع را باید در چند نکته مهم جست و جو کرد. اول این که لاستیک‌ها موادی با انعطاف پذیری بسیار زیاد و در عین حال تراکم ناپذیری بسیار ناچیز هستند. به نحوی که نظریه‌های کشسان خطی به هیچ وجه درباره آنها صدق نمی‌کند؛ بنابراین ارائه‌ی مدلی جامع و کامل که

ساعت را در این دما سپری کردند و در هوای داخل فر به آهستگی خنک شدند. برای لوله‌های مسی نیز این روال در دمای $50^\circ C$ و زمان 1 ساعت انجام شد.^[۲۸] پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها را داخل فر قرار دادند. مطابق شکل ۳ سطح بیرونی و داخلی لوله‌های مسی و آلومینیومی برس‌کاری سیمی شدند و با استفاده از استون چربی‌زدایی و بلافاصله به صورت جذب و روان داخل یکدیگر زیر پرس جا زده شدند. در نهایت در دمای $320^\circ C$ و مدت 1 ساعت لوله‌های دولایه‌ی مسی - آلومینیومی در کوره قرار گرفتند و فرایند سرد شدن را نیز در همان محیط طی کردند.^[۲۹]

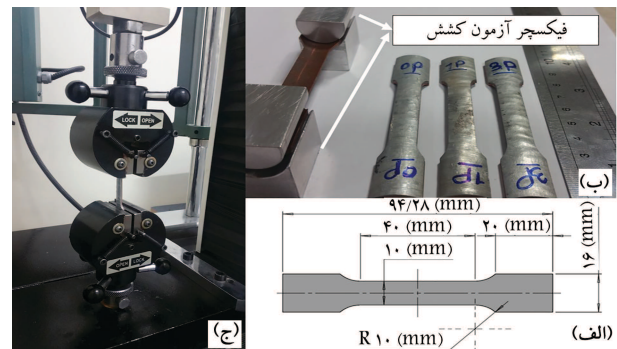
در گام نخست برای انجام آزمایش از سیلیکون و پلی‌اورتان نرم استفاده شد اما به دلیل داشتن حالت کشسانی بیش از حد پس از پایین رفتن سنبه، لاستیک قادر به برگرداندن مجموعه‌ی لوله‌ی آلومینیومی و مسی به مکان اولیه‌اش نبود. در نتیجه از لاستیک سخت‌تری همچون پی‌وی‌سی استفاده شد. این آزمایش پیشرفت و بهبود زیادی نسبت به استفاده از لاستیک‌های نرم‌تر داشت؛ اعوجاج‌ها و چروکیدگی‌ها به شدت کاهش یافت اما در نهایت برای گرفتن نتیجه‌ی مطلوب از پلی‌اورتان با سختی بالا استفاده شد که این آزمایش با موفقیت همراه بود. در شکل ۴ نمونه‌های آزمون کشش به همراه تصویر ابعادی و فیکسچر مربوطه نشان داده شده است. دستگاه استفاده شده برای آزمون کشش با نام ستام بوده و ابعاد نمونه‌ها نیز مقیاسی از استاندارد ASTM: E8-M انتخاب شد. لازم به ذکر است نمونه‌ها با استفاده از دستگاه وایرکات برش خوردند. از سوی دیگر آزمون سنجش میکروسختی در مقطع



شکل ۳. لوله‌های آلومینیومی و مسی آنیل شده و برس خورده در سطوح درگیر و سپس جا زدن آنها داخل هم.



شکل ۵. پارامترهای ماندل و مدل تقارن محوری.

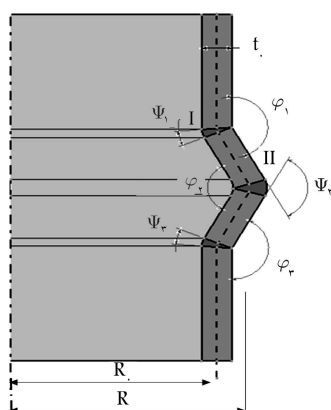


الف) شماتیک ابعادی نمونه‌های آزمون کشش؛ ب) نمونه‌های آزمون کشش با فیکسچر؛ ج) نمونه همراه با فیکسچر در حین آزمون کشش.

شکل ۴. ابعاد نمونه‌های آماده شده و انجام آزمون کشش.

جدول ۱. خواص مکانیکی آلومینیوم، مس و پلیاورتان.

نام ماده	چگالی (kg/m^3)	نسبت پواسون	مدول یانگ (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)
آلومینیوم	۲۷۰۰	۰٫۳۳	۷۰۰۰۰	۲۷٫۵	۶۸٫۹۴
مس	۸۹۰۰	۰٫۳۷	۱۱۰۰۰۰	۸۰	۲۴۰
پلی اورتان	۱۳۰۰	۰٫۴۸	سختی shore A	ضرایب مونی - ریولین (MPa)	
				D۱	D۱
			۸۵	۰	۱۵
				۱۰	۱۰



شکل ۶. ناحیه‌ی تغییر شکل در حین فرایند کرنش‌دهی لوله با استفاده از لاستیک با ماندلر لوزی به همراه پارامترهای اصلی.

جدول ۲. مقدار پارامترهای ناحیه‌ی تغییر شکل.

پارامترها	مقادیر
$\phi_1 = \phi_2$	160°
ϕ_2	140°
$\psi_1 = \psi_2$	20°
ψ_2	40°
R°	12 mm
R	$13/85\text{ mm}$
t°	$1/85\text{ mm}$

می‌افزاید بررسی میزان تنش‌ها و کرنش‌های برشی است که با توجه به روش‌های تغییر شکل شدید خمیری تأثیر به سزایی در استحکام‌دهی لوله دارد.

