



## Experimental Investigation of the Effect of Temperature on the Production of Bimetallic Workpiece Al-Cu Using Forward Extrusion Method

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Gholizadeh A.<sup>1</sup> MSc,  
Elyasi M.<sup>\*1</sup> PhD,  
Mirnia M.J.<sup>1</sup> PhD,  
Jamaati R.<sup>2</sup> PhD

#### How to cite this article

Gholizadeh A, Elyasi M, Mirnia M.J, Jamaati R. Experimental Investigation of the Effect of Temperature on the Production of Bimetallic Workpiece Al-Cu Using Forward Extrusion Method. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(9):2355-2362.

### ABSTRACT

Bimetallic parts are widely used in chemical industry, petroleum, heat exchangers, and pressure vessels due to their properties of bimetallic workpieces, especially high weight strength, better mechanical properties, and at the same time reducing cost and weight loss compared to single-layer parts. Among the various processes used to produce these components, extrusion is a good choice for the formation of bimetallic parts due to the compressive stress and the possibility of metallurgical bonding. In the current study, the effect of temperature on the production of bimetallic parts in the case of shell copper and core aluminum alloy by extrusion method has been investigated. In this study, the two-layer connection of metal for a 45% thickness reduction the ratio was performed for three temperatures of 200, 300, and 400°C. Mechanical properties were also examined using a uniaxial tension test and a microstructure by using optical microscopy and scanning electron microscopy. The results showed that at the ratio of 45% thickness reduction at 200°C, there was no acceptable connection between the two layers, and after the process and cutting off the workpiece, the two layers did not separate, but a weak connection was established. The microscopy images at the temperature of 300°C showed that this temperature was the threshold for the two-layer connection, and finally, at the 400°C, a more suitable connection was obtained in the bimetal parts.

**Keywords** 3Forward Extrusion; Bimetallic Workpiece; Boundary Connection; High Temperature

<sup>1</sup>Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

<sup>2</sup>Faculty of Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

#### \*Correspondence

Address: Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Phone: -

Fax: -

elyasi@nit.ac.ir

#### Article History

Received: May 3, 2020

Accepted: June 27, 2020

ePublished: September 20, 2020

### CITATION LINKS

[1] Modern materials: Bimetallic tubes [2] Fabrication of aluminum/copper clad composite using hot hydrostatic extrusion process and its material characteristics [3] Theoretical analysis of bimetallic rods extrusion process in double reduction die [4] Upper bound analysis of extrusion of axisymmetric, piecewise homogeneous tubes [5] Investigation of parameters affecting interface strength in Al/Cu clad bimetal rod extrusion process [6] Extrusion of axi-symmetric bi-metallic tubes from solid circular billets: Application of a generalised upper bound analysis and some experiments [7] Material-based design of the extrusion of bimetallic tubes [8] An investigation into the effect of die profile of cold forward extrusion on the thickness distribution of Al-Cu bimetallic tubes [9] An upper bound solution to extrusion of circular billet to circular shape through cosine dies [10] Co-extrusion of dissimilar sintered P/M preforms - An explored route to produce bimetallic tubes [11] Experimental and numerical study of extrusion process of bimetallic tubed [12] The effect of surface shape on the production of aluminum-copper two layer Tubes using forward extrusion process [13] Experimental investigation of plane stress fracture toughness for Al/Cu/Al multilayer produced by Cold Roll Bonding method [14] Enhancement of the microstructure and elevated temperature mechanical properties of as-cast Mg Al<sub>2</sub>Ca Mg<sub>2</sub>Ca in-situ composite by hot extrusion

## بررسی تجربی اثر دما بر تولید قطعات دوفلزی آلومینیوم- مس به روش اکستروژن مستقیم

علیرضا قلی‌زاده MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

مجید الیاسی\* PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

محمدجواد میرنی PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

روح‌اله جماعتی PhD

دانشکده مهندسی مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

### چکیده

قطعات دوفلزی، به‌علت خواص آنها به ویژه استحکام به وزن بالا، خواص مکانیکی بهتر و در عین‌حال کاهش هزینه و کاهش وزن نسبت به قطعات تک‌فلزی، کاربردهای زیادی در صنایع شیمیایی، نفتی، مبدل‌های حرارتی و مخازن تحت فشار دارند. از بین فرآیندهای مختلف که برای تولید این قطعات کاربرد دارند، اکستروژن به‌دلیل ایجاد تنش فشاری و امکان ایجاد پیوند متالورژیکی یک انتخاب مناسب برای شکل‌دهی قطعات دوفلزی است. در پژوهش حاضر، تاثیر دما بر تولید قطعات دوفلزی در حالت مس پوسته و آلومینیوم هسته به روش اکستروژن مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، نحوه اتصال دولایه فلز برای نسبت کاهش ضخامت ۴۵٪ برای سه دمای ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰°C انجام شد. همچنین خواص مکانیکی با استفاده از آزمون کشش تک‌محوره و ریزساختار با عکس‌برداری از فصل مشترک با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در نسبت کاهش ضخامت ۴۵٪ در دمای ۲۰۰°C اتصال قابل قبولی میان دو لایه به وجود نیامد و پس از فرآیند و برش قطعه، دو لایه از هم جدا نشدند ولی اتصال ضعیفی برقرار شد. تصاویر میکروسکوپی در دمای ۳۰۰°C نشان داد که این دما، آستانه اتصال دو لایه بوده و در نهایت در دمای ۴۰۰°C اتصال مناسب‌تری در فصل مشترک قطعه دوفلزی به‌دست‌آمد.

