



## تأثیر شکل سطح بر تولید لوله‌های دو لایه آلومینیوم-مس با استفاده از فرایند اکستروژن مستقیم

فاطمه برندار<sup>1</sup>، مجید الیاسی<sup>2\*</sup>، محمدجواد میرنیا<sup>3</sup>، روح الله جماعتی<sup>4</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

4- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

\* بابل، صندوق پستی 484، elyasi@nit.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 20 اسفند 1397

پذیرش: 28 اردیبهشت 1398

ارائه در سایت: دی 1398

کلیدواژگان:

شکل‌دهی لوله دو لایه

اثر شکل سطح

اکستروژن مستقیم

آزمون لهیدگی

استفاده از لوله‌های دولایه به دلیل بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی آن نسبت به لوله‌های تک لایه، مورد توجه صنایع مختلف قرار گرفته است. این لوله‌ها به روش‌های مختلفی تولید می‌شوند اما به دلیل حالت تنش فشاری در فرایند اکستروژن که امکان ایجاد باندهای متالورژیکی بین دو فلز را افزایش می‌دهد این فرایند برای ساخت میله‌ها و لوله‌های دولایه مناسب‌تر است. در این پژوهش تأثیر شکل سطح لوله بر تولید لوله‌های دولایه در دو حالت مس پوسته- آلومینیوم هسته و برعکس، به روش اکستروژن مستقیم مورد بررسی قرار گرفته است. جهت دستیابی به اتصال مکانیکی مناسب و کیفیت مطلوب اتصال، لوله‌ها در سه حالت مختلف آماده‌سازی شدند. بدین ترتیب که شیارهایی بین دولایه ایجاد گردید تا لایه‌ها در هم قرار گیرند و توسط فرایند اکستروژن فضای خالی لایه‌ها پر گردید. در نهایت فرایند اکستروژن لوله دو لایه در دو نسبت 40 و 60 درصد انجام گرفت. بمنظور بررسی خواص مکانیکی، آزمون لهیدگی بر روی لوله‌های دولایه تولید شده توسط فرایند اکستروژن انجام شد. تصاویر میکروسکوپی در هر دو حالت مس پوسته- آلومینیوم هسته و برعکس نشان داد که ایجاد شیار در هر دولایه، سبب نفوذ و درآمیخته شدن مناسب دو جنس در یکدیگر می‌شود. همچنین نتایج آزمون لهیدگی لوله‌های دولایه نشان داد که لوله‌هایی که هر دو فلز دارای شیار بودند مقاومت بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها در برابر لهیدگی دارد.

## The effect of surface shape on the production of aluminum-copper two layer tubes using forward extrusion process

Fatemeh Barandar<sup>1</sup>, Majid Elyasi<sup>1\*</sup>, Mohammad Javad Mirnia<sup>1</sup>, Rohollah Jamaati<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Department of Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

\* P.O.B. 484 Babol, Iran, elyasi@nit.ac.ir

## Article Information

Original Research Paper  
Received 10 March 2019  
Accepted 18 May 2019  
Available December 2019

## Keywords:

Formation of bimetal tubes  
Effect of surface shape  
Forward extrusion  
Crushing test

## Abstract

The use of bimetal tubes due to the improvement of its mechanical and physical properties compared to single layer tubes has been considered by various industries. These tubes are produced in a variety of processes, but because of the compressive stress in the extrusion process, this process is more suitable for making rods and tubes which increases the possibility of forming metallurgical bands between the two metals. In this study, the effect of the tube surface shape on the production of bimetal tubes in both copper shell and aluminum core and vice versa has been investigated through extrusion process. In order to achieve the proper mechanical connection and optimum connection quality, the tubes were prepared in three different surface shapes. In this way, grooves between the bimetal tubes were created to form the layers and were filled by the process of extrusion of the empty space of the layers. Finally, extrusion process of bimetal tubes was carried out in two extrusion ratio of 40 and 60 percent. In order to investigate the mechanical properties, the crushing test was performed on the produced bimetal tubes. Microscopic images in both copper shell and aluminum core and vice versa showed that the formation of the groove in each two-layers, causes the proper mixing between the two tube layers. Also, the results of the crushing test showed that the tubes with both grooves had better resistance than the other ones.

## 1- مقدمه

می‌شوند مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین به منظور جمع خواص چند ماده در کاربردهای مختلف، استفاده از مواد مرکب مورد نیاز می‌باشد. مواد چند لایه به دلیل این ویژگی خاصشان که نمی‌تواند در یک ماده منفرد پیدا شود، بسیار حائز اهمیت‌اند.

امروزه به دلیل نیاز به خواص بهبود یافته در قطعات مورد استفاده و کاهش هزینه تمام شده محصولات، استفاده از ماده مرکب پوششی که دو یا چند ماده در سطح تماس‌شان به هم متصل

## Please cite this article using:

F. Barandar, M. Elyasi, M. J. Mirnia, R. Jamaati, The effect of surface shape on the production of aluminum-copper two layer tubes using forward extrusion process, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 8, pp. 1-9, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

محور را به دست آوردند و در بخش تجربی نیز با ترکیب قالب‌ها و میله محورهای مخروطی و منحنی شکل به بررسی فرآیند پرداختند و در نهایت با انجام یک مقایسه میان نتایج تجربی و تحلیلی دلایل دقت کم روابط تحلیلی را ارزیابی کردند.

