



Investigation of Equal-Channel Angular Pressing of Steel/Copper Bimetallic Rods and Effect of Cu-Shell Thickness on Imposed Surface Stretch

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Etemadi M.¹ MSc,
Rashidi M. A.^{2*} Phd

How to cite this article

Etemadi M, Rashidi M A. Investigation of Equal-Channel Angular Pressing of Steel/Copper Bimetallic Rods and Effect of Cu-Shell Thickness on Imposed Surface Stretch. Modares Mechanical Engineering, 2021; 21(2) :79-89.

¹Department of Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

²Department of Materials Science and Textile Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

*Correspondence

Address: Department of Materials Science and Textile Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

Phone: -

Fax: -
rashidi1347@razi.ac.ir

Article History

Received: September 14, 2020

Accepted: November 22, 2020

ePublished: February 11, 2021

ABSTRACT

To determination of equal-channel angular pressing (ECAP) process on the stress-strain behavior of steel core of steel/copper bi-metal and also the effect of Cu-shell thickness on the created surface stretch during ECAP, the bimetallic samples composed of steel rods with 8 mm diameter and copper shells with 0.75 mm thickness are prepared. Both bimetallic samples and steel rods with 9.5 mm are subjected to consecutive ECAP process using a die with an inner angle 90° and an outer curvature corner angle of 30°. The applied load and punch displacement are recorded during samples passing through an ECAP die. The tensile testing is carried out on both the initial and ECAPed series. Moreover, the dependence of surface stretch to diameters, shell thickness, and strength properties of constituents of core/shell bimetallic rods is analytically modeled. Then, the finite element method (FEM) is used to investigate the effect of Cu-shell thickness. The obtained results revealed that the ultimate tensile strength of the bimetallic core and steel rods are improved by approximately 60% and 108% by ECAP deformation, respectively. The applied punch load for passing of bimetallic sample through an ECAP die is 54% less than the ones for steel rod. According to the FEM results, the maximum value of surface stretch is linearly decreased with increasing the thickness of the copper shell. The obtained results show a good agreement between the analytical model and the FEM approach.

Keywords Equal Channel Angular Pressing, Steel/Copper Bimetallic Materials, Surface Stretch, Shell Thickness, Ultimate Tensile Strength.

CITATION LINKS

[1] Equal-channel angular extrusion... [2] Scale up and application of equal-channel... [3] Principles of equal-channel angular pressing... [4] Processing of metals by equal-channel angular pressing. [5] The principles of grain refinement... [6] A New Method for Producing Bimetallic Rods. [7] Effect of Severe Plastic Deformation... [8] Experimental and Numerical Investigation... [9] Effect of Post-Deformation Annealing... [10] Equal Channel Angular Pressing... [11] Optimisation of Interface Formation... [12] The Cold Welding of Copper to Aluminum... [13] Strain field and extrusion load in ECAE process... [14] Analysis of eccentric unbonded bimetal rod in ECAP... [15] Characterization of bimetallic interface... [16] Enhancement of mechanical properties... [17] Microstructure and electrical conductivity of aluminium/steel bimetallic rods... [18] Room temperature flow behavior... [19] Evaluating a new core-sheath procedure... [20] Review of preparation and application of copper-steel... [21] Study on application of copper clad steel wire... [22] Investigation wavy interface forming and stretching... [23] Numerical study on the effects of hierarchical... [24] Specific wave interface and its formation... [25] Effect of wavy profile on the fabrication... [26] Effect of copper tube casing on strain distribution... [27] An experimental verification of the finite element modelling... [28] Optimum processing parameters for... [29] An experimental investigation of casing effect... [30] Influence of friction in equal channel... [31] Principles of Metal Working. [32] Tubular pure copper grain refining by tube cyclic extrusion... [33] Application of implicit and explicit finite element... [34] Dynamic explicit FE modeling... [35] Investigation of material deformation in multi-pass... [36] Atlas of Stress-Strain Curves... [37] Overview of processing, microstructure and mechanical properties... [38] Hardening and softening mechanisms... [39] Ultra-high-strength interstitial-free steel processed... [40] Principle of equal-channel angular pressing... [41] An upper-bound approach for... [42] The influence of friction... [43] The Role of the friction during... [44] Mechanics of Materials. [45] Microstructure, Mechanical and Electrical Properties...

بررسی فشردن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار میله‌های دوفلزی فولاد/مس و تعیین اثر ضخامت پوسته مسی بر کشیدگی سطحی ایجادشده

محمد اعتمادی MSc

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

علی محمد رشیدی PhD*

دانشیار، گروه مهندسی مواد و نساجی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

چکیده

به منظور تعیین اثر عملیات فشردن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار (ایکپ) بر رفتار تنش-کرنش هسته فولادی ماده دو فلزی فولاد/مس و همچنین تعیین اثر ضخامت پوسته مسی بر کشیدگی سطحی ایجادشده طی فرایند ایکپ، نمونه‌های دوفلزی با جا زدن میله‌های فولادی با قطر ۸ میلی‌متر در داخل لوله‌های مسی با ضخامت ۷۵ صدم میلی‌متر تهیه شدند. نمونه‌های دوفلزی و تک جزئی فولادی با استفاده از یک قالب ایکپ با زاویه خم داخلی ۹۰ درجه و خارجی ۳۰ درجه تحت فرایند ایکپ قرار گرفتند. در طول مدت حرکت نمونه‌ها از درون قالب ایکپ، مقدار نیروی اعمالی و جابجایی سنبه اندازه‌گیری و ثبت گردید. بر روی نمونه‌های اولیه و ایکپ شده، آزمون کشش انجام شد. همچنین مدل جدیدی برای بیان وابستگی کشیدگی سطحی به قطر نمونه دوفلزی، ضخامت پوسته و خواص استحکامی اجزاء سازنده ماده دوفلزی ارائه شد. اثر ضخامت پوسته بر کشیدگی سطحی با روش اجزاء محدود بررسی گردید. مطابق نتایج به دست آمده پس از یک بار فرایند ایکپ استحکام نهایی هسته فولادی نمونه دوفلزی فولاد/مس و فولادی تک جزئی به ترتیب ۶۰ و ۱۰۸ درصد افزایش یافت. نیروی فشردن نمونه‌های دوفلزی فولاد/مس به داخل قالب ایکپ، ۵۴ درصد کمتر از نمونه‌های تک جزئی فولادی بود. طبق نتایج حاصل از مدل‌سازی با روش اجزاء محدود، میزان پیشینه کشیدگی سطحی با افزایش ضخامت پوسته به صورت خطی کاهش یافت. بین نتایج مدل تحلیلی ارائه‌شده برای بیان اثر ضخامت پوسته بر پیشینه کشیدگی سطحی و نتایج حاصل از روش اجزاء محدود هم‌خوانی خوبی مشاهده شد.

کلیدواژه‌ها: فشردن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار، ماده دوفلزی فولاد/مس، نیروی سنبه، کشیدگی سطحی، ضخامت پوسته، استحکام کششی.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۲

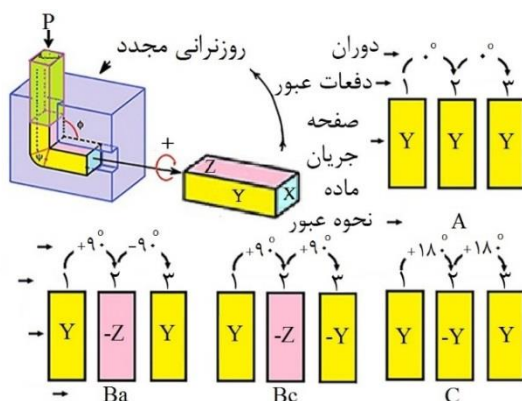
*نویسنده مسئول: rashidi1347@razi.ac.ir

۱- مقدمه

فشردن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار (Equal-channel angular pressing) یا به اختصار ایکپ (ECAP) یکی از پرکاربردترین روش‌های تغییر شکل دائمی شدید مواد فلزی و دستیابی به مواد فوق ریزدانه و نانو بلوری است که اساس آن در دهه ۱۹۸۰ میلادی توسط سگل و همکاران^[1] بیان شد و سپس بر اساس صرفه اقتصادی و در راستای تجاری‌سازی و تولید پیوسته و انبوه،

روش‌های مختلفی ابداع و معرفی گردید^[2]. در مقیاس آزمایشگاهی در این فرایند معمولاً از یک قالب شکل‌دهی مانند شکل ۱ استفاده می‌شود که حاوی یک کانال ورودی و یک کانال خروجی با سطح مقطع برابر است. زاویه گوشه داخلی ϕ و قوس بیرونی ψ در محل تقاطع این دو کانال نقش مهمی در فرایند شکل‌دهی دارند. نمونه فلزی با سطح مقطع مربع یا دایره‌ای داخل کانال ورودی قرار گرفته و با اعمال فشار توسط یک دستگاه پرس به داخل کانال فشرده می‌شود. در نتیجه ماده به داخل قسمت قوسی (محل تقاطع) سیلان نموده و پس از آن وارد کانال خروجی می‌شود. چون طی این فرایند فقط تنش‌های هیدرواستاتیکی به قطعه کار وارد می‌گردد، هنگام عبور ماده از ناحیه محل تقاطع دو کانال، بدون رخ دادن پدیده لاغر شدن موضعی یا بشکه‌ای شدن، تغییر شکل برشی شدیدی (معمولاً با کرنش برشی نزدیک یا بیش از یک) ایجاد می‌شود^[3]. برای تولید مواد فوق ریزدانه یا نانو ساختار لازم است نمونه چند بار پشت سر هم مجدداً وارد قالب شده و تحت تغییر شکل قرار گیرد. یکسان بودن سطح مقطع کانال‌های ورودی و خروجی سبب می‌شوند ابعاد و شکل هندسی نمونه قبل و بعد از فرایند ایکپ تغییری نکنند و در نتیجه می‌توان نمونه را بعد از خروج از قالب، دوباره وارد کانال ورودی نموده و مجدداً تحت تغییر شکل برشی قرارداد تا در آن کرنش بسیار بالایی ایجاد شود که به فوق ریزدانه شدن نمونه منجر می‌گردد. وارد کردن دوباره (باز تزریق) نمونه به قالب، همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، می‌تواند به چند روش انجام شود که از آن‌ها با عنوان روش‌های باز تزریق یا باز ورود A، BA، BC و C یاد می‌شود^[4,5].

