



مطالعه تجربی فرایند فلوفرمینگ لوله‌های دو لایه مس-آلومینیوم شیاردار و بررسی نیروی جدایش دو لایه

مجتبی علیپور لائین^۱، امیر اشرفی^{۱*}، مجید خدادادی^۲

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- گروه مهندسی ساخت و تولید، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، اسفراین، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: amirashrafi@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۷ دی ۱۴۰۳

پذیرش: ۱۶ فروردین ۱۴۰۴

کلیدواژگان:

فلوفرمینگ

لوله دو لایه

سطح شیاردار

نیروی جدایش

چکیده

در این تحقیق فرایند فلوفرمینگ لوله‌های دو لایه آلومینیوم-مس مورد مطالعه قرار گرفته است. برای شکل‌دهی لوله‌ها از یک ابزار ساچمه‌ای استفاده شده است. فشار وارده از ابزار به سطح لایه بیرونی باعث جریان یافتن لایه بیرونی و فشار به لایه داخلی می‌شود، در نتیجه یک لوله با طول بیشتر و ضخامت کمتر شکل خواهد گرفت. در این حالت ماده لوله بیرونی به درون شیاردار لوله داخلی وارد می‌شود و دو لوله به صورت یک قفل مکانیکی با هم درگیر می‌شوند. در این تحقیق روی سطح لوله داخلی شیارداری ایجاد شده و پس از قرار گرفتن درون لوله بیرونی، فرایند فلوفرمینگ روی آن‌ها انجام شد. دو دسته از پارامترها وجود دارند که دسته اول پارامترها شامل سرعت دورانی اسپیندل، سرعت پیشروی و عمق باردهی ثابت هستند و دسته دوم شامل عمق و گام شیار به صورت متغیر در نظر گرفته شده‌اند. برای انجام آزمایش ابتدا نمونه‌ها با شکل شیار مناسب آماده و تحت فرایند فلوفرمینگ قرار گرفتند. در مرحله بعد به منظور سنجش میزان اتصال دو لوله از آزمون پوسته‌کنی استفاده شد. در مورد شیاردارهای دایره‌ای، افزایش گام شیار سبب کاهش حدوداً ۳۳ درصدی نیرو شد، به طوری که از حدود ۱۹ کیلو نیوتن به حدود ۱۳ کیلو نیوتن در عمق شیار ۰.۵ میلی‌متری و از حدود ۳۴ کیلو نیوتن به ۲۴ کیلو نیوتن در عمق شیار ۰.۷۵ میلی‌متر رسیده است. همچنین مشاهده شد که افزایش عمق شیار از ۰.۵ به ۰.۷۵ تقریباً سبب دو برابر شدن نیروی جدایش شده است.

Experimental study of the flow forming process of grooved copper-aluminum bi-layer tubes and investigation of the separation force between the two layers

Mojtaba Alipour Layin¹, Amir Ashrafi^{1*}, Majid Khodadadi²

1- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

2- Department of Manufacturing Engineering, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, Iran

* Corresponding Author's Email: amirashrafi@birjand.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 6 January 2025

Accepted: 5 April 2025

Keywords:

Flow Forming

Bi-Layer Tube

Grooved Surface

Separation Force

Abstract

In this research, the flow forming process of aluminum-copper bi-layer tubes was studied. A ball tool was used for shaping the tubes. The pressure applied by the tool causes the outer layer to flow and exert pressure on the inner layer, resulting in a tube with increased length and reduced thickness. In this case, the material of the outer tube enters the grooves of the inner tube, forming a mechanical interlock between the two tubes. In this study, grooves were created on the surface of the inner tube, which was then placed inside the outer tube, and the flow forming process was performed on it. Two categories of parameters were considered. The first category includes spindle rotational speed, feed rate, and depth, which were kept constant. The second category includes grooves depth, and pitch, which were considered variable. For the experiments, the samples were first prepared with appropriate grooves and then subjected to the flow forming process. In the next stage, to assess the bonding strength between the two tubes, a peel test was conducted. For circular grooves, increasing the groove pitch results in approximately a 33% reduction in force, decreasing from about 19 kN to around 13 kN at a groove depth of 0.5 mm and from approximately 34 kN to 24 kN at a groove depth of 0.75 mm. Additionally, it is observed that, increasing the groove depth from 0.5 mm to 0.75 mm nearly doubles the separation force.

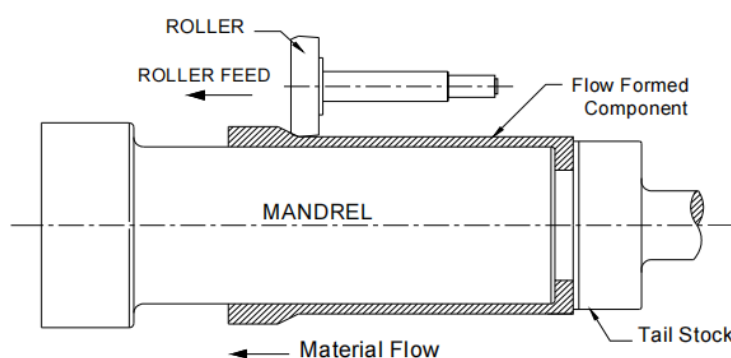
Please cite this article using:

Alipour Layin M, Ashrafi A, Khodadadi M. Experimental study of the flow forming process of grooved copper-aluminum bi-layer tubes and investigation of the separation force between the two layers. 2025 Apr 21;12(2):44-58. doi: 10.22034/ijme.2025.498237.2040 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

شکل‌دهی چرخشی یکی از فرایندهای شکل‌دهی فلزات است که در آن از ترکیب نیرو و دوران قطعه‌کار، به منظور ایجاد قطعاتی تو خالی با محور تقارن و بدون درز استفاده می‌شود [۱]. در شکل‌دهی چرخشی متداول، یک ورق به صورت مقید بین ابزار نگهدارنده و مندرل قرار می‌گیرد، سپس با حرکت تدریجی ابزار، ورق را در یک یا چند مرحله به شکل پیش‌بینی شده تغییر می‌دهند و قطعه مورد نظر را در اشکال و هندسه مورد نظر تولید می‌کنند [۲]. نوع دیگر فرایندهای شکل‌دهی چرخشی به فلوفرمینگ معروف است. در این فرایند لوله در یک انتها روی مندرل مقید می‌شود و تماس ابزار چرخشی بر سطح لوله شکل‌دهی صورت می‌گیرد به طوری که طول لوله افزایش می‌یابد و ضخامت آن کم می‌شود. جهت حرکت ابزار و افزایش طول لوله در فلوفرمینگ مستقیم در یک جهت و در فلوفرمینگ معکوس مخالف یکدیگر می‌باشد. در شکل ۱ نمایی از فرایند فلوفرمینگ مستقیم مشاهده می‌شود [۳].



شکل ۱ فرایند فلوفرمینگ مستقیم [۳]

این فرایند در تولید بدنه‌های جدار نازک راکت و موشک، مخزن‌های CNG، چرخ‌دنده داخلی و طیف وسیعی از مخازن تحت فشار به کار می‌رود [۴، ۵]. خدادادی و همکاران [۶] فرایند فلوفرمینگ چرخ‌دنده داخلی را به روش عددی و تجربی مورد تحلیل قرار دادند و اثر عوامل نرخ پیشروی، درصد کاهش ضخامت، زاویه تماس و قطر ابزار را بر روی لبه انباشته بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که زاویه تماس ابزار بیشترین اثر را بر روی تشکیل لبه انباشته دارد. خدادادی و همکاران [۷] بهینه‌سازی چند هدفه را بر روی پارامترهای فرایند جهت افزایش ارتفاع دنده و کاهش نیرو و لبه انباشته انجام دادند. همچنین کاربرد جدید این فرایند در ساخت لوله‌های دو لایه می‌باشد [۸]. در ادامه به بررسی مفصل آن‌ها پرداخته می‌شود.

ژانگ و همکاران [۹] با مطالعه بر روی تولید لوله‌های کامپوزیتی دو لایه و استحکام اتصال چرخشی آن‌ها و تأثیر پارامترهای میزان کاهش ضخامت، ضریب اصطکاک سطحی و نسبت تنش تسلیم بر روی استحکام اتصال دو لوله، یک مدل نظری ارائه دادند. نتیجه آزمایش آن‌ها نشان داد که با زیاد شدن کاهش ضخامت در یک محدوده خاص، کیفیت اتصال بهبود می‌یابد و همچنین هر چه تنش‌های تسلیم دو لوله به یکدیگر نزدیک‌تر باشد، لوله‌های روکش شده راحت‌تر به لوله ماتریس متصل می‌شوند.

