

امکان سنجی تولید لوله دو فلزی مس-آلومینیوم به روش اکستروژن فشاری تناوبی

چکیده: در پژوهش حاضر، فرآیند تولید لوله دو فلزی مس-آلومینیوم با اعمال تغییرشکل های پلاستیک شدید به روش اکستروژن فشاری تناوبی (TCEC) در طی دو چرخه کاری و دمای اتاق بررسی شده است. استحکام برشی پیوند بین لایه های آلومینیوم و مس در نمونه های بدست آمده از چرخه اول ۶/۳۲ و از چرخه دوم ۸/۲۴ مگاپاسکال می باشد. استحکام تسلیم فشاری لوله های دو فلزی تولید شده در انتهای هر چرخه (چرخه اول ۳۰۳ و چرخه دوم ۳۵۴ مگاپاسکال) نسبت به مواد اولیه (آلومینیوم ۸۸ و مس ۱۱۷ مگاپاسکال) افزایش قابل توجهی یافته است. علاوه بر این، متوسط سختی آلومینیوم و مس تغییر شکل یافته در انتهای چرخه دوم به ترتیب ۱۰۵/۴ و ۱۳۰/۲ ویکرز ثبت شده است که از سختی نمونه های اولیه (آلومینیوم ۴۹/۵ و مس ۶۸/۸ ویکرز) بیشتر است. نتایج بررسی ریزساختار نیز نشان می دهد که ساختار کریستالی درشت و نسبتاً همگن اولیه پس از هر بار اعمال فرآیند به ریزساختاری ناهمگن و فوق ریز دانه تبدیل می گردد.

واژه های راهنما: اکستروژن فشاری تناوبی، تغییر شکل پلاستیک شدید، لوله دو فلزی، مس-آلومینیوم، استحکام برشی پیوند، فوق ریزدانه

زهره ایمانی نژاد

مدرس حق التدریس،
گروه مهندسی مکانیک،
مجتمع آموزش عالی گناباد،
گناباد

حمید بهلولی*

استادیار،
گروه مهندسی مکانیک،
واحد بیرجند،
دانشگاه آزاد اسلامی،
بیرجند

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۹

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸

**Zohreh
Imani Nejad**
Adjunct Professor,
Department of Mechanical
Engineering,
University of Gonabad,
Gonabad

Hamid Bohluli*
Assistant Professor,
Department of Mechanical
Engineering,
Islamic Azad University,
Birjand Branch,
Birjand

Feasibility study of bimetallic copper-aluminum tube production by TCEC method

Abstract: In this study, the production of copper-aluminum bimetallic tubes using the TCEC method was investigated in a maximum of two cycles at room temperature. The shear strength between the aluminum and copper layers was 6.32 MPa for cycle1 and 8.24 MPa for cycle2. The strength of the bimetallic tubes in each cycle (303 MPa in cycle1 and 354 MPa in cycle2) was significantly increased compared to the initial materials (88 MPa for aluminum and 117 MPa for copper). On the other hand, the average hardness of deformed aluminum and copper in the end of second cycles were 105.4 and 130.2 Vickers respectively, which were higher than the initial materials (aluminum 49.5 and copper 68.8 Vickers). The microstructure analysis revealed that the initially coarse and homogenous crystals turned into non-homogenous and ultra-fine grained structures during each cycle.

Keywords: Tube cycle extrusion compression, Sever plastic deformation, Copper-aluminum, Bimetallic tube, Shear bond strength, Ultrafine grained

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر لوله‌های دو فلزی تولید شده به روش‌های مختلف، به دلیل خصوصیات فیزیکی و مکانیکی منحصر به فرد در جوامع علمی و صنعتی مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. یکی از پرکاربردترین لوله‌های دو فلزی، لوله‌های مس-آلومینیوم هستند که به دلیل خواصی مانند استحکام بالا، مقاومت به خوردگی و قیمت و وزن پایین نسبت به لوله‌های مسی هم اندازه، در صنایع مختلف مورد استقبال قرار گرفته‌اند [۱]. لوله دو فلزی مس-آلومینیوم ۶۰-۴۰٪ سبک‌تر و ۳۰-۴۰٪ ارزان‌تر می‌باشد [۲]. تاکنون روش‌های متعددی مانند قالب‌گیری چرخشی نمونه‌های چندلایه^۱ [۳]، جوشکاری انفجاری [۴]، جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی [۶]، شکل‌دهی الکترومغناطیس [۷] و فرو بردن لوله^۲ [۸] جهت تولید لوله‌های دو فلزی معرفی شده‌اند.

استفاده از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید^۳ جهت اتصال فلزات غیر هم‌جنس در سال‌های اخیر گسترش پیدا کرده است [۹]، [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]، [۱۴]. در این روش‌ها اتصال بین مواد معمولاً در دماهای بسیار پایین‌تر از دمای تبلور مجدد فلزات صورت می‌گیرد و این پدیده سبب شکل‌گیری ساختارهای لایه‌ای به جای ترکیبات متالورژیکی بین مواد می‌شود. علاوه بر این تغییر شکل پلاستیک شدید خصوصاً از نوع اعمال کرنش برشی می‌تواند سطوح اتصال دو فلز را در فاصله نزدیکتری نسبت به یکدیگر قرار دهد و باعث تشکیل یک پیوند مکانیکی در اثر آمیخته شدن عناصر دو فلز در فصل مشترک گردد [۱۵]. همچنین با افزایش نقایص شبکه کریستالی ناشی از تغییر شکل پلاستیک شدید، انتظار می‌رود پدیده نفوذپذیری تقویت یافته و بر استحکام پیوند بین لایه‌ای اثر گذار باشد [۱۶].

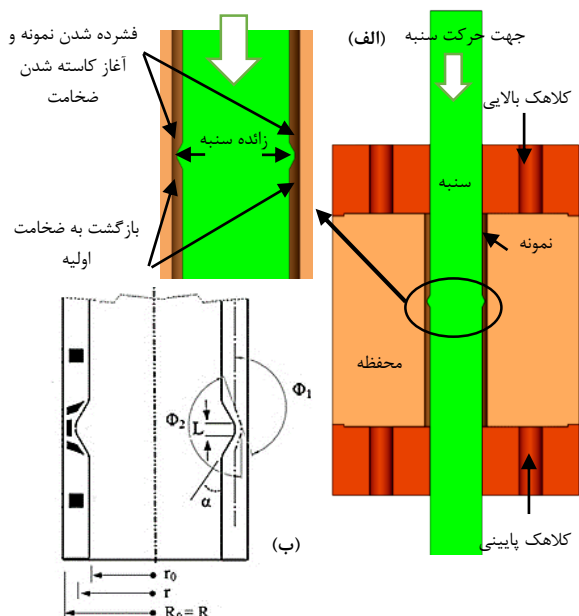
ساپانادن و همکاران [۱۷] یک روش اکستروژن توسعه یافته برای تولید میله‌های دو فلزی بصورت اکستروژن مارپیچی رو به جلو متقارن محوری^۴ پیشنهاد دادند. این فرآیند شامل اکستروژن یک نمونه دو فلزی از طریق یک قالب با شیارهای مارپیچ است. کوچیش و همکاران [۱۸] روش قالب‌گیری چرخشی^۵ را به منظور تولید میله‌های چند لایه آلومینیوم-مس-آلومینیوم ارائه کردند. ایشان میانگین کرنش مؤثر را به ازای اعمال یک پاس