**کلیدواژه‌ها:** اکستروژن مستقیم، قطعه دوفلزی، مرز اتصال، دما بالا

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۰۷

\*نویسنده مسئول: elyasi@nit.ac.ir

### مقدمه

در چند دهه اخیر، افزایش قیمت برای اکثر محصولات فلزی موجب شد تا شرکت‌های سازنده به دنبال یافتن راه‌حل‌های مختلفی برای فروش بیشتر و کاهش قیمت محصولات خود باشند و در عین حال کیفیت محصولات خود را حفظ کنند. یکی از راه‌های اساسی برای رسیدن به کیفیت و هزینه بهینه، تولید محصولات دوفلزی است [1]. امروزه استفاده از مواد دوفلزی در بسیاری از صنایع رو به افزایش است که از پرکاربردترین محصولات دوفلزی می‌توان به لوله‌های دوفلزی آلومینیوم- مس اشاره کرد. یک لوله دوفلزی آلومینیوم- مس ۵۰٪ ارزان‌تر و ۴۰٪ تا ۶۰٪ سبک‌تر از لوله یک لایه مسی است [2].

از بین فرآیندهای مختلف تولید قطعات دوفلزی مانند جوش انفجاری، فلورمینگ، نورد، کشش و اکستروژن، فرآیند اکستروژن

دارای مزایایی مانند ایجاد پیوندهای متالورژیکی قوی‌تر بین دوفلزی، استحکام اتصال بهتر، سرعت و نرخ تولید بالا نسبت به دیگر فرآیندها است. به‌دلیل تنش فشاری در فرآیند اکستروژن می‌توان مواد با انعطاف‌پذیری کمتر را نیز شکل داد. به‌طور کلی از میان فرآیندهای اشاره‌شده برای تولید قطعات دوفلزی، فرآیند اکستروژن گزینه مناسبی در تولید قطعات دوفلزی است [3].

هارتلی [4] نخستین بار در سال ۱۹۷۳ فرآیند اکستروژن چندفلزی را برای لوله‌های سه‌فلزی با قالب مخروطی به روش کران بالا مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش اثر پارامترهایی مانند نسبت اکستروژن، ثابت اصطکاک، نیم‌زاویه قالب و شعاع مندرل بر فشار نسبی اکستروژن لوله سه‌لایه مس- آلومینیوم بررسی شد.

خسروی‌فرد و ابراهیمی [5] مدل‌سازی و بهبود قالب در فرآیند اکستروژن میله‌های دوفلزی با قالب مخروطی را به روش کران بالا تحلیل و سپس به روش اجزای محدود شبیه‌سازی کردند. نتایج شبیه‌سازی برای میله‌های دوفلزی (Cu-Al) و (Al-Cu) بررسی شد و این نتایج نشان داد در حالتی که آلومینیوم به‌عنوان هسته باشد نیروی اکستروژن بیشتر از حالتی است که مس به‌عنوان هسته قرار گیرد.

چیتکارا و الیم [6] انواع مختلف اکستروژن مستقیم لوله‌های دوفلزی را در حالت سرد با روش‌های تحلیلی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. آنها معادلات کلی اکستروژن لوله دوفلزی با پروفیل دلخواه قالب و مندرل را با استفاده از روش تحلیل قاچی، مطالعه کردند. همچنین، با ترکیب قالب و مندرل‌های مخروطی و منحنی شکل قالب، فرآیند تجربی اکستروژن را بررسی کردند و با مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی به‌دست‌آمده، دلایل دقت پایین روابط تحلیلی را به‌دست آوردند.

کینزیویچ و همکاران [7] با استفاده از روش اجزای محدود اثر طراحی مختلف قالب بر روی رفتار ماده بر اکستروژن لوله‌های دولایه از جنس آلومینیوم و مس را بررسی کردند. آنها سه طرح قالب متقارن، موازی و مستقیم برای لوله‌های دوفلزی اکستروژن شده ارائه کردند. هدف اصلی در این پژوهش به حداقل رساندن بارهای اکستروژن برای رسیدن به کمترین نیروی اکستروژن بود. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان داد که طرح اکستروژن لوله‌های متقارن بهترین برآورد نیرو را در مقایسه با طرح‌های دیگر آن دارد.

مومنی و همکاران [8] تاثیر زاویه قالب‌های متفاوت بر نیروی مورد نیاز برای اکستروژن مستقیم لوله دوفلزی را با روش تجربی بررسی کردند. نتایج نشان داد که با کاهش زاویه قالب، نیروی مورد نیاز برای لوله‌های دوفلزی کاهش‌یافته و کیفیت ظاهری تولیدشده بهبود می‌یابد.

نارایاناسوامی و همکاران [9] برای رسیدن به نیروی کمینه اکستروژن، پروفیل قالب اکستروژن را توسط منحنی‌های بزیر طراحی کردند و با استفاده از روش حد بالایی نیروی مورد نیاز برای پروفیل‌های ایجادشده را به‌دست آوردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان

بررسی پژوهش‌های انجام‌شده دیده می‌شود که هیچ‌گونه کار پژوهشی یا مطالعه‌ای در تولید قطعات دوفلزی به روش اکستروژن مستقیم در دمای بالا بررسی نشده است. لذا در این پژوهش اثر دما بر تولید قطعه دوفلزی آلومینیوم- مس به روش اکستروژن مستقیم بررسی شده است.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش لوله‌های آلومینیومی و مسی به‌عنوان ماده اولیه مورد استفاده قرار گرفت. لوله مسی با درصد خلوص ۹۹٪ و لوله آلومینیومی با گرید ۸۰۰۰ و عناصر تشکیل‌دهنده در جدول ۱، به‌عنوان دومین ماده برای ساخت لوله دوفلزی انتخاب شد. در پژوهش حاضر آلومینیوم به‌عنوان هسته و مس به‌عنوان پوسته قرار گرفت که آلومینیوم با قطر داخلی ۲۱mm، ضخامت ۲mm و طول ۵۰mm و لوله مسی با قطر داخلی ۲۵mm، ضخامت ۱/۴۵mm و طول ۵۰mm به‌عنوان مواد اولیه در این پژوهش هستند. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است لوله‌ها به‌صورت پرسی در یکدیگر قرار گرفته‌اند و یک لوله دولایه جهت انجام فرآیند اکستروژن مستقیم ایجاد گردید.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی آلومینیوم استفاده‌شده در این پژوهش

