Archive of SID

ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2020;20(6):1583-1591

Improvement of Cu Mechanical Properties by Cyclic Extrusion and Expansion under Hydrostatic Pressure

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Mehrabi A.[1] *MSc,*
Davari A.*[1] *PhD*

How to cite this article
Baghinipour M, Biglari F. Improvement of Cu Mechanical Properties by Cyclic Extrusion and Expansion under Hydrostatic Pressure. Modares Mechanical Engineering. 2020-;20(6):1583-1591.

ABSTRACT

Fine grain materials exhibit excellent mechanical properties and are widely used in various industries. One way to produce fine grain bar is by using the severe plastic deformation techniques. Cyclic extrusion and expansion of the sample is used as one of the methods of severe plastic deformation for production of fine-grained bars. As the length of piece increases, the friction force increases, so that the required force for shaping operation is increased to such an extent that the process cannot be performed. For solving this problem, the "Cyclic Extrusion and Expansion under Hydrostatic Pressure" is proposed as a new method of severe plastic deformation for production of long-length fine-grained bars. In this method, the forming operation was done by using a pressure oil, so the hydrostatic compressive stresses are applying to the material and improve the mechanical properties. Also, the results of simulation of finite elements of this method show the effect of friction coefficient on the forming force and independence of the forming force from the bar length due to the hydrostatic process. Therefor the process is capable of producing rods of long length and fine structure. Results of pure copper rebar underwent this process showing that the yield strength and final strength increased by 200% and 33%, respectively. Also, the sample hardness increased substantially by 120%, and the distribution of relatively homogeneous hardness in rebar diameter was obtained. The microstructure results showed a fine-grain after the process, with the grain size reduced to 8μm in center and 5μm in outer diameter.

Keywords Severe Plastic Deformation, Fine Grain Materials, Cyclic Extrusion and Expansion, Hydrostatic Pressure, Pure Copper

[1]Manufacturing & Production Department, Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Correspondence
Address: Manufacturing & Production Department, Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
Phone: +98 (21) 64543434
Fax: -
biglari@aut.ac.ir

Article History
Received: October 3, 2019
Accepted: April 2, 2020
ePublished: June 20, 2020

CITATION LINKS

[1] Metal forming: Mechanics and metallurgy [2] Nanostructured materials from severe plastic deformation [3] Processing metals by severe plastic deformation [4] Adiabatic shear bands and examples of their role in severe plastic deformation [5] Materials science and engineering [6] A review on the finite-element method and metal forming process modeling [7] Hydrostatic tube cyclic expansion extrusion (HTCEE) as a new severe plastic deformation method for producing long nanostructured tubes [8] Tube cyclic expansion-extrusion (TCEE) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes [9] Equal-channel angular pressing using plate samples [10] Microstructure and mechanical behavior of AZ91 Mg alloy processed by equal channel angular pressing [11] Numerical and experimental investigation of hydrostatic cyclic expansion extrusion with back pressure

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

www.SID.ir

Archive of SID

بهبود خواص مکانیکی مس با اکستروژن و انبساط تناوبی تحت فشار هیدرواستاتیک

مصطفی باغینی‌پور BSc
گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
فریدرضا بیگلری* PhD
گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده
مواد ریزدانه، خواص مکانیکی فوق‌العاده‌ای از خود نشان می‌دهند و کاربرد فراوانی در صنایع مختلف دارند. یکی از راه‌های تولید میل‌گرد ریزدانه استفاده از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید است. اکستروژن و انبساط متوالی نمونه به‌عنوان یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید برای تولید میل‌گردهای ریزدانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. با افزایش طول قطعه، نیروی اصطکاک افزایش پیدا می‌کند، تا جایی که نیروی مورد نیاز برای عملیات شکل‌دهی به حدی افزایش پیدا می‌کند که امکان انجام فرآیند وجود ندارد. برای حل این مشکل، در این پژوهش، فرآیند "اکستروژن و انبساط تناوبی تحت فشار هیدرواستاتیک" به‌عنوان یک روش جدید تغییر شکل پلاستیک شدید برای تولید میل‌گردهای با ساختار ریزدانه با طول بلند پیشنهاد شده است. در این روش، عملیات شکل‌دهی با استفاده از روغن تحت فشار انجام می‌گیرد؛ به همین دلیل، تنش‌های هیدرواستاتیک فشاری به ماده اعمال می‌شود و سبب بهبود مناسب خواص مکانیکی می‌شود. همچنین، نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود این روش، تاثیر میزان ضریب اصطکاک بر نیروی شکل‌دهی و مستقل‌بودن نیروی شکل‌دهی از طول میل‌گرد را به‌دلیل انجام فرآیند به‌صورت هیدرواستاتیک نشان می‌دهد؛ بنابراین، فرآیند قادر است که میله‌هایی با طول بلند و ساختار ریزدانه تولید کند. میل‌گردی از جنس مس خالص تحت این فرآیند قرار گرفت و نتایج، حاکی از آن است که پس از انجام فرآیند، حد تسلیم و استحکام نهایی به‌ترتیب ۲۰۰% و ۳۳% افزایش یافت. همچنین سختی نمونه به‌صورت قابل ملاحظه‌ای ۱۲۰% افزایش یافت و توزیع نسبتاً همگنی از سختی در قطر میل‌گرد به‌دست آمد. نتایج ریزساختار، ریزدانه‌شدن قابل توجهی را پس از فرآیند نشان داد که اندازه دانه‌ها تا ۸ میکرومتر در مرکز قطعه و ۵ میکرومتر در شعاع خارجی کاهش یافته است.

