



امکان سنجی اجرای فرآیند ترکیبی پرسکاری در کانال هم‌مقطع زاویه‌دار و اکستروژن مستقیم به منظور تولید میله دو جنسی آلومینیوم - مس

خلیل خلیلی^{۱*}، حمید بهلولی^۲ و محمدرضا مرکی^۳

^۱ استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۲ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۳ مربی، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۸/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۳

چکیده

در این تحقیق امکان‌سنجی تولید میله دو جنسی آلومینیوم-مس با هدف ایجاد یک پیوند بین لایه‌های مستحکم و بهبود خواص مکانیکی آن در مقایسه با مواد سازنده، مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور، از یک فرآیند اکستروژن در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار (طی حداکثر چهار پاس) و دو مرحله فرآیند اکستروژن مستقیم، قبل و بعد از این فرآیند استفاده شده است. استحکام تسلیم فشاری و استحکام برشی پیوند برای نمونه‌های دو فلزی تحت دو بار اکستروژن مستقیم به ترتیب برابر ۲۶۳ مگاپاسکال و ۹/۴ مگاپاسکال اندازه‌گیری گردید. انجام فرآیند ECAP و تکرار آن در بین فرآیندهای اکستروژن مستقیم، باعث افزایش این مقادیر شده است؛ بطوریکه برای نمونه‌های دو فلزی تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه چهار پاس فرآیند ECAP، افزایش ۳۸ درصدی در استحکام تسلیم فشاری و ۱/۵ برابری در استحکام برشی پیوند به همراه داشته است. مقایسه سختی نمونه‌های اولیه و نهایی نشان می‌دهد که سختی نمونه‌های تولید شده بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. ریزساختار حاصل شده در مس و آلومینیوم در هر کدام از نمونه‌های دو فلزی و مشاهده لایه پیوندی، مؤید نتایج بدست آمده است.

کلمات کلیدی: تغییر شکل پلاستیک شدید؛ اکستروژن در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار؛ میله دو جنسی؛ استحکام برشی پیوند.

Feasibility of Aluminum-Copper Bimetallic Bar Production by Combined Equal Channel Angular Pressing and Direct Extrusion Process

K. Khalili^{1,*}, H. Bohlooli², M.R. Maraki³

¹ Professor, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

² Ph.D. Student, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

³ Instructor, Department of Materials Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran.

Abstract

In this study, the feasibility of aluminum-copper bimetallic bar production was investigated. The aim was to achieve a strong interlayer bond so that the mechanical properties of the produced bar be better than embedded metals. For this purpose, an equal channel angular pressing process (up to a maximum of four passes) together with two steps of direct extrusion process (before and after ECAP process) was considered. In bimetallic samples that were subjected to two steps of direct extrusion, the compressive yield strength and bond shear strength were 263 and 9.4 MPa, respectively. Applying and repeating the ECAP process increased these values so that for the bimetallic samples under two steps of direct extrusion plus 4 passes of ECAP, compressive yield strength and bond shear strength increased by about 38% and 150%, respectively. Comparing the hardness of the primary and final samples showed a significant increase in the processed samples. The results were confirmed using the microstructure analysis of copper and aluminum and observation of the bonding layer in each of the bimetallic samples.

Keywords: Severe Plastic Deformation; Equal Channel Angular Pressing (ECAP); Bimetallic Bar; Bound Shear Strength.

۱- مقدمه

امروزه پیدایش مواد جدید با خواص مکانیکی و فیزیکی بهبود یافته یکی از حوزه‌های تحقیقاتی علوم مواد مدرن است. رسیدن به طیف گسترده‌ای از خواص مطلوب مکانیکی و فیزیکی از جمله استحکام، سختی، شکل‌پذیری، هدایت الکتریکی و حرارتی بالا درون یک فلز بسیار دشوار است [۱]. از سوی دیگر بسیاری از نیازهای صناعی چون صنایع راکتورسازی، هوایی، خودروسازی و الکترونیک نمی‌تواند با استفاده از مواد معمولی شناخته شده برآورده شود؛ بنابراین مطالعه برای دستیابی به مواد مرکب با تلفیقی از خصوصیات مکانیکی و فیزیکی که توسط فرآیندهای خاص بهبود یافته اند، علاقه‌مندی بسیاری از محققان را در دو دهه اخیر به خود اختصاص داده است [۲ و ۳]. مواد مرکب به طور کلی از دو یا چند جزء سازنده تشکیل شده‌اند که ترکیب آنها موجب ایجاد خواصی می‌شود که از جهات گوناگون برخواص اجزای سازنده ماده مرکب برتری دارد [۴].

مواد مرکب زمینه فلزی کاربردهای متعددی را در زندگی روزمره پیدا کرده‌اند. به عنوان مثال ماده ترکیبی از سه لایه ورق فولاد زنگ نزن - آلومینیوم - مس می‌تواند در وسایل آشپزی کاربرد داشته باشد. ماده ترکیبی از دو لایه ورق مس - آلومینیوم دارای هدایت الکتریکی معادل یک مس آلیاژی بوده، در حالی که ۵۰ درصد وزن سازه و ۳۵ درصد قیمت آن را کاهش می‌دهد [۵].

از طرف دیگر در چند دهه اخیر مواد چند بلوری با دانه بندی بسیار ریز در حد نانومتر به دلیل برخورداری از خواص مکانیکی و فیزیکی منحصر به فرد، شدیداً مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. خواص مکانیکی و فیزیکی تمام مواد بلوری بر اساس چندین عامل تعیین می‌گردند که اندازه دانه مهم‌ترین و اساسی‌ترین نقش را داراست [۶]. استحکام تمام مواد چند بلوری با اندازه متوسط دانه d از طریق رابطه هال-پیچ^۱ تعیین می‌شود. این رابطه بصورت رابطه (۱) است [۷ و ۸]:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

در این رابطه σ_y تنش تسلیم، σ_0 مقاومت شبکه، d اندازه دانه و k_y ثابتی است که به جنس ماده بستگی دارد (ضریب

هال-پیچ). مشکلی که در عمل برای تولید مواد ریز دانه وجود دارد، این است که معمولاً تولید مواد با دانه‌های ریزتر منجر به تولید قطعاتی در ابعاد کوچک با هزینه زیاد می‌شود. روش‌های جدیدی به منظور کاهش اندازه دانه‌ها به وجود آمده است که روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید^۲ به خاطر کنترل خواص مکانیکی ماده در حین فرآیند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید را با توجه به هندسه و شکل محصول این فرآیند، می‌توان به سه دسته اصلی تقسیم بندی کرد. این سه دسته شامل، تغییر شکل پلاستیک شدید مواد بالک، ورق‌ها و لوله‌ها است که به طرق مختلف انجام می‌پذیرد و در سال‌های اخیر با اصلاح روش‌های قدیمی [۹] و با معرفی روش‌های ترکیبی [۱۰] توسعه یافته‌اند.

چنانچه در فرآوری مواد مرکب از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید بهره گرفته شود، انتظار می‌رود، ضمن بهره جستن از خواص ویژه و منحصر به فرد مواد مرکب، شرایطی برای ایجاد ساختارهایی با دانه بندی ریز نیز در مواد تشکیل دهنده فراهم شود. استفاده از روش‌های SPD جهت اتصال فلزات غیر هم‌جنس در سال‌های اخیر گسترش پیدا کرده است. در این روش‌ها اتصال بین مواد در دماهای بسیار پایین تر 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 بین فلزی در اثر آمیخته شدن عناصر دو فلز گردد؛ همچنین با افزایش نقایص شبکه کریستالی ناشی از تغییر شکل پلاستیک شدید انتظار می‌رود، پدیده نفوذپذیری تقویت یافته و استحکام پیوند بین لایه‌ای دو فلز به شدت افزایش یابد [۱۱]. در خصوص تولید مواد مرکب دو فلزی شامل، مس و آلومینیوم و اتصال آنها به هم، پژوهش‌ها و روش‌های بسیار زیاد دیگری مانند جوشکاری ذوبی [۱۲]، ریخته‌گری مرکب [۱۳]، جوشکاری نفوذی [۱۴]، جوش در اثر فرآیند کشش عمیق [۱۵]، جوشکاری سرد [۱۶]، انواع روش‌های اکستروژن [۱۷ و ۱۸]، جوشکاری

² Sever Plastic Deformation (SPD)

¹ Hall-Petch

شود. با وجود گزارش آن‌ها 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. زبردست و همکاران [۳۴] اذعان داشتند که تولید میله‌های دو فلزی Al / Cu با فرآیند ECAP، امکان‌پذیر است. مکانیزم جوش سرد بین غلاف مس و هسته آلومینیوم با استفاده از خصوصیات سطوح تماس هم از لحاظ تئوری و هم با بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی سطوح پوست کنده شده توسط آن‌ها ارزیابی شد و نتایج زیر بدست آمد: ۱- برای رسیدن به جوش سرد، کشش سطح آستانه حدود ۵۹ درصد لازم است ۲- کاهش زاویه داخلی قالب منجر به استحکام بیشتر در جوش می‌شود ۳- وجود زاویه خارجی قالب کیفیت جوش را مختل می‌کند. ایوانی و همکاران [۳۵]، نقش عامل متالورژیکی را در شکل‌گیری و استحکام پیوند بسیار اندک برشمردند و عامل قفل مکانیکی و افزایش کسر اتصال را دلیل اصلی بهبود استحکام در نمونه‌های دو فلزی در فرآیند ECAP و تکرار آن، بیان کردند.