ترکیب	درصد وزنی
Al	پایه
Fe	۱/۵۸
Cu	۰/۳۰
Cr	۰/۰۳
Mg	۰/۰۷
Mn	۰/۱۰
Si	۰/۴۰
V	۰/۰۱
Zn	۰/۲۸



شکل ۱) لوله دولایه پرس‌شده پیش از انجام فرآیند اکستروژن مستقیم

داد که قالب‌های طراحی‌شده با منحنی بزیر به نیروی کمتری نسبت به قالب‌های طراحی‌شده با منحنی چندجمله‌ای نیاز دارد. کریشنا و همکاران<sup>[10]</sup> برای نخستین بار لوله‌های دوفلزی را با استفاده از مواد اولیه‌ای که با روش متالورژی پودر تهیه شده‌اند از طریق فرآیند اکستروژن سرد تولید کردند. آنها در این پژوهش لوله‌های دولایه از جنس فولاد- مس و آلومینیوم- مس را مورد مطالعه قرار دادند و تاثیر پارامترهای مختلفی مثل نسبت اکستروژن و نسبت حجمی را در دو حالت هسته سخت و هسته نرم برای موارد فوق مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که برای جلوگیری از شکست قطعه دولایه اکستروژن‌شده با هسته سخت، باید مابین نیرو و تنش موجود در منطقه تغییر شکل تعادل به وجود آید.

دیلیمی عضدی و همکاران<sup>[11]</sup> در پژوهش خود به بررسی تجربی و عددی تولید لوله دوفلزی با فرآیند اکستروژن پرداختند. آنها دریافته‌اند که با افزایش نسبت ضخامت هسته به پوسته در لوله‌های دوفلزی (Al-Cu) ماکزیم نیروهای وارده حداقل می‌شود. در نتیجه هر چه مواد پوسته، حجم کمتری داشته باشد، نیروی مورد نیاز برای تغییر شکل کمترشده و راحت‌تر جریان می‌یابد. برنادر و همکاران<sup>[12]</sup> در پژوهش خود نحوه اتصال و رفتار مکانیکی قطعه دولایه تولیدشده توسط فرآیند اکستروژن مستقیم را در دو نسبت اکستروژن ۴۰٪ و ۶۰٪ در دو حالت مس- آلومینیوم و آلومینیوم- مس مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که در نسبت اکستروژن ۴۰٪ با وجود شیار در سطح لایه‌ها هیچ‌گونه اتصالی در دو حالت اکستروژن انجام‌شده برقرار نشد در نسبت اکستروژن ۶۰٪ اتصال مکانیکی در هر دو حالت اکستروژن صورت گرفت.

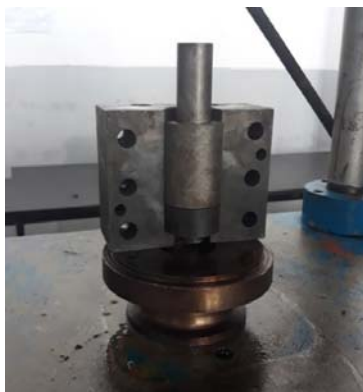
رحمت‌آبادی و همکاران<sup>[13]</sup> در پژوهش خود نمونه کامپوزیتی و سه لایه آلومینیوم- مس- آلومینیوم را با استفاده از فرآیند پیوند نوردی تولیدشده و خواص مکانیکی مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که خواص مکانیکی کامپوزیت تولیدشده به مراتب بهتر از مواد اولیه استفاده شده است. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که استحکام کششی و ازدیاد طول کامپوزیت تولیدشده به ترتیب بیشتر و کمتر نسبت به نمونه‌های اولیه به‌دست آمد.

خراسانی و همکاران<sup>[14]</sup> ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت Mg-Al-Ca را در حالت ریخته‌گری و پس از اکستروژن گرم را مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش دمای تغییر شکل و کاهش نسبت اکستروژن، اندازه دانه‌های کامپوزیت‌شده افزایش می‌یابد و فرآیند اکستروژن گرم، خواص مکانیکی کامپوزیت را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. بالاترین استحکام کششی به‌دست‌آمده از این کامپوزیت در دمای ۴۰۰C مشاهده شد.

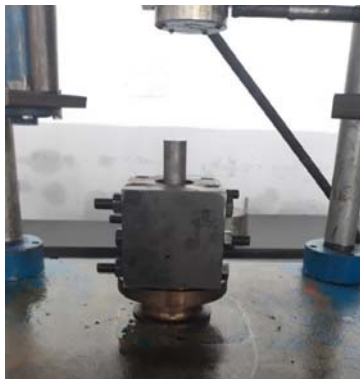
دما یکی از عواملی است که می‌تواند بر فرآیند اکستروژن و همچنین بر فصل مشترک بین دوفلز تاثیر داشته باشد. با توجه به

استفاده از دستگاه پرس به صورت لوله‌های دولایه تبدیل شدند. برای انجام فرآیند اکستروژن مستقیم و تولید لوله‌های دولایه از دستگاه پرس ۳۰ تن با کورس حرکتی ۹۰۰mm و سرعت قابل تنظیم دستی استفاده شد. همچنین از مخلوط گرافیت چرب و روغن به منظور روانکار بین لوله و بوش استفاده شد. برای گرم کردن قالب و اندازه‌گیری آن از ۴ عدد المنت فشنگی به قطر ۲۰mm و طول ۱۰۰mm با توان مصرفی ۷۵۰ وات و ۱ عدد ترموکوپل پیچی استفاده شد.