کلیدواژه‌ها: تغییر شکل پلاستیک شدید، مواد فوق ریزدانه، اکستروژن و انبساط تناوبی، فشار هیدرواستاتیک، مس خالص

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۷/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱/۱۴

*نویسنده مسئول: biglari@aut.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اخیر، با توجه به نیاز روزافزون فلزات با استحکام بالا در صنایع مختلف، تحقیقاتی برای تولید میل‌گردهای ریزدانه صورت گرفته است. اخیراً، تولید مواد فلزی ریزدانه به‌طور ویژه‌ای مورد توجه محققین دنیا قرار گرفته است. این مواد به‌عنوان نسل جدیدی از محصولات فلزی مطرح هستند که خواص فیزیکی و مکانیکی آنها در مقایسه با مواد درشت‌دانه به‌طور قابل ملاحظه‌ای بالا است. در عین حال که استحکام در مواد فلزی ریزدانه بسیار بالاتر از مواد درشت‌دانه است، قابلیت شکل‌پذیری آنها نیز در حد قابل قبولی است. همچنین مواد ریزدانه حتی در دماهای پایین‌تر و نرخ کرنش‌های بالاتر، خاصیت شکل‌پذیری خوبی از خود نشان می‌دهند. هنگامی که یک فلز در دماهای نه‌چندان بالا، تحت تغییر شکل پلاستیک قرار می‌گیرد، ساختار درونی فلز شروع به مقاومت در برابر تغییر شکل بیشتر می‌کند؛ در نتیجه برای ادامه تغییر شکل باید مقدار تنش بیشتری اعمال نمود. به این حالت ایجادشده در فلز، کارسختی یا کرنش‌سختی گفته می‌شود. در واقع، کارسختی باعث افزایش استحکام و سختی فلز در اثر تغییر شکل می‌شود[1].

در مقابل این افزایش استحکام، فلز چقرمگی (Ductility) خود را از دست می‌دهد و قابلیت تغییر شکل آن پایین می‌آید؛ بنابراین این محدودیت باعث می‌شود که افزایش استحکام بیشتر فلز توسط اعمال کار مکانیکی محدود شود، زیرا باعث شکست ماده خواهد شد. بسیاری از فرآیندهای شکل‌دهی صنعتی که روی فلزات انجام می‌گیرد، به‌دلیل این محدودیت فلزات، امکان افزایش استحکام فلز را تا مقدار مورد نظر ندارند[2]. در روش‌های مرسوم، در برخی موارد محدودیت ابزار وجود دارد؛ به این معنی که اعمال کرنش بالاتر به ماده باعث خرابی دستگاه و ابزارآلات می‌شود[3].

برای تبدیل جامدی با دانه‌های درشت به ماده‌ای با دانه‌های بسیار ریز، وجود دو عامل ضروری است. عامل اول، اعمال کرنش زیاد به ماده برای اینکه چگالی بالایی از نابجایی‌ها به‌وجود آید و عامل دوم مرتب‌شدن مجدد نابجایی‌ها برای تشکیل یک ردیف مرزدانه[4]. تغییر شکل شدید، در واقع مجموعه روش‌هایی است که طی آن می‌توان کار مکانیکی نسبتاً زیادی را به فلز اعمال نمود (بدون اینکه فلز دچار شکست و ترک‌خوردگی شود). واژه "شدید" به این خاطر اطلاق می‌شود که با توجه به تمهیداتی (همچون محدودکردن ماده از تمام جهات و اعمال فشار از همه جهات برای جلوگیری از رشد ترک) که در این روش‌ها انجام می‌گیرد، تغییر شکل شدیدی را می‌توان به فلز در مقایسه با سایر روش‌های معمولی شکل‌دادن فلزات اعمال نمود.

استحکام تمام مواد چندکریستالی به اندازه دانه از طریق رابطه تجربی هال‌پچ مربوط می‌شود. با کاهش اندازه دانه، تنش تسلیم بهبود می‌یابد[5]. در این رابطه، d قطر میانگین دانه، σ_0 تنش اصطکاکی و k_y ثوابت مربوط به ماده و σ_y تنش تسلیم ماده است.

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

معرفی فرآیند انقباض و انبساط متوالی در فشار هیدرواستاتیک

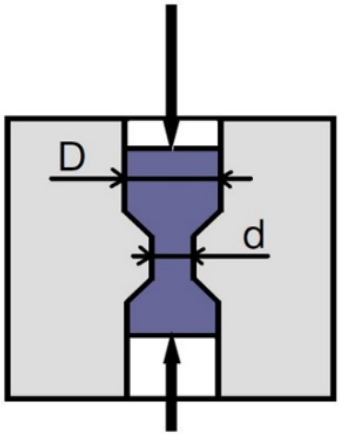
اساس فرآیند انقباض و انبساط متوالی در فشار هیدرواستاتیک (Hydrostatic Cyclic Extrusion Compression; HCEC)، فرآیند انقباض و انبساط متوالی (Cyclic Extrusion-Compression; CEC) است. تصویر شماتیک فرآیند انقباض و