الکاراز و همکارانش [8] یک حل عددی برای اکستروژن لوله‌های دوفلزی از طریق قالب مخروطی با فرض جریان شعاعی و داشتن تقارن محوری استنباط کردند. آن‌ها شرایط فرایندی متفاوت و ترکیب‌های مختلفی را برای به دست آوردن ترازهای تنش در نواحی بحرانی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها حل دما را برای دو حالت که در یکی از آن‌ها ماده سخت‌تر به عنوان پوسته و در حالت دیگر از آن به عنوان هسته استفاده شده بررسی کردند. تأثیرات پارامترهای مختلف مانند تنش تسلیم مابین دو ماده، زاویه قالب و کسر حجمی ماده سخت‌تر را بر روی میدان تنش در لوله‌های دوفلزی، مورد بررسی قرار دادند و آن را برای همه حالت‌ها در نظر گرفتند.

عسگری و حقیقت [9] فرایند اکستروژن مستقیم و غیرمستقیم لوله‌های دوفلزی با پروفیل قالب دلخواه و میله محور متحرک را به روش کران بالا تحلیل و به روش اجزای محدود شبیه‌سازی کردند و به مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی پرداختند. همچنین در این پژوهش پارامترهای نیرو و جابجایی، طول و زاویه بهینه قالب ارزیابی گردید.

کریشنا و همکاران [10] تولید لوله‌های دو لایه از جنس فولاد-مس و آلومینیوم-مس را با فرایند متالورژی پودر مورد مطالعه قرار دادند. آنها اثر پارامترهای فرایند از جمله نسبت فشار، نسبت تراکم و نسبت حجم بر تغییر شکل و شکست دو فلز را در دو حالت لوله‌های با هسته نرم و هسته سخت، مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و نشان دادند که تمایل به شکست بسیار کمی در اکستروژن با هسته نرم مشاهده شد. همچنین دیده شد که استفاده از پیش‌شکل‌ها<sup>5</sup> به عنوان مواد اولیه، باعث کاهش تسریع شکست در اکستروژن لوله دو لایه با هسته نرم می‌شود. با این حال افزایش نسبت حجم، جریان غیریکنواخت را افزایش داده و منجر به شکستگی فلز پوسته می‌شود که می‌توان آن را با کم شدن نسبت چگالی کاهش داد. همچنین در اکستروژن لوله با هسته سخت جریان غیریکنواخت بیشتری وجود دارد که تمایل به شکست آن با افزایش حجم هسته سخت افزایش می‌یابد.

با توجه به بررسی پژوهش‌های انجام شده قبلی دیده می‌شود که هیچگونه کار پژوهشی یا مطالعه‌ای در زمینه آماده‌سازی

از پرکاربردترین مواد مرکب، مواد دوفلزی متشکل از آلومینیوم و مس هستند. یک لوله دوفلزی متشکل از مس و آلومینیوم 40 تا 60 درصد سبک‌تر و 30 تا 40 درصد ارزان‌تر می‌باشد [1]. خواص لوله‌های دو لایه شامل استحکام، رسانایی الکتریکی، مقاومت به خوردگی بالا توام با وزن کم سبب کاربرد این لوله‌ها در صنایع مختلف از جمله نفت و گاز، صنایع شیمیایی و الکتریکی شده است [2].

بین تمام فرایندهای شکل‌دهی<sup>1</sup> که توسط آن لوله دو لایه<sup>2</sup> تولید می‌شود اکستروژن چند مزیت منحصر به فرد دارد. به دلیل حالت تنش فشاری در این فرایند مواد با پلاستیسیته<sup>3</sup> پایین می‌توانند با این روش شکل یابند و این فرایند امکان ایجاد باندهای متالورژیکی بین دو فلز را می‌دهد. از این رو، این فرایند جهت تولید لوله‌های دو لایه بسیار مناسب است [3].

فرایند اکستروژن چند فلزی توسط هارتلی [4] در سال 1973 برای لوله‌های متشکل از سه لایه فلز و با قالب مخروطی به روش کران بالا مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، با فرض اینکه مواد صلب کاملاً پلاستیک هستند، اثر پارامترهایی مانند ثابت اصطکاک، نیم زاویه قالب، نسبت اکستروژن و شعاع میله محور<sup>4</sup> بر فشار نسبی اکستروژن بررسی گردید.

مؤمنی و همکاران [5] به بررسی تجربی تأثیر زاویه قالب متغیر بر نیروی مورد نیاز برای اکستروژن مستقیم و کیفیت ظاهری لوله دو لایه تولید شده توسط این فرایند پرداختند. نتایج نشان داد که با کاهش زاویه قالب، نیروی مورد نیاز برای لوله‌های دو لایه کاهش یافته و کیفیت ظاهری تولید بهبود می‌یابد.

کینزیویچ و همکاران [6] با استفاده از روش المان محدود و مدل‌سازی پلاستیسیته پلی‌کریستال، تأثیر سه طراحی قالب متمایز متقارن، موازی و مستقیم برای لوله‌های دوفلزی اکستروژن شده را بررسی کردند. هدف اصلی، به حداقل رساندن بارهای ماکزیمم برای رسیدن به کاهش نیروی یکسان اکستروژن بود. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد که طرح اکستروژن لوله‌ای متقارن در مقایسه با طراحی رایج اکستروژن مستقیم به ماکزیمم نیروی کمتری می‌رسد.