فرآیند، ۰/۵ پیش‌بینی کرده و توزیع کرنش را به طور معناداری غیر همگن ارزیابی کردند. ایوانی و همکاران [۱۹] روش اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار^۶ را برای اولین بار به منظور تولید میله‌های دو فلزی مس-آلومینیوم پیشنهاد کردند. با وجود گزارش ایشان مبنی بر شکل‌گیری یک پیوند بین لایه‌ای مستحکم بین دو فلز، توزیع غیر یکنواخت و نامتقارن کرنش را در نمونه‌ها متذکر شدند که ناهمگنی خواص مکانیکی نمونه‌های تولید شده را به دنبال دارد. ایوانی و همکاران [۱۵] در یک مطالعه جدیدتر به بررسی اثر افزایش تعداد چرخه‌های فرآیند ECAP بر مکانیزم اتصال و رشد ترک‌ها پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که بیش از سه چرخه فرآیند سبب رشد قابل توجه ترک‌ها می‌گردد. در خصوص چگونگی وقوع مکانیزم پیوند بین دو فلز و عوامل مؤثر بر استحکام آن در روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید به عواملی مثل قفل مکانیکی^۷، جوش سرد^۸ و پیوندهای متالورژیکی^۹ در فصل مشترک پیوند اشاره شده است [۱۵]، [۱۹]، [۲۰]. اخیراً علایی و همکاران [۲۱] لوله دو فلزی مس-آلومینیوم را به روش فشردن در کانال لوله‌ای زاویه‌دار موازی^{۱۰} تولید کردند. نتایج این تحقیق ایجاد پیوند مستحکم بین لایه‌های مسی و آلومینیومی را نشان می‌دهد.

روش اکستروژن فشاری تناوبی^{۱۱} یک روش نوین و کم هزینه جهت تولید لوله‌های فوق ریزدانه^{۱۲} و مستحکم است که بر مبنای تغییر شکل‌های پلاستیک شدید استوار است. این روش در سال ۲۰۱۴ توسط بابایی و همکاران معرفی گردید [۲۲]. شکل (۱ الف) شماتیکی از انجام فرآیند اکستروژن فشاری تناوبی را نشان می‌دهد. در این روش جداره‌های خارجی و داخلی لوله توسط قالب و سنبه مقید می‌گردند. همچنین دو انتهای لوله توسط کلاهک-هایی محصور شده که مانع از حرکت قالب و یا خارج شدن لوله از آن می‌شوند. بر روی سنبه نیز زائده‌ای قرار دارد که قطر آن از قطر داخلی لوله بیش‌تر و از قطر خارجی آن کم‌تر است. با عبور زائده از هر مقطع لوله، ضخامت سطح مقطع کم شده و تغییر شکل‌های پلاستیک شدید در آن اتفاق می‌افتد و سپس به ضخامت اولیه خود برمی‌گردد.

تاکنون در مقالات متعددی بهبود خواص مکانیکی لوله‌ها توسط روش اکستروژن فشاری تناوبی به اثبات رسیده است [۲۳]، [۲۴]، [۲۵]، [۲۶]، [۲۷].

⁸ Cold welding⁹ Metallurgical bonding¹⁰ Parallel Tube-shaped Channel Angular Pressing (PTCAP)¹¹ Tube Cycle Extrusion Compression (TCEC)¹² Ultra-Fine Grained (UFG)¹ Multi-Billet Rotary Swaging (MBRW)² Tube sinking process³ Severe plastic deformation⁴ Axi-symmetric forward spiral composite extrusion⁵ Rotary Swaging (RS)⁶ Equal Channel Angular Pressing (ECAP)⁷ Mechanical locking



شکل ۱ الف- طرح واره فرآیند اکستروژن فشاری تناوبی ب- مناطق تغییر شکل پلاستیک و عوامل هندسی قالب فرآیند [۲۸].

لوله مسی به قطر خارجی ۲۷ میلی‌متر و ضخامت ۲/۵ میلی‌متر می‌باشد. از میلگرد آلومینیومی با قطر ۳۰ میلی‌متر نیز با انجام عملیات روتراشی و سوراخ‌کاری، لوله‌ای با قطر خارجی ۲۲-۰/۲ میلی‌متر و قطر داخلی ۱۷ میلی‌متر تهیه شد. نمونه‌های مسی و آلومینیومی به ترتیب در دماهای ۶۰۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت تحت عملیات آنیل کاری قرار گرفتند. سپس سطوح داخلی و خارجی نمونه‌های حاصل توسط استون شستشو داده شد و با برس‌کاری بسیار نرمی که روی سطوح داخلی لوله‌های مسی انجام گرفت، سطوح از حالت صیقلی خارج شد و تا حدود کمی زبر گردید. لوله‌های آلومینیومی داخل لوله‌های مسی جا زده شدند و با تمیزکاری نهایی آن‌ها، نمونه‌های اولیه برای انجام فرآیند تهیه شد.

قالب مورد استفاده در این مطالعه از فولاد گرم کار ۱/۲۳۴۴ (AISI H13) ساخته شده است که مشخصات هندسی آن بر اساس شکل (۱-ب) به شرح زیر می‌باشد:

$$R_0 = R = 13.5 \text{ mm}, \quad r_0 = 8.5 \text{ mm}, \\ r = 11 \text{ mm} \\ L = 1.15 \text{ mm}, \quad \phi_1 = \phi_2 = 150^\circ, \\ \alpha = 30^\circ$$

جهت دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب در قالب اعم از استحکام بالا، تافنس مناسب، مقاومت در برابر سایش و ... عملیات حرارتی کوئنچ و تمپر در اتسفر خنثی جهت حصول

در این تحقیق، تولید لوله دو فلزی مس-آلومینیوم با هدف ارتقای خواص مکانیکی و ایجاد پیوند بین فلزی مطلوب به روش TCEC امکان‌سنجی شده است.