در حین فرایند، کشش و فشار پیرامونی ناشی از افزایش و کاهش قطر منجر به کرنش برشی می‌شود که در نتیجه‌ی اثر ماندلر روی لوله، نواحی برشی آن بر لوله منعکس می‌شود. با توجه به هندسه‌ی ماندلر با پایین آمدن ماندلر لوزی شکل کرنش‌های برشی در سه ناحیه‌ی (I)، (II) و (III) پدید می‌آید. رابطه‌ی ۲ برای محاسبه‌ی کرنش در لوله‌ها رابطه‌ی کاربردی و رایج است. به این ترتیب که کرنش کل از دو بخش شامل کرنش برشی^[۲۷] مطابق معادله‌ی ۳ به دست می‌آید و با اضافه کردن آن با کرنش محیطی^[۲۸] طبق معادله‌ی ۴ و ۵ کرنش کلی به دست می‌آید که در معادله‌ی ۶ نشان داده شده است. لازم به ذکر است با توجه به ثابت ماندن زوایا در هر سه سری و فقط تغییر قطر بخش لوزی شکل، پارامتر کرنش برشی در معادلات ثابت می‌ماند و فقط تغییر کرنش پیرامونی سبب افزایش کرنش کل می‌شود. با توجه به معادله‌ی ۶ و پارامترهای معرفی شده در جدول ۱، کرنش مجموع

بتواند رفتار آنها را در همه محدوده تغییر شکل بیان کند، امری دشوار است و نیازمند مدل‌های پیچیده ریاضی با پارامترها و شاخص‌های متعدد است.

به همه این موارد باید دشواری به کارگیری این مدل‌ها در نرم‌افزارهای اجزای محدود را نیز افزود، چرا که بدون استفاده از تحلیل اجزای محدود عملاً این مدل‌ها قابلیت کاربرد ندارند.

بیان ریاضی رفتار مکانیکی مستقل از زمان در لاستیک‌ها به کمک مدل‌های ابرکشان انجام می‌شود. در حقیقت این مدل به شکل عددی در نرم‌افزار آباکوس قرار دارد. تاکنون مدل‌های زیادی در این خصوص عرضه شده است.^[۳۰-۳۳]

نکته‌ی قابل توجه در این بخش بحث وارد کردن خواص لاستیک است. برای این کار می‌توان از نظریه‌ی موجود به نام‌های مونی - ریولین^{۲۳}، یه اوه^{۲۴}، اگدن^{۲۵} و مارلو^{۲۶} استفاده کرد.

در پژوهش حاضر، برای بیان ریاضی رفتار مکانیکی لاستیک از مدل ابرکشان مونی - ریولین استفاده شده است. این مدل یک چندجمله‌یی کاهش‌یافته خوانده می‌شود که با معادله‌ی ۱ نشان داده شده است:

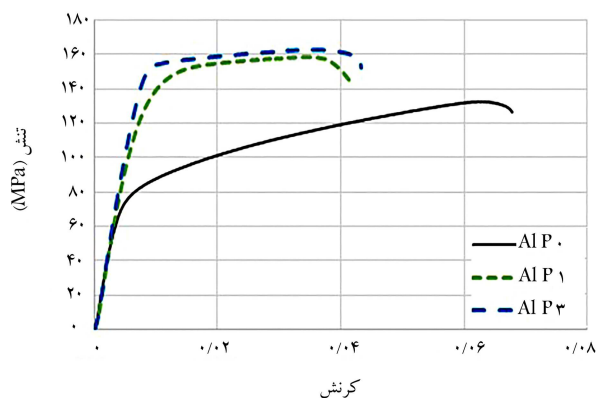
$$W = C_1 (\bar{I}_1 - 3) + C_2 (\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1} (J - 1)^2 \quad (1)$$

که در آن W تابع چگالی انرژی کرنشی، \bar{I}_1 و \bar{I}_2 اجزای انحرافی کرنش، J مربوط به تغییرات حجم، C_1 و C_2 ثابت‌هایی مربوط به جنس و D_1 معرف میزان تراکم است. انتخاب مقادیر مربوط به مدل‌سازی لاستیک با استفاده از مقالات مرتبط با شبیه‌سازی‌های عددی فوم‌ها و مواد انعطاف‌پذیر نظیر و با کمی تغییرات به منظور ایجاد سختی بیشتر در شبیه‌سازی انتخاب شده است.^[۲۵،۲۴] سایر خواص مکانیکی که در نرم‌افزار داده شده است نیز در جدول ۱ نشان داده شده است.

در شکل ۶ برشی از لوله در حین فرایند نشان داده شده است که در آن از ماندلر لوزی شکل استفاده شده است. پارامترهای موجود در حین تغییر شکل هنگامی که لوله پیرامون ماندلر را فرا گرفته در جدول ۲ نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌کنید در حین فرایند شکل‌دهی مقطع آن مشابهت‌هایی با فرایندهای پیشتر ارائه شده‌ی فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌یی^{۲۷، ۲۶]} دارد.