محبی و اکبرزاده [۱۰] در تحقیق دیگری با مطالعه بر روی تولید لوله‌های کامپوزیتی Al/Cu در دماهای ۲۵، ۱۳۰ و ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد و کاهش سطح مقطع ۲۰ تا ۶۰ درصدی نشان دادند که کاهش قطر بیش از ۳۰ درصد، پیوند بین لوله‌ها با کیفیت بیشتری اتفاق خواهد افتاد. آن‌ها دریافتند که انجام آزمایش در دماهای بالاتر باعث کاهش کیفیت پیوند لوله‌ها در فصل مشترک می‌شود.

جیانگ و همکاران [۱۱] بر روی سازگاری تغییرات هم‌زمان کرنش طولی لوله‌های کامپوزیتی Al/Cu تولید شده به روش شکل‌دهی چرخشی، به صورت تجربی و عددی مطالعه کردند. آن‌ها آزمایش را در دو حالت انجام دادند. در حالت اول لوله آلومینیومی را به عنوان لوله داخلی و لوله مسی را به عنوان لوله خارجی و حالت دوم لوله مسی را به عنوان لوله داخلی و لوله آلومینیومی را به عنوان لوله خارجی انتخاب کردند. آن‌ها نشان دادند که در حالت اول نتایج آزمایش بسیار نزدیک به نتایج شبیه‌سازی بود و تغییر شکل پلاستیک دو لوله کاملاً هم‌زمان و یکسان اتفاق افتاد اما در حالت دوم لوله آلومینیومی به عنوان لوله خارجی دچار تغییر شکل پلاستیک و کرنش طولی زیادی شد، اما لوله مسی با نرسیدن به حد تنش تسلیم خود دچار تغییر شکل پلاستیکی نشد. نتایج آن‌ها نشان داد که تنش تسلیم و شرایط ورود به منطقه تغییر شکل پلاستیک نقش خیلی مهمی در سازگاری سطوح تغییر شکل یافته دارد.

هانگ و همکاران [۱۲] مطالعات خود را بر روی پدیده گلوبی شدن در لوله‌های جدارنازک تولید شده به روش فلوفرمینگ انجام دادند. هدف آن‌ها تحقیق و جست‌وجو برای پیدا کردن یک حالت بهینه برای تولید محصول دقیق بود. برای این منظور تعدادی از عوامل که باعث وقوع پدیده گلوبی شدن در قطعه‌کار می‌شد را توسط روش‌های عملی و تحلیل اجزاء محدود شناسایی کردند و در نهایت برای بهینه‌سازی فرایند به کار بردند. آن‌ها دریافته‌اند رسیدن در استفاده از فلوفرمینگ معکوس، می‌توان کنترل ابعاد محصولات را با بهبود بخشیدن طول تغذیه غلتک تغییر داد، اما محصول با ابعاد دقیق را نمی‌توان با این روش تولید کرد. آن‌ها اشاره کردند که در صورت استفاده از فلوفرمینگ مستقیم کنترل دقت ابعادی محصول تولیدی نسبت به فلوفرمینگ معکوس خیلی بهتر و راحت‌تر است.

جیانگ و همکاران [۱۳] نقش اندازه ساچمه در فرایند شکل‌دهی چرخشی ساچمه‌ای معکوس را بر روی لوله‌های دیواره نازک با دنده طولی درونی، به روش المان محدود صلب-پلاستیکی بررسی نمودند. آن‌ها دریافته‌اند که اندازه ساچمه‌ها نقش مهمی در شکل‌دهی چرخشی ساچمه‌ای معکوس در قطعات لوله‌ای دیواره نازک با دنده طولی ایفا می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش اندازه ساچمه‌ها به شکل‌پذیری دنده‌های داخلی و همچنین جریان مداوم مواد فلزی بر روی سطح دورانی قطعات کمک می‌کند؛ اما افزایش بیش از حد اندازه ساچمه‌ها منجر به کمتر شدن دقت ابعادی و کیفیت سطح قطعه می‌انجامد.

گوئو و همکاران [۱۴] با مطالعه بر روی بیشترین مقدار تنش پسماند لوله‌های دو لایه تولید شده به روش شکل‌دهی چرخشی داخلی نشان دادند که تولید این لوله‌ها به روش شکل‌دهی چرخشی داخلی به‌خوبی قابل انجام است. در نتایج آن‌ها موقعیت لوله بیرونی در شبیه‌سازی و شرایط آزمایشگاهی نزدیک به هم بودند؛ اختلاف بین نتایج آن‌ها و نتایج تحلیل نظری ۴٫۲۶٪ بود که نشان می‌دهد که این نتایج قابل قبول هستند. آن‌ها نشان دادند هنگامی که انبساط لایه بیرونی در موقعیت مرز الاستوپلاستیک قرار گرفت، مقدار تنش تماسی باقیمانده لوله‌های دو لایه بعد از اتمام بارگذاری بزرگترین مقدار را داشت، که فرضیه را اثبات کرد. در شبیه‌سازی حداکثر تنش باقیمانده ۱٫۸۳۴ مگاپاسکال بود و در تجربی ۱٫۷۱۲ مگاپاسکال بود که انحراف ۶٪/۱۶۵ است و نشان دهنده صحت قابل قبول نتایج شبیه‌سازی و آزمایش تجربی با یکدیگر است. این مقدار بزرگتر از ۰٫۳ مگاپاسکال است که با نیاز استاندارد و تولید صنعتی سازگار است. مطالعاتی نیز در زمینه لوله‌های دو لایه مس و آلومینیوم با فرایندهای شکل‌دهی دیگر انجام شده است که به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد.

آشتیانی و همکاران [۱۵] تولید لوله آلومینیوم AA7075 با روکش مس خالص را به روش اکستروژن مستقیم داغ مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها آزمایش اصلی را با زاویه قالب ۴۵ درجه، نسبت اکستروژن ۴ و دمای ۴۸۰ درجه سانتی‌گراد انجام دادند. نتایج آزمایش کشش و تصاویر میکروسکوپی نشان داد که استحکام و سختی نمونه مطلوب است و نفوذ و درهم‌تنیدگی مناسبی بین دو جنس وجود دارد.

افشاری و همکاران [۱۶] فرایند هیدروفورمینگ لوله دو لایه با لایه بیرونی مس و لایه داخلی آلومینیوم را انجام دادند. برای جلوگیری از چروکیدگی لوله داخلی آلومینیوم از یک قید مکانیکی داخلی از جنس لوله مسی استفاده گردید. شبیه‌سازی اجزای محدود برای بررسی توابع هدف نازک‌شدگی لایه‌ها و ارتفاع برآمدگی لوله دو لایه انجام گرفت و نهایتاً مقادیر بهینه پارامترها متناسب با توابع هدف استخراج شده‌اند.

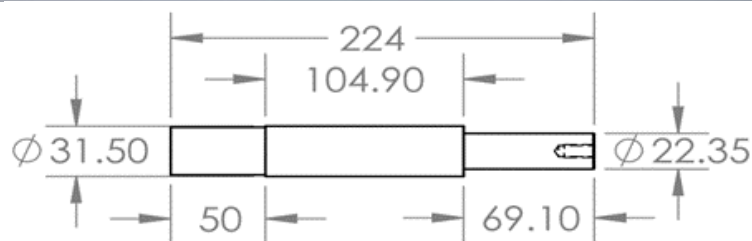
برندار و همکاران [۱۷] فرایند اکستروژن مستقیم لوله دو لایه مس و آلومینیوم را انجام دادند و برای اتصال بهتر از ایجاد شیار بر روی سطح لوله‌ها استفاده نمودند. آن‌ها دو حالت مس پوسته-آلومینیوم هسته و برعکس را مطالعه کردند. همچنین شیارهای سطح لوله را در سه حالت شیار سطح بیرونی لوله هسته، شیار سطح داخلی پوسته و هر دو با هم بررسی کردند. آن‌ها آزمون لهیدگی را بر روی نمونه‌ها انجام دادند و توسط تصاویر میکروسکوپی مقطع نمونه‌ها را مطالعه نمودند و به این نتیجه رسیدند که لوله‌هایی که هر دو فلز دارای شیار بودند نسبت به سایر نمونه‌ها مقاومت بهتری در برابر لهیدگی داشتند. همچنین نمونه‌ای که مس پوسته و آلومینیوم هسته بود نیروی لهیدگی بیشتری را در حالت آلومینیوم پوسته و مس هسته نشان داد.