برای این منظور، نمونه‌های دو فلزی اولیه طی دو چرخه کاری و در دمای اتاق، تحت فرآیند TCEC قرار گرفته‌اند. تغییر نکردن شکل هندسی نمونه پس از انجام فرآیند از خصوصیات بارز این فرآیند است که این خصوصیت، امکان تکرار فرآیند را برای نمونه به دفعات زیاد فراهم می‌آورد و از این طریق می‌توان کرنش‌های زیادی در نمونه ایجاد کرد. این موضوع می‌تواند شرایط را برای تغییر ساختار دانه و خواص مکانیکی در نمونه فراهم آورد. ویژگی‌های دیگری مثل مستقیم بودن مسیر انجام فرآیند

در مقایسه با روش ECAP لوله، عدم محدودیت در استفاده از نمونه‌هایی با طول بزرگتر در مقایسه با روش پیچش لوله با فشار بالا^۱ و همچنین پیچیدگی کم‌تر نسبت به PTCAP باعث شده است روش TCEC در بین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید لوله، قابلیت توسعه و کاربردی شدن بالایی داشته باشد. تکرار فرآیند علاوه بر اعمال کرنش‌های بیشتر به نمونه‌ها و بهبود خواص مکانیکی مثل سختی و استحکام تسلیم، در نمونه‌های دو فلزی یک پیوند بین لایه‌های مستحکم از نوع قفل مکانیکی بین دو فلز برقرار می‌کند که استحکام این پیوند در انتهای هر چرخه از فرآیند مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق، مس خالص تجاری و آلومینیوم ۶۰۶۳ می‌باشد. ترکیب شیمیایی این مواد در جدول (۱) و (۲) آورده شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی مس مورد مطالعه

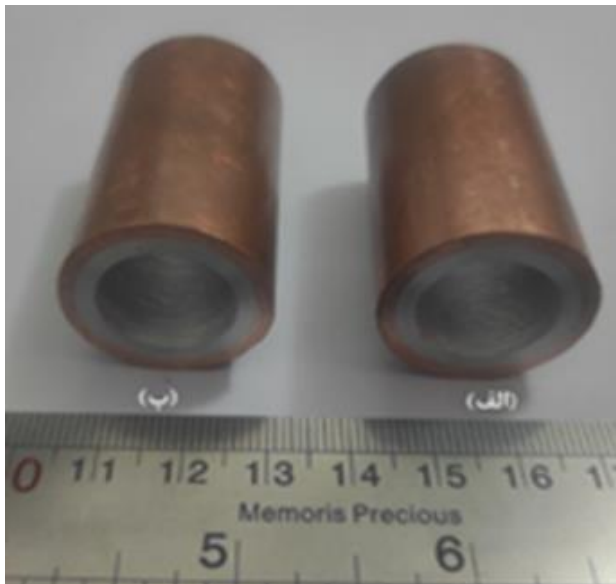
عنصر	Mg	Cr	S	Ca	Sn	Sb	Cu
درصد وزنی	۰/۴۷	۰/۰۲۶	۰/۰۲۵	۰/۰۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۷	۹۹/۴۴

جدول ۲ ترکیب شیمیایی آلومینیوم مورد مطالعه

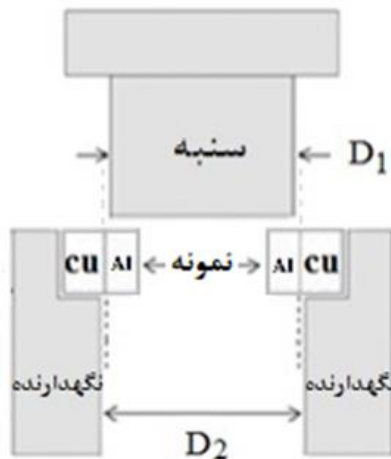
عنصر	Fe	Si	Mn	Cu	Mg	Zn	Cr	Al
درصد وزنی	۰/۳	۰/۳۱	۰/۱۵	۰/۱	۰/۶۵	۰/۴۶	۰/۰۸	۹۷/۹۵

^۱ High Pressure Torsion (HTP)

کاهش ۷۵ درصدی طول نمونه‌ها ادامه یافت. تنش متناظر با نقطه انتهایی منطقه خطی در دیاگرام تنش- کرنش حقیقی در آزمون فشار به عنوان استحکام تسلیم نمونه‌ها ثبت گردید. به منظور کاهش اثر اصطکاک بین سطوح تماس دستگاه و نمونه از پلاستیک تفلون و فوم صابون استفاده شد.



شکل ۳ الف- نمونه دو فلزی تولید شده در انتهای چرخه اول
ب- در انتهای چرخه دوم



شکل ۴ نگهدارنده و سنبه ساخته شده جهت بررسی استحکام برشی پیوند بین مس و آلومینیوم

ساختار مارتنزیت تمپر شده با سختی حدود ۴۸ راکول C انجام پذیرفت. جهت ساخت سنبه قالب مذکور از فولاد سرد کار ۱/۲۰۸۰ که با نام فولاد SPK در بازار معروف است، استفاده گردید. سنبه توسط عملیات ماشین‌کاری ساخته شد و در نهایت تحت عملیات حرارتی قرار گرفت و سختی حدود ۵۰ راکول C در آن‌ها ایجاد گردید.

اجزای تشکیل دهنده قالب قبل و بعد از مونتاژ به ترتیب در شکل‌های (۲- الف) و (۲- ب) آورده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲ الف- اجزای قالب فرآیند اکستروژن فشاری تناوبی قبل از مونتاژ ب- اجزای قالب TCEC بعد از مونتاژ [۱۵].

فرآیند TCEC طی حداکثر دو چرخه‌کاری، با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه، در دمای اتاق و توسط دستگاه پرس ۱۰۰ تن مدل GOTECH انجام گرفت. نمونه‌ای از تولیدات دو فلزی حاصل از این فرآیند در انتهای چرخه اول و دوم به ترتیب در شکل‌های (۳- الف) و (۳- ب) آورده شده است.

از مس و آلومینیوم اولیه و همچنین لوله‌های دو فلزی تولید شده، نمونه‌های مشابهی از نظر هندسی تهیه گردید و جهت بررسی رفتار مکانیکی آن‌ها از آزمون استاندارد فشار تک محوره استفاده گردید به عبارت دیگر با توجه به اینکه نمونه‌های دو فلزی تولید شده به شکل لوله می‌باشد، لوله‌هایی با همین ابعاد از جنس مس و آلومینیوم اولیه آماده شد و سپس آزمون استاندارد فشار تک محوره روی این نمونه‌ها انجام گرفت. آزمون فشار یک روش مناسب برای اندازه‌گیری استحکام تسلیم و بررسی رفتار پلاستیک ماده می‌باشد. برای انجام این آزمون از دستگاه پرس ۱۰۰ تن مدل GOTECH بهره گرفته شد. آزمون فشار با سرعت ۰/۳ میلی‌متر بر ثانیه در دمای اتاق انجام گرفت و تا

به چرخه اول افزایش یافته است. استحکام تسلیم لوله‌های دو فلزی تولید شده در پایان هر دو چرخه، همواره از استحکام آلومینیوم جداره داخلی بیش‌تر و از استحکام مس جداره خارجی کم‌تر است. علاوه بر این، استحکام لوله دو فلزی و اجزای آن در هر دو چرخه به نسبت آلومینیوم و مس اولیه (× در شکل (۶)) بیش‌تر است.