در مطالعه حاضر سعی شده است، با بکارگیری یک فرآیند ترکیبی که می‌تواند یکی از نوآوری‌های این پژوهش باشد، محدودیت‌ها و نقایص بوجود آمده در نمونه‌های تولید شده در روش‌های قبلی تا اندازه‌ای رفع شود. اعمال ترکیبی فرآیند اکستروژن مستقیم^۴ و فرآیند اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار روی نمونه‌های دو فلزی به ترتیبی که در ادامه به آن اشاره خواهد شد، شرایطی را بوجود آورده است که اولاً یک پیوند بین لایه‌ای مستحکم بین دو فلز برقرار گردد و ثانیاً سیستم‌های لغزشی متفاوتی از نوع برشی به دلیل اعمال کرنش‌های شعاعی و طولی در نمونه فعال گردد و توزیع یکنواخت‌تر کرنش را به دنبال داشته باشد و باعث بهبود یکنواخت خواص مکانیکی در مواد سازنده گردد.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش از مس خالص تجاری و آلومینیوم ۶۰۶۳ به عنوان مواد مورد مطالعه استفاده گردیده که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ و ۲ آورده شده است.

انفجاری [۱۹] و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی [۲۰] توسط محققان ارائه شده است که هر یک از آنها دارای معایب و محاسن مخصوص به خود است. اکسیداسیون و تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد با استحکام پایین در روش‌های جوشکاری ذوبی و نیمه ذوبی و محدودیت‌هایی در هندسه و ابعاد نمونه‌ها و نقص‌هایی مانند فرآیند زمان‌بر و هزینه‌های بالای تولید در روش‌های جوشکاری حالت جامد باعث شده است که پژوهشگران به دنبال روش‌های جدیدی باشند. استفاده از روش‌های SPD جهت اتصال فلزات غیر هم‌جنس یکی از این روش‌ها است.

سایپانادان و همکاران [۲۱]، یک روش اکستروژن توسعه یافته برای تولید میله‌های دو فلزی بصورت اکستروژن مارپیچی رو به جلو متقارن محوری^۱ پیشنهاد دادند. این فرآیند شامل، اکستروژن یک نمونه دو فلزی از طریق یک قالب با شیارهای مارپیچ است. راه حل تحلیلی در خصوص تغییر شکل‌های برشی حاصله در جهت شعاعی نمونه توسط آن‌ها ارائه گردید و مطالعه عملی در جهت تولید میله‌های آلومینیوم- مس با استفاده از این فرآیند، در دمای بالا و در حضور فشار عقبی انجام گرفت. آن‌ها بیان کردند که تغییرات سختی نمونه دو فلزی از مرکز آن تا سطح آن متغیر است و هرچه به سطح آن نزدیک می‌شود، مقدار آن افزایش می‌یابد. کوکیچ و همکاران [۲۲]، روش قالب‌گیری چرخشی^۲ را به منظور تولید میله‌های چند لایه آلومینیوم- مس- آلومینیوم ارائه کردند. آن‌ها 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 [۲۳]، روش اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار^۳ را برای اولین بار به منظور تولید میله‌های دو فلزی مس- آلومینیوم پیشنهاد کردند. آن‌ها مزایای استفاده از این روش را به شرح ذیل اعلام کردند: ۱) کنترل ابعادی خوب روی هر دو جزء سازنده اتفاق می‌افتد ۲) انجام فرآیند در بیش از یک پاس که می‌تواند موجب افزایش استحکام پیوند بین لایه‌ای شود، امکان‌پذیر است ۳) فرآیند در دماهای مختلف می‌تواند انجام

^۱ Axi-symmetric Forward Spiral Composite Extrusion (AFSCE)

^۲ Rotary Swaging (RS)

^۳ Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

^۴ Direct Extrusion (DE)

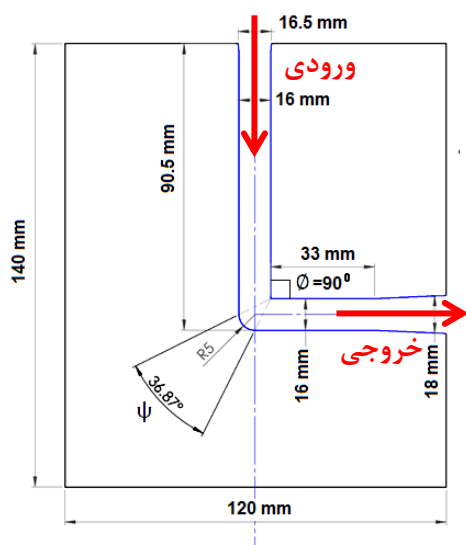
جدول ۱- ترکیب شیمیایی مس مورد مطالعه [۲۴]

عنصر	Mg	Cl	S	Ca	Sn	Sb	Cu
درصد وزنی	۰/۴۷	۰/۰۲۶	۰/۰۲۵	۰/۰۲	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷	۹۹/۴۴

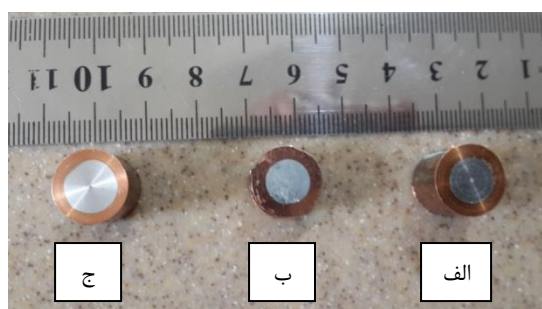
جدول ۲- ترکیب شیمیایی آلومینیوم ۶۰۶۳ مورد مطالعه [۲۵]

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

مستقیم بعلاوه یک پاس ECAP و تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه چهار پاس ECAP تولید می‌شوند (شکل ۲).



شکل ۱- ابعاد و زوایای قالب ECAP

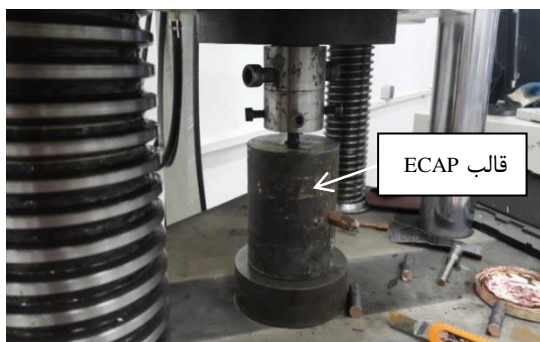


شکل ۲- نمونه‌های دو فلزی تولید شده (الف) تحت دو بار اکستروژن مستقیم (ب) تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه یک پاس ECAP و (ج) تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه چهار پاس ECAP

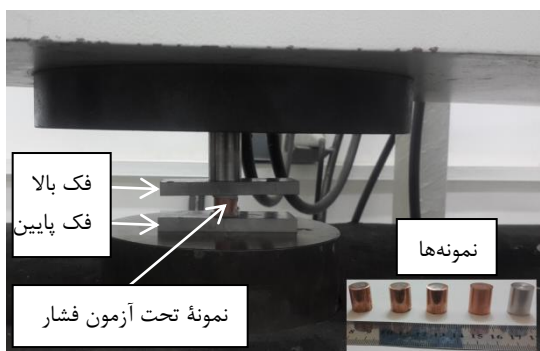
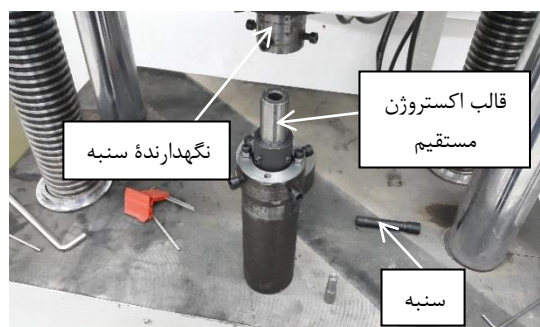
به منظور آماده سازی نمونه‌های دوفلزی، ابتدا یک لوله مسی به قطر خارجی ۲۰ میلی‌متر و یک میله آلومینیومی به قطر ۱۴ میلی‌متر به نحوی تهیه گردید که اندازه قطر میله آلومینیومی به اندازه قطر داخلی لوله مسی باشد. سطوح داخلی و خارجی نمونه‌ها توسط استون کاملاً تمیز گردید و با استفاده از یک برس سیمی نرم سطوح داخلی لوله مسی جهت ایجاد شیارهای میکروسکوپی برس زده شد. به منظور جازدن میله آلومینیومی، لوله مسی را کمی گرم کرده تا انبساط پیدا کرده و میله آلومینیومی راحت‌تر درون آن قرار گیرد. در پایان نمونه‌هایی به طول تقریبی ۴۵ میلی‌متر توسط عملیات برش‌کاری تهیه گردید.