در این تحقیق یک روش جدید برای افزایش استحکام اتصال لوله دو لایه در فرایند فلوفرمینگ پیشنهاد شده است که شامل ایجاد شیارهای دایره‌ای و مثلثی روی سطح لوله داخلی است که این مورد قبلاً در منابع بررسی نشده است. پر شدن این شیارها توسط لوله بیرونی باعث ایجاد یک قفل مکانیکی و بهبود اتصال می‌شود. برای این منظور آزمایش‌هایی انجام گرفت و مقدار نیروی جدایش نمونه‌های دو لایه فلوفرمینگ با هم مقایسه شده‌اند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

برای انجام آزمایش از یک مندرل، دو پیش‌فرم مسی و آلومینیومی و یک غلتک استفاده شده است. مندرل از جنس فولاد CK45 با ابعاد مشخص شده در شکل ۲ به منظور سوار شدن لوله‌ها روی آن و انجام عملیات فلوفرمینگ، تهیه شد. همچنین یک سوراخ قلاویز شده در ابتدای مندرل جهت ثابت شدن لوله‌ها روی آن تعبیه شده است.



شکل ۲ نمونه مندرل آماده شده جهت فلوفرمینگ

بر روی پیش‌فرم آلومینیومی ۶۰۶۱ شیارهایی مطابق جدول ۱ با استفاده از قلم‌های تراش با اشکال مثلثی و نیم‌دایره ایجاد شد. در شکل ۳ ابعاد دو نمونه از قطعات شیاردار نشان داده شده است. پیش‌فرم دیگر یک لوله مسی با قطر خارجی ۲۸٫۵ میلی‌متر، قطر داخلی ۲۵٫۵ میلی‌متر و طول ۳۵ میلی‌متر است که با انطباق پرسی با تolerانس ۰٫۰۴ روی پیش‌فرم آلومینیومی سوار شده است. در شکل ۴ پیش‌فرم آلومینیومی شیاردار و نحوه قرارگیری پیش‌فرم مسی بر روی آن نشان داده شده است. آزمایش آنالیز مواد برای ماده آلومینیوم با استاندارد ASTM E1251 و برای ماده مس با استاندارد BS DIN EN 15079 انجام شد. در جدول‌های ۲ و ۳ درصد عناصر لوله‌های آلومینیوم و مس داده شده است.

جدول ۱ مشخصات شیاره‌های نمونه‌های آلومینیومی

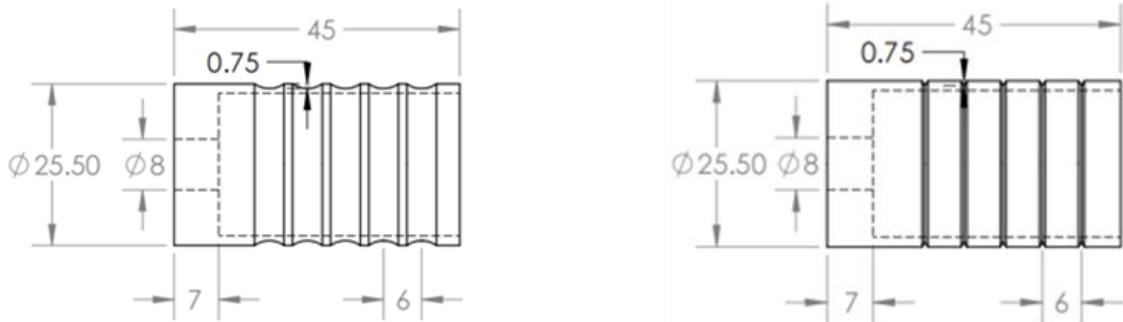
نمونه	شکل هندسی شیار	عمق شیار (mm)	گام شیار (mm)
۱	نیم‌دایره	۰/۵	۶
۲	نیم‌دایره	۰/۵	۸
۳	نیم‌دایره	۰/۷۵	۶
۴	نیم‌دایره	۰/۷۵	۸
۵	مثلث	۰/۵	۶
۶	مثلث	۰/۵	۸
۷	مثلث	۰/۷۵	۶
۸	مثلث	۰/۷۵	۸

جدول ۲ عناصر آلیاژی آلومینیوم ۶۰۶۱

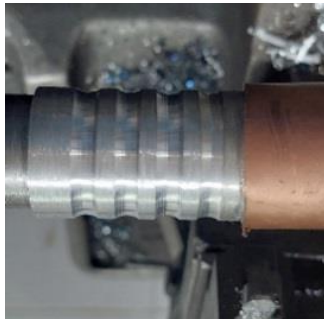
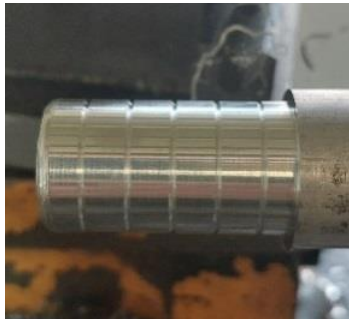
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ni	Ti	Sn	V	Ca	Cd	Co	Ga	Sb	B	Bi	Al
۰/۳۶۶	۰/۵۰۸	۰/۲۴۴	۰/۱۶۲	۱/۰۴۷	۰/۰۷۰	۰/۱۴۵	۰/۰۰۲	۰/۰۲۵	۰/۰۰۳	۰/۰۱۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۸	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷	۹۷/۳۷۶

جدول ۳ عناصر آلیاژی مس تجاری ۱۲۲۰۰

Sn	P	Fe	Cr	Co	Sb	Te	Bi	Zr	Cu
۰/۰۰۱	۰/۰۳۹	۰/۰۰۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۴	۰/۰۱۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۹۹/۹۲۵



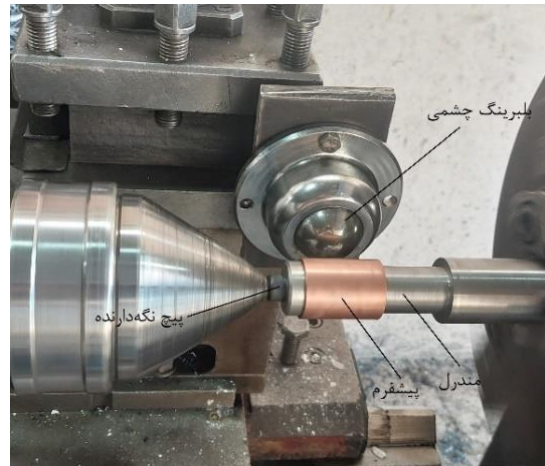
شکل ۳ دو نمونه از ابعاد پیش‌فرم‌های آلومینیومی



شکل ۴ پیش‌فرم آلومینیومی پس از عملیات شیارزنی

۲-۲- آزمایش‌های تجربی

در این تحقیق فرایند فلوفرمینگ مستقیم با استفاده از یک بلبرینگ که بر روی دستگاه تراش نصب شد، مورد آزمایش قرار گرفت. عملیات فلوفرمینگ با سرعت پیشروی ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه، میزان عمق باردهی ۰٫۷۵ میلی‌متر و با سرعت اسپیندل ۱۴۰ دور بر دقیقه انجام شد. شکل ۵ تجهیزات آماده شده و نحوه قرارگیری و تنظیمات آن روی دستگاه تراش و همچنین ابعاد بلبرینگ استفاده شده در تحقیق را نشان می‌دهد. در ابتدا پس از تهیه کردن تجهیزات آزمایشگاهی، جهت اطمینان از سازوکار و نحوه عملکرد فرایند، آزمایش‌های اولیه انجام شد. این آزمایش‌ها در دو پاس انجام شد و لوله‌ها به صورت پرسی و با فشار مرغک دستگاه تراش، روی مندرل قرار گرفتند. شکل ۶ یک نمونه آزمایش را قبل و بعد از فرایند فلوفرمینگ را نشان می‌دهد.

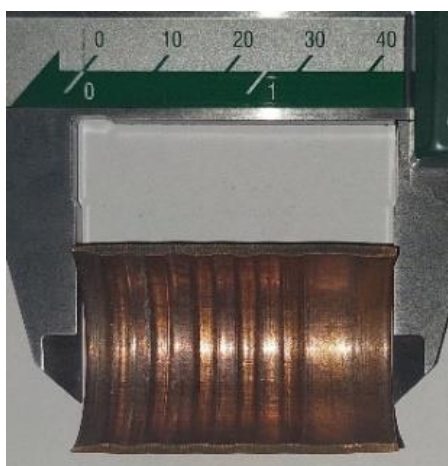


شکل ۵ سوار شدن قطعات روی دستگاه تراش و ابعاد بلبرینگ استفاده شده به عنوان ابزار فلوفرمینگ

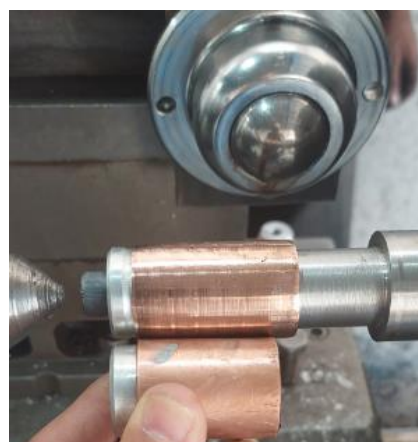


شکل ۶ لوله تولید شده دو لایه به روش فلوفرمینگ

نمونه‌های اولیه به منظور مشاهده و اندازه‌گیری نفوذ جریان مواد به داخل شیارهای آلومینیومی، با دستگاه وایرکات^۱ برش داده شدند. شکل ۷ چند نمونه از لوله‌های مسی برش خورده و جدا شده از لوله‌های آلومینیومی بعد از عملیات فلوفرمینگ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود سطح داخلی لوله مسی به داخل شیارهای لوله آلومینیومی نفوذ کرده است. در شکل ۸ نمای برش خورده از لوله دو لایه نشان داده شده است که در آن پرشدگی شیارهای لوله آلومینیومی توسط مواد جریان یافته از لوله مسی در اثر فشار بلبرینگ در حین فرایند فلوفرمینگ کاملاً مشهود است.