در دو دهه‌ی پس از معرفی فرایند ایکپ، بیشتر کارهای تحقیقاتی در مورد آنالیز کرنش برشی و اثر این فرایند بر ریز ساختار و خواص فلزات و آلیاژهای آن‌ها بود، اما در سال‌های اخیر اعمال این فرایند بر روی مواد دوفلزی پوسته/هسته مانند^[6-13] Al/Cu، Cu/Al^[14]، Ni/Cu^[15]، Ti/Cu^[16]، Steel/Al^[17]، Ni/Fe، Ti/Fe^[18] و NiTi/Fe^[19] نیز مورد توجه قرار گرفته است. ایوانی و طاهری^[6] اثر ایکپ با باز ورود A، C و در دمای



شکل ۱) نمایش قالب ایکپ، زوایای بین دو کانال ورودی و خروجی و روش‌های باز تزریق نمونه به قالب

افزایش سختی فلز هسته است. نتایج بیان شده فوق و جستجو در منابع علمی در دسترس، نشان می‌دهند تاکنون اثر اعمال فرایند ایکپ بر روی نمونه‌های دوفلزی فولاد/مس توسط دیگر پژوهشگران بررسی نشده است. اجزاء دوفلزی فولاد/مس در چند دهه اخیر در حوزه‌های مختلف مانند ارتباطات فرکانس بالا (High-frequency telecommunications)، ابزارهای هوشمند اندازه‌گیری فشار و دما، کاربردهای پزشکی و زیست پزشکی، موتورهای و مجموعه‌های مغناطیسی، مقاومت‌ها و خازن‌های ویژه، نیروگاه‌های بادی، راه‌آهن برقی پر سرعت، صنایع خودرو، هوافضا و پتروشیمی [20-22] مورد توجه وافر قرار گرفته‌اند. بنابراین، تحقیق در این زمینه می‌تواند هم از نظر علمی و هم از منظر کاربرد صنعتی و تجاری حائز اهمیت باشد. کشیدگی سطحی جفت ماده (Mating surface stretch)، یکی از مواردی است که در ایجاد جوش سرد و تعیین مورفولوژی فصل مشترک (سطح یا مواج بودن آن)، و به تبع آن‌ها در موفقیت تولید مواد دوفلزی با استحکام اتصال بین فلز و خواص مکانیکی و فیزیکی مناسب نقش کلیدی دارد. زبردست و کریمی طاهری [12] خاطر نشان نمودند که جوش خوردگی بین پوسته و هسته مواد دوفلزی در صورتی رخ می‌دهد که مقدار کشیدگی سطحی ایجاد شده طی فرایند ایکپ از یک مقدار آستانه (threshold value) بیشتر شود. در مقایسه با مورفولوژی تخت، فصل مشترک موج‌دار منجر به چقرمگی شکست بالاتر، استحکام جوش بیشتر و مقاومت بهتر در برابر از هم جدا شدن (debonding) دو فلز می‌شود [23-25].

نویسندگان مقاله حاضر نیز در مقاله دیگری [22] نشان دادند که بعد از اعمال سه بار ایکپ با باز تزریق BC، تنها در برخی از نواحی بین دو فلز که متناظر با بیشینه کشیدگی سطحی هستند، فصل مشترک موجی شکل با کمینه طول موج به وجود می‌آید. بنابراین، با توجه به نقش کشیدگی سطحی در جوش سرد و مورفولوژی فصل مشترک بین اجزاء یک ماده دوفلزی، بررسی عوامل اثرگذار بر مقدار کشیدگی سطحی می‌تواند واجد ارزش زیادی باشد. در مراجع [12,22] اثر کرنش برشی اعمالی و روش و تعداد دفعات باز تزریق نمونه به قالب ایکپ بر میزان کشیدگی سطحی طی فرایند تغییر شکل شدید نمونه‌های دوفلزی مدل شده است. با این حال مدل‌های ارائه شده، اثر تغییر قطر هسته و ضخامت پوسته نمونه‌های دوفلزی را نشان نمی‌دهند. با توجه به اینکه در نمونه‌های دوفلزی مس/آلومینیم، افزایش ضخامت پوسته مسی منجر به افزایش میانگین کرنش موثر ایجاد شده، استحکام برشی و نیروی فشردن نمونه به داخل قالب ایکپ (نیروی سنبه) شده است [12,13,26]، انتظار می‌رود ضخامت پوسته در مقدار کشیدگی ایجاد شده طی فرایند ایکپ نقش داشته باشد. تحقیق در این زمینه می‌تواند ابهامات در این خصوص را برطرف نماید.

در مقاله حاضر، ابتدا اثر ایکپ بر نمودار تنش-کرنش و نیروی سنبه در میله‌های هم قطر تک جزئی فولادی و دوفلزی

۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و اثر روزرانی متداول (Extrusion) در همان دما را بر استحکام برشی میله دوفلزی با هسته آلومینیوم و پوسته مسی بعد از آنیل کردن به مدت یک ساعت در دمای ۳۰۰ درجه را باهم مقایسه نموده و دریافتند که استحکام نمونه ایکپ شده بعد از دو بار باز ورود A، و حدوداً ۱۲/۵٪ بالاتر از نمونه روزرانی است [6]. اندازه دانه‌های هسته آلومینیومی و پوسته مسی با دو بار ایکپ با روش BC به ترتیب از ۵۸ و ۹۶ میکرومتر به ۴۱۰ و ۱۸۰ نانومتر کاهش یافته، سختی از ۳۶ و ۵۸ ویکرز تا ۴۸ و ۱۰۵ ویکرز زیاد شده و رسانش الکتریکی به رغم کاهش قابل‌ملاحظه، پس از اعمال دو بار ایکپ، با انجام فرایند آنیل کوتاه مدت در دمای ۲۰۰ درجه به میزان زیادی بازیابی شده است [7]. طبق تحقیق قدیمی و همکاران [8]، سه بار ایکپ لوله‌های دوفلزی با پوسته بیرونی آلومینیومی و پوسته داخلی مسی با روش باز تزریق C سبب کاهش اندازه دانه‌های پوسته آلومینیومی از حدود ۸۱ به ۱۹ میکرومتر، افزایش ۱۲۹ درصدی سختی و ۲۲۷ درصدی استحکام برشی اتصال بین دو پوسته شده است. طبق نتایج آنالیز اجزاء محدود با افزایش ضریب اصطکاک بین قالب و پوسته بیرونی لوله از ۰/۵ تا ۰/۱ موجب افزایش ۱۳۷ درصدی بیشینه نیروی لازم برای فشردن لوله‌ها به داخل قالب گردیده و با افزایش ضخامت پوسته آلومینیومی از صفر تا ۴ میلی‌متر، نیروی مذکور از حدود ۱۴۵ کیلو نیوتن تا حدود ۸۰ کیلو نیوتن کم شده است [8]. زبردست و طاهری [12] اثر زوایای گوشه‌های داخلی و خارجی قالب ایکپ و همچنین ضخامت پوسته مسی را بر استحکام برشی نمونه‌های دوفلزی با هسته آلومینیومی را بررسی نموده و برای محاسبه کشیدگی بین سطحی یک مدل تحلیلی ارائه نموده‌اند. مطابق این تحقیق، با افزایش ضخامت پوسته مسی و زاویه قوس داخلی استحکام برشی کم شده (در یک دستگاه مختصات قطبی در سطح مقطع کانال خروجی)، مقدار کشیدگی تابعی از موقعیت زاویه‌ای نقاط واقع در فصل مشترک و بیشینه مقدار آن مربوط به زاویه صفر با راستای افق بوده و این مقدار بیشینه با افزایش زاویه قوس داخلی کاهش یافته است [12]. ناروتی و طاهری [13] به روش تحلیلی میدان کرنش و نیروی شکل‌دهی ایکپ نمونه‌های دوفلزی استوانه‌ای را مدل نموده‌اند. نتایج تجربی آن‌ها حاکی از کاهش نیروی شکل‌دهی با کاهش ضخامت پوسته مسی (لبه سخت‌تر بیرونی) نمونه دوفلزی مسی-آلومینیومی است. نتایج تحقیقات مرجع [17] نیز نشان‌دهنده افزایش استحکام تسلیم نمونه‌های دوفلزی با هسته فولاد زنگ نزن L316 با کاهش ضخامت‌های پوسته آلومینیومی از ۳/۵ تا ۲/۵ میلی‌متر و افزایش تعداد دفعات ایکپ در دمای ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد با روش باز تزریق BC است. شاهمیر و همکاران [19] ایکپ انواع نمونه‌های دوفلزی با پوسته آهنی و هسته‌های مختلف آهنی، نیکلی و آلیاژ نیکل-تیتانیم را مورد بررسی قرار داده و سیلان دائمی ماده و توزیع کرنش را با آنالیز اجزاء محدود سه بعدی شبیه‌سازی نمودند. نتایج این بررسی حاکی از افزایش کرنش ایجاد شده و شیب همگنی با افزایش اندازه هسته و همچنین افزایش ضریب توزیع ناهمگنی با