با توجه به طراحی خاص ماندلر، نمونه در حین فرایند در سه ناحیه‌ی (I)، (II) و (III) متحمل کرنش برشی می‌شود. زوایای φ و ψ جزو پارامترهای فرایندی هستند که به همراه پارامتر R وابسته به طراحی ماندلر لوزی شکل است. آنچه بر اهمیت مقادیر می‌افزاید بررسی میزان تنش‌ها و کرنش‌های برشی است که با توجه به روش‌های تغییر شکل شدید خمیری تأثیر به سزایی در استحکام‌دهی لوله دارد. با توجه به طراحی خاص ماندلر، نمونه در حین فرایند در سه ناحیه‌ی (I)، (II) و (III) متحمل کرنش برشی می‌شود. زوایای φ و ψ جزو پارامترهای فرایندی بوده که به همراه پارامتر R وابسته به طراحی ماندلر لوزی شکل است. آنچه بر اهمیت مقادیر

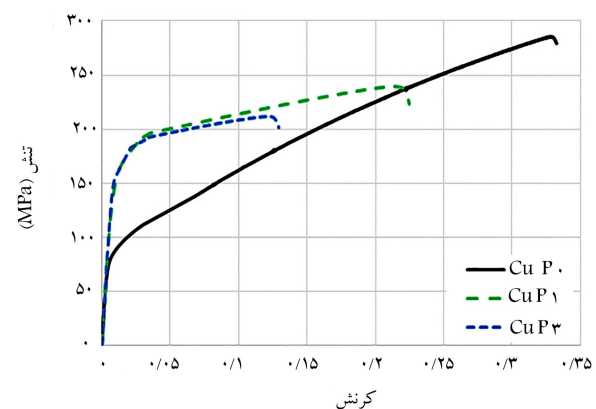
قابل توجهی دارد و از مقدار اولیه 132 MPa به 161 MPa در پاس سوم رسیده است، این در حالی است که مقدار کرنش در لحظه‌ی شکست از 0.07 به 0.43 رسیده است. مجدداً آزمایش با نمونه‌های مسی تکرار شد که نمودار آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که استحکام نمونه‌های تحت فرایند نسبت به ماده‌ی خام دچار کاهش قابل ملاحظه‌ی کرنش تا لحظه‌ی شکست و استحکام نهایی شده است. علت این مسئله در بروز میکروتکرک‌ها و تردشدگی به واسطه‌ی اعمال کرنش سریع و انجام فرایند در دمای محیطی پیش‌بینی می‌شود. خلاصه‌ی اطلاعات نموداری در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به



شکل ۸. نمودار تنش - کرنش آلومینیوم اولیه در مقایسه با نمونه‌های تحت فرایند.



شکل ۹. نتایج استخراج شده از نمودار شکل ۸.



شکل ۱۰. نمودار تنش - کرنش مس اولیه در مقایسه با نمونه‌های تحت فرایند.

پلاستیک در یک پاس از فرایند استحکام‌دهی لوله توسط لاستیک برای قطره‌های مختلف به دست آمد.

$$\bar{\varepsilon}_{TN} = N (\varepsilon_V + 2\bar{\varepsilon}_\theta) \quad (2)$$

$$\bar{\varepsilon}_V = \left(\frac{2 \cot\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) + \psi \csc\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\psi}{2}\right)}{\sqrt{3}} \right) \quad (3)$$

$$\bar{\varepsilon}_\theta = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_\theta \quad (4)$$

$$\varepsilon_\theta = \ln \frac{L}{L_0} \quad (5)$$

$$\bar{\varepsilon}_{TN} = N \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{2 \cot\left(\frac{\varphi_i}{2} + \frac{\psi_i}{2}\right) + \psi_i \csc\left(\frac{\varphi_i}{2} + \frac{\psi_i}{2}\right)}{\sqrt{3}} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{L}{L_0} \right) \quad (6)$$

۳. نتایج و بحث

۱.۳. خواص مکانیکی

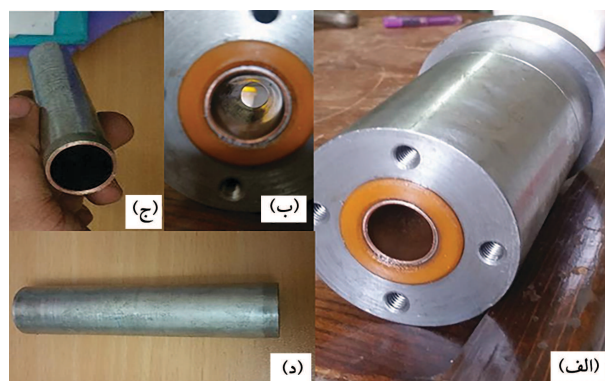
۱.۱.۳. آزمون استاندارد کشش

پس از انجام فرایند، بررسی ظاهری نمونه‌ها نشان‌گر سطح کیفی مناسب نمونه‌ها و بی‌آسیب بودن آنهاست. همچنین پس از پایان فرایند، لوله در راستای طولی بدون اعوجاج ماند و ضخامت آن در دیواره یکسان بود. این امر را می‌توان به استفاده از لاستیک، عدم حرکت دادن قطعه و نیز خود مرکز شوندگی روش نسبت به روش‌های مشابه نسبت داد. مسئله‌ی دیگری که با توجه به شکل ۷ مشخص است، عدم تغییر ابعاد لوله‌های تحت فرایند نسبت به نمونه‌ی اولیه است که این مهم یکی از ویژگی‌های برجسته روش‌های شکل‌دهی شدید در قیاس با سایر روش‌هاست.

در مرحله‌ی بعد نمونه‌ها برای آزمون کشش محیا شدند و آزمایش آزمون کشش روی آنها به صورت‌های زیر انجام پذیرفت. ابتدا نمونه لوله‌های یک‌پاس و دوپاس از هر جنس جدا شد و سپس با مشابه خام خود مقایسه شد.