چیتکارا و الیم [7] انواع مختلف اکستروژن سرد مستقیم لوله را با روش‌های تحلیلی و تجربی بررسی کردند. آن‌ها در بخش تحلیلی پژوهش خود، با استفاده از روش تحلیل قاجی، معادلات مربوط به حالت کلی اکستروژن لوله با پروفیل دلخواه قالب و میله

<sup>1</sup> Metal forming

<sup>2</sup> Bimetal tube

<sup>3</sup> Plasticity

<sup>4</sup> Mandrel

<sup>5</sup> Preforms

انتخاب گردید و اجزای آن پس از ماشین‌کاری در دمای 860 درجه سانتی‌گراد به مدت 30 دقیقه درون کوره نگهداری شد و پس از اتمام مدت زمان، خنک‌کاری در روغن انجام گرفت.



Fig. 1 Bimetal tube for forward extrusion

شکل 1 لوله دو لایه جهت انجام فرایند اکستروژن مستقیم

جدول 2 ابعاد لوله‌ها و میله محور

Table 2 Dimensions of Tubes and mandrel

جنس لوله	قطر خارجی (mm)	قطر داخلی (mm)	طول (mm)
آلومینیوم	25	21	50
مس	28/75	25	50
میله محور	21	25	130

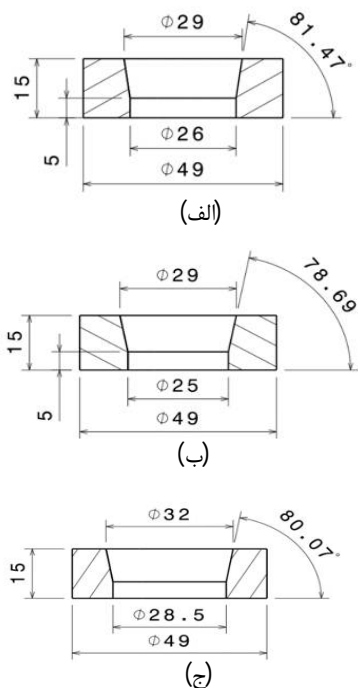


Fig. 2 Dimensions of dies using in forward extrusion process

شکل 2 ابعاد و اندازه ماتریس مورد استفاده در اکستروژن مستقیم

شکل سطح اولیه لوله‌ها بر نحوه اتصال لوله دو لایه در فرایند اکستروژن بررسی نشده است. لذا در این پژوهش تأثیر شکل سطح اولیه لوله بر نحوه اتصال‌پذیری لایه‌ها بررسی شده است.

## 2- مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایش‌های تجربی لوله‌هایی از جنس آلومینیوم آلیاژی 6063 با ترکیب شیمیایی ارایه شده در جدول 1 و مس خالص تجاری استفاده شده است. در پژوهش حاضر، دو گروه لوله دولایه ایجاد شد که در گروه اول لوله مس به عنوان لایه بیرونی و لوله آلومینیومی به عنوان لایه داخلی استفاده گردید. گروه دوم حالت عکس گروه اول است، به این صورت که در لوله دولایه ایجاد شده، لوله آلومینیومی به عنوان پوسته و لوله مسی به عنوان هسته قرار گرفت. در هر دو گروه، قطر خارجی و داخلی به ترتیب 29 و 25 میلی‌متر و 32 و 25 میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است لوله‌ها به صورت پرسی در یکدیگر قرار گرفته و یک لوله دو لایه جهت انجام فرایند اکستروژن مستقیم به طول 50 میلی‌متر ایجاد گردید.

در جدول 2، ابعاد نمونه‌ها و میله محور آورده شده است. قبل از انجام آزمایش‌ها، نمونه‌ها برحسب جنس در دما و زمان معین آنیل شدند. بدین ترتیب برای انجام عملیات آنیل، لوله آلومینیوم به مدت 2 ساعت در دمای 550 درجه درون کوره قرار گرفت و پس از آن لوله‌ها درون آب خنک‌کاری شدند. همچنین لوله‌های مسی در دمای 350 درجه به مدت 2 ساعت در کوره نگهداری شدند و سپس در آب خنک گردیدند.

ماتریس مورد نیاز جهت اکستروژن مستقیم با ابعاد نشان داده شده در شکل 2، از فولاد VCN 150 ساخته شد.

جدول 1 ترکیبات شیمیایی لوله آلومینیومی

Table 1 Chemical Composition of aluminum tube

ترکیب	درصد وزنی
Al	پایه
Cr	0/001
Cu	0/026
Fe	0/228
Mg	0/497
Mn	0/002
Si	0/335
V	0/006
Zn	0/012

همچنین دیگر اجزای قالب اکستروژن از فولاد CK45

از پرس هیدرولیکی با ظرفیت اسمی 25 تن با کورس حرکتی 800 میلی‌متر و سرعت قابل تنظیم استفاده شد. برای انجام آزمایش اجزای مختلف مجموعه قالب بر روی یکدیگر نصب شدند و بر روی دستگاه پرس قرار داده شد. شکل 4 مجموعه تجهیزات نصب شده بر روی دستگاه پرس به منظور انجام فرایند اکستروژن را نشان می‌دهد. سپس عملیات بارگذاری به صورت دستی اعمال شده و جابجایی نمونه‌ها تا هنگامی که به عدد 50 میلی‌متر برسد، ادامه یافت. در جدول 3 مشخصات دستگاه و برخی شرایط انتخاب شده برای پارامترهای فرایند اکستروژن ارائه شده است.

پس از انجام فرایند اکستروژن، نحوه و ضخامت ناحیه اتصال نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری بررسی گردید. همچنین جهت بررسی استحکام لوله‌های اکستروژن شده از آزمایش لهدگی استفاده شد.