با نرخ جابجایی ۲۰ میلی‌متر در دقیقه با استفاده از یک دستگاه فشار-کشش (Santam stm 250) انجام شد. قالب مورد استفاده، حاوی کانال‌های متقاطع با زاویه گوشه داخلی ۹۰ درجه و زاویه گوشه خارجی ۳۰ درجه بود. برای کاهش نیروی اصطکاک، سطح داخلی کانال‌های قالب و سطح خارجی نمونه‌ها با ماده روان کار MOS2 آغشته گردید. در طول مدت عبور نمونه‌ها از درون کانال‌ها، هم نیروی اعمالی دستگاه پرس (نیروی سنبه) و هم مقدار جابجایی متناظر با آن توسط یک سیستم رایانه‌ای ثبت گردید. آزمون کششی بر اساس استاندارد ASTM-E8M در دمای اتاق و با نرخ کرنش ۰/۰۱ با استفاده از دستگاه تست کشش STM-250، انجام گرفت. این آزمون هم بر روی نمونه‌های فولادی و مسی قبل از اعمال فرایند ایکپ و هم بر روی نمونه‌های ایکپ شده تک جزئی فولادی و هسته فولادی نمونه‌های دوفلزی فولاد/مس انجام شد. در شکل ۲ تصاویری از سطح مقطع برش خورده نمونه دوفلزی، نمونه کشش تهیه‌شده از هسته فولادی، نمونه تحت آزمون کشش (لحظه گلوپی شدن) و همچنین ابعاد نمونه‌های کششی مورد استفاده ارائه شده است.

۲-۲- مدل‌سازی با روش اجزا محدود

برای شبیه‌سازی ویژگی‌های تغییر شکل دائمی نمونه‌های استوانه‌ای تک جزئی فولادی و دوفلزی هسته/پوسته (میله/لوله) فولادی/مسی طی فرایند تغییر شکل دائمی شدید با فرایند ایکپ، نرم‌افزار آباکوس ۱۴-۶/۱۴ به کار برده شد. در این شبیه‌سازی از شرایط مرزی زیر استفاده شد: نمونه فقط دارای یک درجه آزادی حرکت در جهت محور کانال قالب بوده و در دیگر راستاها مقید شده است. قالب و پانچ کاملاً صلب بوده و هیچ‌گونه تغییر شکل دائمی در آن‌ها طی فرایند ایکپ ایجاد نمی‌شود. اصطکاک بین سطح نمونه و جداره داخلی کانال از نوع اصطکاک کولمبی^[27,28] با ضریب اصطکاک برابر ۰/۲۴ است که این مقدار پس از مقایسه هم‌خوانی نتایج تجربی نیروی

فولاد/مس به صورت تجربی (آزمایشگاهی) بررسی و باهم مقایسه شده است. با استفاده از رابطه تحلیلی ارائه‌شده برای کشیدگی سطحی در مواد دوفلزی بر اساس هندسه قالب^[12]، رابطه‌ی جدیدی استخراج شده است که اثر قطر نمونه دوفلزی، ضخامت پوسته و خواص مکانیکی اجزاء سازنده ماده دوفلزی بر کشیدگی سطحی را نشان می‌دهد. در نهایت با استفاده از روش اجزاء محدود اثر ضخامت پوسته مسی بر کشیدگی سطحی برای نخستین بار مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

برای تعیین اثر فرایند ایکپ بر خواص کششی و همچنین نیروی لازم برای عبور دادن نمونه‌های تک جزئی فولادی و دوفلزی فولادی/مسی از درون قالب ایکپ، بر روی نمونه‌ها آزمایش‌های تجربی انجام شد. علاوه بر آن با الگوسازی اجزاء محدود، مقدار نیروی سنبه محاسبه و با مقادیر تجربی مقایسه گردید. همچنین مقدار کشیدگی سطحی در نمونه‌های دوفلزی با قطر خارجی یکسان اما با ضخامت‌های مختلف پوسته با روش اجزاء محدود بررسی شد.

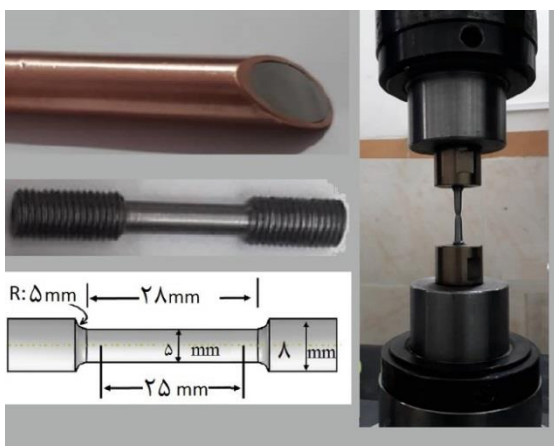
۲-۱- مواد، ابزار و آزمایش‌ها

برای تهیه نمونه‌های دوفلزی فولاد/مس ابتدا لوله‌های مسی با قطر داخلی ۸ میلی‌متر و قطر خارجی ۹/۵ میلی‌متر به عنوان پوسته و نمونه‌های استوانه‌ای فولادی به طول ۱۰۰ میلی‌متر و قطر ۸ میلی‌متر به عنوان هسته با تراشکاری تهیه شدند. به این ترتیب کسر حجمی هسته فولادی در نمونه دوفلزی فولاد/مس تقریباً برابر ۰/۷۹ بود. جهت مقایسه، نمونه‌های استوانه‌ای فولادی به طول ۱۰۰ میلی‌متر و قطر ۹/۵ میلی‌متر به عنوان نمونه‌های تک جزئی تهیه شدند. ترکیب شیمیایی هر دو فلز مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است^[22].

هیچ‌گونه عملیات صیقل کاری و حکاکی خاصی بر روی سطح نمونه‌ها انجام نشد و فقط سطح نمونه‌ها با عملیات اسید شوئی و چربی زدایی در دمای اتاق و سپس شستشوی سطوح با الکل، از هرگونه آلودگی سطحی بعد از عملیات ماشین‌کاری پاک گردید. بعد از آن سری اول میله‌های فولادی با اعمال فشار داخل پوسته‌های مسی جا زده شدند تا نمونه‌های دوفلزی فولاد/مس به‌دست آید. بعد از تهیه نمونه‌های دوفلزی، عملیات فشردن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار، هم بر روی نمونه‌های فولادی تک جزئی و هم بر روی نمونه‌های دوفلزی فولاد/مس در دمای اتاق،

جدول ۱) ترکیب شیمیایی فلزات مورد استفاده^[22]

عنصر	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Fe
فولاد	درصد	0.105	0.439	0.105	0.014	0.01	0.032	0.01
	وزنی	balance						
عنصر	Cu	Pb	Fe	Si	Other			
مس	درصد	> 99.9	0.033	0.016	0.016	< 0.025		
	وزنی							



شکل ۲) تصویر سطح برش خورده نمونه دوفلزی فولاد/مس (بالا سمت چپ)، یکی از نمونه‌های کششی (وسط سمت چپ)، نمایش ابعاد نمونه‌های تهیه‌شده برای آزمون کشش (پایین سمت چپ) و تصویر نمونه تحت کشش در حالت گلوپی شده (سمت راست).

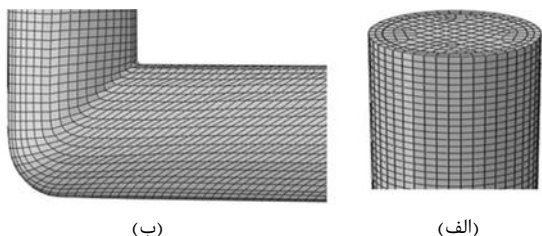
پاسخ شبه استاتیک روش حل صریح با تعداد گام اعمالی و مقیاس جرمی مورد استفاده است [32-35].

در شکل ۳-الف نمای سه بعدی شبیه‌سازی شده المان‌های واقع بر سطح مقطع نمونه و نقاط مختلف محیط یک نمونه استوانه‌ای قبل از ایکپ و در شکل ۳-ب نیز نمای سه بعدی همان المان‌های واقع بر محیط نمونه اما بعد از ایکپ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که فاصله بین دو گره مجاور هم و همچنین فاصله بین دو گره واقع بر گوشه‌های مقابل هم طی عبور نمونه از قالب دچار تغییر شده است.