www.SID.ir

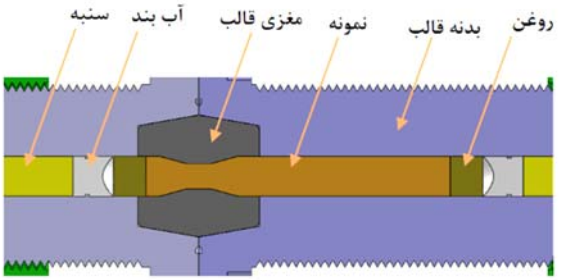
Archive of SID

انبساط متوالی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این فرآیند، یک میله با قطر D، از قالبی که قطر داخلی آن در وسط مسیر به d کاهش می‌یابد، توسط یک سنبه از بالا فشار داده شده تا در این کانال کوچک‌تر اکسترود شود. بلافاصله پس از خروج ماده از کانال اکستروژن، یک سنبه با فشار، نمونه را به سمت بالا فشرده می‌کند ولی فشار سنبه پایین به‌گونه‌ای است که مانع از اکستروژن ماده به سمت پایین نمی‌شود[3].

لازم به ذکر است که شکل ظاهری قالبی که در این مقاله مورد بحث است، اساساً مشابه قالب‌های فرآیند انقباض و انبساط متوالی است؛ با این تفاوت که کل فرآیند در فشار هیدرواستاتیک روغن انجام می‌شود. در شکل ۲، قالب و اجزای اصلی آن مشاهده می‌شود. به‌جای تماس مستقیم سنبه‌ها با نمونه، آب‌بندی پشت سنبه قرار داده می‌شود. روغن داخل فضای قالب پر می‌شود و این روغن است که نقش سنبه را بازی می‌کند؛ بنابراین فرآیند در فشار هیدرواستاتیک روغن انجام می‌شود. مزیت مهم این کار، کاهش چشمگیر اصطکاک نمونه تحت آزمایش با دیواره‌های قالب است.



شکل ۱) شماتیک فرآیند انقباض و انبساط متوالی[3]



شکل ۲) شماتیک فرآیند انقباض و انبساط متوالی در فشار هیدرواستاتیک

تحلیل عددی فرآیند

فرآیند با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، شبیه‌سازی شده است. به‌منظور تحلیل دقیق فرآیند، می‌بایست فیزیک انجام فرآیند به‌خوبی شناخته شود. بنابر دلایل زیر نوع تحلیل استاتیک خواهد بود:

۱. وزن اجزای در قیاس با نیروهایی که قرار است به نمونه اعمال شود بسیار ناچیز است.

۲. سرعت انجام فرآیند بسیار پایین است (چیزی در حدود ۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه) و مجموع جرم اجزای متحرک قالب کمتر از ۳ کیلوگرم است. با توجه به نیروی شکل‌دهی (بیشتر از ۵ تن)، انرژی جنبشی در مقابل انرژی کل مصرفی کمتر از ۱% است. در نتیجه می‌توان آن را استاتیک در نظر گرفت.

۳. از همه مهم‌تر اینکه مطابق معادله ۲ که با عنوان معادله عمومی تغییر شکل فلزات (کرنش سختی فلزات) شناخته می‌شود، مقدار پارامتر m در دمای محیط کمتر از ۰/۰۳ است که با این تفسیر، نرخ کرنش قابل چشم‌پوشی است[6].

$$\bar{\sigma} = k[\bar{\varepsilon}_0 + \bar{\varepsilon}]^n \dot{\bar{\varepsilon}}^m \qquad (۲)$$

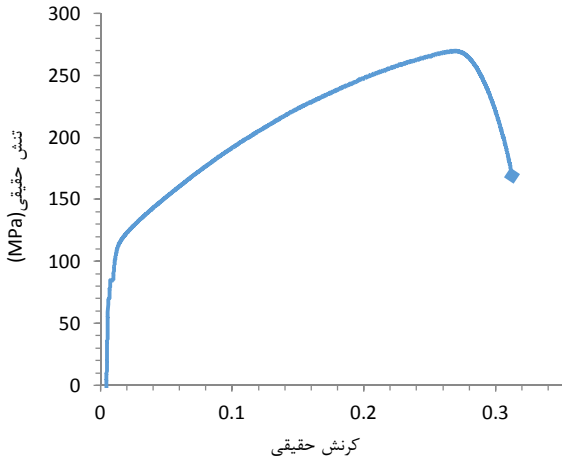
انتخاب جنس

در این مقاله، از فلز مس استفاده شده است. فلز مس قابلیت کارسختی بسیار خوبی را از خود نشان می‌دهد. به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند از مدل الاستیک- پلاستیک همراه کرنش سختی استفاده شده است. خواص مس در شبیه‌سازی در نظر گرفته شد و خواص عمومی آن در جدول ۱ نمایش داده شده است.

مقادیر مربوط به تنش و کرنش در نرم‌افزار آباکوس بر اساس تنش- کرنش حقیقی مس وارد شده است. مقادیر آن با استفاده از نمودار ۱ در چند نقطه استخراج شده است. بخش‌های الاستیک و پلاستیک در نمودار لحاظ شده است و از نقطه تنش نهایی به بعد، رفتار ماده به‌صورت صلب پلاستیک فرض شده است.