Fig. 4 Experimental Setup of die extrusion on press machine

شکل 4 مجموعه قالب نصب شده بر روی دستگاه پرس

جدول 3 پارامترهای تنظیم شده فرایند اکستروژن مستقیم

ظرفیت پرس	25 تن
حداکثر مقدار جابجایی پرس	800 میلی‌متر
قطر قطعه قبل از اکستروژن	29 و 32 میلی‌متر
قطر محصول خروجی	25، 26، 28/5، میلی‌متر

### 3- نتایج و بحث

شکل 5 نتیجه به دست آمده از اکستروژن دولایه در حالت آلومینیوم هسته و مس پوسته با نسبت اکستروژن 40% را نشان

با توجه به مقالات مربوط به اتصال در حالت سرد ورق و لوله‌های فلزی، نشان داده شده است که یک حداقل کاهش ضخامت به منظور ایجاد پیوند لازم می‌باشد [11-13]. بر اساس آنها، حداقل نسبت اکستروژن 40% انتخاب گردید. همچنین با توجه به تناژ پرس موجود و نیز براساس مشاهدات تجربی اولیه، حداکثر نسبت اکستروژن 60% انتخاب شد تا بتوان قطعات سالم بدون ترک را تولید نمود. همان‌طور که در شکل 2 مشخص است مقدار قطر قطعه ورودی به قالب اکستروژن 29 میلی‌متر و قطر محصول خروجی از قالب با توجه نسبت 40 و 60 درصد به ترتیب برابر با 26 و 25 میلی‌متر می‌باشد.

انجام فرایند اکستروژن مستقیم بدین ترتیب انجام شد که بعد از انجام عملیات حرارتی و آماده سازی نمونه‌ها، برای ایجاد اتصال مناسب بین دولایه، بر روی لایه بیرونی آلومینیوم و لایه داخلی مس شیارهای محیطی با گام 2 و عمق 1 میلی‌متر ایجاد شد. سپس چربی زدایی سطوح اتصال با استون و خشک شدن در هوا انجام گردید. لوله دولایه اولیه دارای قطر داخلی 25 میلی‌متر و قطر خارجی 29 میلی‌متر بود. پس از آن، نمونه‌ها برای اکستروژن در دو نسبت 40 و 60 درصد در سه حالت مختلف مطابق شکل 3 آماده‌سازی شدند. در حالت اول، هیچگونه شیاری بین دولایه مس و آلومینیوم ایجاد نشد و در حالت دوم، تنها لایه خارجی آلومینیوم دارای شیار بود. در حالت سوم، هر دولایه خارجی و داخلی نمونه‌ها دارای شیار می‌باشد. سپس دو قطعه کار هسته و پوسته به صورت بررسی به صورت لوله‌های دولایه درآمدند و درون قالب قرار گرفتند.



Fig. 3 Preparation of tube surfaces before assembly of bimetal tubes

شکل 3 آماده‌سازی سطح لوله‌ها پیش از مونتاژ لوله دو لایه

برای انجام فرایند اکستروژن مستقیم و تولید لوله‌های دولایه



(الف)



(ج)

(ب)

**Fig. 6** Bimetal tubes connected with the extrusion ratio of %60, a) in a non-grooved state, b) with a groove in the aluminum surface, c) with grooves in the aluminum and copper surfaces and grooves in both layers

شکل 6 لوله دولایه مس پوسته و آلومینیوم هسته متصل شده در نسبت اکستروژن 60%، الف- در حالت بدون شیار، ب- با شیار در سطح آلومینیوم، ج- با شیار در سطح آلومینیوم و مس

شکل 7- الف نشان می‌دهد اتصال لایه آلومینیومی و مسی به دلیل عدم شیار در سطح، با لایه مرزی بین دو سطح لوله به دست آمده است. ضخامت لایه مرزی بین هسته و پوسته در این حالت تقریباً غیریکنواخت و حدود  $1/6$  میکرون اندازه‌گیری شد. شایان ذکر است که لایه مرزی نشان داده شده ترکیب بین فلزی می‌باشد که ساختاری ترد و شکننده دارد. با حذف این نوع ترکیبات می‌توان استحکام ناحیه اتصال را افزایش داد.

تصویر میکروسکوپی شکل 7- ب نشان می‌دهد که اتصال لایه‌ها مناسب‌تر و با ضخامت لایه مرزی کمتری نسبت به حالت قبل به دلیل شیار در آلومینیوم به دست آمده و ضخامت لایه مرزی بین دولایه لوله در این حالت حدود  $1/4$  میکرون اندازه‌گیری شد.

شکل 7- ج تصویر میکروسکوپی محل اتصال دو لایه لوله با شیار در سطح بیرونی آلومینیوم و داخلی لوله مسی را نشان می‌دهد. این نتیجه، در هم تنیدگی و اتصال دولایه لوله را نشان می‌دهد و دیده می‌شود که ضخامت لایه مرزی کاملاً حذف شده و مواد دولایه به طور کامل درهم فرو رفته‌اند. دلیل این اتفاق وجود

این آزمایش برای هر سه حالت شکل سطح لوله‌ها یعنی نمونه‌های بدون شیار، نمونه با شیار بر روی لوله آلومینیومی و نمونه شیاردار بر روی سطح خارجی لوله آلومینیومی و سطح داخلی لوله مسی آزمایش گردید و در تمامی حالت‌ها در این نسبت اکستروژن، پس از خروج دو لایه از قالب مشاهده شد که نمونه‌ها به ظاهر به یکدیگر چسبیده‌اند اما پس از برش با دستگاه وایرکات از یکدیگر جدا شدند. این نتیجه بیان می‌کند که هیچگونه اتصال مکانیکی و متالورژیکی بین دو لایه پس از اکستروژن صورت نگرفته است. بنابراین آزمایش‌های بعدی در نسبت اکستروژن 60 درصد با تعویض ماتریس در قالب انجام شد.