برای فرآیند ECAP، طبق مطالعه انجام شده توسط ایوانی و همکاران [۱۵]، مقدار استحکام کششی نمونه دو فلزی مس-آلومینیوم با افزایش تعداد چرخه‌ها افزایش یافته است. مقدار گزارش شده برای استحکام تسلیم کششی پس از یک چرخه ۱۹۱ مگاپاسکال و پس از دو چرخه ۲۲۳/۴ مگاپاسکال گزارش شده است. همچنین برای هر دو فرآیند ECAP و TCEC تکرار چرخه موجب افزایش حدود ۱۷٪ استحکام‌های کششی و فشاری نمونه دو فلزی نسبت به چرخه اول شده است.

شکل (۷) مقادیر سختی ویکرز نمونه‌های اولیه‌ی آنیل شده مس و آلومینیوم و همچنین نمونه‌های دو فلزی را پس از دو چرخه فرآیند TCEC نشان می‌دهد. پس از اعمال یک چرخه تغییر شکل پلاستیک شدید، سختی مس و آلومینیوم به ترتیب ۵۹٪ و ۷۲٪ نسبت به نمونه‌های اولیه افزایش یافته است. در انتهای چرخه دوم نیز افزایش سختی به ترتیب ۲۰٪ و ۲۳٪ برای مس و آلومینیوم نسبت به چرخه اول مشاهده می‌شود. اعمال یک چرخه فرآیند PTCAP [۲۱] سبب افزایش سختی ۸۰٪ نمونه مسی و ۵۲٪ نمونه آلومینیومی نسبت به نمونه اولیه شده است. در چرخه دوم نیز میزان افزایش سختی برای هر دو نمونه ۱۴٪ گزارش شده است. برای فرآیند ECAP [۱۵] نیز نمونه‌های مسی و آلومینیومی در چرخه اول به ترتیب ۱۳۴٪ و ۲۰۰٪ و در چرخه دوم ۱۳٪ و ۶٪ افزایش سختی داشته‌اند. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، بیش‌ترین میزان افزایش سختی برای هر سه فرآیند TCEC، ECAP و PTCAP در چرخه اول اتفاق افتاده و نرخ افزایش در چرخه‌های بعدی به شدت کاسته شده است؛ اما برای فرآیند TCEC نرخ افزایش سختی در چرخه‌های بعدی بالاتر از دو فرآیند دیگر است.

بهبود خواص مکانیکی طی فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، متأثر از دگرگونی ساختاری و کاهش اندازه دانه است [۱۱]، [۱۳]، [۲۹]. از آن‌جا که در فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، ریزتر شدن دانه‌ها و افزایش مرزدانه اتفاق می‌افتد؛ لذا موجب ممانعت مرزدانه در برابر نابجایی‌ها و افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل و به طبع آن افزایش استحکام و سختی خواهد شد [۲۳]، [۳۰]، [۳۱]. همچنین جذب نابجایی‌ها

اندازه‌گیری سختی به روش ویکرز توسط دستگاه سختی‌سنج ویلسون-ولپرت ۹۳۰N به مدت ۱۰ ثانیه و تحت بار ۱۰ نیوتن انجام شد. برای هر یک از نمونه‌های مسی و آلومینیومی میانگین حداقل ۴ تکرار آزمایش به عنوان سختی در نظر گرفته شد. بررسی ریزساختار مقاطع عرضی مانده شده آلومینیومی و مسی توسط میکروسکوپ نوری متالوگرافی ساخت شرکت صایران انجام شد. همچنین جهت بررسی استحکام پیوند بین مس و آلومینیوم در لوله‌های دو فلزی تولید شده، نگهدارنده و سنبه‌ای مطابق شکل (۴) طراحی و ساخته شد. قطر سنبه (D1) و دهانه خروجی نگهدارنده (D2) به گونه‌ای انتخاب شده است که به ترتیب به اندازه یک میلی‌متر از قطر قسمت آلومینیومی نمونه‌های دو فلزی کمتر و بیشتر است. با قرارگیری نمونه دو فلزی داخل نگهدارنده، سنبه از طریق فک فشاری دستگاه پرس با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه حرکت کرده و موجب جدایی بخش آلومینیومی می‌گردد. استحکام برشی پیوند از تقسیم نیروی حداکثر بر مساحت سطح تماس دو فلز بدست می‌آید.