جدول ۱) خواص عمومی مس خالص[7]

خاصیت	مقدار
چگالی	۸/۶۹ ton/m³
مدول یانگ	۱۳۰GPa
نسبت پواسون	۰/۳۴
تنش تسلیم	۱۲۵ MPa



نمودار ۱) منحنی تنش- کرنش حقیقی مس خالص[7]

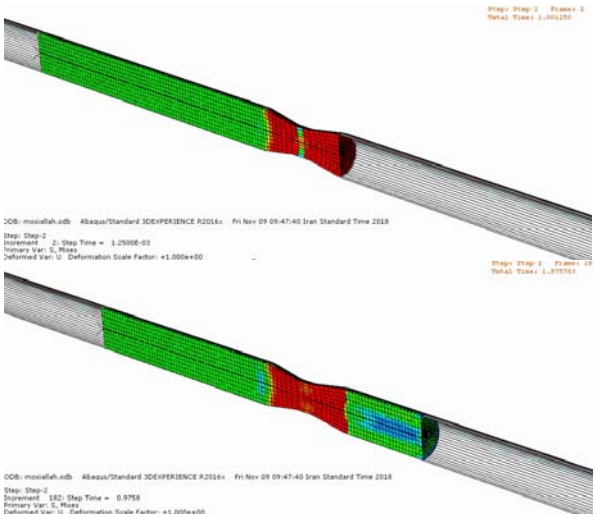
www.SID.ir

Archive of SID

بررسی ورودی‌های تحلیل نرم‌افزاری

فرآیند، در دو گام داخل نرم‌افزار آباکوس تعریف می‌شود. گام اول ابتدا نمونه درون قالب قرار می‌گیرد و با فشار سنبه اصلی در حالی که سنبه فشارپشتی ثابت است، اکسترود شده و قطر آن کاهش می‌یابد. سپس ماده اکسترودشده به سنبه پشتی برخورد می‌کند. سنبه پشتی همانند یک مانع ثابت عمل می‌کند. ماده درون محفظه شکل‌دهی را پر می‌کند و فضای درون قالب پر می‌شود. بعد از مرحله انقباض و انبساط، سنبه فشارپشتی از حالت ثابت خارج شده و با سرعتی برابر با سنبه اصلی حرکت می‌کند. این‌گونه فرض می‌شود که ابتدا ماده آن‌قدر اکسترود شده و سپس منبسط می‌شود که کلیه فضاهای خالی را پر کند. سپس دو سنبه با سرعت‌های مساوی جابجایی مساوی انجام می‌دهند؛ یعنی مستقل از اینکه چه نیرویی به سنبه‌ها وارد می‌شود، صرفاً پرشدن قالب، معیار انجام‌شدن فرآیند در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳).

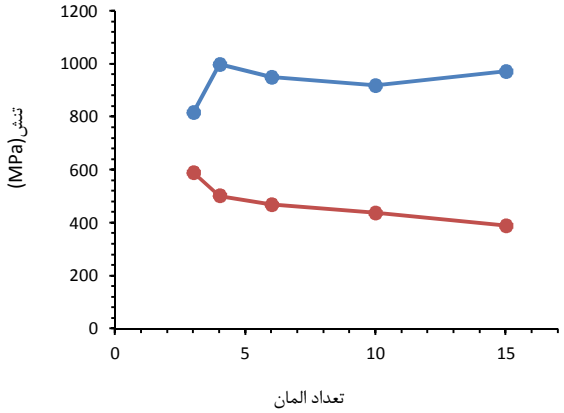
با توجه به اینکه سنبه از طریق فشار روغن (گریس) با نمونه در تماس است، اصطکاک سنبه‌ها با نمونه، صفر در نظر گرفته شد. هرچند اگر فرآیند کاملاً هیدرواستاتیک انجام نشود، اصطکاک روی سنبه‌ها وجود دارد[8]. مقدار ضریب اصطکاک در ناحیه تغییر شکل، ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. این اصطکاک با استفاده از مولیبدن دی‌سولفید (گریس حاوی این ماده) در منطقه تغییر شکل حاصل می‌شود[9]. قطر اولیه نمونه ۱۰mm در نظر گرفته شده است. قطرهای بیشتر از این نیاز به نیروی بسیار زیادتری دارد. قطرهای کمتر نیز فرآیندهای ساخت قالب و سنگ‌زنی سطوح را دشوارتر خواهد کرد. تحلیل‌های انجام‌شده به‌صورت متقارن محوری است. نیمی از مدل به‌علت تقارن، مدل‌سازی شد که تفاوتی با مدل‌سازی کامل ندارد.



شکل ۳) گام‌های تعریف فرآیند در نرم‌افزار آباکوس

عدم وابستگی به مش‌بندی

یکی از مسائل پراهمیت در نرم‌افزارهای المان‌محدود که تاثیر زیادی بر خروجی‌های آن دارد، نحوه مش‌بندی و ابعاد المان‌ها است. المان‌ها می‌بایست تا حد ممکن نزدیک به مکعب باشند. همچنین انتخاب تعداد مناسب المان می‌تواند علاوه‌بر افزایش دقت تحلیل، سرعت آن را نیز بهبود ببخشد. به همین منظور با تغییر تعداد المان‌ها روی شعاع نمونه تحت آزمایش، تاثیر بر تنش نودها بررسی شد. نمودار ۲، تغییرات تنش در شرایط مرزی و بارگذاری یکسان را با تغییر تعداد المان از ۳ تا ۱۵ نمایش می‌دهد. با ریزشدن المان‌ها، مشخص است که مقادیر تنش روی نودهای متصل به سنبه پشتی به یک مقدار ثابت میل می‌کند. در نهایت تعداد ۶ المان برای شبیه‌سازی انتخاب شد.