شکل 6 تصویر لوله برش خورده حاصل از فرایند اکستروژن در نسبت 60% در حالت مس پوسته و آلومینیوم هسته که در تمامی نمونه‌های بدون شیار، نمونه با شیار بر روی لوله آلومینیومی و نمونه شیاردار بر روی سطح خارجی لوله آلومینیومی و سطح داخلی لوله مسی را نشان می‌دهد. در حالت مذکور دولایه برش داده شده از یکدیگر جدا نشدند. با توجه به جدایش سایر نمونه‌ها پس از انجام برشکاری طولی، می‌توان بصورت کیفی بیان داشت که در این حالت اتصال مکانیکی بین لایه ایجاد شده است. به صورت مقایسه‌ای، در حالت نمونه با شیار نسبت به نمونه بدون شیار، کیفیت اتصال بهتری به دست آمده است.

شکل 7 نتایج تصویر میکروسکوپی اتصال دولایه لوله را در حالت مس پوسته و آلومینیوم هسته پس از فرایند اکستروژن با نسبت 60 درصد و در بزرگنمایی 100 برابر را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از اکستروژن لوله دولایه در تمامی نمونه‌های بدون شیار، نمونه با شیار بر روی لوله آلومینیومی و نمونه شیاردار بر روی سطح خارجی لوله آلومینیومی و سطح داخلی لوله مسی در نسبت اکستروژن 60 درصد نشان داد که پس از فرایند، اتصال قابل قبولی میان لایه‌ها به دست آمده است.



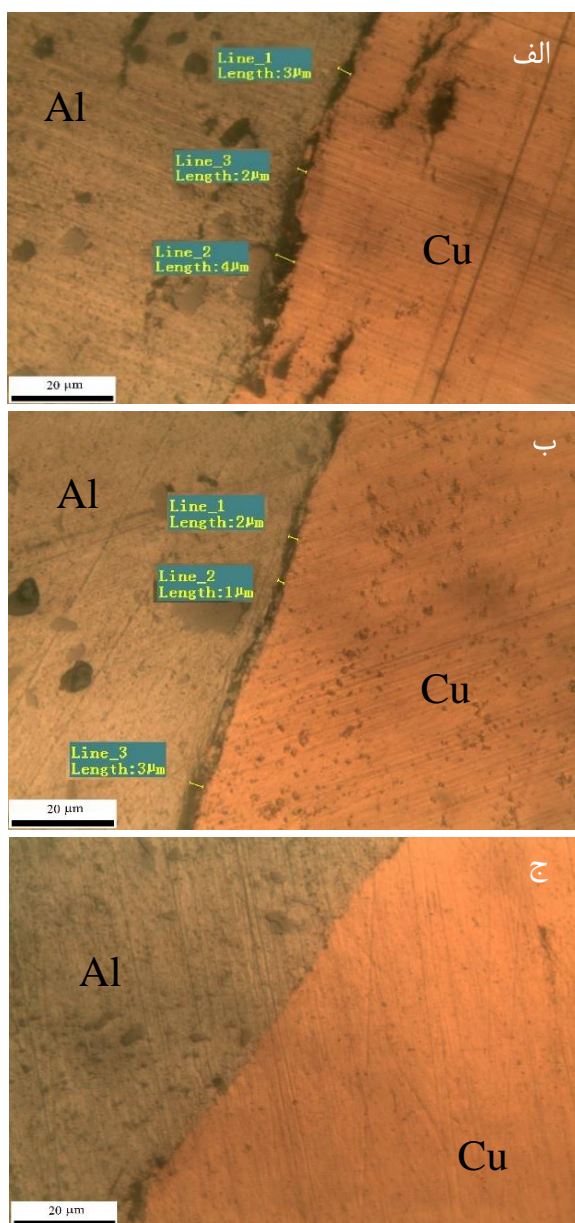
**Fig. 5** Bimetal tube in extrusion ratio of 40 % with groove on tube surfaces

شکل 5 لوله دولایه جدا شده در نسبت اکستروژن 40% و دارای شیار در هر دو لایه

حالت آلومینیوم پوسته و مس هسته پس از فرایند اکستروژن با نسبت 60 درصد و در بزرگنمایی 100 برابر را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از اکستروژن لوله دولایه در تمامی نمونه‌های بدون شیار، نمونه با شیار بر روی لوله مسی و نمونه شیاردار بر روی سطح خارجی لوله مسی و سطح داخلی لوله آلومینیومی در نسبت اکستروژن 60 درصد نشان داد که پس از فرایند، اتصال قابل قبولی میان لایه‌ها به دست آمده است.