۳- نتایج

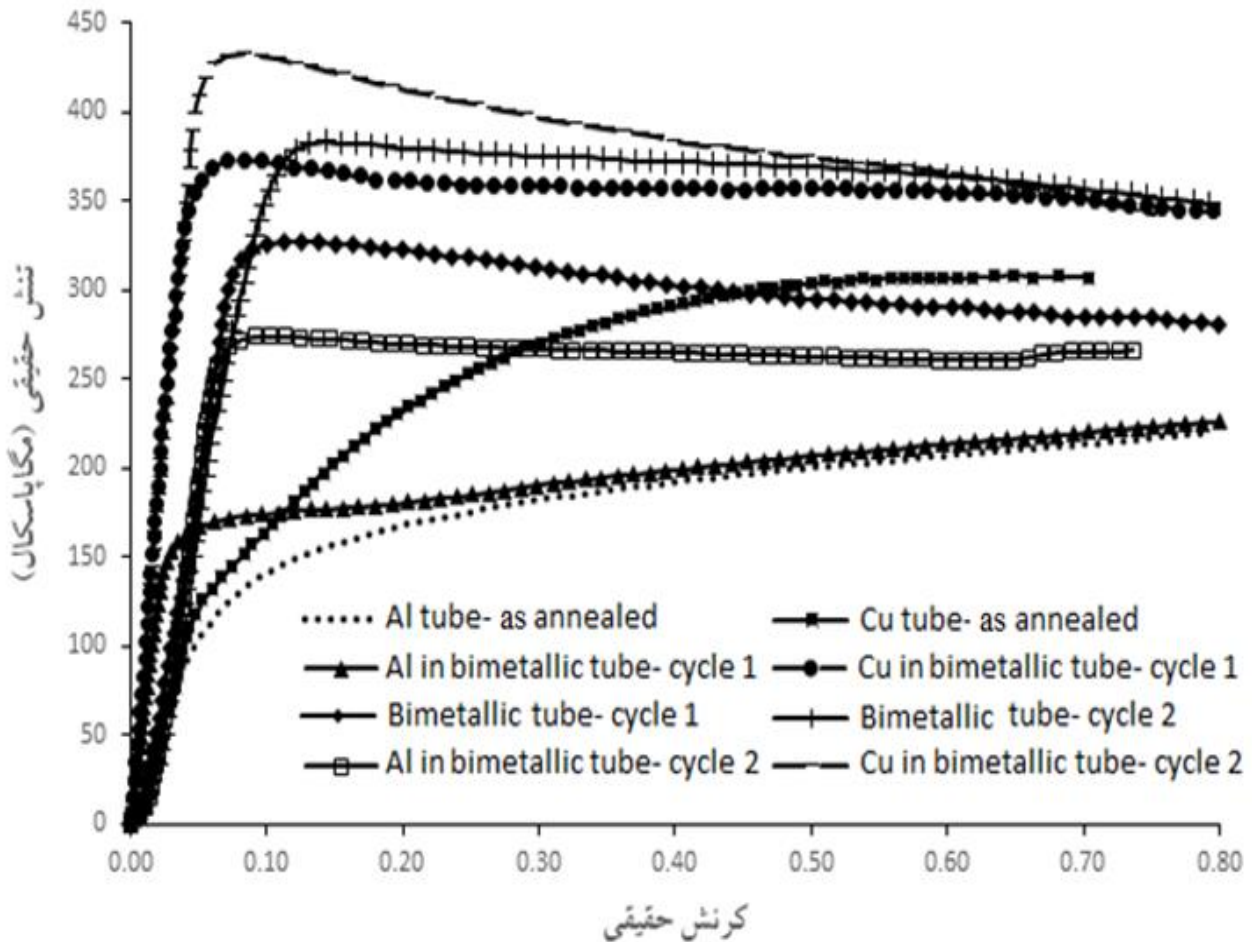
۳-۱- خواص مکانیکی شامل استحکام و سختی

شکل (۵) منحنی‌های تنش- کرنش حقیقی حاصل از آزمون فشار را برای لوله‌های مسی و آلومینیومی اولیه، لوله‌های دو فلزی تولید شده و بخش‌های آلومینیومی و مسی آن‌ها به صورت مجزا در انتهای چرخه‌های اول و دوم نشان می‌دهد. در نمونه‌های اولیه، استحکام به صورت خطی تا مقادیر استحکام تسلیم افزایش یافته و سپس دچار کار سختی شده و استحکام به تدریج زیاد می‌شود. با اعمال هر چرخه از فرآیند، استحکام تسلیم لوله دو فلزی تولید شده نسبت به نمونه‌های اولیه به شدت افزایش یافته و کار سختی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

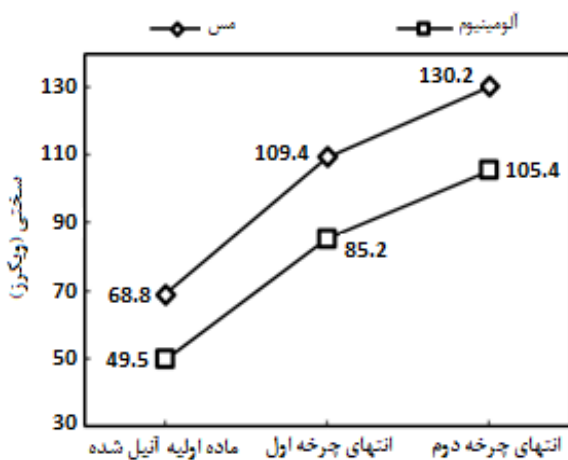
بررسی منحنی‌های حاصل از آزمون فشار برای نمونه‌های مسی و آلومینیوم اولیه و نمونه‌های دو فلزی تولید شده در سطح بالاتری نسبت به نمونه‌های اولیه اتفاق می‌افتد. بر اساس منحنی‌های حاصل از آزمون فشار، استحکام تسلیم نمونه‌های مسی و آلومینیومی اولیه به ترتیب برابر ۱۱۷ و ۸۸ مگاپاسکال اندازه‌گیری گردید. مقادیر استحکام تسلیم لوله‌های دو فلزی و بخش‌های آلومینیومی و مسی آن در انتهای چرخه‌های اول و دوم فرآیند در شکل (۶) مقایسه شده است. استحکام تسلیم لوله دو فلزی و بخش‌های مسی و آلومینیومی آن، در چرخه دوم نسبت

جهت بررسی صحت ادعای ارتباط ساختار با خواص مکانیکی، در بخش بعد به بررسی ریزساختارهای آلومینیوم و مس پرداخته شده است.

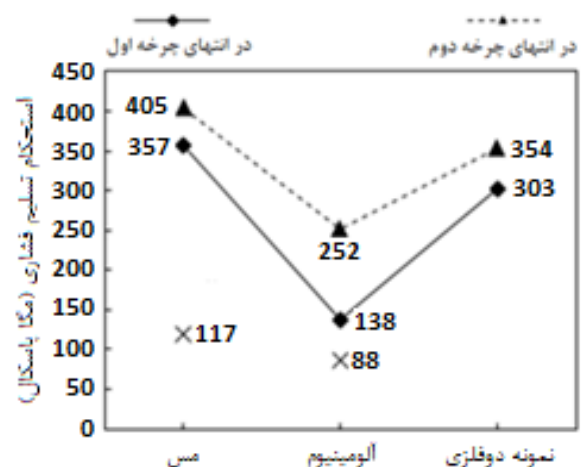
به مرزداشته‌ها به عنوان یک فرآیند بازیابی مؤثر سبب کاهش کارسختی می‌گردد [۳۰]، [۳۲].



شکل ۵ منحنی‌های تنش-کرنش حقیقی برای لوله‌های مسی و آلومینیومی اولیه، لوله‌های دو فلزی تولید شده و بخش‌های آلومینیومی و مسی آن‌ها در انتهای چرخه‌های اول و دوم



شکل ۷ تغییرات سختی ویکرز مس و آلومینیوم درحالت‌های آنیل شده، در انتهای چرخه اول و انتهای چرخه دوم فرآیند اکستروژن فشاری تناوبی

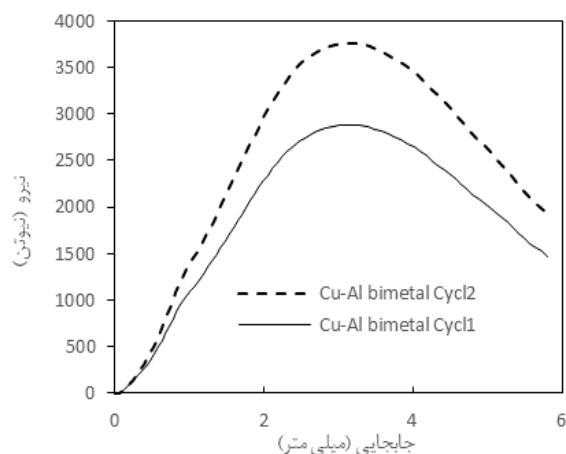


شکل ۶ تغییرات استحکام تسلیم لوله‌های دو فلزی تولید شده و بخش‌های آلومینیومی و مسی آن‌ها در دو چرخه (استحکام نمونه-های اولیه آلومینیوم و مس با × مشخص شده‌اند).