نمودار ۲) منحنی عدم وابستگی به مش‌بندی

تاثیر هندسه قالب

به‌منظور بررسی تاثیر شیب قالب بر خروجی‌های فرآیند، قطر کوچک قالب (منطقه گلویی یا انقباض) ۷ میلی‌متر و ثابت در نظر گرفته شده است و شیب قالب بین مقادیر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه تغییر داده شد.

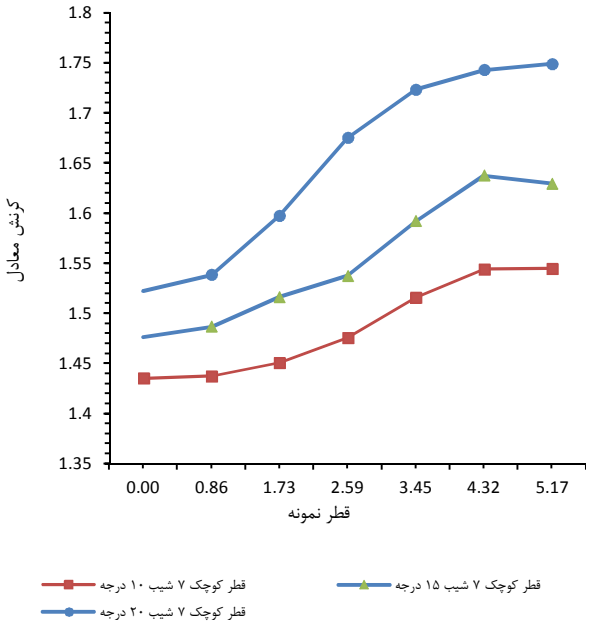
تاثیر تغییر شیب بر فشار وارد بر سنبه و کرنش معادل اعمالی به نمونه مطابق نمودارهای ۳ و ۴ بررسی شد. مشخص است با افزایش شیب قالب کرنش معادل و فشار وارد بر سنبه‌ها افزایش پیدا می‌کند. ولی باید دقت شود در ازای ۵۰% افزایش شیب، کرنش کمتر از ۷% افزایش داشت که تاثیر بسیار کمی بر کرنش اعمالی به نمونه دارد؛ در عوض تنش وارد بر سنبه شدیداً متاثر شده است. با توجه به اینکه هدف در روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، اعمال کرنش بیشتر به نمونه است، افزایش شیب خیلی نمی‌تواند در تحقق این هدف موثر واقع شود. یکنواختی تنش روی قطر نمونه ناشی از انجام فرآیند در فشار هیدرواستاتیک است.

در گام بعدی، شیب قالب ۱۵ درجه و ثابت در نظر گرفته می‌شود. سپس با تغییر قطر کوچک قالب، پارامترهای خروجی تغییر داده می‌شود. قطر کوچک قالب بین ۶، ۶/۵، ۷ و ۸mm تغییر می‌کند. قطر کوچک قالب تاثیر زیادی بر کرنش اعمالی به نمونه دارد. با کاهش این قطر، کرنش اعمالی به نمونه تغییر چشمگیری می‌کند