برای انجام آزمایش، اجزای مختلف قالب بر روی یکدیگر جای‌گذاری و نصب شدند و بر روی دستگاه پرس قرار گرفتند شکل (۴-الف). مونتاژ اجزای قالب در یک نیمه قالب را نشان می‌دهد که مطابق با شکل (۴-ب) به وسیله پیچ و مهره دو نیمه قالب به یکدیگر متصل شدند. در مرحله بعد المنت‌ها و ترموکوپل در جای مخصوص خود که در قالب طراحی شده بود قرار گرفتند که برای کنترل دما از تابلو برقی که به المنت‌ها و ترموکوپل متصل شده بود، استفاده شد و پس از اینکه تابلو برق دمای مورد نظر را نمایش داد پس از ۳۰ دقیقه که تمام اجزای قالب هم‌دم شدند، سپس عملیات بارگذاری به صورت دستی اعمال شد و جابجایی نمونه‌ها تا هنگامی که به نزدیکی عدد ۵۰mm برسد ادامه یافت. در این پژوهش از مقدار گرمای تولیدشده در حین انجام فرآیند اکستروژن به دلیل ناچیزبودن آن صرف‌نظر شد. در جدول ۲ مشخصات دستگاه و برخی شرایط انتخاب‌شده برای پارامترهای فرآیند اکستروژن ارایه شده است.



(الف)

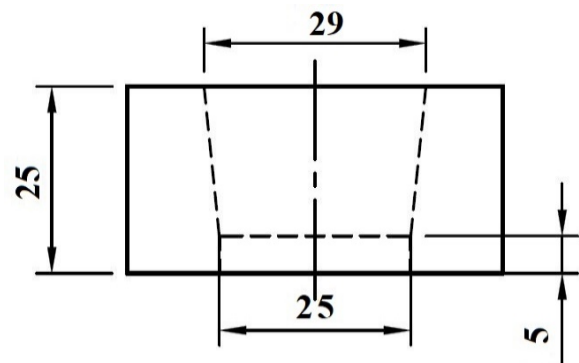


(ب)

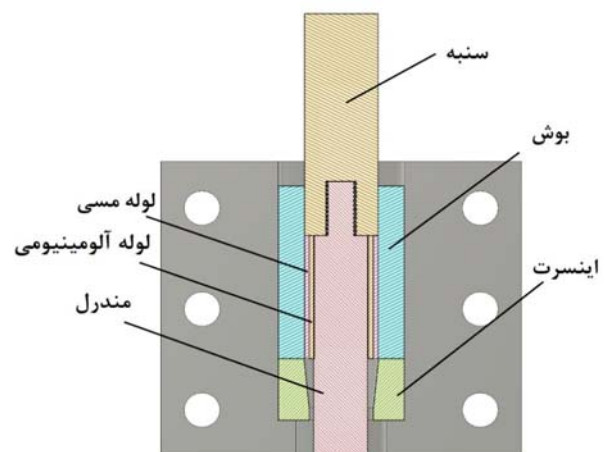
**شکل ۴ (الف)** جای‌گذاری قطعات و مندرل در یک نیمه قالب، **(ب)** مونتاژ کامل قالب بر روی دستگاه پرس

پیش از انجام آزمایش‌ها، نمونه‌های آلومینیومی و مسی در دما و زمان معین در کوره عملیات حرارتی آنیل شدند. بدین ترتیب برای انجام عملیات آنیل، نمونه‌های لوله آلومینیومی به مدت ۲ ساعت در دمای ۵۵۰°C درون کوره قرار گرفتند و پس از آن لوله‌ها درون آب خنک‌کاری شدند همچنین نمونه‌های لوله مسی در دمای ۳۵۰°C به مدت ۳۰ دقیقه در کوره نگهداری شدند و سپس در کوره خنک شدند.

جنس قالب طراحی شده از فولاد M040 تهیه شد و قطعات دیگر این قالب از جمله ماتریس، مندرل و اینسرت موجود در شکل ۲ از جنس CK45 و همچنین سنبه و بوش نیز از جنس فولاد H13 تولید شد. مطابق شکل ۲، قطر ورودی به اینسرت ۲۹mm در نظر گرفته شده است که از قطر خارجی لوله دولایه که ۲۸/۳mm است، بیشتر است تا لوله دولایه قبل از شروع آزمایش در جای مشخص خود قرار بگیرد. همچنین قطر خروجی از اینسرت ۲۵mm است. برای ثابت باقی ماندن قطر داخلی لوله دولایه از مندرل به قطر ۲۱mm استفاده گردید. شماتیک قالب در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲ (ابعاد اینسرت مورد استفاده در اکستروژن مستقیم (ابعاد به mm))

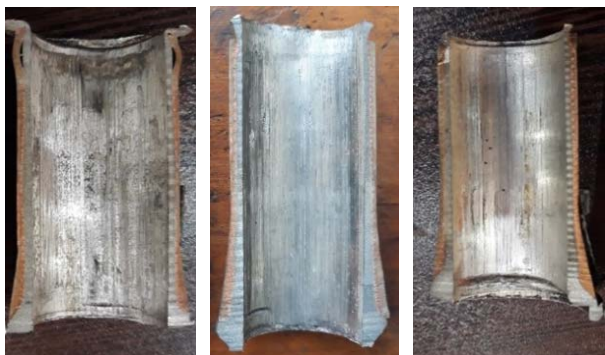


شکل ۳ (شماتیک قالب و اجزای فرآیند اکستروژن)