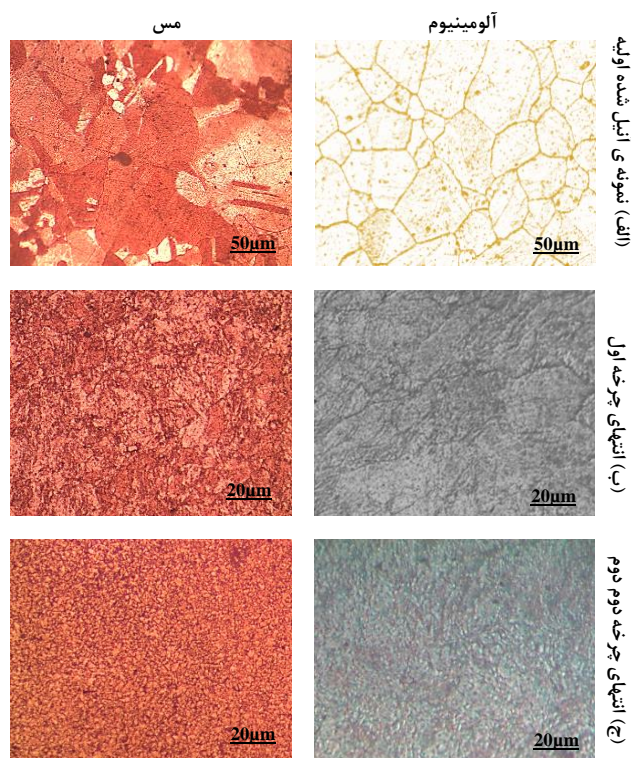
می‌دهد، کاهش اندازه دانه در فرآیند TCEC نسبت به TPCAP بیش‌تر بوده است. متأسفانه در مورد فرآیند ECAP اطلاعات کافی جهت بررسی اندازه دانه در مطالعات اخیر انجام نشده است.

۳-۳- استحکام برشی پیوند بین لایه های مس و آلومینیوم

نیروی لازم جهت جدا کردن لایه آلومینیومی بر حسب جابجایی سنبه برای لوله‌های دو فلزی در یک و دو چرخه فرآیند TCEC در شکل (۹) ترسیم شده است. اگرچه روند تغییرات نیرو بر حسب جابجایی در هر دو چرخه تقریباً یکسان است، اما نیروی لازم جهت جدایش در چرخه دوم نسبت به چرخه اول بیش‌تر است. میزان حداکثر نیرو در چرخه‌های اول و دوم به ترتیب $2884/8$ و $3761/5$ نیوتن می‌باشد که با تقسیم آن بر سطح تماس دو لایه، مقادیر استحکام برشی پیوند $6/32$ و $8/24$ مگاپاسکال حاصل می‌شود. بر اساس مطالعات انجام شده توسط قدیمی و همکاران [۲۲]، بهلولی و همکاران [۲۳] و همچنین علایی و همکاران [۲۱]، اعمال فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید و تکرار آن روی نمونه‌های دو فلزی مس-آلومینیوم، افزایش استحکام برشی پیوند را در هر مرحله به همراه داشته است. در تحقیق انجام شده توسط قدیمی و همکاران [۳۳]، استحکام برشی پیوند بین مس و آلومینیوم در لوله دو فلزی تولید شده توسط فرآیند ECAP، $5/4$ مگاپاسکال بدست آمده است. در تحقیق انجام شده توسط علایی و همکاران [۲۱] نیز استحکام برشی پیوند بین مس و آلومینیوم در روش PTCAP در یک و دو سیکل از فرآیند به ترتیب $2/42$ و $5/72$ مگاپاسکال ثبت شده است. مقدار استحکام برشی پیوند در این پژوهش نسبت به تحقیقات قبلی به میزان قابل توجهی بیشتر است.



شکل ۹ نیروی لازم برای جدا کردن لایه آلومینیومی در نمونه‌های دو فلزی تولید شده در چرخه‌های اول و دوم فرآیند TCEC



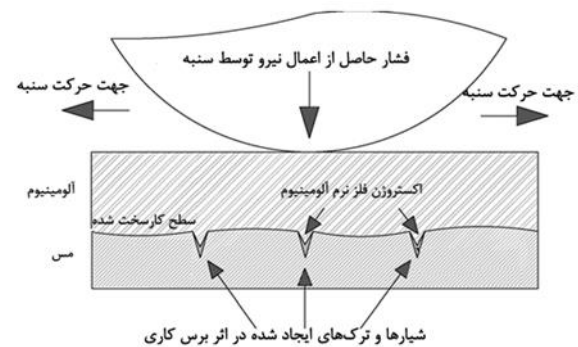
شکل ۸ تصاویر میکروسکوپ نوری از الف- نمونه‌های آلومینیوم و مس آنیل شده اولیه، ب- انتهای چرخه اول و ج- انتهای چرخه دوم

۲-۳- ریزساختار

تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح نمونه‌های آلومینیومی و مسی در سه حالت آنیل شده ابتدایی، انتهای چرخه اول و انتهای چرخه دوم فرآیند TCEC در شکل (۸) نشان داده شده است. ساختار آلومینیومی آنیل شده دارای دانه‌های درشت و همگن با اندازه متوسط دانه تقریباً 81 میکرومتر است. با اعمال کرنش پلاستیک شدید در پایان چرخه اول فرآیند TCEC، ساختار آلومینیوم به شدت دگرگون شده و مرزدانه‌های منظم نمونه اولیه از بین رفته و دانه‌ها و مرزدانه‌های فرعی درون دانه‌های اولیه ایجاد می‌شوند. در پایان چرخه دوم فرآیند TCEC نیز با اعمال کرنش پلاستیک شدیدتر، اندازه دانه‌ها ریزتر می‌شوند. در نمونه مسی آنیل شده نیز ساختار درشت دانه با اندازه متوسط 100 میکرومتر اندازه‌گیری شد که در پایان چرخه اول فرآیند TCEC دانه‌ها به شدت ریزتر می‌شوند (اندازه تقریبی 11 میکرومتر). در انتهای چرخه دوم، کاهش اندازه دانه‌ها محسوس‌تر بوده و تعداد زیادی مرزدانه قابل مشاهده است. در مطالعه انجام شده توسط علایی و همکاران [۲۱]، نمونه‌ی مسی اولیه با اندازه تقریبی 58 میکرومتر پس از یک مرحله فرآیند PTCAP به 18 میکرومتر رسیده است. پس از چرخه دوم فرآیند نیز اندازه دانه‌ها به 11 میکرومتر رسیده است. مقایسه نتایج نشان