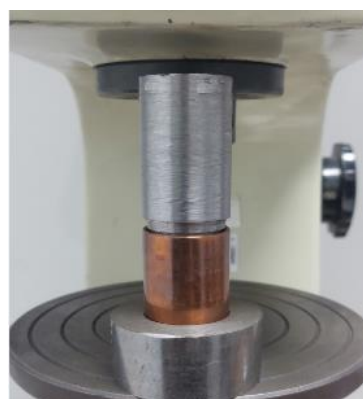
شکل ۷ نمونه فلوفرمینگ و برش خورده با دستگاه وایرکات



شکل ۸ الف) نمونه دو لایه قبل و بعد از فلوفرمینگ، ب) نحوه شکل‌گیری شیارهای لوله مسی

^۱ Wire Cut

پس از عملیات فلوفرمینگ و تولید لوله دو لایه آلومینیومی-مسی، جهت مشخص نمودن استحکام اتصال این لوله‌ها و مشخص نمودن مقدار نیروی قابل تحمل برای جدایش از یکدیگر، آزمون پوسته کنی توسط دستگاه کشش Zwick roell انجام شد. به منظور انجام این تست، یک فیکسچر به منظور قرارگیری لوله‌ها در آن ساخته شد، به طوری که لوله‌ها به طور کامل درون سوراخ فیکسچر قرار گیرند و لوله داخلی که لوله آلومینیومی است، به طور آزادانه و با تفرانس لقی بعد از اعمال نیرو و جابه‌جایی درون سوراخ فیکسچر حرکت کند و لوله مسی با ثابت شدن روی پله‌ای که درون سوراخ فیکسچر است جابه‌جا نشود. همچنین یک سنبه به منظور اعمال فشار بر روی لبه لوله آلومینیومی طراحی شد. در نتیجه با اعمال نیرو بر روی سنبه‌ای که داخل لوله آلومینیومی است و ثابت شدن لوله مسی روی لبه قالب، آزمایش مورد نظر انجام شد، به طوری که لوله آلومینیومی همراه با سنبه حرکت کرده و از درون لوله مسی جدا شد. شکل ۹ نحوه قرارگیری نمونه‌ها برای انجام آزمایش را نشان می‌دهد. سرعت حرکت فک‌های دستگاه فشار در این تحقیق، ۳ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. با برقراری تماس میان سطح سنبه و فک دستگاه، بارگذاری شروع می‌شود. برای تمام نمونه‌ها جابجایی ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد، که در این مقدار جابجایی استخراج ماکزیمم نیروی جدایش لوله‌های تولید شده، حائز اهمیت است.

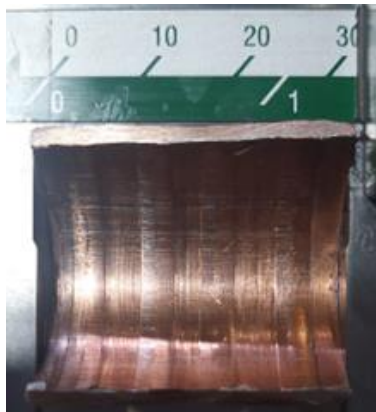


شکل ۹ نحوه قرارگیری سنبه و نگه‌دارنده روی دستگاه آزمون فشار Zwick-roell

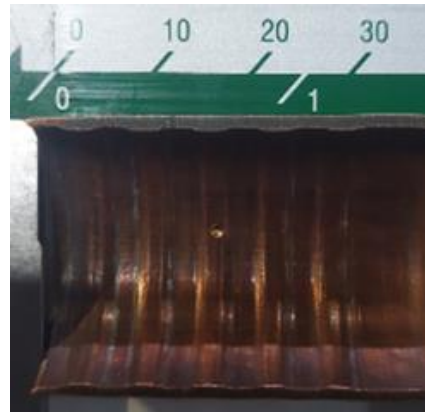
۳- نتایج و بحث

تغییر شکل و نمای برش خورده لوله مس برای تمامی هشت نمونه ذکر شده بعد از آزمون پوسته کنی مورد بررسی قرار گرفت. این مجموعه اشکال مربوط به تغییر شکل لایه مس می‌باشد که در آزمون فشار بر نمونه جفت شده آلومینیوم-مس فلوفورمینگ شده، ایجاد شده است. به طور کلی آزمون پوسته کنی سبب می‌گردد که شیاردار ایجاد شده بر روی ماده مس توسط فرایند فلوفورمینگ از بین رفته و نمونه‌های جفت شده از درون یکدیگر خارج شوند که چند نمونه از لوله‌های مسی پس از خروج در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. با توجه به این تصاویر مشخص است که نمونه چهارم پس از آزمون فشار نیز هنوز دارای شیارهایی نمایان و محسوس می‌باشد و در مقابل نمونه پنجم کمترین اثر از شیاردار را به نمایش گذاشت. این نتیجه نیز با توجه به پارامترهای فرایند فلوفورمینگ یعنی تعداد گام، نوع و عمق شیاردار قابل استنتاج است. طبیعتاً نمونه‌ای که مقدار ماده بیشتری درون شیاردار دارد اثر پررنگ‌تری در آزمون فشار است. به همین سبب نمونه چهارم که از نوع شیاردایروی با عمق ۰٫۷۵ میلی‌متر است دارای شیاره‌های نمایان‌تر، پس از آزمون فشار است و بالعکس نمونه پنجم که از نوع شیاردای مثلثی با عمق ۰٫۵ میلی‌متر است دارای شیاره‌های غیر محسوس‌تر، پس از آزمون فشار می‌باشد.

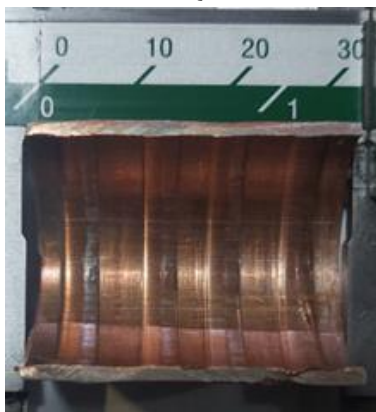
در شکل ۱۱ نمودارهای نیرو-جابجایی آزمون پوسته کنی برای نمونه‌های فلوفورمینگ با توجه به اشکال شیاردار در جدول ۱ گزارش شده است که مقادیر نیروی جدایش برای هر کدام از حالات است. همان‌گونه که از این مجموعه اشکال مشخص است، تمامی نمودارها، به کلی رفتار افزایشی و سپس کاهش را نشان می‌دهند. هر چند که رفتار نمونه ۳ متفاوت است. رفتار این نمودارها نشان می‌دهد که مقادیر نیرو، ابتدا روندی صعودی و سپس نزولی به خود می‌گیرند. این نتیجه مرتبط با قفل‌شدگی شیاردار در هر نمونه است. نخست فرایند درگیر شدن شیاردار درون یکدیگر باعث می‌شود که روند نمودار کاملاً صعودی باشد، اما بعد از خروج شیاردار از یکدیگر نمودارها شروع به افت می‌کنند، زیرا از این ناحیه به بعد فرایند فشار تنها سبب لهیدگی لوله‌های مسی و آلومینیومی می‌شود و دیگر نیرویی صرف جدایش نمونه‌ها نمی‌شود. به عبارت دیگر مقدار بیشینه نیرو، نشان دهنده لحظه جدایش نمونه‌ها و مقدار نیروی متناسب با آن است. با توجه به این توضیح، مقدار بیشینه نیروی لازم جهت جدایش نمونه‌های مختلف گزارش شده است.