در انجام فرآیند اکستروژن مستقیم، پس از آماده‌سازی و عملیات حرارتی نمونه‌ها، سطح خارجی لوله آلومینیومی و سطح داخلی لوله مسی با استفاده از متانول چربی‌زدایی شد و سپس دو لوله با

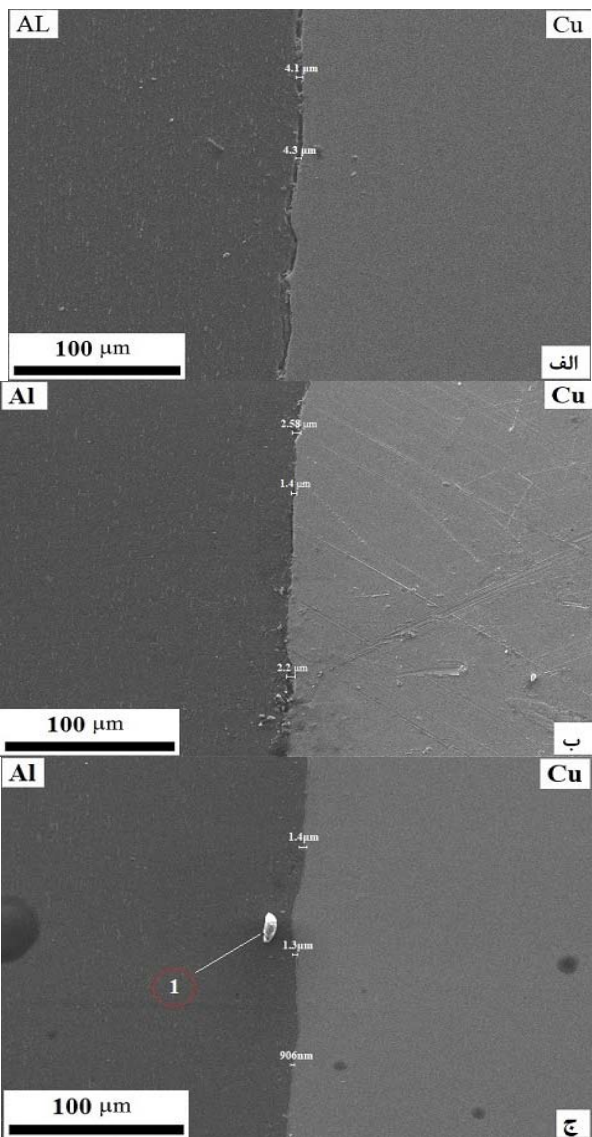


نگرفته است. این عدم اتصال متالورژیکی را می‌توان به دمای پایین فرآیند نسبت داد.



الف) ب) ج)

شکل ۵) قطعه دولایه مس پوسته و آلومینیوم هسته متصل شده در نسبت کاهش ضخامت ۴۵٪، الف) دمای ۲۰۰°C، ب) ۳۰۰°C، ج) ۴۰۰°C



شکل ۶) تصویر میکروسکوپی SEM در دمای، الف) ۲۰۰°C، ب) ۳۰۰°C، ج) ۴۰۰°C

جدول ۲) پارامترهای تنظیم شده فرآیند اکستروژن مستقیم

ظرفیت پرس	۳۰ تن
کورس پرس	۹۰۰ mm
قطر داخلی لوله دولایه	۲۱ mm
قطر خارجی لوله قبل از اکستروژن	۲۸/۳ mm
قطر خارجی لوله پس از اکستروژن	۲۵ mm
دمای مورد نظر	۲۰۰°C، ۳۰۰°C، ۴۰۰°C

## نتایج و بحث

دما یکی از عواملی است که می‌تواند بر روی فرآیند اکستروژن و همچنین بر روی فصل مشترک بین دوفلز تاثیر داشته باشد. فرآیند اکستروژن برای سه دمای ۲۰۰°C، ۳۰۰°C و ۴۰۰°C صورت گرفت. شکل ۵ لوله دولایه مس پوسته و آلومینیوم هسته تولید شده در نسبت کاهش ضخامت ۴۵٪، به ترتیب در دمای ۲۰۰°C، ۳۰۰°C و ۴۰۰°C را نمایش می‌دهد و در تمامی دماها در این نسبت اکستروژن، پس از خروج دولایه از قالب و پس از برش با دستگاه وایرکات از یکدیگر جدا نشدند. می‌توان به صورت مقایسه‌ای بیان داشت که قطعه دوفلزی تولید شده در شکل (الف) در دمای ۲۰۰°C، از اتصال مکانیکی ضعیفی برخوردار بود که با کوچک‌ترین ضربه‌ای دولایه از یکدیگر جدا شدند. قطعه دوفلزی تولید شده در شکل (ب) در دمای ۳۰۰°C نسبت به قطعه دوفلزی تولید شده در دمای ۲۰۰°C، از اتصال مکانیکی بهتری برخوردار شد. و در حالت قطعه دوفلزی تولید شده در شکل (ج) در دمای ۴۰۰°C، کیفیت اتصال بهتری نسبت به قطعه دوفلزی تولید شده در دمای ۲۰۰°C و ۳۰۰°C به دست آمده است.