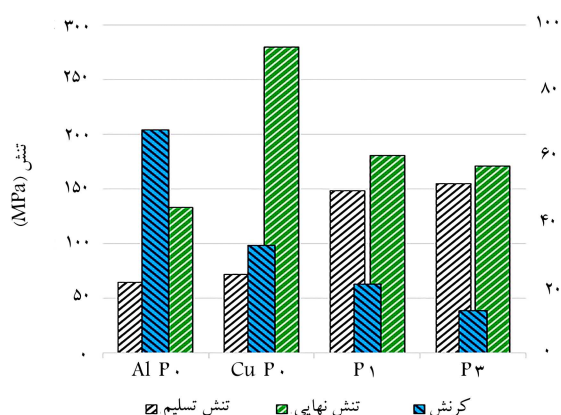
با توجه به شکل ۸، استحکام نمونه‌های تحت فرایند نسبت به حالت اولیه افزایش می‌یابد و تحمل کرنش آنها کاهش می‌یابد. خلاصه مقادیر نیز در شکل ۹ آورده شده است.

چنان که ملاحظه می‌شود استحکام نهایی در مقایسه با نمونه‌ی خام رشد

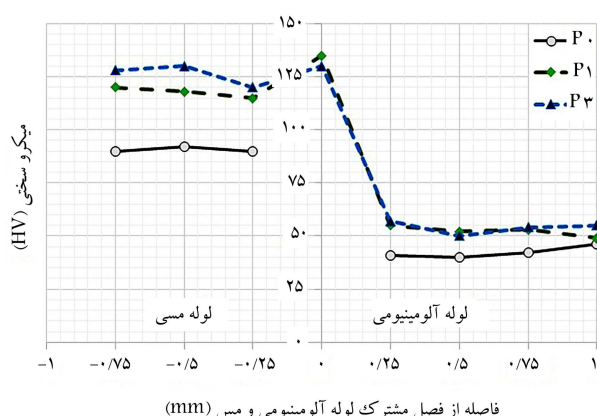


الف) قالب باز شده پس از اتمام فرایند هنگامی که لوله داخل است؛
ب) صافی سطح و یکنواختی لوله؛
ج) لوله خارج شده از داخل قالب؛
د) سلامت سطح لوله که در تماس با لاستیک قرار گرفته بود.

شکل ۷. لوله و قالب پس از انجام فرایند.



شکل ۱۳. نمودار تنش - کرنش لوله‌های یک پاس و سه پاس به هم چسبیده در قیاس با حالت خام هر ماده.

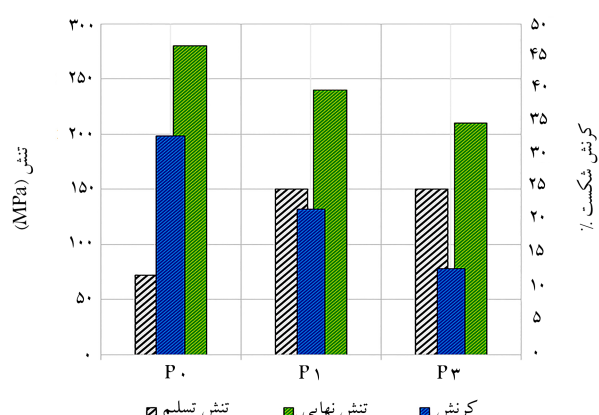


شکل ۱۴. سنجش ریزسختی نسبت به لایه‌ی اتصال.

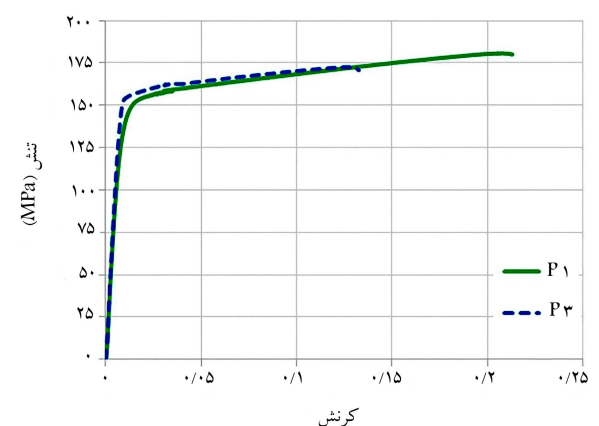
چنان که ملاحظه می‌شود سختی در دیواره‌ی داخلی (سمت مسی) به دلیل بالاتر بودن میزان کرنش اعمال شده با توجه به هندسه‌ی سنبه بیشترین رشد را از خود نشان می‌دهد. به طوری که میزان سختی لوله‌های مسی نسبت به ماده‌ی خام خود از HV ۹۰ به HV ۱۲۰ رشد داشته است اما این رشد در پاس‌های مختلف فرایند حداکثر تا حدود HV ۱۳۰ بالا رفته است. از سوی دیگر این میزان رشد در سطح بیرونی لوله (سمت آلومینیومی) با توجه به کرنش پایین تر وارد شده در طی فرایند به دلیل دور بودن از سنبه و چسبیدن به غلاف لاستیکی، تخفیف یافته و فقط فرایند نسبت به پاس اول و سوم رشد نشان می‌دهد. این مقدار برای آلومینیوم رشدی از مقدار پایه HV ۴۰ تا HV ۵۴ در پاس سوم است. باید توجه داشت که یک نقطه‌ی عطف در محل فصل مشترک دیده می‌شود که ناحیه‌ی تشکیل پیوندهای بین فلزی مس و آلومینیوم است.