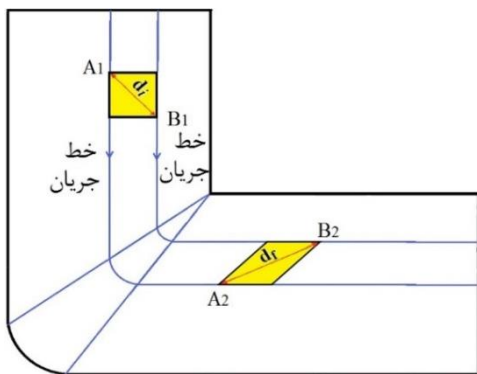
برای بررسی کشیدگی سطح در حالت کلی، در نمونه تک جزئی فولادی قطر وجه بیرونی (سطح در تماس با قالب) یک ردیف از المان‌های واقع بر محیط استوانه در کانال ورودی و سپس قطر همان وجه المان‌ها در کانال خروجی، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی کرنش‌ها با اجزا محدود تعیین گردید. در نمونه‌های دو جزئی متشکل از میله فولادی و لوله مسی نیز همین عملیات تکرار شد با این تفاوت که برای میله فولادی قطر وجه بیرونی المان‌های در تماس با سطح جداره مسی و برای لوله مسی قطر وجه داخلی المان‌های در تماس با سطح جداره مسی تعیین مقدار شد. در نهایت بر اساس رابطه (۱) [12]، درصد کشیدگی سطحی هر المان محاسبه شد:

$$Str = 100 \times |d_f - d_i| / d_i \quad (1)$$

در این رابطه Str، d_i و d_f به ترتیب درصد کشیدگی سطحی و قطر وجه المان قبل و بعد از اعمال فرایند ایکپ مطابق شکل ۴ هستند.



شکل ۳) شکل المان‌های واقع بر نقاط مختلف محیط یک نمونه استوانه‌ای در حالت سه بعدی در الف) کانال ورودی، ب) کانال خروجی، شبیه‌سازی شده با روش اجزاء محدود.



شکل ۴) نمایش قطر وجه خارجی یک المان قبل و بعد از تغییر شکل نمونه با فرایند ایکپ

شکل‌دهی با نتایج حاصل از به کار بردن چند مقدار مختلف ضریب اصطکاک، بر اساس محدوده ذکر شده در مرجع [27]، انتخاب گردید. در نمونه دوفلزی، دو فلز در فصل مشترک به صورت چسبیده (ضریب اصطکاک واحد) به هم متصل بوده و نسبت به هم حرکتی ندارند [26,29]. دمای نمونه، برابر دمای محیط (۲۹۸ کلوین) بوده و در طول فرایند تغییر شکل، تغییر نمی‌کند. رفتار کار سختی نمونه‌ها طی عملیات شکل‌دهی به صورت همگن و مستقل از نرخ کرنش بوده و اثر گرمای تولیدشده طی فرایند ایکپ ناچیز است [30].

نرخ جابجایی (سرعت) پانچ، همان مقدار مورد استفاده در آزمایش‌ها یعنی ۲۰ میلی‌متر در دقیقه در نظر گرفته شد. هندسه قالب به همان شکل مورد استفاده در آزمایش‌ها، یعنی با کانال‌های متقاطع با زاویه گوشه داخلی ۹۰ درجه، زاویه گوشه خارجی ۳۰ درجه و قطر کانال ۹/۷ میلی‌متر (با لحاظ لقی ۰/۱ + میلی‌متر بین نمونه و قالب) لحاظ شد. نمونه‌ها نیز به همان شکل و ابعاد به‌کاربرده شده در آزمایش‌ها در نظر گرفته شدند، با این تفاوت که در نمونه‌های دو فلزی، قطر خارجی همان ۹/۵ میلی‌متر بوده، اما ضخامت پوسته مسی در نمونه‌ها متغیر و برابر ۰/۷۵، ۱/۷۵، ۲/۷۵، ۳/۷۵ و ۳ میلی‌متر انتخاب شد. برای مشخص ساختن سطح تنش سیلان ماده از معیار فون میسز (Von Mises) استفاده شد. برای تعیین تغییرات تنش سیلان و خصوصیات سخت شونده‌گی ماده طی فرایند تغییر شکل دائمی، روابط هولمن به دست آمده از نمودارهای آزمون کشش نمونه‌های فولادی و مسی به ترتیب به شکل $\sigma_{st} = 615\varepsilon^{0.26}$ و $\sigma_{cu} = 498\varepsilon^{0.52}$ به‌کاربرده شد. از مدل 2 پلاستیسته پراوتل-روس (Prandtl-Reuss) برای مشخص ساختن رابطه نموی تنش-کرنش استفاده شد [31].

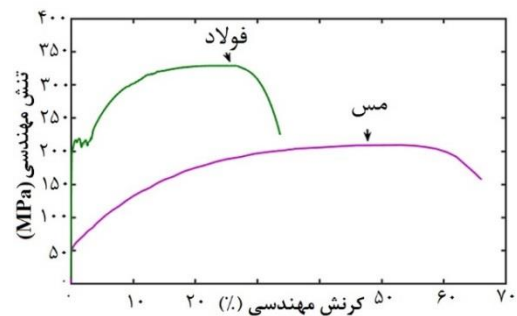
هم قالب و هم میله پانچ فشار دهنده نمونه‌ها به داخل قالب به صورت المان‌های صلب مجزا R3D4 (۴ گره - ۳ بعدی بصورت چهارضلعی صلب دو طرفه) مدل شدند. نمونه‌ها شامل میله فولادی (برای نمونه تک جزئی) و هسته فولادی و غلاف مسی (برای نمونه دوفلزی) نیز به صورت مواد شکل‌پذیر و با المان‌های C3D8R (۸ گره آجری خطی، انتگرال کاهش‌یافته) مدل گردیدند. حساسیت به مش بندی و وابستگی نتایج به تعداد المان‌های میله و پوسته بررسی و مشخص شد که مش ریزی المان‌ها به صورت ۱۰۴ المان به طول ۰/۷ میلی‌متر برای نمونه تک جزئی فولادی و ۳/۵×۱۰۴ المان به طول ۰/۲ میلی‌متر برای نمونه دوفلزی به نتایج بهینه (حالت باثبات نیرو مشابه نتایج تجربی) منجر می‌شود. به منظور کاهش زمان محاسبات از مقیاس جرمی ۲۰ استفاده گردید. نسبت انرژی جنبشی کل نمونه به انرژی داخلی طی مدل‌سازی در حدود نیم درصد پایش شد که تأییدکننده اندک بودن خطای ایجادشده طی مدل‌سازی و صحت

۳- نتایج و بحث

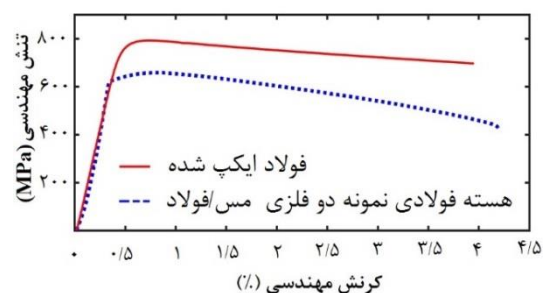
۳-۱- بررسی مقایسه‌ای نمودارهای تنش-کرنش

در شکل ۵ نمودار تنش-کرنش مهندسی نمونه‌های فولادی و مسی قبل از انجام هرگونه عملیات ایکپ ارائه شده است. بر اساس این نمودارها استحکام کششی نهایی و استحکام تسلیم نمونه‌ها به ترتیب برابر ۳۲۸ و ۲۰۹ مگاپاسکال و استحکام تسلیم آن‌ها نیز به ترتیب برابر ۲۱۸ و ۶۱ مگاپاسکال به دست آمد. با استفاده از داده‌های تنش مهندسی (σ) و کرنش مهندسی (ϵ) ناحیه بین نقطه تسلیم (در نمونه فولادی نقطه تسلیم بالایی) تا نقطه گلوپی شدن، مقادیر تنش حقیقی (S) و کرنش حقیقی (ϵ) به ترتیب طبق روابط $S = \sigma(1 + \epsilon)$ و $\epsilon = \ln(1 + \epsilon)$ تعیین گردیدند و سپس مطابق راهنمایی مرجع [36] با انطباق معادله کلی سیلان مواد به شکل $\sigma = k\epsilon^n$ بر یافته‌های تنش-کرنش حقیقی، مقادیر پارامترهای n و k برای نمونه فولادی به صورت ۶۱۵ مگاپاسکال و ۰/۲۶ و برای نمونه مسی به صورت ۴۹۸ مگاپاسکال و ۰/۵۲ تعیین شدند.

نمودارهای تغییر تنش مهندسی بر حسب کرنش اسمی نمونه‌های فولادی و هسته فولادی نمونه دوفلزی فولاد/مس بعد از یک بار اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید با فرایند ایکپ در شکل ۶ ارائه شده‌اند. مشاهده می‌شود که در هر دو نمونه با افزایش کرنش، تنش سریعاً تا یک مقدار بیشینه افزایش و بعد از آن با شیب ملایمی کاهش یافته است. ایجاد چگالی بالایی از



شکل ۵) نمودار تنش-کرنش مهندسی نمونه‌های فولادی و مسی قبل از عملیات ایکپ.