نمونه ۲



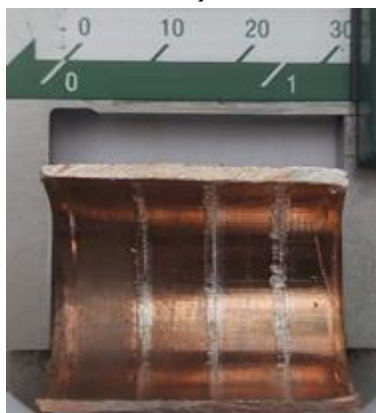
نمونه ۱



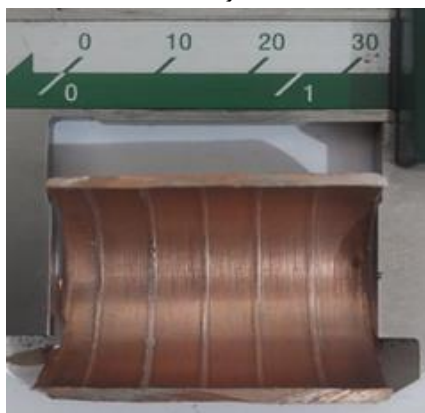
نمونه ۴



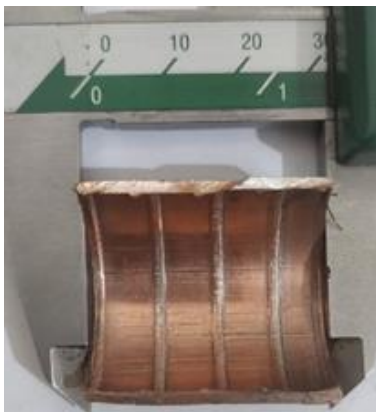
نمونه ۳



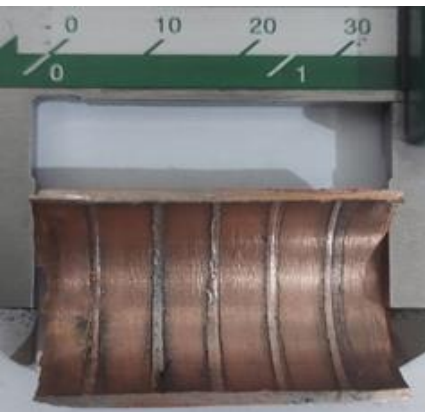
نمونه ۶



نمونه ۵

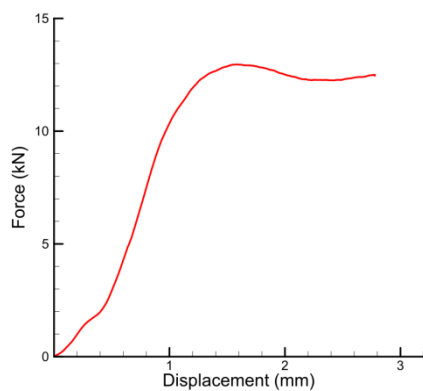


نمونه ۸

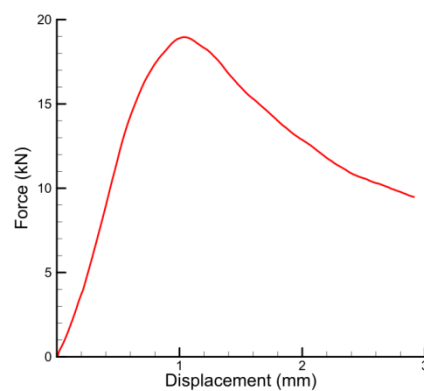


نمونه ۷

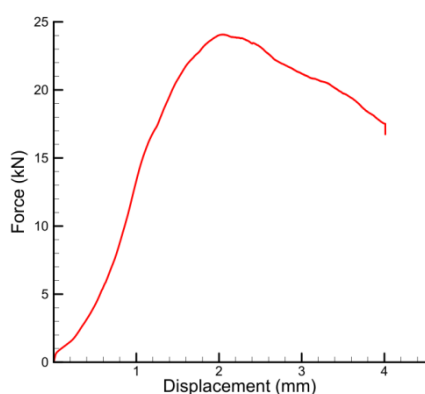
شکل ۱۰ لوله‌های مسی پس از آزمون پوسته کنی