۲.۳. شبیه‌سازی

شبیه‌سازی فرایند با شرایط مذکور به طور موفقیت آمیز روی لوله‌ی آلومینیومی - مسی در سه چرخه‌ی مختلف اجرا شد. یکی از اساسی‌ترین بحث‌های این بخش را می‌توان به طراحی بهینه‌ی ماندل در راستای افزایش میزان تنش برشی مربوط دانست که در ریزدانه کردن و متعاقباً بالا بردن استحکام سهم بیشتری ایفا می‌کند. آنچه مورد اهمیت است امکان استفاده از بالاترین قطر ماندل به منظور اعمال بالاترین کرنش است؛ اما استفاده از ماندل‌هایی با قطر بیشتر و زوایای کمتر در کنار اعمال تنش‌های



شکل ۱۱. نتایج استخراج شده از نمودار شکل ۸.



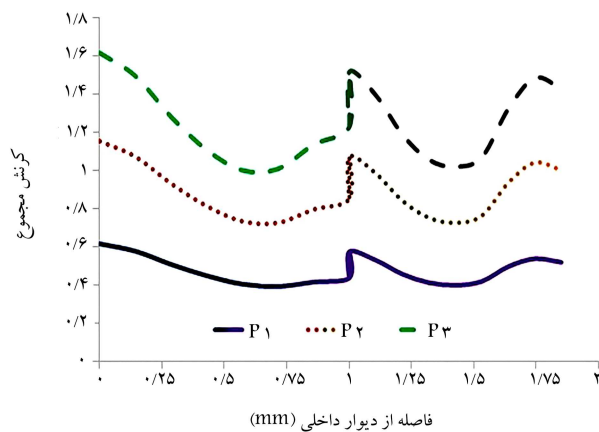
شکل ۱۲. نمودار تنش - کرنش لوله‌های یک پاس و سه پاس به هم چسبیده.

شکل ۱۱ استحکام و کرنش در لحظه‌ی شکست برای مس خام و مس سه پاس به ترتیب از ۲۸۱ MPa به ۲۱۰ MPa و از ۳۳٪ به ۱۳٪ کاهش می‌یابد. بخش اصلی آزمون شامل بررسی رفتار لوله‌های به هم چسبیده است. با توجه به شکل ۱۲، نمونه‌ی یک پاس و سه پاس دارای رفتار کشسانی و خمیری با شیب مشابه هستند، اما آنچه باعث تغییر شرایط این دو نمونه می‌شود میزان کرنش تا لحظه‌ی شکست است. بدین ترتیب لوله‌ی دولایه‌ی یک پاس در نقطه‌ی شکست دارای استحکام نهایی ۱۷۱ MPa و کرنش ۱۴٪ است اما لوله‌ی دولایه‌ی سه پاس دارای مقادیر استحکام نهایی ۱۸۰ MPa و کرنش ۲۱٪ است. نتایج مقایسه‌ی نمودار اصلی با ماده‌ی خام در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.

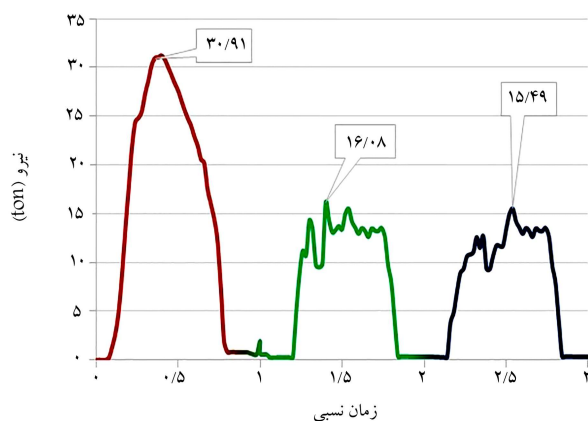
با توجه به شکل ۱۳ در فرایند معرفی شده سطح داخلی که لوله‌ی مسی و بیرونی آلومینیومی نسبت به حالت خام مس خود با کاهش استحکام نهایی همراه بود. این مسئله ناشی از ترد شدن قطعه به دلیل اعمال بیشترین کرنش برشی به جداری داخلی است. متعاقباً در اثر این تردشدگی کرنش تا نقطه‌ی شکست نیز به طرز قابل توجهی کاهش یافته، اگرچه در مقابل برای نمونه خام آلومینیومی، حالت چسبیده از رشد ملایم کرنش و استحکام بهره برده است.

۲.۱.۳. سنجش ریزسختی

سنجش ریزسختی روی سطح مقطع لوله‌ی دولایه با انجام ۹ بار آزمایش در فواصل مساوی از دیواره‌ی بیرونی تا داخلی بررسی شد. در شکل ۱۴ سختی در دیواره به تفکیک نقاط و فواصل نسبت به فصل مشترک، در مقایسه با ماده خام اولیه از هر جنس نشان داده شده است.



شکل ۱۷. توزیع کرنش خمیری معادل در ضخامت در پاس‌های مختلف.

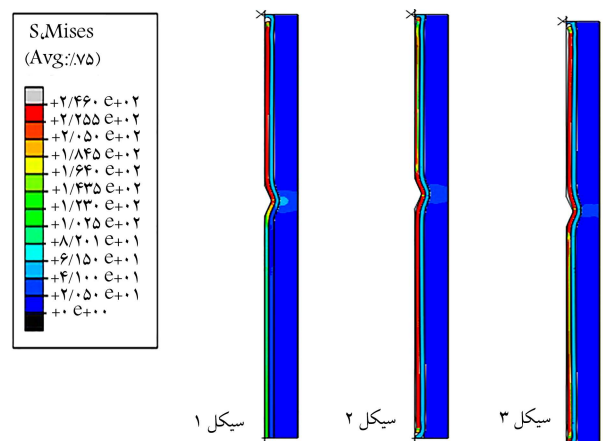


شکل ۱۸. شبیه‌سازی نیروی وارد به سنبه در طی فرایند.