جهت انجام فرآیندهای شکل‌دهی روی نمونه‌های دو فلزی آماده شده، از دو قالب اکستروژن مستقیم و یک قالب ECAP استفاده گردید. شکل ۱ ابعاد و زوایای داخلی (ϕ) و خارجی (ψ) قالب ECAP را نشان می‌دهد.

ابتدا نمونه‌ها درون قالب اکستروژن مستقیم قرار گرفته و تحت فرآیند صورت گرفته، قطر آن از ۲۰ به ۱۶ میلی‌متر کاهش می‌یابد (کاهش ۳۶ درصدی سطح مقطع). در ادامه نمونه‌های اکستروژن شده، درون قالب ECAP قرار گرفته و طی چند پاس (حداکثر چهار پاس) تحت این فرآیند قرار می‌گیرند. به این ترتیب نمونه‌هایی از ماده دو فلزی تحت یک پاس و چهار پاس فرآیند ECAP تهیه می‌شود و در مرحله بعد این نمونه‌ها مجدد تحت فرآیند اکستروژن مستقیم قرار گرفته و قطر آنها از ۱۶ به ۱۴ میلی‌متر کاهش می‌یابد (کاهش ۲۳ درصدی سطح مقطع). در پایان نمونه‌هایی تحت فقط دو بار اکستروژن مستقیم، تحت دو بار اکستروژن



شکل ۳- سنجه، نگهدارنده سنجه و نحوه استقرار قالب‌های اکستروژن مستقیم و ECAP زیر دستگاه پرس



شکل ۴- نحوه قرارگیری نمونه‌ها زیر دستگاه پرس در آزمون فشار

بطوریکه

$$D_1 = D_{core} - 0.5 \text{ mm} \quad (2)$$

$$D_2 = D_{core} + 0.5 \text{ mm} \quad (3)$$

در روابط مذکور D_1 و D_2 به ترتیب قطر سنجه و فیکسچر مورد استفاده و D_{core} قطر قسمت آلومینیومی از نمونه‌های دو فلزی تولید شده است. جهت انجام آزمون استحکام پیوند، نمونه‌هایی به ضخامت h تهیه می‌شوند و درون فیکسچر قرار می‌گیرند. مطابق شکل ۶ سنجه از یک طرف به فک فشاری دستگاه پرس متصل می‌شود و از طرف دیگر روی نمونه‌ها قرار می‌گیرد.

نیروی فشاری از طریق حرکت سنجه با سرعت ثابت ۵ میلی‌متر بر دقیقه، به منظور جدا کردن لایه داخلی (آلومینیوم) اعمال می‌شود و روند تغییرات آن بر حسب جایجایی سنجه ثبت می‌شود. بر اساس رابطه ۴ استحکام برشی پیوند از تقسیم بیشترین نیرو بر مساحت سطح تماس میان دو فلز در نمونه بدست می‌آید:

جهت انجام فرآیندهای اکستروژن مستقیم و ECAP از دستگاه پرس Gotech با ظرفیت ۱۰۰ تن در دمای اتاق و با سرعت ثابت سنجه برابر یک میلی‌متر بر ثانیه استفاده گردید. شکل ۳ نحوه استقرار قالب‌های مذکور را زیر دستگاه پرس نشان می‌دهد.

از مس و آلومینیوم اولیه و همچنین میله‌های دو جنسی تولید شده نمونه‌های مشابهی از نظر هندسی تهیه گردید و جهت بررسی رفتار مکانیکی آنها از آزمون فشار مطابق استاندارد ASTM-E9 استفاده گردید [۲۶]. به دلیل محدودیتی که در اندازه میله‌های تولیدی از نظر طولی وجود داشت، تهیه نمونه استاندارد آزمون کشش میسر نگردید و لذا از آزمون فشار برای اندازه‌گیری استحکام تسلیم و بررسی رفتار پلاستیک ماده استفاده شد. برای انجام این آزمون از دستگاه پرس GOTECH مدل GT-7001-LS100 مطابق شکل ۴ بهره گرفته شد. آزمون فشار با سرعت ۰/۳ میلی‌متر بر ثانیه در دمای اتاق انجام گرفت و تا کاهش ۶۰ 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 فک دستگاه و سطح نمونه از پلاستیک تفلون و فوم صابون استفاده شد.

جهت بررسی میزان استحکام پیوند بوجود آمده بین مس و آلومینیوم، نوعی از آزمون استحکام برشی^۱ بر اساس استاندارد ASTM F1044-87 طرح ریزی گردیده است [۲۳، ۳۴ و ۳۵]. برای این منظور فیکسچر و سنجه‌ای مطابق شکل ۵ طراحی و ساخته شد.

¹ Shear Strength Test

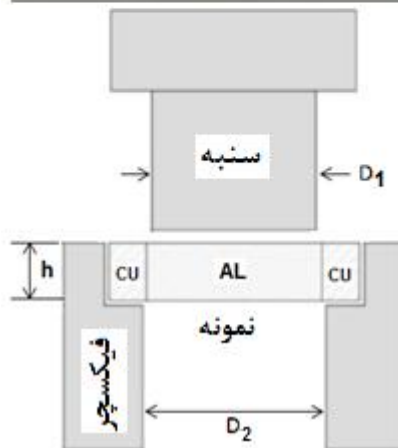
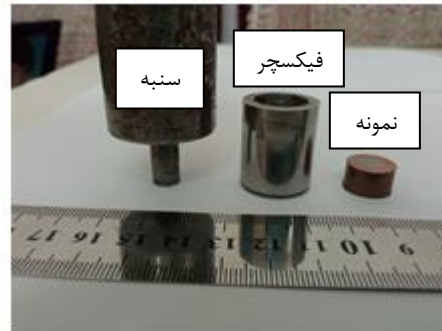
جداگانه انجام شد و میانگین مقادیر حاصله برای هر قسمت به عنوان سختی ثبت گردید. آزمون سختی تحت بار ۱۰ کیلوگرم به مدت ۱۰ ثانیه انجام گرفت. از دستگاه سختی سنج ویلسون- ولپرت مدل N930 جهت این آزمون استفاده شد.

به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌های تولیدی توسط میکروسکوپ نوری، مقاطعی در جهت عرضی از هر نمونه تهیه شد گردید. با توجه به متفاوت بودن محلول حکاکی برای دو فلز خصوصاً واکنش پذیری شدید آلومینیوم با محلول اچ مس، هر یک از دو فلز پس از جدا شدن از یکدیگر متالوگرافی شدند. نمونه‌های مسی و آلومینیومی پس از عملیات سنباده زنی و صیقل کاری حکاکی شدند. نمونه‌های مسی در محلول محتوی 2gr دی کرومات پتاسیم (K₂Cr₂O₇)، 4ml محلول اشباع کلرید سدیم (NaCl)، 8ml اسید سولفوریک (H₂SO₄) حکاکی شده و نمونه‌های آلومینیومی در محلولی حاوی ۱۲ درصد HF، ۱۲ درصد HCl، ۲۵ درصد HNO₃ و ۵۱ درصد آب مقطر حکاکی شدند. جهت مشاهده وضعیت محل اتصال از میکروسکوپ نوری استفاده گردید. سطح نمونه‌های برش خورده با دقت زیاد سنباده زده شدند، عملیات سنباده کاری از سنباده دانه درشت با شماره ۱۰۰ شروع و با سنباده دانه ریز شماره ۵۰۰۰ پایان یافت. نمونه‌های آماده شده بوسیله محلول آب و Al₂O₃ پولیش کاری شدند.