شکل ۶ نتایج تصویر SEM (میکروسکوپی الکترونی روبشی) را در فصل مشترک لوله دولایه، در سه دمای ۲۰۰°C، ۳۰۰°C و ۴۰۰°C پس از فرآیند اکستروژن با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از اکستروژن لوله دولایه در تمامی نمونه‌ها نشان داد که با افزایش دمای فرآیند از ۲۰۰°C به ۴۰۰°C، اتصال قابل قبول‌تری میان لایه‌ها به دست آمده است (شکل ۶-الف). نشان می‌دهد در طول کل نمونه در دمای ۲۰۰°C اتصال ضعیفی بین لایه آلومینیوم و مس برقرار شد که میانگین جدایش به وجود آمده بین دولایه ۴/۲ μm اندازه‌گیری شد. شکل (۶-ب) نشان می‌دهد که در دمای ۳۰۰°C اتصال دولایه نسبت به دمای ۲۰۰°C بین آلومینیوم و مس در برخی نقاط برقرار شد که میانگین اختلاط بین دولایه به ۲/۰ μm رسید. همچنین نتیجه به دست آمده در شکل (۶-ج) نشان می‌دهد که در دمای ۴۰۰°C اتصال قوی‌تری نسبت به دمای ۲۰۰°C و ۳۰۰°C رخ داده است و میانگین اختلاط بین دولایه ۱/۲۰ μm به دست آمد.

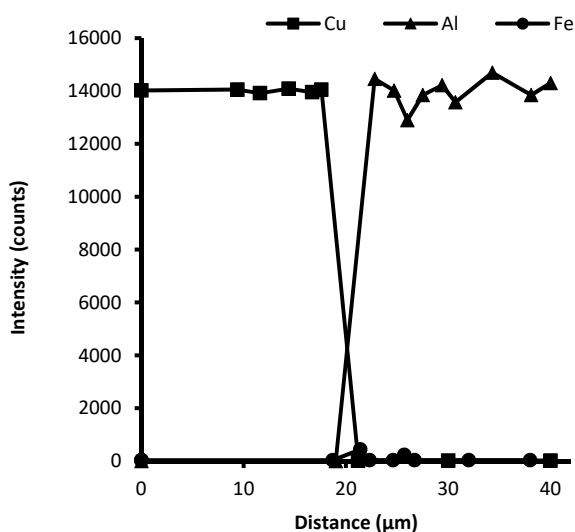
نمودار ۱ تصویر آنالیز خطی از نمونه شکل داده شده در دمای ۲۰۰°C را نشان می‌دهد. مطابق این نمودار در محل اتصال دو فلز می‌توان مشاهده کرد که هیچ نفوذ و پیوند متالورژیکی شکل

تکم‌محوره با استانداردهای آزمون تست کشش مطابق استاندارد GB\_T228-2002 از قطعه‌های دوفلزی تهیه شد و تست کشش از قطعه دوفلزی صورت گرفت.

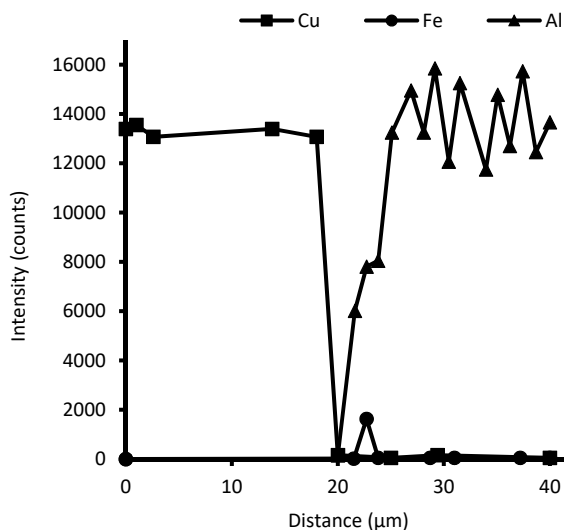
نمودار ۴ مقایسه نمودار تنش- کرنش لوله دوفلزی تولیدشده در این پژوهش در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  با لوله آلومینیومی و مسی پس از عملیات حرارتی را نشان می‌دهد. مطابق نمودار می‌توان به این نتیجه رسید که با تولید لوله دوفلزی آلومینیوم- مس، استحکام و چقرمگی لوله دولایه نسبت به لوله تک‌لایه آلومینیوم و مس بیشتر می‌شود. با توجه به نمودار تنش- کرنش (Al-Cu) در نمودار ۴، نمودار را می‌توان به سه قسمت تقسیم کرد که در مرحله اول از صفر تا حدود کرنش  $0.18$ ، نمودار اتصال متالورژیکی و مکانیکی لوله دوفلزی را نشان می‌دهد که در کرنش  $0.18$  اتصال بین دوفلز از بین رفت و دولایه از هم جدا شدند. مرحله دوم از کرنش  $0.2$  تا حدود کرنش  $0.29$  نمودار آلومینیوم و مس بدون اتصال متالورژیکی انجام شد و در کرنش  $0.29$  آلومینیوم دچار شکست شد. مرحله سوم از کرنش  $0.3$  تا حدود کرنش  $0.48$  تست کشش فقط بر روی لوله مسی انجام شد و در کرنش  $0.48$  مس نیز دچار شکست شد. استحکام لوله تولیدشده در این پژوهش نسبت به استحکام لوله تک‌لایه آلومینیومی  $35\%$  و نسبت به لوله تک‌لایه مسی  $15\%$  بهبود یافت.

برای نمونه‌های کشش در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  و  $300^{\circ}\text{C}$ ، اتصال بین دوفلز پس از وایرکات از بین رفت و لوله آلومینیوم و مس از یکدیگر جدا شدند. به همین دلیل آزمون تست کشش بر روی آنها انجام نگرفت.

شکل ۹ تصویر آزمون تست کشش قطعه در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  را نشان می‌دهد. با توجه به تصویر می‌توان مقطع شکست در لوله دوفلزی را مشاهده کرد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود شکست لوله آلومینیومی و لوله مسی در یک نقطه انجام نشد و دلیل آن را می‌توان خواص متفاوت لوله آلومینیومی و لوله مسی دانست.