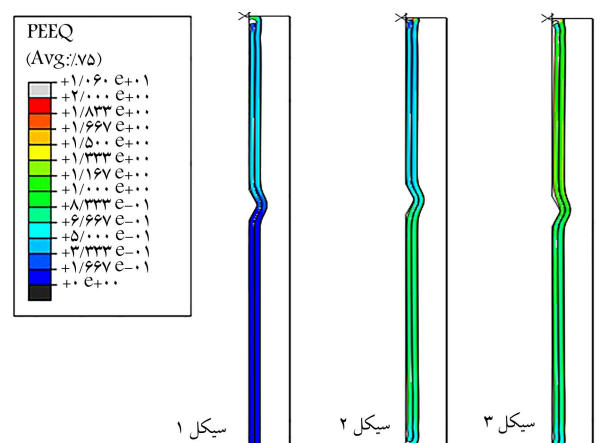
پاس سوم ۱/۲۷ است. معادله‌ی ۶ کرنش ۱/۱۵ را در پاس اول در مقایسه با میزان کرنش ناشی از شبیه‌سازی اجزاء محدود محاسبه می‌کند. میزان کرنش با توجه به مقادیر ارائه شده، برخلاف رابطه‌ی ۶ که به صورت نظری میزان کرنش در هر پاس را تابعی خطی از تعداد دفعات در میزان کرنش در پاس اول محاسبه می‌کند، رشد کرنش با افزایش پاس‌ها تخفیف می‌یابد و از مقدار پیش‌بینی شده به دور است. این مورد در سایر فرایندهای شکل‌دهی شدید نیز دیده شده است که علت آن کرنش سخت شدن لوله‌ی آلومینیومی - مسی در ادامه‌ی فرایند فرا نگرفتن کامل لوله به دور ماندن و ایجاد ناحیه‌ی خالی دور قسمت لوزی شکل سنبه است.^[۲۹] این مسئله سبب تغییر کرنش محاسباتی نسبت به کرنش خروجی حاصل از مدل‌سازی اجزاء محدود می‌شود.

شکل ۱۸ نشان‌دهنده‌ی نیروهای وارد بر ماندنل در حین فرایند است. به علت درگیری بیشینه‌ی ماندنل با لوله در اواسط فرایند و اثرات اصطکاکی آن، هر سه پاس دارای قله‌هایی در میان فرایند خود هستند. در واقع در آغاز فرایند که ماندنل به طور کامل با نمونه درگیر نشده، نیرو بسیار اندک است اما در ادامه با درگیر شدن بخش لوزی شکل، نیرو به طور ناگهانی جهش می‌یابد تا به اوج خود برسد. از این پس با پایین‌تر رفتن ماندنل سطح درگیر کم می‌شود تا ماندنل از طرف دیگر قالب خارج شود.

لازم به ذکر است که با توجه به نمودار که اوج آن در پاس اول روی می‌دهد، می‌توان فرایند را با یک فشار ۴۰ ton انجام داد. نیروی وارد بر سنبه در پاس‌های اول، دوم و سوم به ترتیب ۳۰/۹۱ ton، ۱۶/۸ ton و ۱۵/۴۹ ton است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود



شکل ۱۵. کانتور مجموع تنش ون مایسز وارد شده به لوله در سیکل‌های مختلف.



شکل ۱۶. کانتور کرنش معادل در پاس‌های مختلف فرایند.

برشی بیشتر سبب له کردن و پایین کشیدن لوله‌ی داخل کلاف لاستیکی می‌شود در حالی که استفاده از ماندنل‌هایی با قطر کمتر، کرنش برشی کمتری را در هر چرخه از فرایند در عین اطمینان از سلامت لوله‌ها اعمال می‌کند. در واقع حالت بهینه هنگامی ایجاد می‌شود که قطر بخش محدب هم‌اندازه‌ی قطر خارجی لوله باشد. در شکل ۱۵ تنش معادل در پاس‌های مختلف روی لوله نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود تنش معادل وارد شده برابر ۲۴۸ MPa است.

در شکل ۱۶ کانتور کرنش معادل در پاس‌های مختلف فرایند نشان داده شده است. میزان کرنش در پاس‌های مختلف متفاوت است که به نوعی یکی از خروجی‌های مهم فرایند است. در شکل ۱۷ مقادیر کرنش در ضخامت نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۷، کرنش در دیواره‌ی داخلی در کلیه‌ی چرخه‌های فرایند بالاترین مقدار را دارد. به طور کلی با دور شدن از جداریه‌ی مسی داخلی و حرکت به سمت فصل مشترک در حدود فاصله‌ی ۱ mm، قله‌پی در نمودار پدید می‌آید. در انتهای لوله‌ی آلومینیومی و در محل تماس با جداریه‌ی لاستیکی، این نمودار با خیز همراه است. علت این مسئله را در نما و لغزش لایه‌ها روی هم و ایجاد کرنش برشی می‌توان دانست، لذا هرچه از ناحیه‌ی داخلی به سمت بیرون می‌رویم با توجه به کمتر شدن سهم کرنش برشی و غلبه‌ی کرنش محیطی نمودار با افت همراه می‌شود.