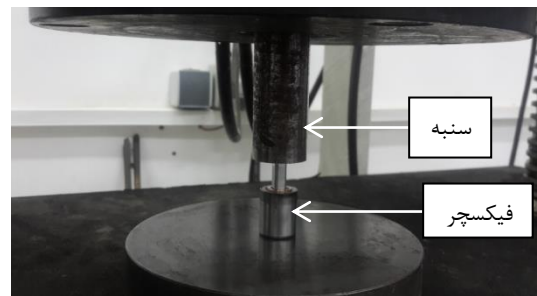
۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین خواص مکانیکی میله‌های دو جنسی آلومینیوم- مس تولیدی

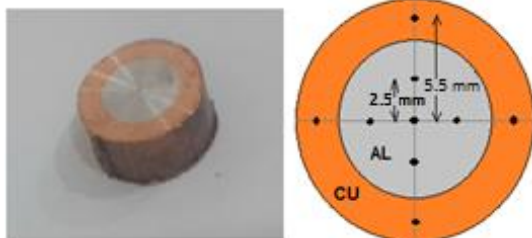
شکل ۸ نمودارهای تنش- کرنش حقیقی حاصل از آزمون فشار را برای نمونه‌های اولیه و نمونه‌های دو فلزی تولید شده



شکل ۵- فیکسچر و سنبه طراحی شده جهت آزمون استحکام پیوند



شکل ۶- نحوه انجام آزمون استحکام پیوند

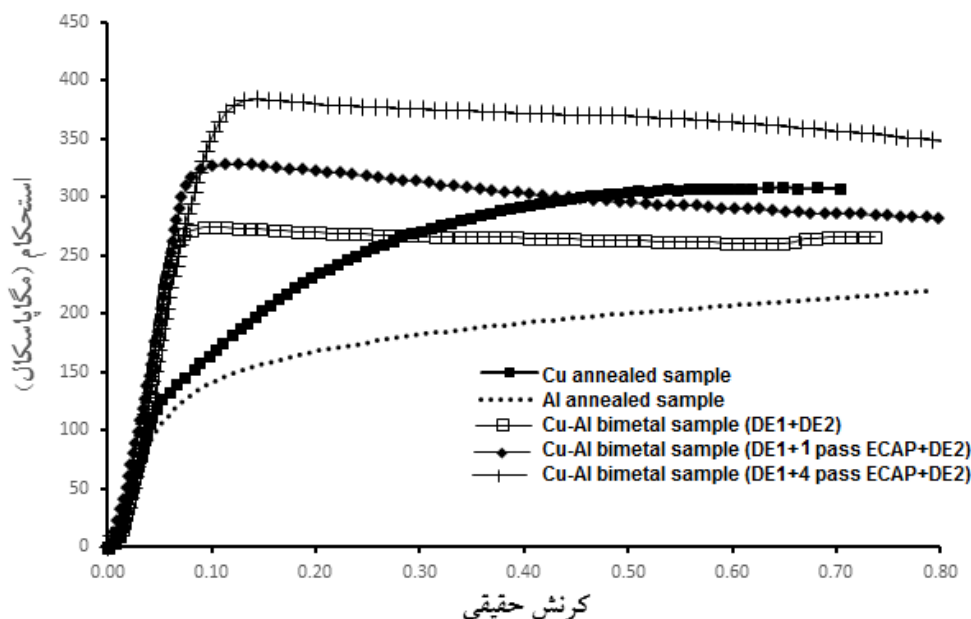


شکل ۷- الگوی نقاط برای آزمون سختی سنجی

$$\tau = \frac{F_{max}}{\pi D_{core} h} \quad (4)$$

در رابطه مذکور F_{max} بیشترین نیروی فشاری ثبت شده بر حسب نیوتن و τ استحکام برشی پیوند است که برحسب مگاپاسکال بدست می‌آید.

آزمون سختی سنجی به روش ویکرز روی سطوح عمود بر محور مرکزی میله‌ها مطابق الگوی نقاط نشان داده شده در شکل ۷ برای هر یک از قسمت‌های مسی و آلومینیومی بطور



شکل ۸ - منحنی‌های تنش - کرنش حقیقی حاصل از آزمون فشار روی نمونه‌های مسی و آلومینیومی اولیه و نمونه‌های دوفلزی در حالت‌های مختلف

قابل توجهی افزایش یافته است. این روند افزایشی در استحکام تسلیم نمونه‌های دوفلزی، با اعمال فرآیند ECAP در بین فرآیندهای اکستروژن مستقیم و تکرار آن، نیز مشاهده شده است. بر اساس نمودارهای حاصل از آزمون فشار مقادیر مرتبط با استحکام تسلیم نمونه‌ها در حالت‌های مختلف، در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- استحکام تسلیم فشاری نمونه‌ها در حالت‌های مختلف

استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	نوع ماده و روش تولیدی
۱۱۷	نمونه مسی اولیه
۸۸	نمونه آلومینیومی اولیه
۲۶۳	نمونه دوفلزی تحت دو بار اکستروژن مستقیم (از ۲۰ به ۱۶ میلی‌متر و از ۱۶ به ۱۴ میلی‌متر)
۳۱۰	نمونه دوفلزی تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه یک پاس فرآیند ECAP
۳۶۲	نمونه دوفلزی تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه چهار پاس فرآیند ECAP

نشان می‌دهد. نمونه‌های دوفلزی انتخاب شده برای آزمون فشار، به صورت نمونه‌هایی هستند که تحت دو بار اکستروژن مستقیم $(DE_1 + DE_2)$ ، تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه یک پاس فرآیند اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار $(DE_1 + 1 \text{ Pass ECAP} + DE_2)$ و تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه چهار پاس فرآیند اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار $(DE_1 + 4 \text{ Pass ECAP} + DE_2)$ تولید شده‌اند. لازم به ذکر است که از فرآیند ECAP در بین فرآیندهای اکستروژن مستقیم استفاده شده است.

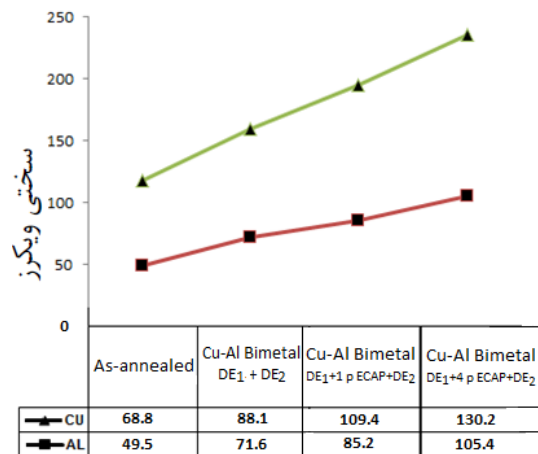
بررسی نمودارهای حاصل از آزمون فشار برای نمونه‌های مسی و آلومینیوم اولیه و نمونه‌های دوفلزی تولید شده نشان می‌دهد که نقطه تسلیم نمونه‌های تک فلزی اولیه در سطح پایین‌تری نسبت به نمونه‌های دوفلزی اتفاق می‌افتد. بر اساس نمودارهای حاصل از آزمون فشار، استحکام تسلیم نمونه‌های مسی و آلومینیومی اولیه به ترتیب برابر ۱۱۷ و ۸۸ مگاپاسکال اندازه‌گیری گردید.

نتایج آزمون فشار روی نمونه‌های دوفلزی تولید شده نشان می‌دهد که با قرارگیری نمونه‌های دوفلزی تحت دو بار فرآیند اکستروژن مستقیم، استحکام تسلیم آنها در مقایسه با استحکام تسلیم نمونه‌های مسی و آلومینیومی اولیه به مقدار

یکی از دلایل بهبود خواص مکانیکی مواد طی فرآیندهای SPD را می‌توان دگرگونی ساختاری و کاهش اندازه دانه دانست که متأثر از کرنش‌های اعمالی است [۲۷-۳۱]. شکل (۱۰- الف) ریزساختار تصویر برداری شده توسط میکروسکوپ نوری از سطح نمونه آلومینیومی اولیه را که از دانه‌های درشت متعارف^۱ تشکیل می‌شود، نشان می‌دهد. با استفاده از روش برخورد خطی^۲ و به کمک نرم افزار Image J متوسط اندازه دانه در این حالت اندازه‌گیری گردید. متوسط اندازه دانه برای آلومینیوم اولیه در حدود ۶۷ میکرومتر تعیین شد. شکل‌های (۱۰- ب تا د) ساختار دانه‌بندی قسمت آلومینیومی نمونه‌های دو فلزی را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. آنچه به وضوح ملاحظه می‌شود، این است که با بیشتر شدن تعداد پاس‌های فرآیند ECAP روی نمونه‌ها، ساختار دانه بندی تغییر کرده، مرزخانه‌ها افزایش پیدا نموده و اندازه متوسط دانه کاهش پیدا کرده است.