نمودار (۲) آنالیز خطی از نمونه در دمای  $300^{\circ}\text{C}$



نمودار (۱) آنالیز خطی از نمونه در دمای  $200^{\circ}\text{C}$

نمودار ۲ تصویر آنالیز خطی از نمونه شکل داده‌شده در دمای  $300^{\circ}\text{C}$  را نشان می‌دهد. مطابق این نمودار، منطقه نفوذی وجود دارد و چون نمودار مس و آلومینیوم با هم تماس پیدا کردند و با کاهش آلومینیوم، مس در حال افزایش است پس اتصال متالورژیکی تشکیل می‌شود ولی مقدار عمق نفوذ حدود  $5\mu\text{m}$  است. اما با وجود اتصال متالورژیکی ترکیب بین فلزی تشکیل نشده است.

مطابق نمودار ۳، تصویر آنالیز خطی در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  از نمونه نشان می‌دهد که در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  نیز منطقه نفوذی وجود دارد و عمق نفوذ در این دما برابر  $11\mu\text{m}$  است. به دلیل آنکه با کاهش آلومینیوم، مس در حال افزایش است پس اتصال متالورژیکی تشکیل می‌شود. همچنین به علت اینکه شیب نمودار آلومینیوم و مس در منطقه نفوذی در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  از شیب نمودار آلومینیوم و مس در دمای  $300^{\circ}\text{C}$  کمتر است پس اتصال متالورژیکی قوی‌تری در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  رخ داده است. از طرفی چون دمای  $400^{\circ}\text{C}$  به دمای ذوب آلومینیوم نزدیک‌تر است پس تحرکات اتم‌های آلومینیوم و نفوذ آلومینیوم بیشتر از مس است و به دلیل پایین بودن دمای کاری نسبت به دمای ذوب مس تشکیل ترکیبات بین فلزی امکان‌پذیر نبوده هرچند که چون ترکیب بین فلزی سخت است و باعث کاهش استحکام می‌شود عدم تشکیل ترکیب بین فلزی بهتر از تشکیل آن است.

در جدول ۳ با استفاده از SEM، عمق نفوذ بین دوفلز در دماهای مورد بررسی اندازه‌گیری شد که با استفاده از آن می‌توان نتیجه گرفت که هرچه دمای فرآیندی به دمای ذوب آلومینیوم نزدیک‌تر شود عمق نفوذ بین دوفلز در فصل مشترک بیشتر و اتصال متالورژیکی قوی‌تری صورت می‌گیرد.

برای بررسی خواص مکانیکی فصل مشترک نمونه‌ها در سه دمای  $200^{\circ}\text{C}$ ،  $300^{\circ}\text{C}$  و  $400^{\circ}\text{C}$  مطابق شکل ۷ و ۸ نمونه کشش



شکل ۹) نمونه پس از تست کشش

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش نحوه اتصال و رفتار مکانیکی لوله‌های دولایه تولیدشده توسط فرآیند اکستروژن مستقیم مورد بررسی قرار گرفت. فرآیند اکستروژن در نسبت کاهش ضخامت ۴۵٪ در حالت مس پوسته و آلومینیوم هسته در سه دمای ۲۰۰°C، ۳۰۰°C و ۴۰۰°C انجام گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- با توجه به انتخاب دوفلزی آلومینیوم و مس، در نسبت کاهش ضخامت ۴۵٪ نتیجه گرفته شد که دمای ۲۰۰°C دمای مناسبی جهت اتصال دوفلزی نیست. دمای ۳۰۰°C آستانه اتصال دوفلزی پس از فرآیند اکستروژن است و از تصاویر میکروسکوپی نتیجه گرفته شد که برخی از نقاط به یکدیگر متصل شده‌اند. همچنین در دمای ۴۰۰°C اتصال کامل بین دوفلزی در این نسبت به وجود آمده است.
- ۲- نتایج آزمون کشش قطعه دوفلزی آلومینیوم-مس در مقایسه با نمونه تست کشش تک‌لایه آلومینیوم و تک‌لایه مس نشان داد که استحکام قطعه دوفلزی ۳۵٪ نسبت به لوله تک‌لایه آلومینیومی و ۱۵٪ نسبت به لوله تک‌لایه مسی بهبود پیدا کرد.
- ۳- با توجه به میزان عمق نفوذ در فصل مشترک دوفلزی که به ترتیب در دمای ۲۰۰°C، ۳۰۰°C و ۴۰۰°C برابر با ۵μm و ۱۱μm که با آنالیز خطی به دست آمد می‌توان نتیجه گرفت که دمای ۴۰۰°C بهترین دمایی است که بیشترین عمق نفوذ در فصل مشترک دوفلزی به دست آمده و اتصال متالورژیکی قوی‌تری صورت گرفت.

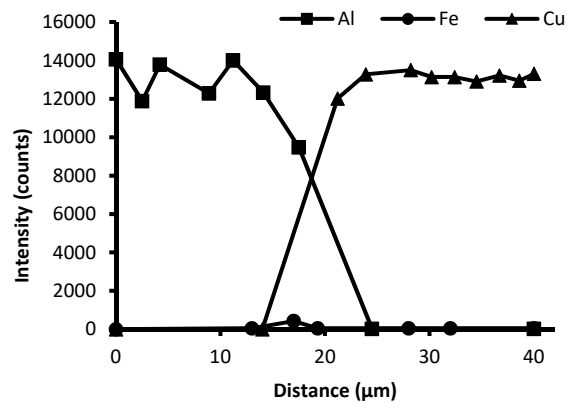
**تشکر و قدردانی:** موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

**تأییدیه اخلاقی:** موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

**تعارض منافع:** موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

**سهم نویسندگان:** علیرضا قلی‌زاده (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۲۵٪)؛ مجید الیاسی (نویسنده دوم)، روش‌شناس (۲۵٪)؛ محمدجواد میرنی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۲۵٪)؛ روح‌اله جماعتی (نویسنده چهارم)، نگارنده مقدمه/تحلیلگر آماری (۲۵٪).