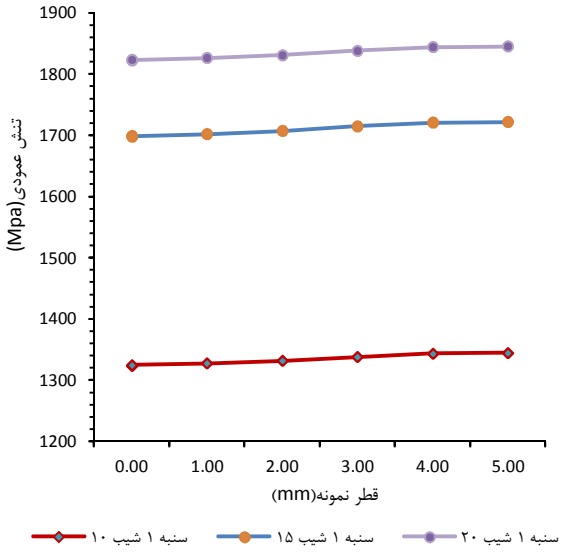
www.SID.ir

Archive of SID

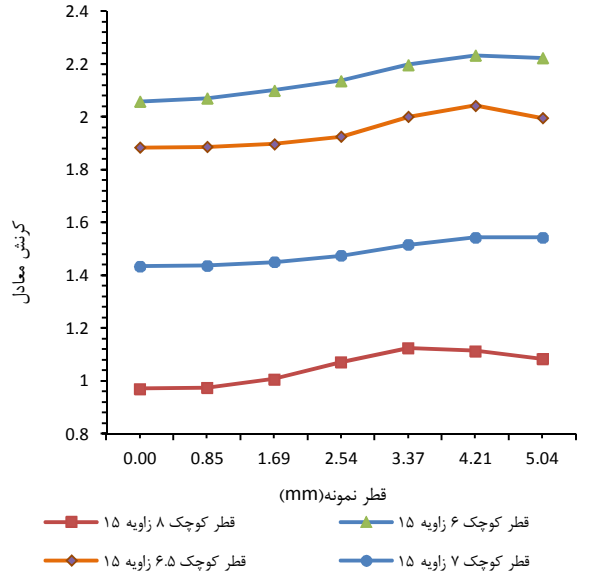
(نمودار ۵). تغییر قطر کوچک قالب در مقایسه با شیب قالب، تاثیر بسیار بیشتری دارد و با ۲۵% کاهش قطر کوچک، ۱۲۰% افزایش کرنش مشاهده می‌شود. همچنین واضح است که با کوچک‌شدن قطر ناحیه گلویی قالب تنش روی سنبه‌ها افزایش می‌یابد (نمودار ۶). با کوچک‌کردن ۰/۵ میلی‌متری قطر ناحیه گلویی از ۶/۵ به ۶، به تنش روی سنبه ۴۱۰ مگاپاسکال افزوده می‌شود و این در حالی است که کرنش تغییر چشمگیری نمی‌کند. بر اساس تحلیل‌های اخیر، قطر کوچک قالب ۶/۵ میلی‌متر و شیب آن ۱۵ درجه در نظر گرفته شده است.



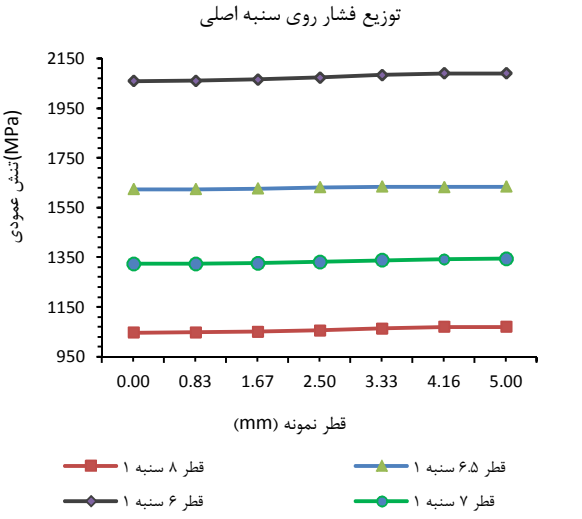
نمودار ۳) تاثیر زاویه قالب بر کرنش معادل



نمودار ٤) تاثیر شیب قالب بر فشار سنبه



نمودار ۵) تاثیر قطر کوچک قالب بر کرنش معادل



نمودار ٦) تاثیر قطر کوچک قالب بر فشار سنبه

طراحی و ساخت قالب

یک سیستم مکانیکی نیاز است تا میله‌ای مسی را ابتدا از قطر ۱۰ میلی‌متر به قطر ۶/۵ رسانده و سپس آن را به قطر اولیه بازگرداند و تمامی مقاطع میل‌گرد مسی تحت این تغییر قطر قرار گیرند. همچنین فرآیند باید در حضور روغن و فشار هیدرواستاتیک انجام شود. نیروها و تنش‌های مورد نیاز برای طراحی قالب در تحلیل المان‌محدود به‌دست آمده است.

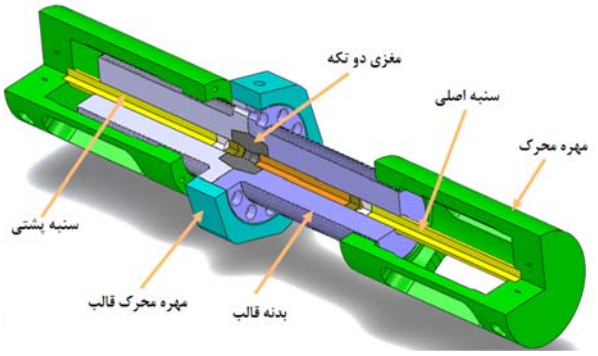
مکانیزم قالب در شکل ۴ نمایش داده شده است. قالب به‌صورت پیچ و مهره‌ای طراحی شده است. ناحیه تغییر شکل به‌صورت یک مغزی دوتکه مخروطی ساخته شده است تا بتوان نمونه را پس از اتمام فرآیند از داخل قالب خارج کرد. در گام اول فرآیند، بدنه قالب و سنبه پشتی ثابت است و با دوران مهره محرک متصل به سنبه اصلی، نمونه داخل مغزی قالب، ابتدا اکسترود شده و سپس با برخورد به سنبه پشتی منبسط می‌شود. در گام دوم فرآیند دو

www.SID.ir

Archive of SID

سنبه ثابت می‌شوند و با دوران مهره محرک قالب، مغزی قالب روی نمونه کشیده می‌شود و تمامی مقاطع آن دچار کرنش سختی می‌شود.