در نمونه‌های تحت دو بار اکستروژن مستقیم، ساختار دانه‌بندی آلومینیوم نسبت به حالت اولیه اندکی تغییر کرده است و دانه‌ها تا حدودی کشیده شده‌اند. اندازه متوسط دانه در این حالت در حدود ۵۴ میکرومتر اندازه‌گیری گردید (شکل ۱۰- ب). در نمونه‌های تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه یک پاس فرآیند ECAP مشاهده شد که با اعمال کرنش پلاستیک شدید، ساختار دانه‌بندی آلومینیوم تا حدود زیادی دگرگون شده و اندازه دانه که متأثر از اعمال کرنش برشی شدید هنگام عبور ماده از درون قالب ECAP است، به شدت کاهش یافته است (شکل ۱۰- ج). با اعمال کرنش‌های پلاستیک شدید بیشتر در نمونه‌های تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه چهار پاس فرآیند ECAP، سیستم‌های لغزشی متفاوتی به دلیل اعمال کرنش‌های شعاعی و طولی در نمونه فعال می‌شود و ریزساختار ماده دستخوش تغییرات بیشتر می‌شود. عوامل مذکور باعث می‌شود، ساختاری متشکل از دانه‌های ریز و نسبتاً همگن به همراه تعداد زیادی مرزخانه جدید، توسط میکروسکوپ نوری مشاهده شود (شکل ۱۰- د).

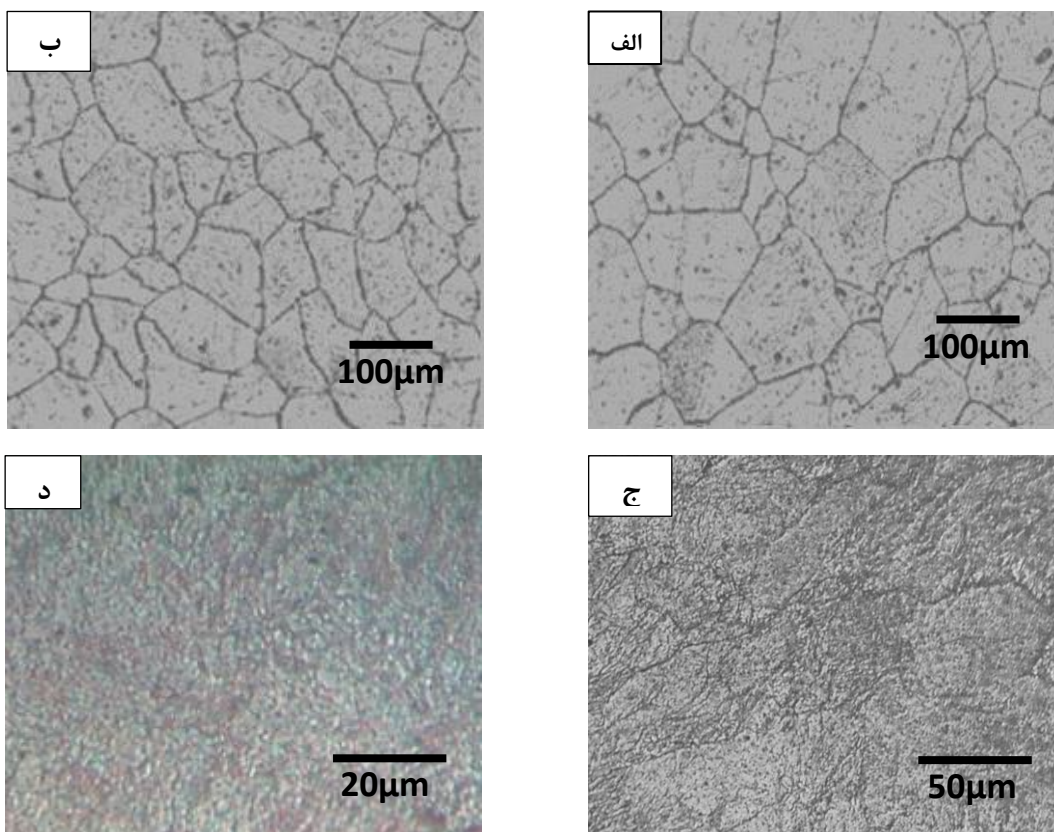
شکل ۹ میانگین مقادیر سختی ویکرز نمونه‌های مس و آلومینیوم اولیه و میانگین مقادیر سختی ویکرز قسمت‌های مسی و آلومینیومی در نمونه‌های دو فلزی تولید شده را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. از الگوی نقاط نشان داده شده در شکل ۹ جهت آزمون سختی سنجی استفاده گردید و میانگین مقادیر سختی در نقاط مختلف جهت ثبت گزارش مورد استفاده قرار گرفت. میانگین سختی ویکرز برای مس و آلومینیوم اولیه به ترتیب برابر ۶۸/۸ و ۴۹/۵ بدست آمده است. پس از اعمال فرآیند اکستروژن مستقیم طی دو مرحله و کاهش قطر نمونه‌ها از ۲۰ به ۱۴ میلی‌متر میانگین مقادیر سختی مس و آلومینیوم به ترتیب در حدود ۸۸/۱ و ۷۱/۶ اندازه‌گیری شد. میانگین مقادیر سختی برای مس و آلومینیوم برای نمونه‌های دو فلزی تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه یک پاس فرآیند ECAP، به ترتیب ۱۰۹/۴ و ۸۵/۲ ویکرز تعیین گردید. با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند ECAP و اعمال کرنش‌های پلاستیک شدید بیشتر، سختی هر دو قسمت آلومینیومی و مسی باز هم افزایش یافت؛ بطوریکه میانگین مقادیر سختی به عدد ۱۳۰/۲ ویکرز برای مس و ۱۰۵/۴ ویکرز برای آلومینیوم در نمونه‌های دو فلزی تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه چهار پاس فرآیند ECAP رسید.



شکل ۹- مقادیر سختی نمونه‌های مس و آلومینیوم اولیه و میانگین مقادیر سختی قسمت‌های مسی و آلومینیومی در نمونه‌های دو فلزی تولید شده در حالت‌های مختلف

¹ Conventional coarse-grains

² linear Intercept

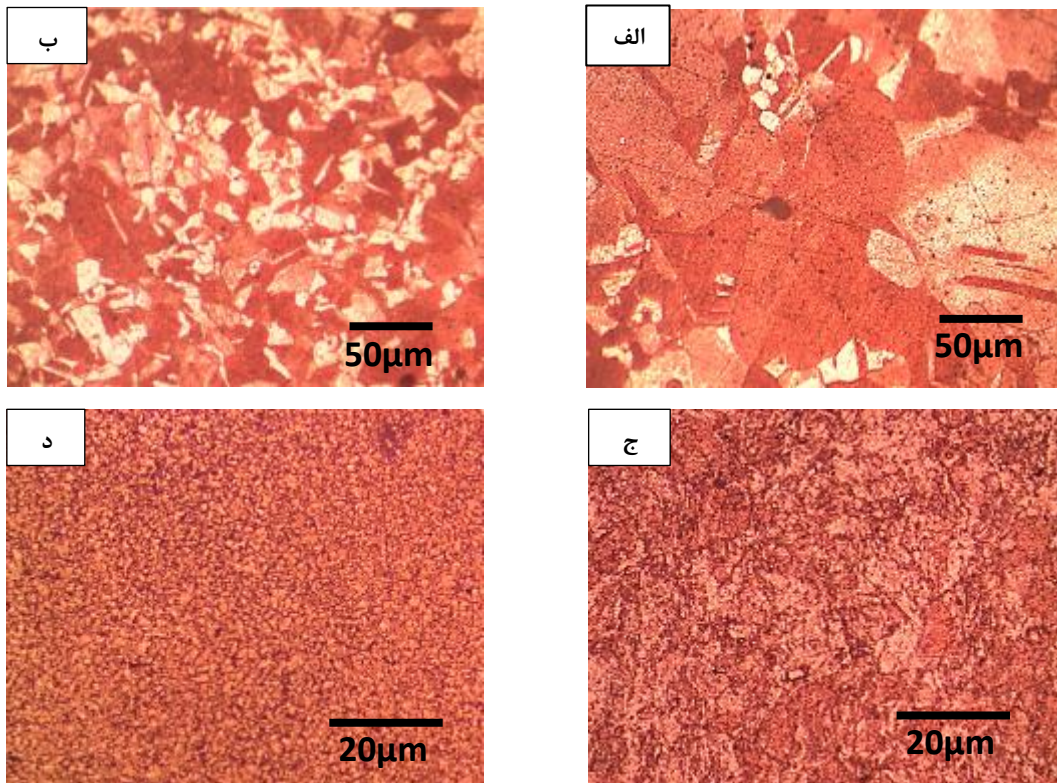


شکل ۱۰- ریزساختار تصویر برداری شده توسط میکروسکوپ نوری از سطح قسمت آلومینیومی نمونه‌های دوفلزی، (الف) اولیه، (ب) تحت دو بار اکستروژن مستقیم، (ج) تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه یک پاس فرآیند ECAP و (د) تحت دوبار اکستروژن مستقیم بعلاوه چهار پاس فرآیند ECAP

است، ضمن اینکه کاهش شدید اندازه دانه و ایجاد مرزدانه‌های جدید به وضوح مشاهده می‌شود (شکل ۱۱- ج). با اعمال کرنش‌های پلاستیک شدید بیشتر در نمونه‌های دو فلزی تحت دو بار فرآیند اکستروژن مستقیم بعلاوه چهار پاس فرآیند ECAP، تمامی ساختار پالایش شده و دانه‌هایی در مقیاس بسیار ریز درون ماده حاصل گردیده است (شکل ۱۱- د).