میزان کرنش متوسط در لایه‌ی مسی در مقایسه با لایه‌ی آلومینیومی تقریباً مشابه است، بدین ترتیب که کرنش متوسط در پاس اول ۰/۴۸، برای پاس دوم ۰/۹ و برای

۳. سختی لایه‌ی مسی نیز به دلیل اعمال کرنش بیشتر و تماس با سنبه نسبت به لایه‌ی آلومینیم از رشد بیشتری برخوردار است. سختی لایه‌ی مسی و آلومینیومی در پاس سوم به 130 HV و 50 HV رسیده است.

۴. به دلیل پر نشدن دور سنبه در ادامه‌ی فرایند کرنش به نسبت کمتری در سایر پاس‌ها رشد می‌یابد و نیرو در ادامه‌ی فرایند کاهش می‌یابد.

فهرست علائم

EPS : کرنش خمیری معادل؛

N : تعداد پاس؛

L : حداکثر شعاع قسمت لوزی شکل ماندل؛

I : حداقل شعاع قسمت لوزی شکل ماندل؛

T° : ضخامت لوله.

علائم یونانی

Ψ : زاویه گوشه (درجه)؛

φ : زاویه کانال (درجه)؛

σ : تنش (MPa)؛

ε : کرنش؛

$\bar{\varepsilon}_{TN}$: کرنش خمیری معادل؛

μ : ضریب اصطکاک.

۴. نتیجه‌گیری

روش ارائه شده با نام «استحکام‌دهی لوله با استفاده از ماندل لوزی شکل و لاستیک» به عنوان روشی برای شکل‌دهی قطعات دوار معرفی شد. این روش بر مبنای چرخه‌های رفت و برگشتی ماندلری محدب از درون لوله‌یی است که پشت آن را لاستیک فراگرفته است. دستاوردهای این پژوهش عبارت است از:

۱. با توجه به نتایج مدل‌سازی انتخاب ماندل با قطر 22 mm که به میزان قطر خارجی لوله مورد استفاده است، بهترین انتخاب است.

۲. پیوند لایه‌ی مسی - آلومینیومی نسبت به آلومینیوم دارای رشد استحکام و کرنش است و نسبت به نمونه‌ی مسی کاهش استحکام نهایی و کرنش را رقم زده است. رشد استحکام تسلیم در حالی در قیاس با نمونه‌ی خام مسی رخ می‌دهد که علت را می‌توان در اتصال آن با آلومینیوم تحلیل کرد. لازم به ذکر است استحکام نمونه‌های یک‌پاس و سه‌پاس به ترتیب 171 MPa و 180 MPa است.

پانوشت‌ها

1. bimetallic materials
2. diffusion bonding
3. forming
4. centrifugal casting
5. continuous casting
6. heat affected zone (HAZ)
7. magnetic pulse cladding (MPC)
8. Explosive bonding
9. friction stir welding (FSW)
10. sever plastic deformation (SPD)
11. accumulative roll bonding (ARB)
12. equal channel angular extrusion (ECAE)
13. high-pressure tube twisting (HPTT)
14. equal channel angular pressing (ECAP)
15. accumulative spin bonding (ASB)
16. rotary swaging
17. rubber pad tube straining
18. MoS₂
19. analytic rigid
20. deformable shell
21. kinematic contact
22. penalty method

23. Mooney-Rivlin
24. Ye-oh
25. Ogden
26. Marlow
27. tube channel angular pressing

منابع (References)

1. Cabeza, L.F. and et al. "Immersion corrosion tests on metal-salt hydrate pairs used for latent heat storage in the 32 to 36⁰ C temperature range", *Materials and corrosion*, **52**(2), pp. 140-146 (2001).
2. Farrell, A.J., Norton, B. and Kennedy, D.M. "Corrosive effects of salt hydrate phase change materials used with aluminium and copper", *Journal of Materials Processing Technology*, **175**(1-3), pp. 198-205 (2006).
3. Zebardast, M. and Taheri, A.K. "The cold welding of copper to aluminum using equal channel angular extrusion (ECAE) process", *Journal of Materials Processing Technology*, **211**(6), pp. 1034-1043 (2011).