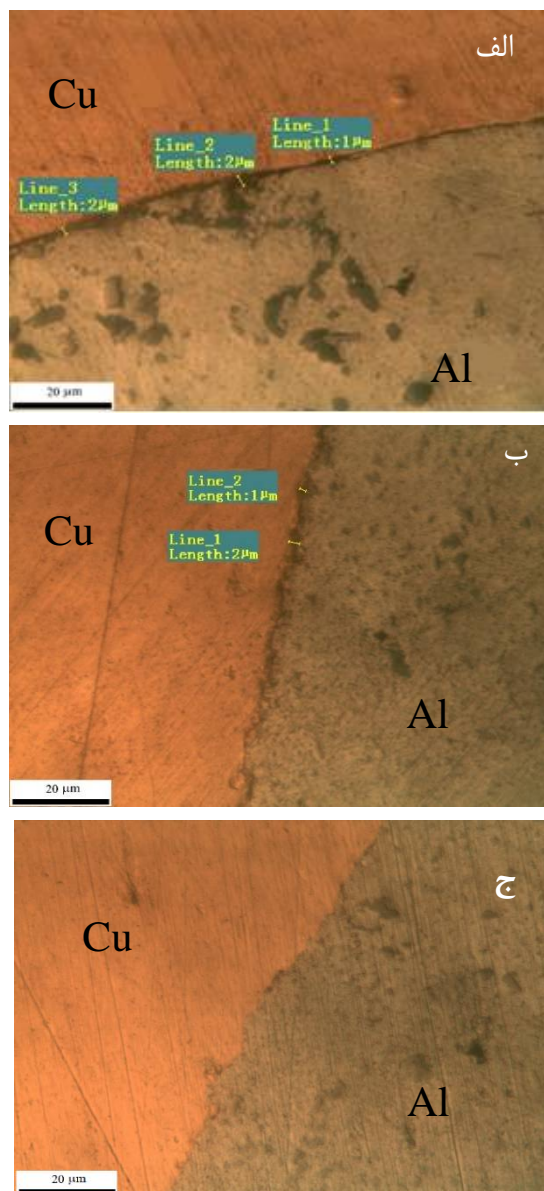
شیار در سطح هر دو لایه می‌باشد که سبب بهبود اتصال نسبت به دو حالت قبلی شده‌اند.

مشابه آزمایش‌های بیان شده اخیر، جای لایه آلومینیوم و مس تغییر داده شد و فرایند اکستروژن در نسبت 60 درصد در حالت آلومینیوم پوسته و مس هسته در نمونه‌های بدون شیار، نمونه با شیار بر روی لوله مسی و نمونه شیاردار بر روی سطح خارجی لوله مسی و سطح داخلی لوله آلومینیومی انجام شد.



**Fig. 8** Optical microscope images of the boundary layer thickness, a) in a non-grooved state, b) with a groove in the copper surface, c) with grooves in the aluminum and copper surfaces

**شکل 8** تصاویر میکروسکوپ نوری از ضخامت لایه مرزی، الف- در حالت بدون شیار، ب- با شیار در سطح آلومینیوم، ج- با شیار در سطح آلومینیوم و مس



**Fig. 7** Optical microscope images of the boundary layer thickness, a) in a non-grooved state, b) with a groove in the aluminum surface, c) with grooves in the aluminum and copper surfaces

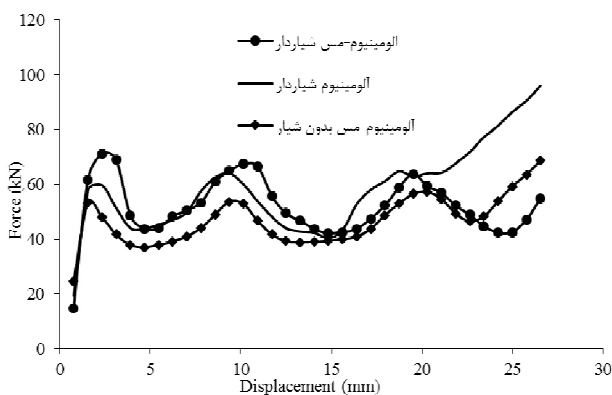
**شکل 7** تصاویر میکروسکوپ نوری از ضخامت لایه مرزی، الف- در حالت بدون شیار، ب- با شیار در سطح آلومینیوم، ج- با شیار در سطح آلومینیوم و مس

**شکل 8** نتایج تصویر میکروسکوپی اتصال دولایه لوله را در

جذب کرده و هر کدام از آنها تحمل نیروی بیشتری دارد و بصورت متقارن لهیده شده‌اند.



**Fig. 9** Crushing of extruded specimens, a) aluminum and copper of both grooves, b) aluminum grooved sample, c) sample without groove  
شکل 9 لهیدگی نمونه‌های اکستروژن شده در یکدیگر، الف- آلومینیوم-مس هر دو شیار دار، ب- نمونه آلومینیوم شیار دار، ج- نمونه بدون شیار



**Fig. 10** The stress-Displacement curves for bimetal tubes of Copper shell and Aluminum core with the extrusion ratio of 60%  
شکل 10 نمودار نیرو جابجایی برای لوله‌های دو لایه مس پوسته و آلومینیوم با نسبت 60%

با ملاحظه تصویر میکروسکوپی شکل 8- الف دیده می‌شود که به دلیل عدم وجود شیار در سطح آلومینیوم و مس، لایه مرز بین در محل اتصال دو لایه لوله دیده می‌شود و ضخامت میانگین این لایه مرزی حدود 3 میکرومتر است.

تصویر میکروسکوپی در شکل 8- ب نشان می‌دهد در حالتی که سطح لوله مسی دارای شیار بوده، اتصال لایه‌ها مناسب و با ضخامت لایه کمتری نسبت حالت قبل به دست آمده است. در این حالت، ضخامت لایه مرزی بین هسته و پوسته حدود 2 میکرومتر اندازه‌گیری شد.