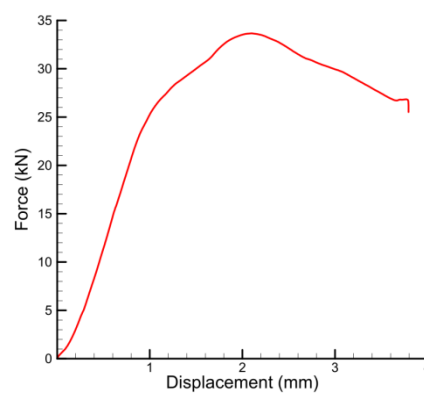
نمونه ۲



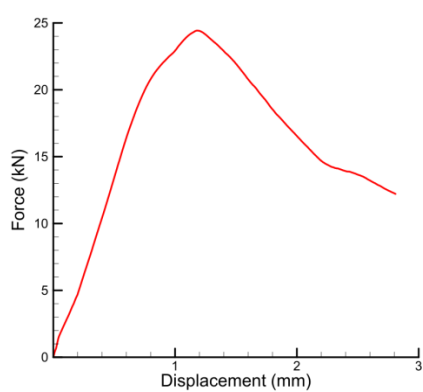
نمونه ۱



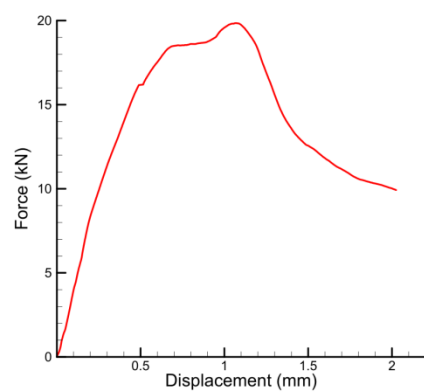
نمونه ۴



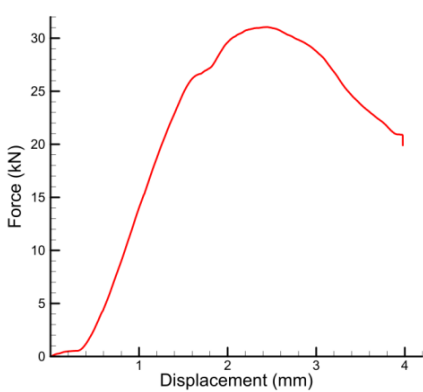
نمونه ۳



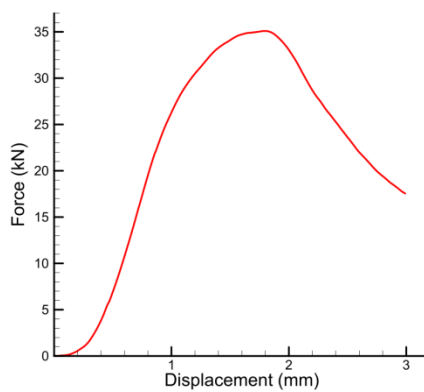
نمونه ۶



نمونه ۵



نمونه ۸



نمونه ۷

شکل ۱۱ نمودار نیرو-جابجایی مربوط به آزمون پوسته کنی

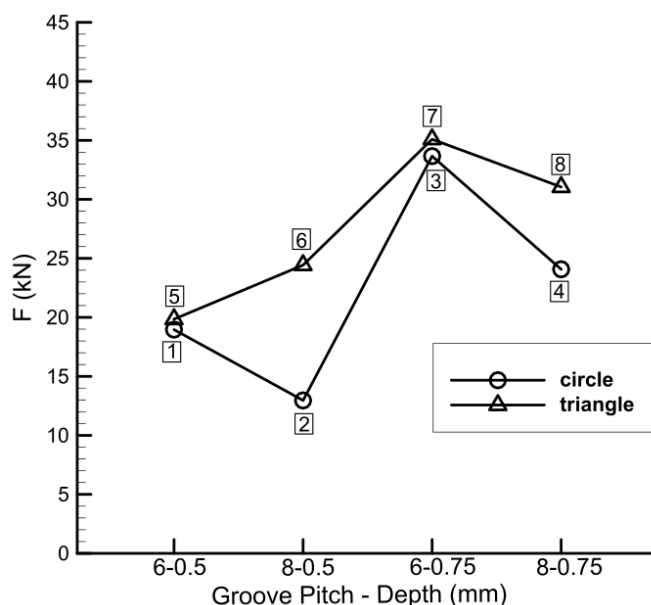
در جدول ۴ بیشینه مقادیر نیروی جدایش در آزمون فشار تجربی برای هر کدام از نمونه‌ها آورده شده است. همان‌گونه که از این جدول مشخص است، افزایش گام شیار، سبب کاهش و افزایش عمق شیار موجب افزایش مقدار نیروی بیشینه می‌شود. در مورد شیارهای دایره‌ای، افزایش گام شیار سبب کاهش حدوداً ۳۳ درصدی نیرو شده است، به طوری که از حدود ۱۹ کیلو نیوتن به حدود ۱۳ کیلو نیوتن در عمق شیار ۰,۵ میلی‌متری و از حدود ۳۴ کیلو نیوتن به ۲۴ کیلو نیوتن در عمق شیار ۰,۷۵ میلی‌متر رسید. همچنین مشاهده می‌شود که به جز نمونه ۵ و ۶ که استثنا هستند، افزایش عمق شیار از ۰,۵ به ۰,۷۵ تقریباً سبب دو برابر شدن نیرو در نمونه‌ها شده است. طبیعتاً افزایش عمق شیار موجب درگیری بیشتری مقدار دو ماده در داخل یکدیگر می‌شود و این یعنی مقدار نیروی بیشتری جهت جدایش لازم است. همچنین از سویی کاهش گام‌های شیار، سبب می‌شود که شیارها به یکدیگر نزدیک‌تر شوند و در نتیجه میزان نفوذ جریان مواد به داخل شیارها بیشتر شده و قفل شدگی بیشتر اثر می‌کند. اما آنچه که مورد توجه است کم بودن اثر گام شیار در بیشینه نیروی جداسازی نسبت به عمق شیار است. همچنین قابل توجه است که استفاده از شیار مثلثی نسبت به شیار دایره‌ای دارای نیروی جدایش بیشتری در حالت مشابه عمق و گام است که به نحوه نوع درگیری هر شیار برمی‌گردد.

جدول ۴ بیشینه نیروی جدایش در نمونه‌های تجربی

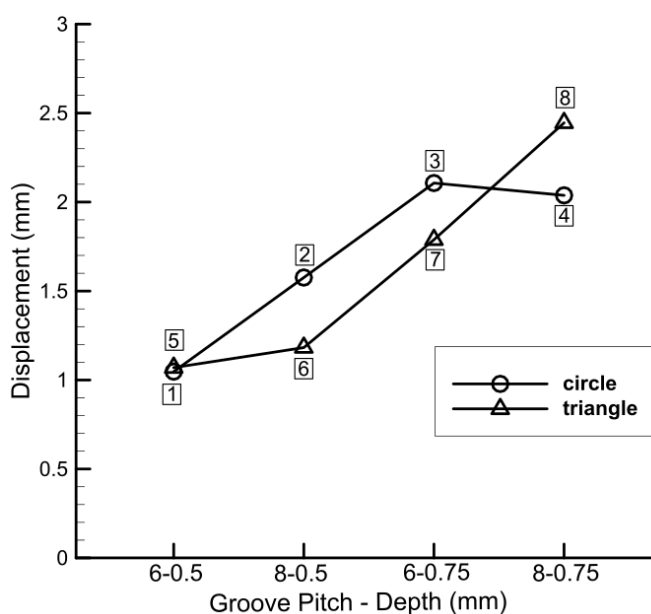
شماره نمونه	نوع شیار	گام شیار (mm)	عمق شیار (mm)	بیشینه نیروی جدایش (kN)	جابجایی در نیروی ماکزیمم (mm)	کار تغییرشکل تا نیروی ماکزیمم (N.m)
۱	دایره	۶	۰/۵	۱۸/۹۶	۱/۰۴۷	۱۱/۶۸۰
۲	دایره	۸	۰/۵	۱۲/۹۵۹	۱/۵۷۶	۱۰/۹۳۲
۳	دایره	۶	۰/۷۵	۳۳/۶۶۳	۲/۱۰۷	۴۵/۴۲۲
۴	دایره	۸	۰/۷۵	۲۴/۰۷۳	۲/۰۳۸	۲۶/۰۴۳
۵	مثلثی	۶	۰/۵	۱۹/۸۴۷	۱/۰۷۰	۱۵/۰۶۸
۶	مثلثی	۸	۰/۵	۲۴/۴۲۸	۱/۱۸۲	۱۷/۲۰۴
۷	مثلثی	۶	۰/۷۵	۳۵/۰۹۲	۱/۷۸۸	۳۴/۹۶۷
۸	مثلثی	۸	۰/۷۵	۳۱/۰۴۹	۲/۴۴۵	۴۱/۳۹۸

در شکل ۱۲ نیروی جدایش لایه‌ها در نمونه‌های شیاردار دایره‌ای و مثلثی با هم مقایسه شده‌اند. نیروی جدایش نمونه‌های ۱ با ۵ (گام ۶ میلی‌متر و عمق ۰,۵ میلی‌متر) با هم برابرند (حدوداً ۱۹ کیلو نیوتن) و نیروی جدایش نمونه‌های ۳ و ۷ (گام ۶ میلی‌متر و عمق ۰,۷۵ میلی‌متر) با هم تقریباً برابر هستند (به ترتیب ۳۳ و ۳۵ کیلو نیوتن). با مقایسه نمونه‌های ۲ و ۶ (گام ۶ میلی‌متر و عمق ۰,۷۵ میلی‌متر) مشخص می‌شود که نیروی جدایش نمونه شیاردار دایره‌ای ۱۳ کیلو نیوتن و نیروی جدایش نمونه شیار مثلثی تقریباً ۲۴ کیلو نیوتن است. همچنین با مقایسه نمونه‌های ۴ و ۸ (گام ۸ میلی‌متر و عمق ۰,۷۵ میلی‌متر) نیز مشخص می‌شود که نمونه شیاردار دایره‌ای نیروی جدایش کمتری دارد (۲۴ کیلو نیوتن در مقابل ۳۱ کیلو نیوتن). بنابراین در نمونه‌های با گام ۶ میلی‌متر نیروی جدایش نمونه‌های دایره‌ای و مثلثی برابر است، اما با گام ۸ میلی‌متر نمونه مثلثی نیروی جدایش بیشتری را نشان داده است. در نمونه ۸ میلی‌متر تعداد ۴ شیار حلقوی وجود دارد و در نمونه با گام ۶ میلی‌متر تعداد ۵ شیار حلقوی روی نمونه ایجاد شده است. در نمونه دایره‌ای تعداد کمتر شیار اثر نامطلوب نسبت به نمونه مثلثی دارد و قفل شدگی کمتری را در آزمایش ایجاد کرده است. به طور کلی از نمودار شکل ۱۲ این نتیجه گرفته می‌شود که نمونه‌های مثلثی نسبت به نمونه‌های دایره‌ای تحمل نیروی بیشتری داشته‌اند و هنگامی که گام کوچک شده است نیروهای نمونه‌های دایره‌ای نیز زیاد شده است.

در شکل ۱۳ مقدار جابجایی تا رسیدن به نیروی جدایش ماکزیمم در نمونه‌های شیار دایره‌ای و مثلثی نشان داده شده است. در حالت گام ۶ میلی‌متر و عمق ۰,۵ میلی‌متر، نمونه‌های ۱ و ۵ مقدار جابجایی برابر حدود ۱ میلی‌متر و نیروی برابری هم داشتند. برای گام ۸ میلی‌متر و عمق ۰,۵ میلی‌متر، نمونه دایره‌ای ۲ از نمونه ۶ جابجایی بیشتری داشته است (جابجایی ۱,۵۷۶ میلی‌متر در برابر ۱,۱۸۲ میلی‌متر)، اما نیروی کمتری تحمل کرده است. برای گام ۶ میلی‌متر و عمق ۰,۷۵ میلی‌متر، جابجایی نمونه دایره‌ای بیشتر بوده است (جابجایی ۲,۱۰۷ میلی‌متر در برابر ۱,۷۸۸ میلی‌متر) اما نیروی یکسان داشتند. برای گام ۸ میلی‌متر و عمق ۰,۷۵ میلی‌متر، نمونه مثلثی با جابجایی ۲,۴۴۵ میلی‌متر مقدار بیشتری نسبت به نمونه دایره‌ای با جابجایی ۲,۰۳۸ میلی‌متر داشته است و نیروی بیشتری هم تحمل کرده است.