۳-۴- مکانیزم اتصال لایه‌های مس و آلومینیوم در تولید لوله‌های دو فلزی به روش اکستروژن فشاری تناوبی

با اعمال نیروی فشاری از سمت سنبه، پیوندی از نوع جوش سرد بین دو فلز برقرار می‌شود. شیارهای برس کاری شده روی سطح مس که در اثر کار مکانیکی ایجاد شده‌اند، سبب ایجاد لایه سخت کاری شده روی آن می‌شوند. قرار گرفتن لایه نرم آلومینیومی در مجاورت لایه سخت شده حاوی شیارهای متعدد و با اعمال فشار، فلز نرم به درون شیارها تزریق (اکستروژن) شده و ساختارهای لایه‌ای بین دو فلز شکل می‌گیرد. تحت شرایط به وجود آمده، نوعی قفل مکانیکی بین دو فلز به وجود می‌آید که منجر به یک پیوند مکانیکی می‌شود. استحکام بیشتر این پیوند نیاز دارد به اینکه صفحات اتصال هرچه بیشتر به یکدیگر نزدیک شوند. این امر با تکرار فرآیند روی نمونه‌های دو فلزی فراهم می‌شود. طرح‌واره‌ی شکل‌گیری پیوند دو فلز در شکل (۱۰) آورده شده است.



شکل ۱۰ طرح‌واره اتصال میان دو فلز مس و آلومینیوم طی فرآیند اکستروژن فشاری تناوبی.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، امکان‌سنجی تولید لوله‌های دو فلزی مس-آلومینیوم به روش اکستروژن فشاری تناوبی در طی دو چرخه-کاری فرآیند مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

۱- اعمال هر چرخه از فرآیند اکستروژن فشاری تناوبی موجب افزایش استحکام تسلیم لوله دو فلزی می‌گردد. استحکام تسلیم آلومینیوم و مس اولیه به ترتیب ۸۸ و ۱۱۷ مگاپاسکال می‌باشد که برای لوله دو فلزی در انتهای چرخه اول به ۳۰۳ و در انتهای چرخه دوم به ۳۵۴ مگاپاسکال افزایش یافته است.

۲- با اعمال فرآیند اکستروژن فشاری تناوبی طی دو چرخه‌کاری بر روی نمونه‌های دو فلزی، سختی برای مس از ۶۸/۸ تا ۱۳۰/۲ ویکرز و برای آلومینیوم از ۴۹/۵ تا ۱۰۵/۴ ویکرز افزایش می‌یابد.

۳- تغییرات ریزساختار و کاهش قابل توجه اندازه دانه در هر چرخه از فرآیند، عامل اصلی در افزایش خواص مکانیکی استحکام تسلیم و سختی نمونه‌های تولیدی است.

۴- نفوذ لایه‌های نرم آلومینیوم به سطوح کار سخت شده مس که در اثر کار مکانیکی ناشی از برس کاری ایجاد شده‌اند موجب به وجود آمدن قفل مکانیکی و پیوند میان دو فلز می‌گردد. مقادیر استحکام برشی پیوند در چرخه‌های اول و دوم فرآیند حدود ۶/۳۲ و ۸/۲۴ مگاپاسکال می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب روش اکستروژن فشاری تناوبی در جهت دستیابی به پیوند مستحکم بین لایه‌های آلومینیوم و مس است.

۵- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

L	طول اکستروژن (mm)
R	شعاع قالب (mm)
r	شعاع نمونه (mm)
TCEC	فرآیند اکستروژن فشاری تناوبی

علائم یونانی

ϵ	کرنش
ϕ	زاویه شمول (درجه)
α	زاویه اکستروژن (درجه)

زیر نویس‌ها

total	کلی
0	بیرونی

۶- مراجع

- [1] F. Barandar, M. Elyasi, M. J. Mirnia, and R. Jamaati, "The effect of surface shape on the production of aluminum-copper two layer tubes using forward extrusion process," (in persian), *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 6, no. 8, pp. 1-9, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.01.025>.
- [2] K. Y. Rhee, W. Y. Han, H. J. Park, and S. S. Kim, "Fabrication of aluminum/copper clad composite using hot hydrostatic extrusion process and its material characteristics," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 384, pp. 70-76, 2004, doi: <http://doi.org/10.1016/j.msea.2004.05.051>.
- [3] H.-f. Wang, J.-t. Han, and Q.-l. Hao, "Fabrication of laminated-metal composite tubes by multi-billet rotary swaging technique," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 76, no. 1, pp. 713-719, 2015, doi: <http://doi.org/10.1007/s00170-014-6302-9>.