اجزای قالب با توجه به تنش‌های بسیار زیاد اعمالی از فولادهای آلیاژی ساخته شده است که سخت‌کاری شده‌اند. سنبه‌ها از جنس فولاد تندبر (HSS) با ۵% کبالت ساخته شده است که تا ۷۰ راکول سختی و تنش تسلیمی در حدود ۱۹۰۰ مگاپاسکال دارند. مغزی قالب از فولاد آلیاژی با ۲% کروم و ۱/۵% نیکل ساخته شد که ۵۲ راکول سخت شده است. داخل اجزای قالب با دقت ۰/۰۱mm سنگ خورده است. آب‌بندها از پلی‌آمیدی با نام پلی‌تترافلئوراتیلن (PTFE) ساخته شده است. هندسه آن به‌گونه‌ای است که با افزایش فشار، آب‌بندها منبسط شده و فشار با نیروی بیشتری مانع نشتی می‌شوند. در شکل‌های ۵ و ۶ اجزای قالب قابل مشاهده است.



شکل ۴) مکانیزم قالب

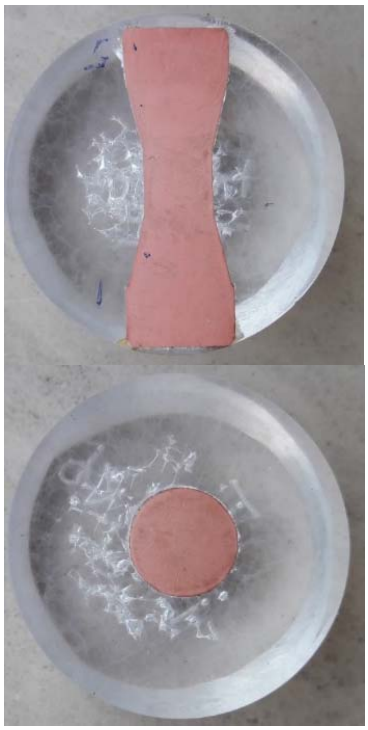
شکل ۵) قالب ساخته‌شده

شکل ۶) آب‌بند پلی‌آمیدی

آزمون‌های تعیین خواص نمونه

پس از استخراج نمونه از قالب، آزمون‌هایی روی آن انجام می‌شود. همچنین باید بررسی شود که انجام این فرآیند تا چه میزان بر خواص مکانیکی تاثیر داشته است. نحوه صحیح انجام آزمایش‌ها نیز مهم است. آزمون متالوگرافی به‌منظور بررسی تغییرات ریزساختار، میکروسختی‌سنجی به‌منظور بررسی سختی نمونه و آزمون کشش به‌منظور بررسی افزایش یا کاهش استحکام تسلیم، استحکام نهایی و تغییرات چقرمگی انجام می‌شود. شکل ۷ نمایشگر نمونه‌های به‌دست‌آمده از فرآیند و شکل ۸ نمونه‌های مانت‌شده را نمایش می‌دهد. سختی مس خالص آنیل‌شده، ۶۰ ویکرز اندازه‌گیری شده است. ریزساختار آن در شکل ۹ نمایش داده شده است. اندازه دانه‌ها در مس خالص آنیل‌شده بسیار بزرگ است و تا ۱۰۰ میکرون می‌رسد. مرزدانه‌ها خیلی کم هستند و زوایای کوچک در آنها زیاد مشاهده می‌شود.

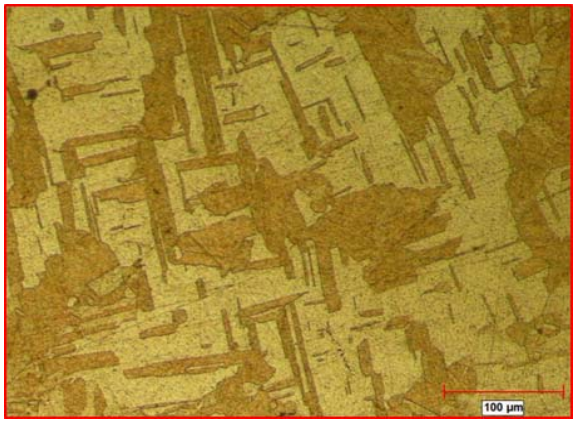
شکل ۷) تصویر نمونه تحت آزمایش و نمونه پیش از آزمایش