شکل ۶) نمودار تنش-کرنش مهندسی نمونه‌ی تک جزئی فولادی و هسته فولادی نمونه‌ی دوفلزی فولاد/مس بعد از عملیات ایکپ.

ناجائی‌ها طی فرایند ایکپ سبب می‌شود نقطه تسلیم به استحکام نهایی نزدیک شده و پس از اندکی ازدیاد طول یکنواخت (نسبت به نمونه ایکپ نشده) پدیده گلوپی شدن موضعی رخ دهد. پس از آن هم به دلیل کاهش موضعی سریع سطح مقطع موثر و هم به خاطر افزایش موضعی دما و رخ دادن بازیابی دینامیکی ناجائی‌ها [37-39]، تغییر شکل تا هنگام شکست نمونه با کاهش تنش اعمالی همراه است. مطابق نتایج آزمون کشش، نسبت به نمونه فولادی اولیه، یک بار اعمال عملیات ایکپ باعث افزایش استحکام کششی حقیقی این دو نمونه به ترتیب به میزان ۴۵۰ و ۲۴۸ مگاپاسکال و استحکام تسلیم به میزان ۴۸۲ و ۳۸۷ مگاپاسکال و کاهش درصد ازدیاد طول نهایی شکست نمونه فولادی از حدود ۳۳ درصد تا تقریباً ۴ درصد شده است. در مقایسه با میزان کاهش انعطاف‌پذیری نسبت به حالت اولیه، اثر تک جزئی یا دوفلزی بودن چشمگیر نیست.

شکل ۶ هم‌چنین نشان می‌دهد تأثیر انجام عملیات ایکپ بر افزایش استحکام نهایی هسته فولادی نمونه دوفلزی به مراتب کمتر از اثر آن بر بهبود استحکام نهایی نمونه فولادی تک جزئی است. علت را می‌توان به ایجاد کرنش برشی کمتر در هسته فولادی نمونه دوفلزی نسبت به نمونه تک جزئی ربط داد. کل کرنش برشی ایجاد شده در یک نمونه طی یک بار اعمال عملیات ایکپ تابعی از هندسه قالب ایکپ به شکل رابطه ۲ است [40]:

$$\gamma = 2 \cot \beta + \psi \cdot \operatorname{cosec} \beta \quad (2)$$

در این رابطه $\beta = (\phi + \psi)/2$ بوده و ϕ و ψ به ترتیب زاویه‌های گوشه داخلی و قوس بیرونی قالب ایکپ مورد استفاده هستند. وقتی که نمونه تک جزئی فولادی تحت عملیات ایکپ قرار می‌گیرد، کل کرنش برشی γ در آن ایجاد می‌شود، اما هنگامی که نمونه دو جزئی فولاد/مس تحت تغییر شکل شدید با ایکپ واقع می‌شود، فقط کسری از کرنش برشی کل در هسته فولادی آن به وجود می‌آید. به تبع آن مطابق رابطه هولمن (معادله کلی سیلان مواد به شکل $\sigma = k\epsilon^n$)، تنش سیلان هسته فولادی هم نسبت به نمونه فولادی تک جزئی کمتر افزایش می‌یابد.

۳-۲- بررسی مقایسه‌ای نیروی سنبه

در شکل ۷ نمودار تجربی و نمودار به دست آمده با روش اجزاء محدود مربوط به تغییر نیروی سنبه با جابجایی، طی اولین عبور نمونه‌های فولادی تک جزئی (شکل ۷-الف) و دوفلزی فولاد/مس (شکل ۷-ب) از قالب ایکپ باهم مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود هم‌خوانی نسبتاً خوبی بین نتایج تجربی و مدل‌سازی با روش اجزاء محدود وجود دارد.

شکل ۷ نشان می‌دهد به رغم مشابه بودن روند کلی تغییرات نیرو بر حسب جابجایی، اما هم مقدار بیشینه نیرو و هم مقدار جابجایی متناظر با آن در نمونه فولادی بیشتر از نمونه دوفلزی

۳-۳- بررسی اثر ضخامت پوسته بر کشیدگی سطحی

۳-۳-۱- استخراج مدل تحلیلی

کشیدگی سطحی به صورت نسبت اختلاف فاصله بین دو نقطه مجاور هم روی سطح نمونه قبل از هرگونه تغییر شکل به فاصله بین همان دو نقطه بعد از تغییر شکل تعریف می‌شود و رابطه ریاضی آن به شکل رابطه (۱) بیان می‌شود، با این تفاوت که d_i و d_f ، به جای قطر دو گوشه مقابل المان انتخابی در روش حل اجزاء محدود، بیانگر فاصله اولیه بین دو نقطه مفروض و فاصله بین همان دو نقطه بعد از اعمال فرایند ایکپ هستند.

بر اساس هندسه قالب ایکپ و خطوط جریان ماده در قالب، زبردست و کریمی طاهری^[12]، رابطه بین کرنش برشی ایجادشده طی فرایند ایکپ و درصد کشیدگی سطحی در هر نقطه از فصل مشترک یک نمونه استوانه‌ای دوفلزی را به شکل زیر بیان نموده‌اند:

$$Str_{\theta} = 100 \times (\sqrt{(\gamma \cos \theta)^2 + 1} - 1) \quad (3)$$

در جایی که θ موقعیت زاویه‌ای هر نقطه مورد بررسی در فصل مشترک یعنی زاویه شعاع حامل نقطه با صفحه افقی گذرنده از مرکز کانال خروجی است. بنابراین بیشینه درصد کشیدگی سطحی در موقعیت‌های زاویه صفر و ۱۸۰ ایجادشده و مقدار آن نیز از رابطه ۴ قابل محاسبه است^[12]:

$$Str_m = 100 \times (\sqrt{\gamma^2 + 1} - 1) \quad (4)$$

با توجه به رابطه ۲، این مدل نشان می‌دهد درصد کشیدگی تابعی از زاویه‌های گوشه داخلی (ϕ) و قوس بیرونی (ψ) به قالب ایکپ مورد استفاده است. این مدل اثر نوع ماده اجزاء سازنده یک نمونه دوفلزی تحت فرایند ایکپ و ابعاد هندسی اجزاء آن را نشان نمی‌دهد. با این حال با استفاده از رابطه ۴ می‌توان بیشینه درصد کشیدگی را به صورت تابعی از خواص مکانیکی اجزاء سازنده و ابعاد هندسی آن‌ها در یک ماده دوفلزی به صورت تحلیلی مدل نمود.

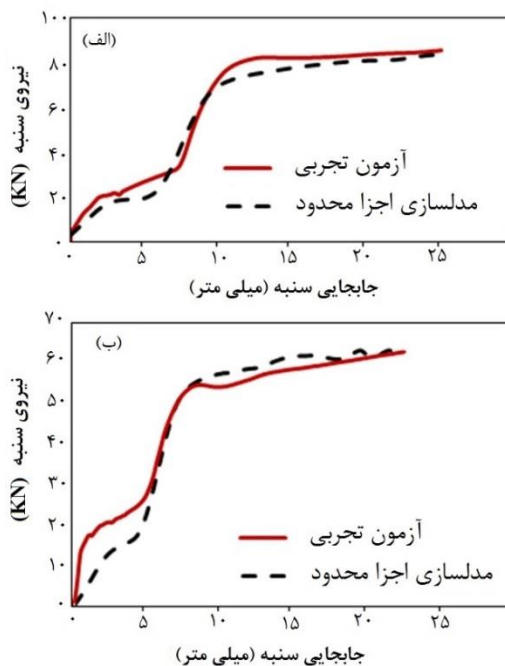
رابطه بین کرنش برشی و کرنش نرمال موثر (ϵ_{eff}) به شکل $\gamma = \sqrt{3}\epsilon_{eff}$ است^[40]. از طرفی طبق رابطه هولمن، مقدار تنش اعمالی که منجر به ایجاد چنین کرنش پلاستیکی شده را می‌توان از رابطه $\sigma = k\epsilon_{eff}^n$ تخمین زد. در این رابطه n و k ثابت‌های ماده هستند. بنابراین می‌توان نوشت: $\gamma = \sqrt{3}(\sigma/k)^{1/2}$. با جاگذاری $\sqrt{3}(\sigma/k)^{1/2}$ به جای γ در رابطه ۴ می‌توان به دست آورد:

$$Str_m = 100 \times (\sqrt{3(\sigma/k)^2 + 1} - 1) \quad (5)$$

هنگامی که یک ماده دوفلزی هسته/پوسته به فرم میله/لوله با سطح مقطع کل A مطابق شکل ۸، تحت نیروی مفروض P قرار می‌گیرد، اجزاء آن تحت نیروهای P_1 و P_2 واقع می‌شوند و می‌توان نوشت^[44]:

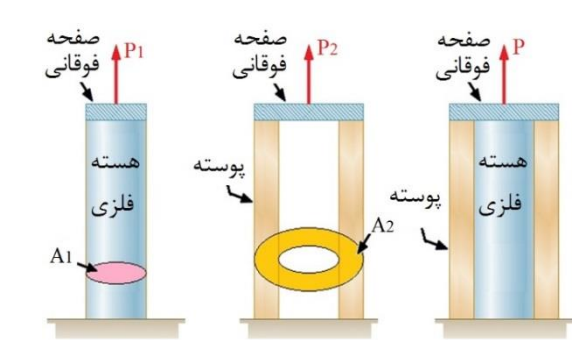
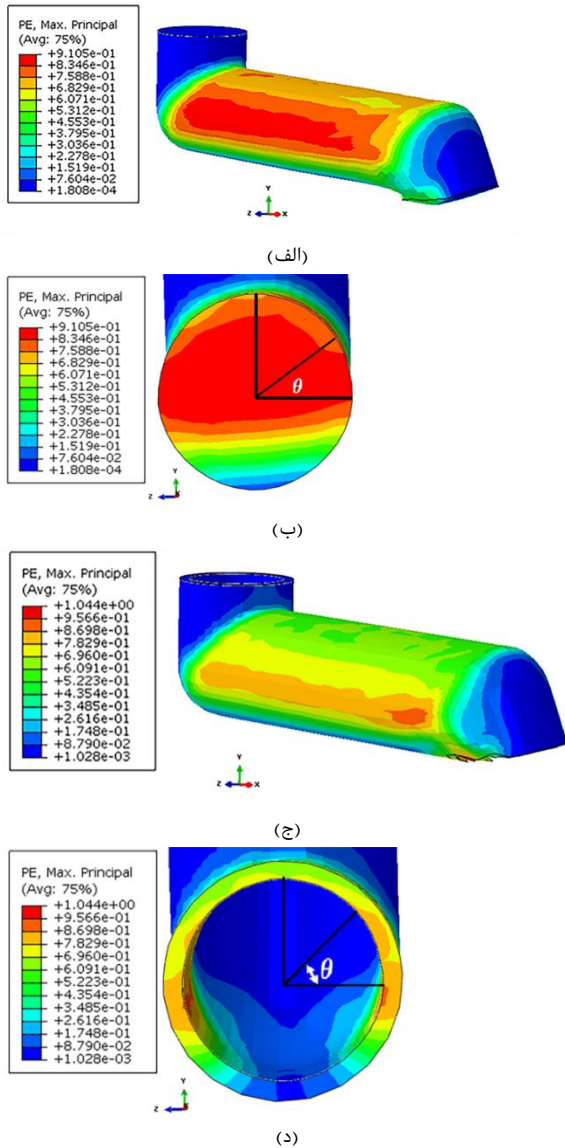
$$P = P_1 + P_2 \quad (6)$$

اگر سطح مقطع میله لوله به ترتیب برابر A_1 و A_2 باشد آنگاه



شکل ۷) مقایسه نمودار نیرو-جابجائی به دست آمده به روش تجربی و مدل شده با روش اجزاء محدود برای نمونه‌های الف) فولادی و ب) دوفلزی فولاد/مس طی فرایند ایکپ.

فولاد/مس است. بیشینه نیروی سنبه برای نمونه تک جزئی برابر ۸۳ مگاپاسکال و جابجایی متناظر با آن حدود ۱۲ میلی‌متر و مقدار این دو کمیت برای نمونه دوفلزی به ترتیب برابر ۵۴ مگاپاسکال و حدود ۸ میلی‌متر است. یک علت احتمالی آن است که استحکام نمونه دوفلزی فولاد/مس کمتر از نمونه فولادی است، زیرا بخشی از میله فولادی با پوسته مسی که استحکام کمتر و انعطاف‌پذیری بیشتری دارد، جایگزین شده و این جایگزین شدن ماده با استحکام کمتر سبب به دست آمدن ماده مرکبی با استحکام کمتر نسبت به نمونه تک جزئی فولادی می‌شود. از طرفی نیروی لازم برای ایکپ یک ماده متناسب با نرخ جابجایی سنبه و مجموع توان‌های صرف شده برای سیلان ماده در درون قالب و غلبه بر اصطکاک بین دیواره کانال‌ها و سطح خارجی نمونه است که هر دو متناسب با استحکام سیلان ماده بوده^[41] و به تبع آن انتظار می‌رود وقتی که نمونه دارای استحکام تسلیم کمتری است، با اعمال نیروی کمتری نیز از درون قالب ایکپ عبور کند. علاوه بر این، همان‌گونه که شکوفر و نژادسیفی^[42] و مدیروس وهمکاران^[43] به خوبی نشان داده‌اند، کمتر بودن ضریب اصطکاک بین سطح خارجی پوسته مسی با بدنه قالب نسبت به ضریب اصطکاک بین سطح نمونه فولادی و قالب نیز ممکن است عامل دیگری بوده که بر کاهش نیروی سنبه در فرایند ایکپ تأثیر گذاشته است.



شکل ۸) نمایش ماده دوفلزی و اجزاء آن تحت نیروهای اعمالی کل و اعمالی بر هر جزء

تنش اعمالی بر کل نمونه برابر $\sigma = P/A$ و تنش‌های اعمالی بر میله و لوله به ترتیب برابر $\sigma_1 = P_1/A_1$ و $\sigma_2 = P_2/A_2$ است. با جاگذاری نیروها بر حسب تنش‌ها در رابطه ۶ به دست می‌آید:

$$\sigma = \sigma_1 \frac{A_1}{A} + \sigma_2 \frac{A_2}{A} \quad (7)$$

از طرفی $A = A_1 + A_2$ و بنابراین با فرض $f = \frac{A_1}{A}$ رابطه ۷ به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$\sigma = f\sigma_1 + (1-f)\sigma_2 \quad (8)$$

برای یک نمونه دوفلزی استوانه‌ای، رابطه f با ضخامت پوسته (th) و قطر نمونه دوفلزی (d) را می‌توان به شکل $f = (1 - th/d)^2$ بیان نمود. بنابراین رابطه ۵ به شکل زیر قابل بازنویسی است:

$$Str_m = 100 \times \left(\sqrt{(3/k)^{2/n} \{ (1 - thic/d)^2 (\sigma_1 - \sigma_2) + \sigma_2 \}^{2/n} + 1} - 1 \right) \quad (9)$$

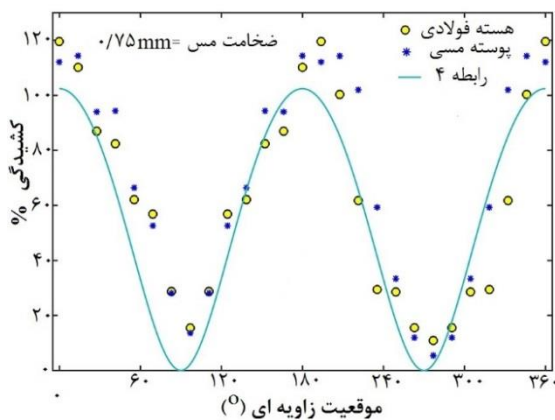
رابطه ۹ چگونگی وابستگی درصد کشیدگی سطحی به قطر نمونه دوفلزی، ضخامت پوسته و خواص مکانیکی اجزاء سازنده ماده دوفلزی را نشان داده و بیان می‌کند که برای یک میله دوفلزی مشخص با قطر خارجی ثابت، درصد کشیدگی سطحی به ضخامت پوسته وابسته است.

۳-۲- نتایج شبیه‌سازی با روش اجزاء محدود

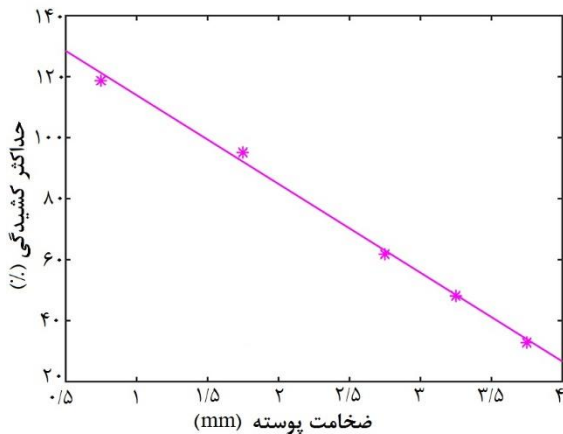
در شکل ۹ نمونه‌ای از نتیجه شبیه‌سازی با روش اجزاء محدود توزیع کرنش نرمال موثر (ϵ_{eff}) در طول و سطح مقطع هسته فولادی و همچنین پوسته مسی به ضخامت ۰/۷۵ میلی‌متر یک نمونه دوفلزی ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد بیشینه مقدار کرنش و به تبع آن بیشینه مقدار کشیدگی سطحی در موقعیت‌های زاویه‌ای صفر و ۱۸۰ درجه ایجاد شده، که با نتیجه حاصل از رابطه تحلیلی (۳) به خوبی سازگار است.

در شکل ۱۰ مقادیر کشیدگی سطحی محاسبه‌شده با استفاده از رابطه ۳، با نتایج به دست آمده با روش اجزاء محدود برای هسته فولادی به قطر ۸ میلی‌متر و پوسته مسی به ضخامت ۰/۷۵ میلی‌متر در موقعیت‌های مختلف زاویه‌ای بین صفر تا ۳۶۰ درجه باهم مقایسه شده است. مشاهده می‌گردد بین نتایج حاصل از

شکل ۹) نمایش توزیع کرنش در طول و سطح مقطع هسته فولادی (الف وب) و پوسته مسی (ج و د) نمونه دوفلزی با پوسته به ضخامت ۰/۷۵ میلی‌متر، شبیه‌سازی شده به روش اجزاء محدود.