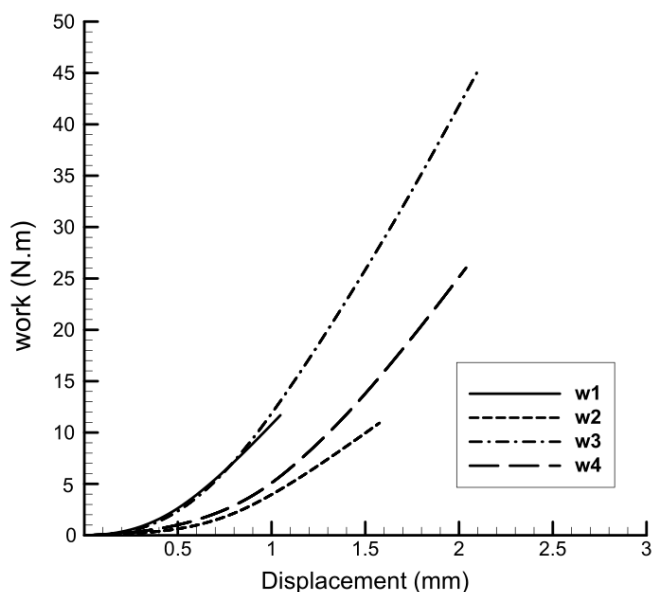


شکل ۱۲ مقایسه نیروی جدایش لایه‌ها برای نمونه‌های شیاردار مثلثی و دایره‌ای

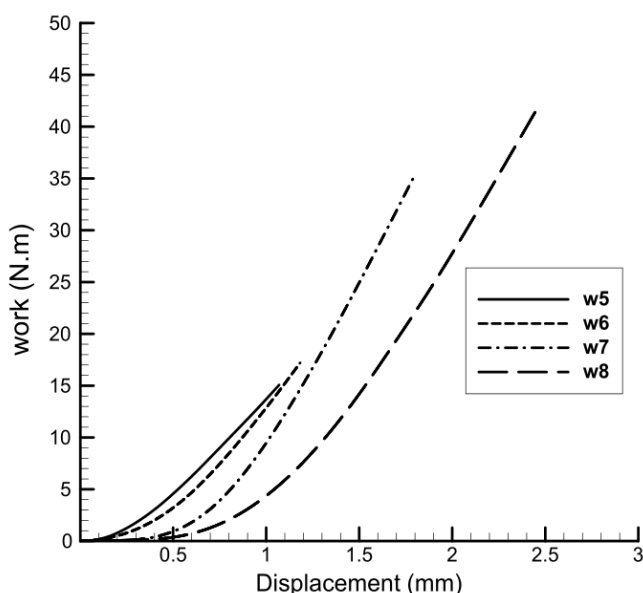


شکل ۱۳ مقایسه مقدار جابجایی در نیروی جدایش ماکزیمم در نمونه‌های شیاردار دایره‌ای و مثلثی

برای مقایسه نتایج، مساحت سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی تا نقطه ماکزیمم نیرو که همان کار انجام شده تا رسیدن به نقطه بحرانی باشد محاسبه شده و در نمودارهای شکل ۱۴ برای نمونه‌های شیاردار دایره‌ای و در نمودارهای شکل ۱۵ برای نمونه‌های مثلثی نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل ۱۴، نمودارهای کار مربوط به نمونه‌هایی که گام شیاردار برابر دارند (۱ با ۳ و ۲ با ۴) به هم نزدیک هستند، اگر چه به یک اندازه ادامه پیدا نکرده‌اند. برای جداسازی نمونه‌های ۳ و ۴ که عمق شیاردار بیشتری داشته‌اند، کار بیشتری انجام شده است. در این حالت به علت عمق درگیری بیشتر لایه‌ها، عبور لایه‌ها از روی هم سخت‌تر بوده است. نمونه ۳ بهترین نتایج را نشان داده است، به این دلیل که گام شیاردار کمتر و عمق شیاردار بیشتری داشته است. با توجه به شکل ۱۵، نمودارها برای دو نمونه ۵ و ۶ با عمق شیاردار ۰.۵ میلی‌متر تقریباً به هم نزدیک هستند؛ اما برای دو نمونه ۷ و ۸ با عمق شیاردار ۰.۷۵ میلی‌متر از هم فاصله دارند. نمونه شماره ۸ با عمق شیاردار ۰.۷۵ میلی‌متر و گام ۸ میلی‌متر نتایج بهتری نسبت به نمودارهای دیگر دارد.

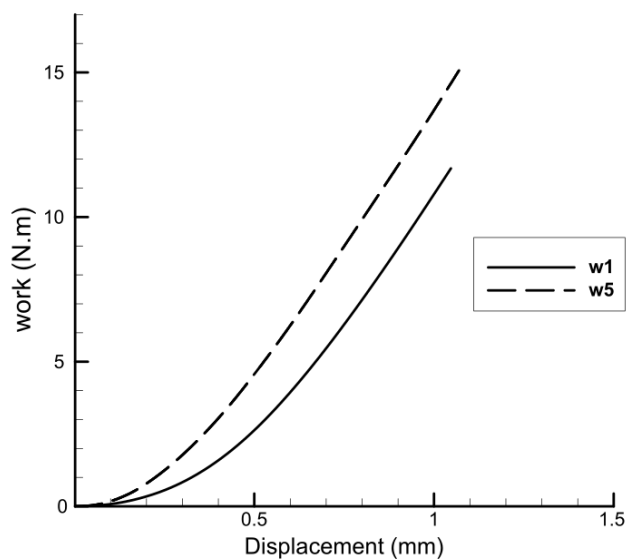


شکل ۱۴ نمودار کار انجام شده بر روی نمونه‌های دایره‌ای

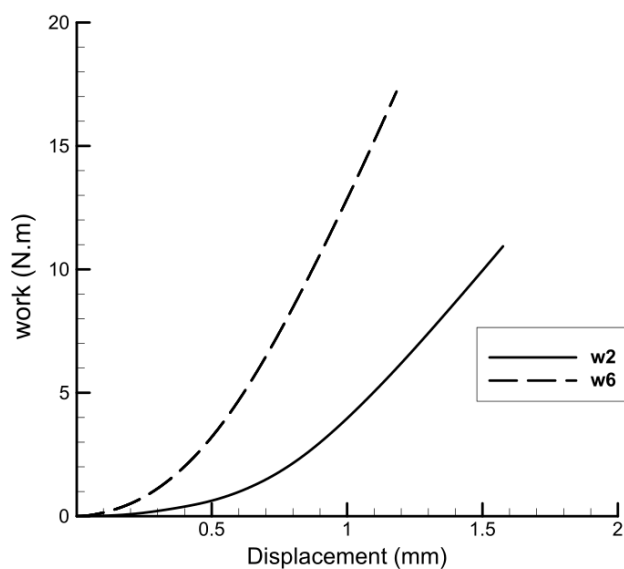


شکل ۱۵ نمودار کار انجام شده بر روی نمونه‌های مثلثی

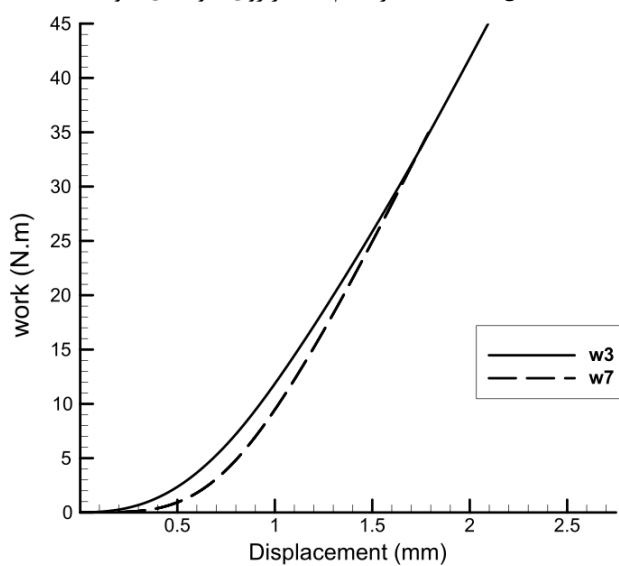
برای مقایسه بین شیاره‌های دایره‌ای و مثلثی نتایج برای نمونه‌های با شکل هندسی مشابه از جدول ۱ با هم مقایسه شده‌اند. از شکل ۱۶ مشخص است که کار انجام شده بر روی نمونه مثلثی ۵ در شرایط گام ۶ میلی‌متر و عمق ۰٫۵ میلی‌متر بیشتر از نمونه دایره‌ای ۱ است؛ البته رفتار دو نمونه مشابهت دارد. با توجه به شکل ۱۷، در نمونه مثلثی ۶ نسبت به نمونه دایره‌ای ۲ در شرایط گام ۸ میلی‌متر و عمق ۰٫۵ میلی‌متر، کار بیشتری انجام شده است و نمودارها خیلی از هم فاصله دارند. در شکل ۱۸ نمودارها به هم نزدیک هستند و بر روی نمونه دایره‌ای ۳ کار بیشتری نسبت به نمونه مثلثی ۷ انجام شده است، به دلیل اینکه جابجایی بیشتری تا نقطه ماکزیمم نیرو طی شده است. مطابق شکل ۱۹ نمودارهای نمونه‌های دایره‌ای ۴ و مثلثی ۸ بر هم منطبق هستند و بر روی نمونه مثلثی کار بیشتری تا نقطه ماکزیمم نیرو انجام شده است. با توجه به نمودارها مشخص است که در شرایط عمق بیشتر کار بیشتری برای جداسازی نمونه‌ها لازم است و در شرایط عمق بیشتر اگر از گام کوچک‌تر استفاده شود نمونه دایره‌ای برتری داشته است و اگر از گام بزرگ‌تر استفاده شود نمونه مثلثی برتری نشان داده است. بهترین نتایج برای نمونه‌های ۳ و ۸ بوده است که با توجه به جدول ۴ نیروی زیادی تحمل کرده‌اند و جابجایی تا نقطه ماکزیمم نیروی آنها نیز زیاد بوده است.