اعمال فرآیند ECAP و تکرار آن، در نهایت یکنواختی و همگنی ساختار دانه‌بندی ماده را به دنبال دارد که از دانه‌های بسیار ریز تشکیل می‌شود و یکی از دلایل بهبود خواص مکانیکی مثل استحکام و سختی نمونه‌های تولیدی است. استحکام با اندازه متوسط دانه مطابق رابطه هال-پچ ارتباط دارد، بطوریکه با کاهش اندازه متوسط دانه، استحکام ماده افزایش می‌یابد.

شکل ۱۱ ریزساختار تصویر برداری شده توسط میکروسکوپ نوری از سطح نمونه‌های مسی را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. (شکل ۱۱- الف) مربوط به ریزساختار نوری بدست آمده از سطح نمونه‌های مسی اولیه است. مشاهده می‌شود که ساختار دانه‌بندی مس اولیه دارای دانه‌های درشت همگن با متوسط اندازه دانه در حدود ۸۵ میکرومتر است. در نمونه‌های تحت دو بار اکستروژن مستقیم، ساختار دانه‌بندی مس به واسطه کار مکانیکی اعمال شده تغییر کرده است. اندازه متوسط دانه در ساختار کریستالی جدید برای مس در این حالت ۴۵ میکرومتر بدست آمد (شکل ۱۱- ب). با قرار گرفتن نمونه‌های دو فلزی تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه یک پاس ECAP، کرنش‌هایی از نوع برشی شدید هم به نمونه‌ها وارد می‌شود. این امر باعث تشکیل یک ریزساختار جدید با دانه‌های کشیده در مس شده



شکل ۱۱- ریزساختار تصویر برداری شده توسط میکروسکوپ نوری از سطح قسمت مسی نمونه‌های دوفلزی (الف) اولیه (ب) تحت دو بار اکستروژن مستقیم (ج) تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه یک پاس فرآیند ECAP (د) تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه چهار پاس فرآیند ECAP

های SPD نقش مهمی در بهبود خواص مکانیکی مواد ریزدانه ایفا می‌کند. بدین ترتیب که در حضور فشار هیدروستاتیک تمرکز جاهای خالی در حین تغییر شکل پلاستیک افزایش خواهد یافت. در این حالت نفوذ نابجایی‌ها در جاهای خالی به سختی انجام می‌شود و فرآیند حذف نابجایی‌ها کند می‌شود. در نهایت با کند شدن فرآیند حذف نابجایی‌ها نرخ کرنش سختی افزایش می‌یابد که این امر بهبود خواص مکانیکی را به همراه دارد [۳۳].

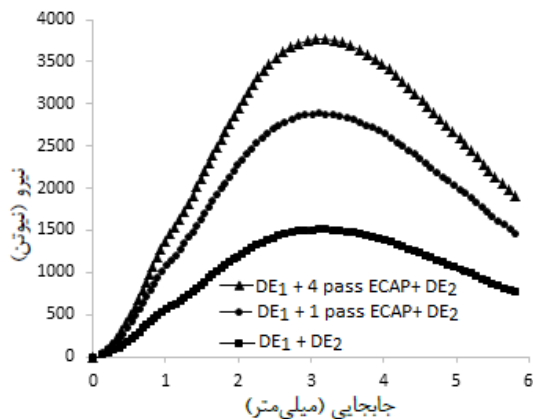
۳-۲- تعیین استحکام برشی پیوند میله‌های دو جنسی آلومینیوم-مس تولیدی

آزمون استحکام برشی^۱ با استفاده از فیکسچر و سنبه ساخته شده مطابق شکل ۵، توسط اعمال نیروی فشاری از طریق

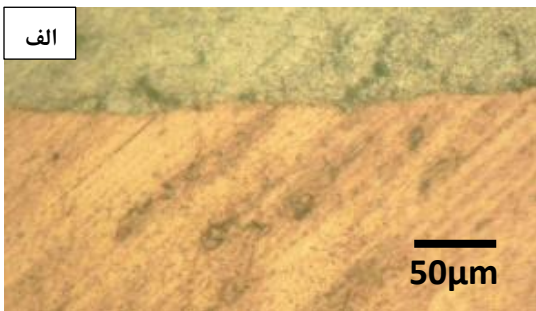
با توجه به شکل‌گیری ریزساختارهای متفاوت در هر مرحله در نمونه‌های دو فلزی تولیدی، مکانیزم اصلی استحکام بخشی را می‌توان بر پایه کرنش سختی^۱ یا افزایش افراطی چگالی نابجایی‌ها مرتبط دانست. با اعمال فرآیند ECAP چگالی نابجایی‌ها با توجه به وارد آمدن کرنش‌های پلاستیک شدید به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. این مسئله در موادی مانند، مس و آلومینیوم که تحت تغییر شکل پلاستیک شدید چه به صورت بالک، ورق و لوله بوده- اند، مشاهده و گزارش شده است [۳۰]. اساساً افزایش بیش از اندازه چگالی نابجایی‌ها موجب مسدود شدن حرکت آنها توسط دیواره‌ها یا سلول‌های نابجایی به وجود آمده می‌شود، بنابراین سختی و استحکام در اثر کرنش سختی افزایش می‌یابد [۳۲]. از سوی دیگر وجود فشار هیدروستاتیک در روش-

^۱ Shear Strength Test

^۱ Strain hardening



شکل ۱۲- مقادیر نیرو بر حسب جابجایی به منظور جدا کردن قسمت آلومینیومی در نمونه‌های دو فلزی تولید شده در حالت‌های مختلف



شکل ۱۳- تصاویر میکروسکوپ نوری از محل اتصال دو فلز در نمونه دو فلزی تحت دو بار اکستروژن مستقیم

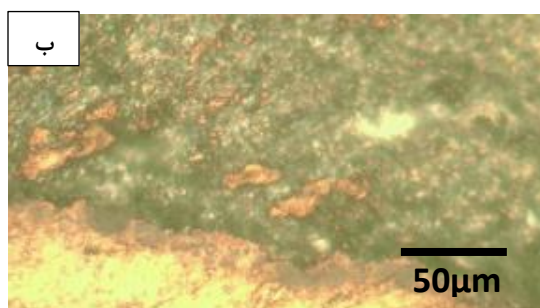
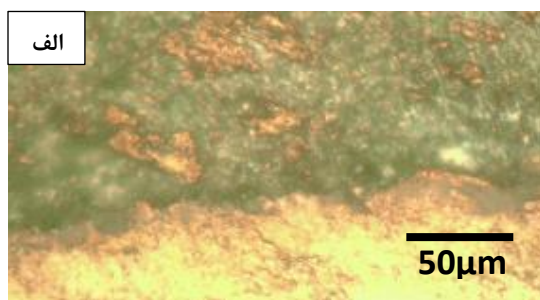
در شکل‌های (الف و ب) تصاویر میکروسکوپ نوری از محل اتصال دو فلز در نمونه‌های دو فلزی تحت دو بار اکستروژن مستقیم، نشان داده شده است. فصل مشترک پیوند، به صورت یک خط تیره تقریباً مستقیم در محل اتصال دو فلز قابل مشاهده است.

سنجه انجام شد که با سرعت ثابت ۵ میلی‌متر بر دقیقه به لایه داخلی نمونه دو فلزی (لایه آلومینیومی) اعمال می‌شود. شکل ۱۲ تغییرات نیرو بر حسب جابجایی سنجه را جهت جدا کردن قسمت آلومینیومی برای نمونه‌های دو فلزی در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. از بیشترین مقدار نیرو در هر یک از نمودارهای بدست آمده، جهت محاسبه استحکام برشی پیوند استفاده شده است.

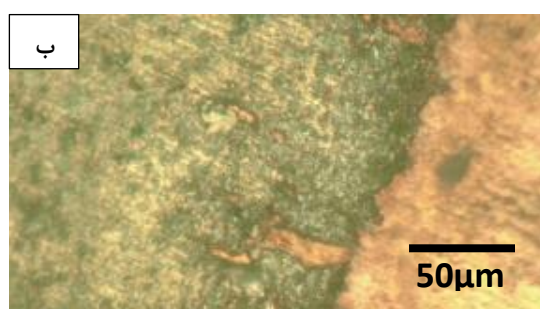
با توجه به نمودارهای شکل ۱۲ حداکثر نیروی بدست آمده برای نمونه‌های تحت دو بار اکستروژن مستقیم برابر ۱۵۱۰ نیوتن، برای نمونه‌های تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه یک پاس فرآیند ECAP برابر ۲۸۸۴/۸ نیوتن و برای نمونه‌های تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه چهار پاس فرآیند ECAP برابر ۳۷۶۱/۵ نیوتن بدست آمده است. با قرار دادن مقادیر D_{core} برابر $1/5$ میلی‌متر و h برابر ۶ میلی‌متر (که از روی نمونه مورد آزمایش بدست آمده است) در رابطه ۴ مقادیر استحکام برشی پیوند به ترتیب $9/4$ ، ۱۸ و $23/5$ مگاپاسکال برای نمونه‌های مذکور بدست آمد.