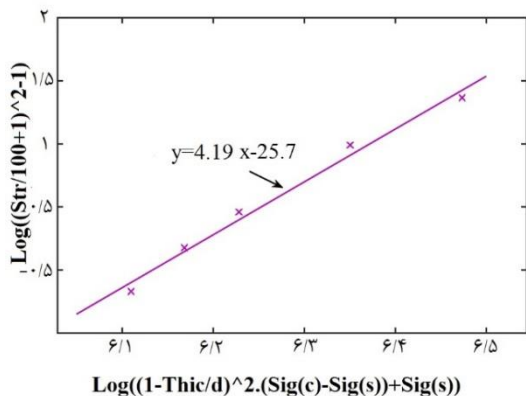


شکل ۱۰) مقایسه نتایج حاصل از به کار بردن رابطه تحلیلی (۳) و روش اجزاء محدود برای تعیین مقدار درصد کشیدگی سطحی بر حسب موقعیت زاویه‌ای در میله دوفلزی فولاد/مسی با پوسته مسی به قطر خارجی ۹/۵ میلی‌متر و ضخامت ۰/۷۵ میلی‌متر.



شکل ۱۲ تغییرات مقدار بیشینه درصد کشیدگی سطحی تعیین شده با روش اجزاء محدود بر حسب ضخامت پوسته مسی در نمونه‌های دوفلزی فولاد/مس با قطر خارجی ۹/۵ میلی‌متر.

(۱۰) $\log(y) = k1 + a \times \log(x)$
 در این رابطه $k1 = 2/n \log(3/k)$ و $a = 2/n$ است. بنابراین اگر تغییرات لگاریتم مقدار y به دست آمده با روش اجزاء محدود بر حسب لگاریتم مقدار x ، رفتار خطی نشان دهد، می‌توان نتیجه گرفت که مدل تحلیلی به دست آمده یک مدل مناسب است. برای بررسی این موضوع، ابتدا با استفاده از بیشینه مقادیر درصد کشیدگی (Str_m) به دست آمده با روش اجزاء محدود برای ضخامت‌های مختلف پوسته (شکل ۱۲)، مقادیر y محاسبه شد. سپس از مقدار d برابر ۹/۵ میلی‌متر، همان ضخامت‌های مورد استفاده در روش اجزاء محدود، مقدار σ_1 برابر ۷۱۰ مگاپاسکال (استحکام تسلیم به دست آمده طی آزمایش کشش برای فولاد ایکپ شده) و مقدار σ_2 برابر ۳۰۰ مگاپاسکال (استحکام تسلیم مس ایکپ شده^[45]) برای تعیین مقدار کمیت مستقل x استفاده گردید. در نهایت تغییرات لگاریتم y بر حسب لگاریتم x ترسیم



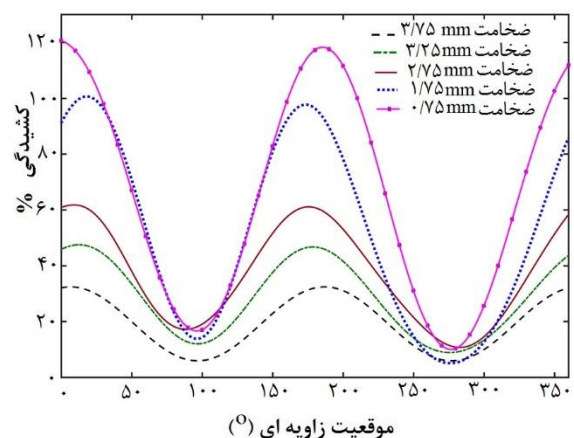
شکل ۱۳ تغییرات $y = (Str_m/100 + 1)^2 - 1$ بر حسب رابطه $x = (1 - thic/d)^2 (\sigma_c - \sigma_s) + \sigma_s$ در مقیاس لگاریتمی با لحاظ مقدار بیشینه درصد کشیدگی سطحی تعیین شده با روش اجزاء محدود برای نمونه‌های دوفلزی فولاد/مس با قطر خارجی ۹/۵ میلی‌متر و با ضخامت پوسته مسی مختلف، $\sigma_c = 710 MPa$ و $\sigma_s = 300 MPa$

مدل تحلیلی و روش اجزاء محدود تطابق نسبتاً خوبی وجود دارد. قبلاً بیان شد که برای اینکه دوفلز به هم در فصل مشترک به هم جوش بخورند و اتصال مستحکمی بین آن‌ها به وجود آید، باید مقدار کشیدگی سطحی از یک مقدار آستانه بالاتر باشد^[12]. بر اساس شکل ۱۰ می‌توان گفت در یک بار ایکپ کردن نمونه‌های دوفلزی، در برخی موقعیت‌های زاویه‌ای جوش سرد بین دوفلز ایجاد نخواهد شد زیرا درصد کشیدگی سطحی آن‌ها هیچ‌گاه به مقدار آستانه نخواهد رسید. این موضوع در خصوص ایجاد فصل مشترک موجدار نیز صادق است.

برای بررسی اثر ضخامت پوسته، میانگین وزنی مقادیر درصد کشیدگی مس و فولاد به دست آمده با روش اجزاء محدود برای نمونه‌های دوفلزی فولاد/مس با ضخامت‌های مختلف پوسته محاسبه شدند و سپس با استفاده از نرم‌افزار متلب، بهترین منحنی قابل انطباق بر داده‌ها ترسیم گردید. نتایج به دست آمده در شکل ۱۱ ارائه شده‌اند. مشاهده می‌گردد الگوی کلی توزیع درصد کشیدگی در کلیه نمونه‌ها تقریباً مشابه هم هستند، اما شیب تغییرات و بیشینه درصد کشیدگی با تغییر ضخامت پوسته تغییر نموده است.

چگونگی تغییر مقدار بیشینه درصد کشیدگی سطحی بر حسب ضخامت پوسته مسی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود با افزایش ضخامت پوسته، مقدار بیشینه کشیدگی سطحی به صورت خطی کاهش یافته است. این نشان می‌دهد برای یک میله دوفلزی با هسته/پوسته معین و با قطر بیرونی ثابت، مدل تحلیلی (رابطه ۹) می‌تواند به شکل ساده‌تری یعنی به صورت یک رابطه خطی درآید.

برای ارزیابی رابطه ۹، می‌توان با لحاظ $x = (1 - thic/d)^2 (\sigma_1 - \sigma_2) + \sigma_2$ و $y = (Str_m/100 + 1)^2 - 1$ آن را به یک رابطه خطی لگاریتمی به شکل رابطه ۱۰ تبدیل نمود:



شکل ۱۱ تغییرات میانگین مقدار درصد کشیدگی سطحی بر حسب موقعیت زاویه‌ای در میله دوفلزی فولاد/مس با پوسته مسی به قطر خارجی ۹/۵ میلی‌متر و با ضخامت‌های مختلف، تعیین شده با شبیه‌سازی اجزاء محدود.

- refinement. Progress in materials science. 2006 ;51(7):881-981.
- 4- Furukawa M, Horita Z, Nemoto M, Langdon TG. Processing of metals by equal-channel angular pressing. Journal of materials science. 2001;36(12):2835-43.
- 5- Langdon TG. The principles of grain refinement in equal-channel angular pressing. Materials Science and Engineering: A. 2007;462(1-2):3-11.
- 6- Eivani AR, Taheri AK. A new method for producing bimetallic rods. Materials Letters. 2007;61(19-20):4110-3.
- 7- Lapovok R, Dubrovsky M, Kosinova A, Raab G. Effect of severe plastic deformation on the conductivity and strength of copper-clad aluminium conductors. Metals. 2019;9(9):960.
- 8- Ghadimi S, Sedighi M, Djavanroodi F, Asgari A. Experimental and numerical investigation of a Cu-Al bimetallic tube produced by ECAP. Materials and Manufacturing Processes. 2015;30(10):1256-61.
- 9- Mirzakouchakshirazi H, Eivani A, Kheirandish S. Effect of post-deformation annealing treatment on interface properties and shear bond strength of Al-Cu bimetallic rods produced by equal channel angular pressing. Iranian Journal of Materials Science and Engineering. 2017;14(4):25-34.
- 10- Llorca-Isern N, Escobar Romero AM, Roca A, Cabrera JM. Equal Channel Angular Pressing of Cu-Al Bimetallic Rod. In Materials Science Forum. 2012;706: 1811-1816. Trans Tech Publications Ltd.
- 11- Medvedev AE, Lapovok R, Koch E, Höppel HW, Göken M. Optimisation of interface formation by shear inclination: Example of aluminium-copper hybrid produced by ECAP with back-pressure. Materials & Design. 2018 ;146:142-51.
- 12- Zebardast M, Taheri AK. The cold welding of copper to aluminum using equal channel angular extrusion (ECAE) process. Journal of Materials Processing Technology. 2011 ;211(6):1034-43.
- 13- Narooei K, Taheri AK. Strain field and extrusion load in ECAE process of bi-metal circular cross section. Applied Mathematical Modelling. 2012 ;36(5):2128-41.
- 14- Hongyu W, Jie S, Zhenting W, Qinglong W, Dewen Z, Dianhua Z. Analysis of eccentric unbonded bimetal rod in ECAP based on different arrangements of soft and hard metals. Applied Mathematical Modelling. 2017;47:501-27.
- 15- Zhilyaev AP, Werner T, Cabrera JM. Characterization of Bimetallic Interface in Cu-Al and Ni-Cu Rods Cold Welded by Equal Channel Angular Pressing. Advanced Engineering Materials. 2020;22(1):1900653.
- 16- Li Y, Ng HP, Jung HD, Kim HE, Estrin Y. Enhancement of mechanical properties of grade 4 titanium by equal channel angular pressing with billet encapsulation. Materials Letters. 2014;114:144-7.
- 17- Qi Y, Lapovok R, Estrin Y. Microstructure and electrical conductivity of aluminium/steel bimetallic rods processed by severe plastic deformation. Journal of materials science. 2016;51(14):6860-75.