همچنین نتیجه به دست آمده در شکل 8- ج نشان می‌دهد در حالتی که سطح لوله‌های مس و آلومینیوم شیاردار بودند پیوند قوی بین لایه‌ها پس از فرایند اکستروژن به دست آمده است و ضخامت لایه مرزی میان دو لایه لوله دیده نمی‌شود.

برای ارزیابی استحکام اتصال از آزمون لهیدگی استفاده شد. لوله‌های دو لایه تولید شده در هر دو حالت مس پوسته، آلومینیوم هسته و برعکس مورد بررسی قرار گرفتند. این آزمون توسط نیروی فشاری و سرعت لهیده کردن 10 mm/min برای تمام نمونه‌ها انجام گردید.

شکل 9 نتایج آزمون لهیدگی را برای حالت مس پوسته، آلومینیوم هسته در تمامی نمونه‌های بدون شیار، نمونه با شیار بر روی لوله آلومینیومی و نمونه شیاردار بر روی سطح خارجی لوله آلومینیومی و سطح داخلی لوله مسی در نسبت اکستروژن 60 درصد نشان می‌دهد. همچنین در شکل 10 نیروی به دست آمده از این آزمون برای هر سه نمونه نشان داده شده است.

به طور کلی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که هر سه نمونه بطور کاملاً متقارن و با طول یکسانی از یکدیگر لهیده می‌شوند. تغییر شکل نمونه‌ها به گونه‌ای است که در ابتدا با تغییر شکل الاستیک، نیرو با نرخ ثابتی تا رسیدن به نیروی بیشینه افزایش می‌یابد که معادل اولین برآمدگی در منحنی نیرو-جابجایی است. پس از تغییر شکل الاستیک، تغییر شکل پلاستیک با تشکیل اولین چین خوردگی آغاز می‌شود. سپس نیروی پرس افت می‌کند و این کاهش نیرو تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که دومین چین خوردگی در آستانه شکل‌گیری قرار گیرد که در این حالت نیرو مجدداً افزایش می‌یابد و پس از تشکیل دومین چین خوردگی نیرو کاهش می‌یابد. سپس تنش به لایه بعدی چین خوردگی منتقل می‌شود و این روند تا لهیدگی کامل نمونه ادامه می‌یابد.

با مقایسه مربوط به هر کدام از نمونه‌ها مشاهده می‌شود که لوله با لایه‌های دارای شیار با اختلاف کمی از یکدیگر انرژی را

میزان نیرو در این حالت 45 kN به دست آمده است در حالیکه در حالت مشابه دولایه مس پوسته و آلومینیوم هسته شیاردار این مقدار در نیروی ماکزیمم اولیه برابر 73 kN به دست آمده است. این مطلب نشان می‌دهد که در حالت کلی، نمونه‌هایی که هر دو لایه شیاردار بودند ظرفیت بار بهتری را در لهیدگی تحمل کرده‌اند. همچنین در حالتی که مس به عنوان پوسته استفاده شده ظرفیت بار لهیدگی بهتر از حالتی که آلومینیوم پوسته به دست آمده است.

#### 4- نتیجه گیری

در این پژوهش نحوه اتصال و رفتار مکانیکی لوله‌های دولایه تولید شده توسط فرایند اکستروژن مستقیم مورد بررسی قرار گرفت. فرایند اکستروژن در دو نسبت اکستروژن 40 و 60 درصد در دو حالت مس پوسته- آلومینیوم هسته و آلومینیوم هسته- مس انجام شد. آماده سازی نمونه‌ها با ایجاد شیاردار بر روی لوله‌ها به سبب بررسی تأثیر بر نحوه اتصال لایه‌ها در سه حالت مختلف انجام گرفت و نتایج زیر حاصل گردید:

1- در نسبت اکستروژن 40% با وجود شیاردار در سطح لایه‌ها هیچگونه اتصالی در تمامی حالت‌های انجام شده برقرار نشد.  
2- در این پژوهش به کمک فرایند اکستروژن در هر دو حالت مس پوسته و آلومینیوم هسته و برعکس در نسبت 60% بین هر دو لایه اتصال قابل قبولی ایجاد شد و پس از برش لوله دولایه اکستروژن شده، اتصال در لایه‌ها دیده شد.  
3- بررسی تصاویر میکروسکوپی نشان داد که با ایجاد شیاردار در سطح لوله‌ها میزان اتصال افزایش می‌یابد بدین صورت که در حالتی که سطح دو لایه بدون شیاردار بود یک لایه مرزی در هر دو حالت مس پوسته و آلومینیوم هسته و برعکس در نسبت 60% دیده شد. با ایجاد شیاردار بر روی سطح لایه داخلی در هر دو حالت مس پوسته و آلومینیوم هسته و برعکس دیده شد که ضخامت لایه مرزی کاهش یافت و در نهایت با ایجاد شیاردار بر روی هر دولایه اتصال بسیار خوبی میان لایه‌ها دیده شد و لایه مرزی میان دو لایه حذف شد.

4- با بررسی آزمون لهیدگی لوله‌های دولایه تولید شده مشخص شد که لوله‌هایی که هر دو فلز دارای شیاردار بودند مقاومت بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها در برابر لهیدگی دارد. همچنین میزان نیرو در حالت مس پوسته و آلومینیوم هسته 73 kN و در حالت آلومینیوم پوسته و مس هسته 45 kN به دست آمد.