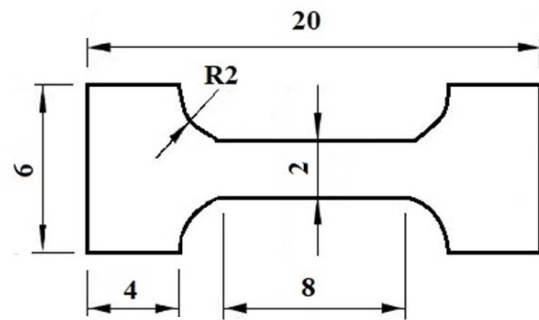
**منابع مالی:** موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.



نمودار ۳) آنالیز خطی از نمونه در دمای ۴۰۰°C

جدول ۳) میزان اختلاط ماده در فصل مشترک دو فلز در دماهای مختلف

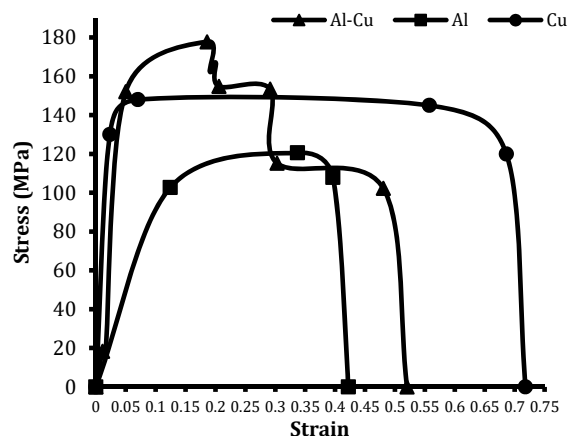
T	μm
۲۰۰°C	۰
۳۰۰°C	۵μm
۴۰۰°C	۱۱μm



شکل ۷) ابعاد نمونه کشش تک محوره (ابعاد به mm)



شکل ۸) نمونه تست کشش قطعه دوفلزی



نمودار ۴) مقایسه نمودار تنش-کرنش قطعات دولایه با قطعه آلومینیومی و مسی

- bimetallic tubes. *International Journal of Civil Engineering and Building Materials*. 2012;(2):4. [Persian]
- 9- Narayanasamy R, Ponalagusamy R, Venkatesan R, Srinivasan P. An upper bound solution to extrusion of circular billet to circular shape through cosine dies. *Materials & Design*. 2006;27(5):411-415.
- 10- Krishna BV, Venugopal P, Rao KP. Co-extrusion of dissimilar sintered P/M preforms - An explored route to produce bimetallic tubes. *Materials Science and Engineering: A*. 2005;407(1-2):77-83.
- 11- Deylami Azodi H, Miri Z, Karimi S. Experimental and numerical study of extrusion process of bimetallic tubed. *Proceedings of the 14<sup>th</sup> National Conference on Iranian Manufacturing Engineering*. 2017 November 2-4, Arak: Arak University of Technology; 2017. [Persian]
- 12- Barandar F, Elyasi M, Mirnia M J, Jamaati R. The effect of surface shape on the production of aluminum-copper two layer Tubes using forward extrusion process. *Iranian Journal Manufacturing Engineering*. 2019;6(8):1-9. [Persian]
- 13- Rahmatabadi D, Mohammadi B, Hashemi R, Shojaee T. Experimental investigation of plane stress fracture toughness for Al/Cu/Al multilayer produced by Cold Roll Bonding method. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(5):166-174. [Persian]
- 14- Khorasani F, Emamy M, Malekan M, Mirzadeh H, Pourbahari B, Krajnák T, et al. Enhancement of the microstructure and elevated temperature mechanical properties of as-cast Mg-Al<sub>2</sub>Ca-Mg<sub>2</sub>Ca in-situ composite by hot extrusion. *Materials Characterization*. 2019;147:155-164.
- 1- Serikov O. Modern materials: Bimetallic tubes. *Metallurgist*. 2005;49(9-10):347-348.
- 2- Rhee K Y, Han W Y, Park HJ, Kim S S. Fabrication of aluminum/copper clad composite using hot hydrostatic extrusion process and its material characteristics. *Materials Science and Engineering: A*. 2004;384(1-2):70-76.
- 3- Berski S, Dyja H, Banaszek G, Janik M. Theoretical analysis of bimetallic rods extrusion process in double reduction die. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004;153-154(1-3):583-588.
- 4- Hartley CS. Upper bound analysis of extrusion of axisymmetric, piecewise homogeneous tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1973;15(8):651-663.
- 5- Khosravifard A, Ebrahimi R. Investigation of parameters affecting interface strength in Al/Cu clad bimetal rod extrusion process. *Materials & Design*. 2010;31(1):493-499.
- 6- Chitkara N R, Aleem A. Extrusion of axi-symmetric bimetallic tubes from solid circular billets: Application of a generalised upper bound analysis and some experiments. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2001;43(12):2833-2856.
- 7- Knezevic M, Jahedi M, Korkolis YP, Beyerlein IJ. Material-based design of the extrusion of bimetallic tubes. *Computational Materials Science*. 2014;95:63-73.
- 8- Momeni S T, Hosseinipour S J, Nourouzi S, Gorji H. An investigation into the effect of die profile of cold forward extrusion on the thickness distribution of Al-Cu