شد که نتیجه در شکل ۱۳ ارائه شده است. دیده می‌شود داده‌ها با تقریب خوبی بر یک خط راست منطبق بوده و بنابراین می‌توان گفت مدل تحلیلی یک مدل سازگار با نتایج شبیه‌سازی با روش اجزاء محدود است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر فرایند فشردن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار (ایکپ) بر رفتار تنش-کرنش و نیروی سنبه-جابجائی نمونه‌های تک جزئی فولادی و دوفلزی فولاد/مس به صورت تجربی مورد بررسی مقایسه‌ای قرار گرفت. همچنین با روش اجزاء محدود روند تغییرات نیرو با جابجایی سنبه و اثر ضخامت پوسته بر کشیدگی سطحی مطالعه شد. معادله تحلیلی نوینی برای وابستگی کشیدگی سطحی به قطر نمونه دوفلزی، ضخامت پوسته و خواص استحکامی اجزاء سازنده ماده دوفلزی به دست آمد. نتایج به دست آمده نشان داد استحکام هسته فولادی نمونه دوفلزی در اثر فرایند ایکپ کمتر از میله فولادی تک جزئی افزایش یافته و نیروی لازم برای فشردن نمونه دوفلزی به درون قالب ایکپ ۵۴ درصد کمتر از نمونه‌ی تک جزئی فولادی بود. هم‌خوانی خوبی بین نتایج روش اجزاء محدود با نتایج تجربی نیروی سنبه و نتایج مدل تحلیلی ارائه شده برای کشیدگی سطحی و اثر ضخامت پوسته بر آن وجود داشت. با افزایش ضخامت پوسته مسی، بیشینه کشیدگی سطحی به صورت خطی کاهش یافت و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت نمونه‌های دوفلزی با پوسته نرم ضخیم‌تر، نیازمند اعمال تعداد دفعات بیشتری عملیات ایکپ بر روی نمونه‌ها هستند تا مقدار کشیدگی سطحی ایجاد شده در آن‌ها به مقدار آستانه لازم برای ایجاد جوش سرد یا فصل مشترک موجدار بین هسته و پوسته در فرایندهای کاربردی افزایش یابد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان قدردان حمایت‌های دانشگاه رازی به خصوص گروه مهندسی مکانیک در انجام این پژوهش هستند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تعارض منافع: در فرایند انجام گزارش، بی‌طرفی از سوی نویسندگان رعایت شده است.

سهم نویسندگان: هر نویسنده ۵۰٪.

منابع مالی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع

- 1- Segal V. Equal-channel angular extrusion (ECAE): from a laboratory curiosity to an industrial technology. Metals. 2020;10(2):244.
- 2- Ferrasse S, Segal VM, Alford F, Kardokus J, Strothers S. Scale up and application of equal-channel angular extrusion for the electronics and aerospace industries. Materials Science and Engineering: A. 2008 ;493(1-2):130-40.
- 3- Valiev RZ, Langdon TG. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain

- (TCEC) as a severe plastic deformation technique. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2014;24(6):623-30.
- 33- Prior AM. Applications of implicit and explicit finite element techniques to metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 1994;45(1-4):649-56.
- 34- Min W, He Y, Sun ZC, Guo LG, Ou XZ. Dynamic explicit FE modeling of hot ring rolling process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2006;16(6):1274-80.
- 35- Wang L, Long H. Investigation of material deformation in multi-pass conventional metal spinning. *Materials & Design*. 2011;32(5):2891-9.
- 36- Moosbrugger C. Atlas of stress-strain curves. ASM International, Materials Park. 2002:375.
- 37- Song R, Ponge D, Raabe D, Speer JG, Matlock DK. Overview of processing, microstructure and mechanical properties of ultrafine grained bcc steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2006;441(1-2):1-7.
- 38- Zhao TZ, Zhang SH, Zhang GL, Song HW, Cheng M. Hardening and softening mechanisms of pearlitic steel wire under torsion. *Materials & Design*. 2014;59:397-405.
- 39- Verma D, Mukhopadhyay NK, Sastry GV, Manna R. Ultra-High-Strength Interstitial-Free Steel Processed by Equal-Channel Angular Pressing at Large Equivalent Strain. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2016;47(4):1803-17.
- 40- Iwahashi Y, Horita Z, Nemoto M, Wang J, Langdon TG. Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials. *Scripta materialia*. 1996;35(2).
- 41- Paydar MH, Reihanian M, Ebrahimi R, Dean TA, Moshksar MM. An upper-bound approach for equal channel angular extrusion with circular cross-section. *Journal of materials processing technology*. 2008;198(1-3):48-53.
- 42- Shokuhfar A, Nejadseyfi O. The influence of friction on the processing of ultrafine-grained/nanostructured materials by equal-channel angular pressing. *Journal of materials engineering and performance*. 2014;23(3):1038-48.
- 43- Medeiros N, Lins JF, Moreira LP, Gouvêa JP. The role of the friction during the equal channel angular pressing of an IF-steel billet. *Materials Science and Engineering: A*. 2008;489(1-2):363-72.
- 44- Beer FP, Johnston ER, DeWolf JT, Mazurek DF. *Mechanics of Materials*. 7th Editio. 2014.
- 45- Moshksar MM, Afsari A, Ahmadi SY. Microstructure, mechanical and electrical properties of commercially pure copper deformed severely by equal channel angular pressing. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;14(15):257-66.
- 18- Derakhshandeh A, Nili-Ahmadabadi M, Khajezade A, Shahmir H. Room Temperature Flow Behavior of Ti Deformed by Equal-Channel Angular Pressing Using Core-Sheath Method. *Advanced Engineering Materials*. 2017;19(2):1600552.
- 19- Shahmir H, Nili-Ahmadabadi M, Mansouri-Arani M, Khajezade A, Langdon TG. Evaluating a New Core-Sheath Procedure for Processing Hard Metals by Equal-Channel Angular Pressing. *Advanced Engineering Materials*. 2014;16(7):918-26.
- 20- Wang Y, Gao Y, Li Y, Zhai W, Sun L, Zhang C. Review of preparation and application of copper-steel bimetal composites. *Emerging Materials Research*. 2019;8(4):538-51.
- 21- Nagasawa H, Kohida T, Aoki S, Katayama S. Study on application of copper clad steel wire to contact wire. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*. 1992;33(2).
- 22- Rashidi AM, Etemadi M. Investigation wavy interface forming and stretching in severe plastic deformed copper/steel bimetallic rod. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2020:1-0.
- 23- Li BW, Zhao HP, Qin QH, Feng XQ, Yu SW. Numerical study on the effects of hierarchical wavy interface morphology on fracture toughness. *Computational Materials Science*. 2012;57:14-22.
- 24- Cui J, Sun G, Li G, Xu Z, Chu PK. Specific wave interface and its formation during magnetic pulse welding. *Applied Physics Letters*. 2014; 105(22):221901.
- 25- Chen W, He W, Chen Z, Zhou Z, Liu Q. Effect of wavy profile on the fabrication and mechanical properties of Al/Ti/Al composites prepared by rolling bonding: Experiments and finite element simulations. *Advanced Engineering Materials*. 2019; 21(11):1900637.
- 26- Shaeri MH, Djavanroodi F, Sedighi M, Ahmadi S, Salehi MT, Seyyedain SH. Effect of copper tube casing on strain distribution and mechanical properties of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2013;48(8):512-21.
- 27- Nagasekhar AV, Yoon SC, Tick-Hon Y, Kim HS. An experimental verification of the finite element modelling of equal channel angular pressing. *Computational materials science*. 2009;46(2):347-51.
- 28- Agwa MA, Ali MN, Al-Shorbagy AE. Optimum processing parameters for equal channel angular pressing. *Mechanics of Materials*. 2016 Sep 1;100:1-1.
- 29- Naseri R, Kadkhodayan M, Shariati M. An experimental investigation of casing effect on mechanical properties of billet in ECAP process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;90(9):3203-16.
- 30- Patil BV, Chakkingal U, Kumar TP. Influence of friction in equal channel angular pressing-A study with simulation. In *Proceedings of the 17th International Conference of Metallurgy and Materials (Metal 2008)*, Czech Rep 2008.
- 31- Kumar S. *Principles of metal working*. Oxford & IBH Publishing Company; 1985.
- 32- Babaei A, Mashhadi MM. Tubular pure copper grain refining by tube cyclic extrusion-compression