- [13] A. Ali, M.-E. Soliman, Y. Abdelrhman, and I. Hasaballah, "Investigation of AL/CU Bimetallic Tube Cladding Process by Severe Plastic Deformation," *JES. Journal of Engineering Sciences*, vol. 51, no. 1, pp. 1-15, 2023, doi: 10.21608/jesaun.2022.154690.1160.
- [14] M. I. Abd El Aal, H. H. El-Fahhar, A. Y. Mohamed, and E. A. Gadallah, "Influence of Parallel Tubular Channel Angular Pressing (PTCAP) Processing on the Microstructure Evolution and Wear Characteristics of Copper and Brass Tubes," *Materials*, vol. 15, no. 9, p. 2985, 2022, doi: <http://doi.org/10.3390/ma15092985>.
- [15] A. R. Eivani, H. R. Mirzakoochakshirazi, and H. R. Jafarian, "Investigation of joint interface and cracking mechanism of thick cladding of copper on aluminum by equal channel angular pressing (ECAP)," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 3394-3405, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.075>.
- [16] A. Khosravifard and R. Ebrahimi, "Investigation of parameters affecting interface strength in Al/Cu clad bimetal rod extrusion process ", *Materials & Design*, vol. 31, no. 1, pp. 493-499, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.026>.
- [17] S. Thaneshan, K. Shahin, and H. Z. Saden, "Spiral extrusion of aluminum/copper composite for future manufacturing of hybrid rods: A study of bond strength and interfacial characteristics," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 571, pp. 85-92, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.03.210>.
- [18] K. Radim, M. Adéla, K. Lenka, and F. František, "Fabrication and characterization of cold-swaged multilayered Al–Cu clad composites," *Materials & Design*, vol. 71, pp. 36-47, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.01.008>.
- [19] A. R. Eivani and A. Karimi Taheri, "A new method for producing bimetallic rods," *Materials Letters*, vol. 61, no. 9, pp. 4110-4113, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.01.046>.
- [20] M. Zebardast and A. K. Taheri, "The cold welding of copper to aluminum using equal channel angular extrusion (ECAE) process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211, no. 6, pp. 1034-1043, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.01.004>.
- [21] M. A. Alaie, M. Kasaeian-Naeni, R. Hashemi, M. Rajabi, and A. Hosseini, "Fabrication of AA1050/CP-Cu Bimetallic Tubes using Parallel Tube-Shaped Channel Angular Pressing Technique and Assessing its Mechanical Properties and Microstructure," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 76,
- [4] C. Wang, B. Zhang, D. Yao, Z. Tian, and C. Zhao, "Study of Copper/Aluminum Bimetallic Tube Rotary Ring Spinning Composite Forming Characteristics," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 8, p. 4727, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/app13084727>.
- [5] A. Tajyar and A. Masoumi, "Investigation of mechanical properties of bimetallic square tubes produced by shape rolling of Al/Cu circular pipes," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 30, no. 9, pp. 4299-4306, 2016, doi: <http://doi.org/10.1007/s12206-016-0844-8>.
- [6] A. Tavassolimanesh and A. Alavi Nia, "A new approach for manufacturing copper-clad aluminum bimetallic tubes by friction stir welding (FSW)," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 30, pp. 374-384, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.10.010>.
- [7] Y. Lei *et al.*, "Dissimilar Cu/Al tube joint by EMF-assisted brazing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 95, no. 9, pp. 4039-4047, 2018, doi: <http://doi.org/10.1007/s00170-017-1535-z>.
- [8] J. Salehi, A. Rezaeian, and M. R. Toroghinejad, "Fabrication and characterization of a bimetallic Al/Cu tube using the tube sinking process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 96, no. 1, pp. 153-159, 2018, doi: <http://doi.org/10.1007/s00170-017-1485-5>.
- [9] H. Zilin *et al.*, "Expanding-welding: A hybrid deformation and welding process for joining dissimilar metals," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 303, p. 117535, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117535>.
- [10] S. Hosseini, M. Roostaei, M. Mashhadi, H. Jabbari, and G. Faraji, "Fabrication of Al/Mg Bimetallic Thin-Walled Ultrafine-Grained Tube by Severe Plastic Deformation," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 31, 01 2022, doi: <http://doi.org/10.1007/s11665-021-06514-5>.
- [11] E. Kaveh *et al.*, "Severe plastic deformation for producing superfunctional ultrafine-grained and heterostructured materials: An interdisciplinary review," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 1002, p. 174667, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.174667>.
- [12] H. Bohluli, K. Khalili, and S. M. H. Seyedkashi, "An investigation on twist extrusion followed by forward extrusion in production of aluminum–copper bimetallic bar," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 33, pp. 52-62, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.02.010>.

- [28] M. Ebrahimi, Q. Wang, and S. Attarilar, "A comprehensive review of magnesium-based alloys and composites processed by cyclic extrusion compression and the related techniques," *Progress in Materials Science*, vol. 131, pp. 1-16, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101016>.
- [29] E. M. Zayed, M. Shazly, A. E. Sabbagh, and N. A. Mahallawy, "Deformation behavior and properties of severe plastic deformation techniques for bulk materials: A review," *Heliyon*, vol. 9, no. 6, pp. 175-167, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16700>.
- [30] M. Eftekhari, G. Faraji, M. Bahrami, and M. Baniyasi, "Effects of hydrostatic tube cyclic extrusion compression process on the properties of 5052 aluminum alloy," (in persian), *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 8, no. 8, pp. 38-51, 2021, doi: <http://doi.org/doi:10.1080/10426914.2014.984210>.
- [31] K. Edalati *et al.*, "Severe plastic deformation for producing superfunctional ultrafine-grained and heterostructured materials: An interdisciplinary review," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 1002, p. 174667, 10 2024, doi: <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.174667>.
- [32] M. Reihanian, R. Ebrahimi, N. Tsuji, and M. M. Moshksar, "Analysis of the mechanical properties and deformation behavior of nanostructured commercially pure Al processed by equal channel angular pressing (ECAP)," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 473, no. 1, pp. 189-194, 2008/01/25/ 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.04.075>.
- [33] S. Ghadimi, M. Sedighi, F. Djevanroodi, and A. Asgari, "Experimental and Numerical Investigation of a Cu–Al Bimetallic Tube Produced by ECAP," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 30, no. 10, pp. 1256-1261, 2015, doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.984210>.
- no. 7, pp. 1937-1948, 2023/07/01 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s12666-023-02897-2>.
- [22] A. Babaei, M. M. Mashhadi, and H. Jafarzadeh, "RETRACTED: Tube Cyclic Extrusion-Compression (TCEC) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 598, pp. 1-6, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.01.02>.
- [23] A. Afsari, S. E. Eftekhari Shahri, H. Bohluli, and A. Ranaei, "Studying the effect of forming at the dynamic recrystallization threshold temperature on mechanical properties of copper produced by tube cyclic extrusion-compression," *Tabriz University Mechanical Journal*, vol. 53, no. 2, pp. 185-189, 2023, doi: <http://doi.org/10.22034/jmeut.2023.51433.3099>.
- [24] A. Babaei and M. M. Mashhadi, "Tubular pure copper grain refining by tube cyclic extrusion-compression (TCEC) as a severe plastic deformation technique," *Progress in Natural Science: Materials International*, vol. 24, no. 6, pp. 623-630, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2014.10.009>.
- [25] A. Babaei and M. M. Mashhadi, "RETRACTED: Characterization of ultrafine-grained aluminum tubes processed by Tube Cyclic Extrusion-Compression (TCEC)," *Materials Characterization*, vol. 95, pp. 118-128, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.06.013>.
- [26] A. Babaei and M. M. Mashhadi, "Retraction notice to "Characterization of SPD processed ultrafine-grained pure copper tubes via Tube Cyclic Expansion-Extrusion" [Materials Characterization 101 (2015) 114–121]," *Materials Characterization*, vol. 101, p. R1, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.05.037>.
- [27] A. Ahmadi, B. Mirzakhani, and Y. Payandeh, "Investigation on Macrostructure and Hardness of Cu Tubes Processed by Tubular Cyclic Extrusion-Compression," (in persian), *The Journal of Iranian Metallurgical Engineering Society*, vol. 27, no. 1, pp. 62-71, 2024, doi: <https://doi.org/10.22076/me.2023.1999760.1379>.