۳-۳- بررسی مکانیزم اتصال میله‌های دو جنسی آلومینیوم- مس تولیدی

در خصوص نحوه ایجاد اتصال بوجود آمده بین مس و آلومینیوم در پژوهش حاضر که از یک روش SPD بهره می‌برد، می‌توان گفت با توجه به اینکه سطح داخلی لوله مسی توسط برس سیمی نرم، برس زده شده است، این سطح دارای شیارها و ترک‌های زیادی است. این شیارها که در اثر اعمال کار مکانیکی به وجود آمده‌اند، باعث ایجاد لایه سطحی بسیار کار سخت شده روی فلز می‌شوند. با 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 بوجود آمده، نوعی قفل مکانیکی بین دو فلز بوجود 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 ECAP روی نمونه‌های دو فلزی فراهم می‌شود.



شکل ۱۵- تصاویر میکروسکوپ نوری از محل اتصال دو فلز در نمونه دو فلزی تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه چهار پاس فرآیند ECAP



شکل ۱۴- تصاویر میکروسکوپ نوری از محل اتصال دو فلز در نمونه دو فلزی تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه یک پاس فرآیند ECAP

تغییر آرایش اتصال و خارج شدن لایه فصل مشترک دو فلز از حالت یکنواخت خطی در نمونه‌های تحت دوبار اکستروژن مستقیم بعلاوه یک و چهار پاس ECAP نسبت به نمونه‌های تحت دوبار اکستروژن مستقیم را می‌توان به اعمال کرنش برشی ساده و تغییر صفحات لغزشی با توجه به ماهیت فرآیند ECAP مرتبط دانست [۳۶ و ۳۷].

با توجه به توضیحات ارائه شده یکی از دلایل اصلی شکل‌گیری پیوند و افزایش استحکام آن وقوع قفل مکانیکی^۱ بین سطوح تماس است. از آنجا که پوسته مسی، هسته آلومینیومی را مانند کمر بند احاطه کرده است، بنابراین نوعی قفل مکانیکی بین هسته و پوسته ایجاد می‌شود. انتظار می‌رود، با افزایش کرنش تولید شده در طی انجام فرآیند ECAP و تکرار آن بر میزان تنش الاستیک بین هسته و پوسته افزوده شود. همانطور که احمد [۳۸] گزارش کرد به دلیل متفاوت بودن رفتار الاستیک مس و آلومینیوم، غلاف بیرونی (مس) مانع از انتشار کامل تنش‌های الاستیک در هسته

شکل‌های (۱۴- الف و ب) تصاویر میکروسکوپ نوری را از محل اتصال دو فلز در نمونه‌های دو فلزی تحت دوبار اکستروژن مستقیم بعلاوه یک پاس ECAP نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، لایه فصل مشترک از حالت یکنواخت خطی که در نمونه‌های قبلی به وضوح دیده می‌شود، به یک شکل نامنظم دندان‌های تغییر حالت داده است. علاوه بر این تداخل فلزی محدود به لایه فصل مشترک نبود و فراتر رفته است.

شکل‌های (۱۵- الف و ب) تصاویر میکروسکوپ نوری را از محل اتصال دو فلز در نمونه‌های دو فلزی تحت دوبار اکستروژن مستقیم بعلاوه چهار پاس ECAP نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با اعمال فرآیند ECAP طی چهار پاس در بین فرآیندهای اکستروژن مستقیم روی نمونه‌های دو فلزی، مقدار و عمق تداخل فلزی بیشتر شده است؛ همچنین فصل مشترک دو فلز محدود به یک خط مستقیم نیست و در هم تنیدگی دو فلز بصورت دندان‌های در لایه پیوندی کاملاً قابل مشاهده است.

¹ Mechanical Locking

مقایسه با استحکام تسلیم آلومینیوم و مس اولیه افزایش یافته است. همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد که انجام فرآیند ECAP و تکرار آن روی نمونه‌های دو فلزی در بین فرآیندهای اکستروژن مستقیم، باعث افزایش بیشتر استحکام تسلیم شده است؛ بطوریکه استحکام تسلیم فشاری برای نمونه‌های دو فلزی تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه یک پاس فرآیند ECAP، مقدار ۳۱۰ مگاپاسکال بدست آمده است و این مقدار برای نمونه‌های دو فلزی تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه چهار پاس فرآیند ECAP، به ۳۶۲ مگاپاسکال افزایش یافته است.

ب- مقایسه نتایج بدست آمده از آزمون سختی، روی قسمت‌های مسی و آلومینیومی میله‌های دو جنسی تولیدی با نتایج بدست آمده از آزمون سختی روی نمونه‌های مسی و آلومینیومی اولیه، نشان می‌دهد که با اعمال فرآیندهای شکل‌دهی صورت گرفته، بر سختی اجزای تشکیل دهنده میله‌های دو جنسی افزوده شده است. میانگین مقادیر سختی برای مس و آلومینیوم در نمونه‌های دو فلزی تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه یک پاس فرآیند ECAP، به ترتیب برابر ۱۰۹/۴ و ۸۵/۲ ویکرز بدست آمد. این مقادیر در نمونه‌های دو فلزی تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه چهار پاس فرآیند ECAP، به ترتیب برابر ۱۳۰/۲ و ۱۰۵/۴ ویکرز بدست آمد که افزایش ۸۹ درصدی و ۱۱۳ درصدی نسبت به سختی نمونه‌های مسی و آلومینیومی اولیه نشان می‌دهد.

ج- نیروی لازم برای جدا کردن قسمت آلومینیومی در نمونه‌های دو فلزی تولید شده تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه چهار پاس فرآیند ECAP، نسبت به نمونه‌های تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه یک پاس فرآیند ECAP بیشتر است که نشان دهنده تأثیر مثبت افزایش تعداد پاس‌های فرآیند ECAP بر تقویت پیوند بین لایه‌ای و افزایش استحکام آن است. استحکام برشی پیوند برای نمونه‌های تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه یک پاس فرآیند ECAP برابر ۱۸ مگاپاسکال و برای نمونه‌های تحت دو بار اکستروژن مستقیم بعلاوه چهار پاس فرآیند ECAP برابر ۲۳/۵ مگاپاسکال اندازه‌گیری گردید. از دلایل اصلی شکل‌گیری پیوند، وقوع قفل مکانیکی بین سطوح تماس است. استحکام بیشتر این پیوند نیاز دارد، به اینکه صفحات اتصال

آلومینیومی می‌شود و این عامل باعث ایجاد تنش برشی اصطکاکی قابل توجهی بین پوسته و هسته می‌کند. عباسی و همکاران [۲] نیز در مطالعه خود گزارش دادند که این نوع تنش در طی فرآیند ایجاد می‌شود و همچنین بیان داشتند که به کمک آنیل کردن^۱ از بین می‌رود. زبردست و همکاران [۳۴]، بعد از عملیات آنیل روی نمونه‌های دو فلزی ECAP شده، همچنان به وجود استحکام پیوند بین مس و آلومینیوم اذعان نمودند. آنها در مطالعه خود عامل دیگری را هم علاوه بر قفل مکانیکی در استحکام پیوند مطرح کردند و از آن به عنوان استحکام ناشی از جوش سرد^۲ (یا عامل متالورژیکی^۳) نام بردند. ایوانی و همکاران [۳۵] در تحقیق خود بر اساس مشاهدات میکروسکوپ الکترونی، شبیه سازی المان محدود و آزمایشاتی که انجام دادند، نقش عامل متالورژیکی را در شکل‌گیری پیوند بسیار اندک دانستند و عامل قفل مکانیکی و افزایش کسر اتصال^۴ را دلیل اصلی بهبود استحکام در نمونه‌های دو فلزی در فرآیند ECAP و تکرار آن بر شمردند.