4. Chitkara, N. and Aleem, A. "Extrusion of axi-symmetric bi-metallic tubes: some experiments using hollow billets and the application of a generalised slab method of analysis", *International Journal of Mechanical Sciences*, **43**(12), pp. 2857-2882 (2001).
5. Pussegoda, L. and et al. "Laboratory simulation of seamless-tube rolling", *Journal of Materials Processing Technology*, **25**(1), pp. 69-90 (1991).
6. Park, H. and et al. "A study of the hydrostatic extrusion of copper-clad aluminium tube", *Journal of Materials Processing Technology*, **67**(1-3), pp. 24-28 (1997).
7. Choi, H.-J., Choi, J.-H. and Hwang, B.-B. "The forming characteristics of radial-backward extrusion", *Journal of Materials Processing Technology*, **113**(1-3), pp. 141-147 (2001).
8. Sponseller, D., Timmons, G. and Bakker, W. "Development of clad boiler tubes extruded from bimetallic centrifugal castings", *Journal of Materials Engineering and Performance*, **7**(2), pp. 227-238 (1998).
9. Xie, J.X. and et al. *A novel forming process of copper cladding aluminum composite materials with core-filling continuous casting*. in *Materials science forum*, Trans Tech Publ, pp.956-961 (2007).
10. Lapovok, R. and et al. "Bimetallic copper-aluminium tube by severe plastic deformation", *Scripta Materialia*, **66**(12), pp. 1081-1084 (2012).
11. Fan, Z., Yu, H. and Li, C. "Plastic deformation behavior of bi-metal tubes during magnetic pulse cladding: FE analysis and experiments", *Journal of Materials Processing Technology*, **229**, pp. 230-243 (2016).
12. Berski, S. and et al. "Analysis of quality of bimetallic rod after extrusion process", *Journal of Materials Processing Technology*, **177**(1-3), pp. 582-586 (2006).
13. Sun, X.-J., Jie, T. and Guo, X.-Z. "Bonding properties of interface in Fe/Al clad tube prepared by explosive welding", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **21**(10), pp. 2175-2180 (2011).
14. Mishra, R.S. and Ma, Z. "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, **50**(1-2), pp. 1-78 (2005).
15. Li, W. and et al. "Interface microstructure evolution and mechanical properties of Al/Cu bimetallic tubes fabricated by a novel friction-based welding technology", *Materials & Design*, **134**, pp. 383-393 (2017).
16. Valiev, R.Z. and et al. "Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation. Jom", **58**(4), pp. 33-39 (2006).
17. Yang, D. and et al. "Ultrafine equiaxed-grain Ti/Al composite produced by accumulative roll bonding", *Scripta Materialia*, **62**(5), pp. 321-324 (2010).
18. Maier, V., Höppel, H. and Göken, M. "Nanomechanical behaviour of Al-Ti layered composites produced by accumulative roll bonding", *In Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, **024** (2010).
19. Mehr, V.Y., Toroghinejad, M.R. and Rezaeian, A. "Mechanical properties and microstructure evolutions of multilayered Al-Cu composites produced by accumulative roll bonding process and subsequent annealing", *Materials Science and Engineering: A*, **601**, pp. 40-47 (2014).
20. Eizadjou, M. and et al. "Investigation of structure and mechanical properties of multi-layered Al/Cu composite produced by accumulative roll bonding (ARB) process", *Composites Science and Technology*, **68**(9), pp. 2003-2009 (2008).
21. Bay, N. and et al. "Cross shear roll bonding", *Journal of Materials Processing Technology*, **45**(1-4), pp. 1-6 (1994).
22. Eivani, A. and Taheri, A.k. "A new method for producing bimetallic rods", *Materials Letters*, **61**(19-20), pp. 4110-4113 (2007).
23. Tóth, L. and et al. "Severe plastic deformation of metals by high-pressure tube twisting", *Scripta Materialia*, **60**(3), pp. 175-177 (2009).
24. Ghadimi, S. and et al. "Experimental and numerical investigation of a Cu-Al bimetallic tube produced by ECAP", *Materials and Manufacturing Processes*, **30**(10), pp. 1256-1261 (2015).
25. Mohebbi, M. and Akbarzadeh, A. "A novel spin-bonding process for manufacturing multilayered clad tubes", *Journal of Materials Processing Technology*, **210**(3), pp. 510-517 (2010).
26. Zhang, Q. and et al. "Rotary swaging forming process of tube workpieces", *Procedia Engineering*, **81**, pp. 2336-2341 (2014).
27. Shapourgan, O. and Faraji, G. "Rubber pad tube straining as a new severe plastic deformation method for thin-walled cylindrical tubes. proceedings of the institution of mechanical engineers, part B:", *Journal of Engineering Manufacture*, **230**(10), pp. 1845-1854 (2016).
28. Li, X.-b., Zu, G.-y and Ping, W. "Microstructural development and its effects on mechanical properties of Al/Cu laminated composite", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **25**(1), p. 36-45 (2015).
29. Lee, J. and et al. "Effects of annealing on the mechanical and interface properties of stainless steel/aluminum/copper clad-metal sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, **187**, pp. 546-549 (2007).
30. Ghoreishy, M., Firouzbakht, M. and Naderi, G. "Parameter determination and experimental verification of bergström-Boyce hysteresis model for rubber compounds reinforced by carbon black blends", *Materials & Design*, **53**, pp. 457-465 (2014).
31. Gajewski, M., Szczerba, R. and Jemioło, S. "Modelling of elastomeric bearings with application of yeoh hyper-elastic material model", *Procedia Engineering*, **111**, pp. 220-227 (2015).
32. Feng, Z.-Q., Peyraut, F. and He, Q.-C. "Finite deformations of Ogden's materials under impact loading", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, **41**(4), pp. 575-585 (2006).
33. Mazurkiewicz, D. "Problems of identification of strength properties of rubber materials for purposes of numerical analysis: a review", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **10**(1), pp. 69-84 (2010).
34. Dirikolu, M.H. and Akdemir, E. Computer aided modelling of flexible forming process", *Journal of Materials Processing Technology*, **148**(3), pp. 376-381 (2004).

35. Liu, Y. and et al. "Studies of the deformation styles of the rubber-pad forming process used for manufacturing metallic bipolar plates", *Journal of Power Sources*, **195**(24), pp. 8177-8184 (2010).
36. Faraji, G. Mashhadi, M.M. and Kim, H.S. "Tubular channel angular pressing (TCAP) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes", *Materials Letters*, **65**(19-20), pp. 3009-3012 (2011).
37. Luiz Pérez, C.J. "On the correct selection of the channel die in ECAP processes", *Scripta Materialia*, **50**(3), pp. 387-393 (2004).
38. Hosford, W.F. and Caddell, R.M. Metal forming : mechanics and metallurgy 1993, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall (1993).
39. Mahallawy, N.E. and et al. "3D FEM simulations for the homogeneity of plastic deformation in Al-Cu alloys during ECAP", *Materials Science and Engineering: A*, **527**(6), pp. 1404-1410 (2010).