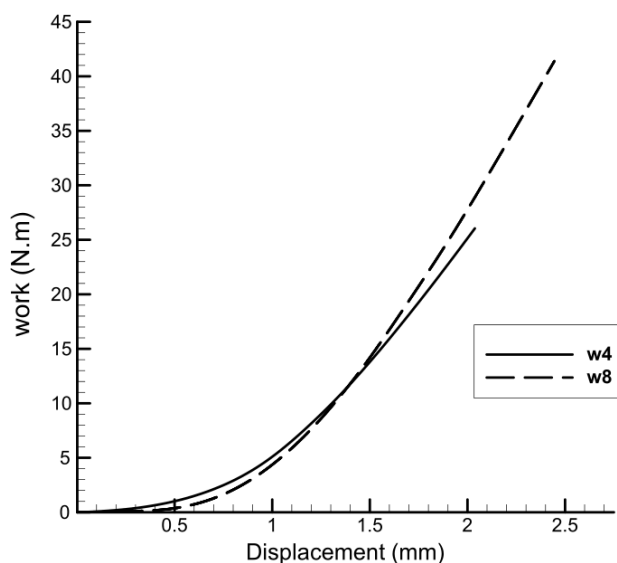
شکل ۱۶ مقایسه کار انجام شده بر روی نمونه‌های ۱ و ۵



شکل ۱۷ مقایسه کار انجام شده بر روی نمونه‌های ۲ و ۶



شکل ۱۸ مقایسه کار انجام شده بر روی نمونه‌های ۳ و ۷



شکل ۱۹ مقایسه کار انجام شده بر روی نمونه‌های ۴ و ۸

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق فرایند فلوفرمینگ لوله دو لایه مس-آلومینیوم به روش تجربی مطالعه شده است. برای اتصال بهتر از ایجاد شیاردار بر روی سطح خارجی لوله هسته کمک گرفته شد. به طوری که لوله پوسته پس از شکل‌دهی شیادهای لوله هسته را پر کند و اتصال مقاوم‌تری به وجود آید. نتایج زیر از آزمایش‌ها به دست آمده‌اند:

- پارامترهای هندسه، عمق و گام شیاردار بر روی استحکام لوله دو لایه در برابر جدا شدگی تأثیر داشته‌اند.
- شکل هندسی مثلثی استحکام بیشتری را در مقایسه با شکل هندسی دایره‌ای نشان داده است. عبور لایه‌های مس و آلومینیوم در حالت مثلثی از روی هم مشکل‌تر بود.
- نیروی جدایش برای نمونه‌های دایره‌ای و مثلثی وقتی عمق شیاردار کم است مشابه بوده و تفاوت چندانی نداشتند.
- در حالتی که عمق شیاردار زیاد است نمونه‌های مثلثی نسبت به نمونه‌های دایره‌ای مقاوم‌تر بوده‌اند. به دلیل اینکه قفل‌شدگی مس درون شیاردار بیشتر از حالت دایره‌ای بوده است و لغزش لایه‌ها از روی هم در آزمایش فشار سخت‌تر بوده است.
- میزان جابجایی نمونه‌های دایره‌ای برای رسیدن به نیروی ماکزیمم بیشتر بوده است. فقط هنگامی که عمق زیاد شود جابجایی نمونه مثلثی افزایش یافته است.
- نمودارهای کار انجام شده برای نمونه‌های دایره‌ای و مثلثی هنگامی که عمق شیاردار زیاد است، مشابه بوده‌اند، اما مقدار کار نهایی تا رسیدن به نیروی ماکزیمم متفاوت بود.

References

- [1] Wong CC, Dean TA, Lin J. A review of spinning, shear forming and flow forming processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003 Nov; 43(14):1419-35. doi: 10.1016/S0890-6955(03)00172-X
- [2] Liu Y, Wang J, Cheng H, Sun Y. Kinematics Analysis of the Roller Screw Based on the Accuracy of Meshing Point Calculation. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015 Jan; 2015(1):303972. doi: 10.1155/2015/303972
- [3] Podder B, De T, Saikumar S, Kumar KR. Process capability study of flow formed shell diameter. *Materials Today: Proceedings*. 2018 Jan 1;5(13):27094-9. doi: 10.1016/j.matpr.2018.09.015
- [4] Runge M. Spinning and flow forming: spinning and flow forming technology, product design, equipment, control systems. Verlag Moderne Industrie; 1994.
- [5] Klocke F, Brummer CM. Laser-assisted metal spinning of challenging materials. *Procedia Engineering*. 2014 Jan 1;81:2385-90. doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.338
- [6] Khodadadi M, Khalili K, Ashrafi A. Optimizing parameters effective on built-up edge in internal gear flowforming process. *Sādhanā*. 2022 Jun;47(2):99. doi: 10.1007/s12046-022-01860-z

- [7] Khodadadi M, Khalili K, Ashrafi A. Single-and multi-objective optimization of internal gear flowforming process based on increasing tooth height and reducing force and built-up edge. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering. 2022 Oct 28;47(1):43-53. doi: [10.1139/tcsme-2022-0073](https://doi.org/10.1139/tcsme-2022-0073)
- [8] Zixuan LI, Rezaei S, Tao WA, Jianchao HA, Xuedao SH, Pater Z, Huang Q. Recent advances and trends in roll bonding process and bonding model: A review. Chinese Journal of Aeronautics. 2023 Apr; 36(4):36-74. doi: [10.1016/j.cja.2022.07.004](https://doi.org/10.1016/j.cja.2022.07.004)
- [9] Zhang Z, Xu W, Shan D. An analytical model on spin-bonding of composite tube. Procedia Engineering. 2014 Jan 1;81:2024-9. doi: [10.1016/j.proeng.2014.10.275](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.275)
- [10] Mohebbi MS, Akbarzadeh A. Fabrication of copper/aluminum composite tubes by spin-bonding process: experiments and modeling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011 Jun;54:1043-55. doi: [10.1007/s00170-010-3016-5](https://doi.org/10.1007/s00170-010-3016-5)
- [11] Jiang S, Ren Z, Li C, Xue K. Role of ball size in backward ball spinning of thin-walled tubular part with longitudinal inner ribs. Journal of Material Processing Technology. 2009 Feb 19; 209(4):2167-2174. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2008.05.006](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.05.006)
- [12] Hong SI, Rhee SH, Yun SJ. A Study on the Neck-in Process by Flow-forming. Metals and Materials. 1998 Aug;4:895-8. doi: [10.1007/BF03026419](https://doi.org/10.1007/BF03026419)
- [13] Jiang SY, Ren ZY, Bin WU, Wu GX. General issues of FEM in backward ball spinning of thin-walled tubular part with longitudinal inner ribs. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2007 Aug 1;17(4):793-8. doi: [10.1016/S1003-6326\(07\)60176-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(07)60176-9)
- [14] Guo X, Yu Y, Tao J, Wang H, El-Aty AA, Wang C, Luo X, Kim N. Maximum residual contact stress in spinning process of SS304/20 bimetallic pipe. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020 Feb;106:2971-82. doi: [10.1007/s00170-019-04774-z](https://doi.org/10.1007/s00170-019-04774-z)
- [15] Rezaei Ashtiani H, Ahari A. Fabrication of two layer Al/Cu rods using hot forward extrusion. Iranian Journal of Manufacturing Engineering, 2019 Sep; 6(4): 7-13. [In Persian]
- [16] Afshari H, Ashrafi A. Experimental and numerical study of the hydroforming process of copper-aluminum double layered tube. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 May 22;10(3):18-33. doi: [10.22034/ijme.2023.424349.1873](https://doi.org/10.22034/ijme.2023.424349.1873) [In Persian]
- [17] Fatemeh B, Elyasi M, Mohammad JM, Rohollah J. The effect of surface shape on the production of aluminum-copper two layer tubes using forward extusion process. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2020 Jan 21;6(8):1-9. [In Persian]