۴- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، تولید میله‌های دو جنسی آلومینیوم- مس به کمک یک فرآیند شکل‌دهی ترکیبی، مورد توجه قرار گرفته است. در تولید این میله‌ها از فرآیند ترکیبی پرسکاری در کانال هم‌مقطع زاویه‌دار و اکستروژن مستقیم استفاده شده است. نمونه‌های دو فلزی اولیه طی دو مرحله، تحت فرآیند اکستروژن مستقیم قرار می‌گیرند. جهت تقویت استحکام پیوند بین دو فلز و بهبود خواص مکانیکی میله‌های دو جنسی از فرآیند ECAP طی چندین پاس (حداکثر چهار پاس) در بین فرآیندهای اکستروژن مستقیم استفاده شده است. نتایج مربوط به تغییرات استحکام تسلیم فشاری، سختی و استحکام برشی پیوند میله‌های دو جنسی در هر مرحله از انجام فرآیند ترکیبی مورد سنجش قرار گرفته است. مهمترین نتایج بدست آمده عبارتند از:

الف- نتایج آزمون فشار روی میله‌های دو جنسی تولیدی نشان می‌دهد که استحکام تسلیم این میله‌ها در

² Annealing

³ Cold Welding

⁴ Metallurgical Factor

⁵ Joint Fracture

[13] Zare GR, Divandari M, Arabi H (2013) Investigation on interface of Al/Cu couples in compound casting. *Mater Sci Tech Ser* 29: 190-196.

[14] Liu H, Ke FJ, Pan H, Sinica AP (2007) Molecular dynamics simulation of the diffusion bonding and tensile behavior of a Cu-Al interface. *Acta Phys Sin-Ch Ed* 56(1): 407-419.

[15] Lee S, Lee MG, Lee SP, Lee GA, Kim YB, Lee JS, Bae DS (2012) Effect of bonding interface on delamination behavior of drawn Cu/Al bar clad material. *Trans. Nonferrous Met Soc China* 22: 645-649.

[16] Sheng LY, Yang F, Xi TF, Lai C, Ye HQ (2011) Influence of heat treatment on interface of Cu/Al bimetal composite fabricated by cold rolling. *Composites* 42(Part B): 1468-1473.

[17] Kazanowski P, Epler ME, Misiolek WZ (2004) Bimetal rod extrusion-process and product optimization. *Mat Sci Eng A-Struct* 369: 170-180.

[18] Luo JT, Zhao S, Zhang CH (2012) Casting-cold extrusion of Al/Cu clad composite by copper tubes with different sketch sections. *J Cent South Univ* 19: 882-886.

[19] Bereski S, Stradomeski Z (2007) Quality of bimetallic Al-Cu joint after explosive cladding. *Journal of Achievement in Materials* 22: 73-76.

[20] Aghajani Derazkola H, Simchi A (2014) Effects of alumina nanoparticles on the microstructure, strength and wear resistance of poly (methyl methacrylate)-based nanocomposites prepared by friction stir processing. *J Mech Behav Biomed Mater* 79: 246-253.

[21] Sapanathan T, Khoddam SH, Zahiri SH (2013) Spiral extrusion of aluminum/copper composite for future manufacturing of hybrid rods: A study of bond strength and interfacial characteristics. *J Alloy Compd* 571: 85-92.

[22] Kocich R, Machackova A, Kuncicka L, Fojtik F (2015) Fabrication and characterization of cold-swaged multilayered Al-Cu clad composites. *Mater Design* 71: 36-47.

[23] Eivani AR, Karimi Taheri A (2007) A new method for producing bimetallic rods. *Mater Lett* 61(19-20): 4110-4113.

[24] Davis JR (2001) Copper and copper alloys. *ASM international*.

[25] Singh R (2018) Characterization of microstructure and mechanical properties of AL6063 using FSP Multipass. *Anchor Academic Publishing*.

[26] ASM handbook mechanical testing and evaluation. *ASM International, Vol. 8, 2000*.

[27] Ranaei MA, Bohlooli H, Khalili KH (2017) Experimental study on effect of equivalent strain on evolution strength of commercially pure copper

هرچه بیشتر به یکدیگر نزدیک شوند. این امر با تکرار فرآیند ECAP روی نمونه‌های دو فلزی فراهم می‌شود.

۵- مراجع

[1] Sasaki TT, Morris RA, Thompson GB, Syarif Y, Fox D (2010) Formation of ultra-fine copper grains in copper-clad aluminum wire. *Scr Mater* 63(5): 488-491.

[2] Abbasi M, Taheri AK, Salehi MT (2001) Growth rate of intermetallic compounds in Al/Cu bimetal produced by cold roll welding process. *J Alloys Compd* 319(1-2): 233-241.

[3] Rhee KY, Han WY, Park HJ, Kim SS (2004) Fabrication of aluminum/copper clad composite using hot hydrostatic extrusion process and its material characteristics. *Mater Sci Eng A* 384(1-2): 70-76.

[4] Hug E, Bellido N (2011) Brittleness study of intermetallic (Cu, Al) layers in copper-clad aluminium thin wires. *Mater Sci Eng A* 528(22-23): 7103-7106.

[5] Alizadeh M, Samiei M, Salahinejad E (2017) Post-annealing, fractographic and corrosion failure analyses on tri-modal Mn-particulate Al/Cu multilayered composites. *Vacuum* 139: 87-92.

[6] Langdon TG (2007) The processing of ultrafine - grained materials through the application of severe plastic deformation. *J Mater Sci* 42: 3388-3397.

[7] Valiev RZ, Islamgaliev RK, Alexandrov IV (2000) Bulk Nanostructured Materials from severe plastic deformation. *Progress in Materials Science* 45: 89-103.

[8] Asadi P, Besharati Givi M, Faraji G (2010) Producing Ultrafine- grained AZ91 from as-cast AZ91 by FSP. *Mater Manuf Process* 25: 1219-1226.

[9] Nosrati HG, Khalili KH, Gerdooei M (2020) Theoretical and numerical investigation of required torque in ECAP-Conform process. *Metall Mater Trans B* 51(2): 519-528.

[10] Shokuhfar A, Shamsborhan M (2014) Finite element analysis of planar twist channel angular extrusion (PTCAE) as a novel severe plastic deformation method. *J Mech Sci Technol* 28(5): 1753-1757.

[11] Khosravifard A, Ebrahimi R (2010) Investigation of parameters affecting interface strength in Al/Cu clad bimetal rod extrusion process. *Mater Design* 31(1): 493-499.

[12] Sundaresan S, Murti KGK (1993) The formation of intermetallic phases in aluminum-austenitic stainless steel friction welds. *Mater Forum* 17: 301-307.

- pressing process. *Mat Sci Eng A-Struct* 563: 193-198.
- [33] Zehetbauer MJ, Stüwe HP, Vorhauer A, Schafner E, Kohout J (2005) The role of hydrostatic pressure in severe plastic deformation, in: *nanomaterials by severe plastic deformation*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA 433-446.
- [34] Zebardast M, Karimi Taheri A (2011) The cold welding of copper to aluminum using equal channel angular extrusion (ECAE) process. *J Mater Process Tech* 211: 1034-1043.
- [35] Eivani AR, Mirzakoochakshirazi HR, Jafarian HR (2020) Investigation of joint interface and cracking mechanism of thick cladding of copper on aluminum by equal channel angular pressing (ECAP). *Jmr & t* 9(3): 3394-3405.
- [36] Eivani AR, Karimi Taheri A (2007) A new method for estimating strain in equal channel angular extrusion. 183: 148-153.
- [37] Bagherpour E, Reihanian M, Pardis N, Ebrahimi R, Terence Langdon G (2018) Ten Years of Severe Plastic Deformation (SPD) in Iran, part I: Equal-Channel Angular Pressing (ECAP). *IJMF, Iranian Journal of Materials Forming* 5(1): 71-113.
- [38] Ahmed N (1978) Extrusion of copper clad aluminum wire. *J Mech Work Technol* 2: 19-32.
- produced by equal channel angular pressing. *JMEUT* 47(2): 333-342.
- [28] Ranjbarbahadori SH, Dehghani K, AkbariMousavi SAA (2015) Comparison of microstructure and mechanical properties of pure copper processed by twist extrusion and equal channel angular pressing. *Mater Lett* 152: 48-52.
- [29] Bohlooli H, Khalili KH, Seyedkashi SH (2021) Experimental study on combined twist and direct extrusion on the mechanical and electrical properties of commercial pure copper. *JMEUT* 51(4): 1-10.
- [30] Babaei A, Mashhadi MM (2015) Characterization of SPD processed ultrafine-grained pure copper tubes via tube cyclic expansion–extrusion. *Mater Charact* 101: 114-121.
- [31] Ranaei MA, Afsari A, Ahmadi Brooghani SY, Moshksar MM (2015) Microstructure, mechanical and electrical properties of commercially pure copper deformed severely by equal channel angular pressing. *Modares Mechanical Engineering* 14(15): 257-266.
- [32] Faraji G, Mashhadi MM, Bushroa AR, Babaei A (2013) TEM analysis and determination of dislocation densities in nanostructured copper tube produced via parallel tubular channel angular