شکل 11 تصویر نمونه آلومینیوم پوسته و مس هسته شیاردار را در زیر دستگاه پرس را نشان می‌دهد. تمامی نمونه در این حالت شکسته شدند. همچنین شکل 12 نمودار نیرو در این حالت را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل 12 مشاهده می‌شود در نمونه‌ای که آلومینیوم به‌عنوان لایه بیرونی قرار دارد، به‌علت ترد بودن لایه مسی، این لایه سریعاً دچار شکست شده و لایه آلومینیومی به تنهایی نیرو را تحمل کرده و لهیده می‌شود. نیروی به دست آمده دارای یک حداکثر مقدار بوده و سپس به دلیل شکست آلومینیوم، با افت شدید داشته است.



Fig. 11 Crushing test of aluminum shell and copper core bimetal tube with grooves in the aluminum and copper surfaces and at extrusion ratio of 60%

شکل 11 آزمون لهیدگی لوله دولایه آلومینیوم پوسته و مس هسته شیاردار با نسبت 60%

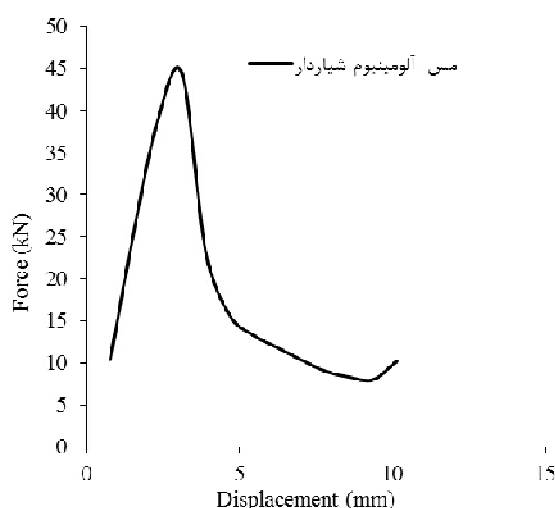


Fig. 12 The force-displacement curves for aluminum shell and copper core bimetal tube with grooves in the aluminum and copper surfaces and at extrusion ratio of 60%

شکل 12 نمودار نیرو جابجایی برای آلومینیوم پوسته و مس هسته شیاردار با نسبت 60%



## 5- مراجع

- [8] J. L. Alcaraz, J. Gilsevilano, An Analysis of the extrusion of bimetallic tubes by numerical simulation, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 38, No. 2, pp. 157-173, 1996.
- [9] H. Haghighat, M. M. Mahdavi, Analysis and FEM simulation of extrusion process of bimetal tubes through rotating conical dies, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 23, No. 11, pp. 3392-3399, 2013.
- [10] B. V. Krishna, P. Venugopal, K. P. Rao, Co-extrusion of dissimilar sintered P/M preforms - An explored route to produce bimetallic tubes, *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 407, No. 1-2, pp. 77-83, 2005.
- [11] J. Degner, W. Böhm, J. Herrmann, M. Köhler, M. Merklein, Manufacturing and Characterization of Multilayered 7000-Series Aluminum with Improved Corrosion Behavior Processed via Accumulative Roll Bonding, *Materials Today*, Vol. 10, pp. 368-375, 2019.
- [12] S. Schödel, J. Herrmann, M. Merklein, Investigation of different surface treatment parameters in the context of roll bonding processes, *Procedia Manufacturing*, Vol. 29, pp. 600-607, 2019.
- [13] V. G. Arigela, N. R. Palukuri, D. Singh, S. K. Kolli, R. Jayaganthan, P. Chekhonin, J. Scharnweber, W. Skrotzki, Evolution of microstructure and mechanical properties in 2014 and 6063 similar and dissimilar aluminium alloy laminates produced by accumulative roll bonding, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 790, pp. 917-927, 2019.
- [1] K.Y. Rhee, A., W.Y. Han, B., and H.J. Park, Fabrication of aluminum/copper clad composite using hot hydrostatic extrusion process and its material characteristics, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 384, No. 5, pp. 70-76, 2006.
- [2] S. K. KY. Rhee, WY. Han, Hj. Park, Experimental research on applying the copper-clad aluminum tube as connecting tubes of air conditioners, *Energy Build*, Vol. 97, pp. 1-5, 2015.
- [3] C. Dye-Cheng, S. Sheng-Kai, W. Cing-Hong, L. Sin-Kai, Investigation into cold extrusion of aluminum billets using three-Dimensional finite element method, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 193, pp. 188-193, 2007.
- [4] C. S. Hartley, Upper bound analysis of extrusion of axisymmetric piecewise homogeneous tubes, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 15, No. 8, pp. 651-663, 1973.
- [5] S. T. Momeni, S.J. Hosseinipour, S. Nourouzi, An investigation into the effect of die profile of cold forward extrusion the thickness distribution of al-cu bimetallic tubes, *Int. J. Civ. Eng. Build. Mater*, Vol. 2, pp. 1-5, 2012. (in Persian فارسی)
- [6] M. Knezevic, M. Jahedi, Y. P. Korkolis, I. J. Beyerlein, Material-based design of the extrusion of bimetallic tubes, *Computational Materials Science*, Vol. 95, pp. 63-73, 2014.
- [7] N.r. Chitkara, A. Aleem, An Analysis of the extrusion if bimetallic tubes by numerical simulation, *Mater. Process. Technol. Elsevier*, 43(12), pp. 2833-2856, 2001.