شکل ۸) نمونه‌های مانت‌شده از مقاطع مختلف

www.SID.ir

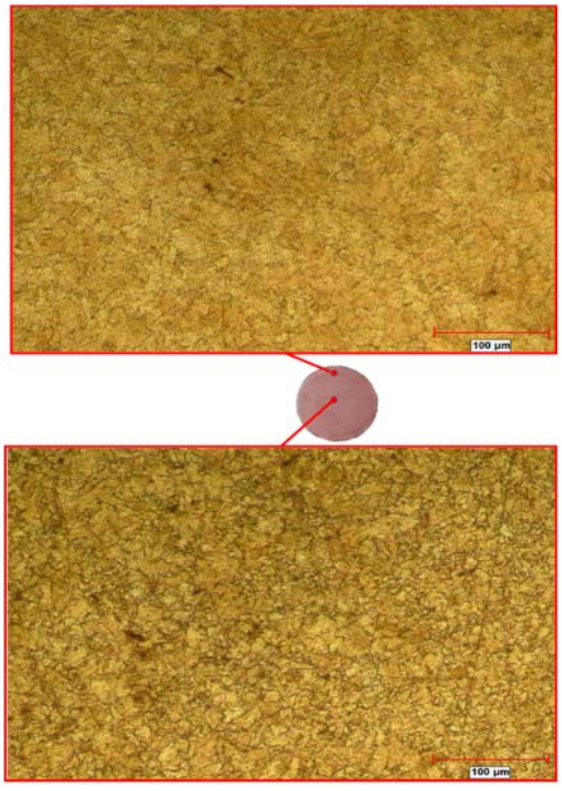
Archive of SID



شکل ۹) ساختار مس خالص آنیل‌شده

آزمون متالوگرافی نمونه

پس از انجام فرآیند اندازه دانه‌ها تا ۸ میکرومتر در مناطق مرکزی و تا ۵ میکرومتر در لبه نمونه کاهش یافته است. نمودار ۵ به‌خوبی این مساله که در شعاع‌های بیشتر ریزدانگی بیشتر است توجیه می‌کند. در تحلیل المان‌محدود، هرچه از مرکز شعاع نمونه به بیرون حرکت شود، کرنش اعمالی به نمونه بیشتر می‌شود. در شکل ۱۰ مشخص است که ساختار در شعاع بیرونی ریزتر از مرکز نمونه است.



شکل ۱۰) ساختار مس خالص آنیل‌شده

آزمون میکروسختی‌سنجی نمونه

با استفاده از دستگاه میکروسختی‌سنجی پروفیل سختی نمونه هم در شعاع نمونه و هم در طول ناحیه تغییر شکل استخراج شده است. یکی بیانگر سیر افزایش سختی نمونه حین انجام فرآیند است و دیگری بیانگر میزان یکنواختی سختی در شعاع نمونه است. انتظار می‌رود با افزایش کرنش اعمالی به نمونه، ریزدانگی افزایش یافته و خواص مکانیکی از جمله سختی بهبود یافته باشد. نقاط اندازه‌گیری سختی در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نمایش داده شده است.

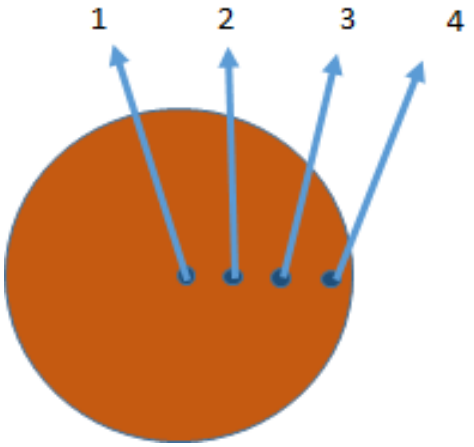
سختی مس خالص آنیل‌شده ۶۰ ویکرز اندازه‌گیری شده است و حداقل سختی نمونه پس از انجام فرآیند بیشتر از دو برابر شده است. هرچه روی شعاع نمونه از مرکز به سمت بیرون جابجایی صورت‌پذیرد، میزان سختی افزایش می‌یابد (جدول ۲). این نتیجه با نتایج متالوگرافی همخوانی دارد و نشان می‌دهد با کاهش اندازه دانه‌ها، سختی افزایش یافته است. با حرکت در مسیر طولی، سختی نمونه بهبود یافته است (جدول ۳). پیش از عبور نمونه از داخل منطقه تغییر شکل نیز سختی بسیار بیشتر از مس خالص است؛ در حالی که پیش از ورود به ناحیه تغییر شکل هنوز نمونه دچار تغییر شکل نشده و تحت کرنش نبوده است. علت آن را می‌توان در وجود لقی ۰/۱ میلی‌متری اولیه بین نمونه و قالب جستجو کرد. اعمال نیرو به سنبه است که فشار آن به نمونه منتقل می‌شود. اعمال این نیرو به قطعه منجر به تورم آن تا رسیدن به دیواره‌ها و پرکردن فضای لقی می‌شود. همچنین خود قالب و اجزای قالب کاملاً صلب نیست و در فشار بالای کاری متورم‌شده و منجر به اعمال کرنش به نمونه می‌شود که به دنبال آن بهبود خواص مکانیکی نمونه پیش از ورود به نواحی تغییر شکل رخ می‌دهد.

جدول ۲) مقادیر سختی روی شعاع نمونه

شماره نقطه	٤	٣	٢	١
سختی (ویکرز)	۱۳۳	۱۲۷	۱۲٦	**۱۲۱**

جدول ۳) مقادیر سختی روی قطاع طولی

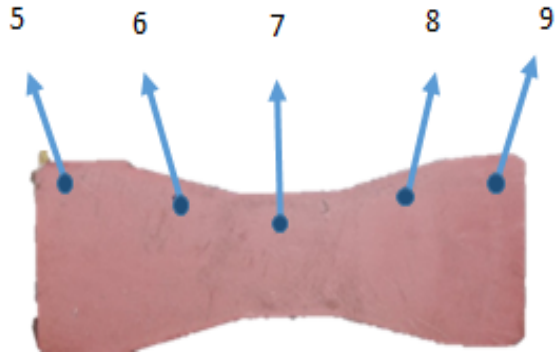
شماره نقطه	٩	٨	٧	٦	٥
سختی (ویکرز)	۱۳۲	۱۲۷	۱۲۰	۱۱٤	**۱۱۲**



شکل ۱۱) اندازه‌گیری سختی نمونه روی شعاع

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۲) اندازه‌گیری سختی نمونه روی قطاع طولی

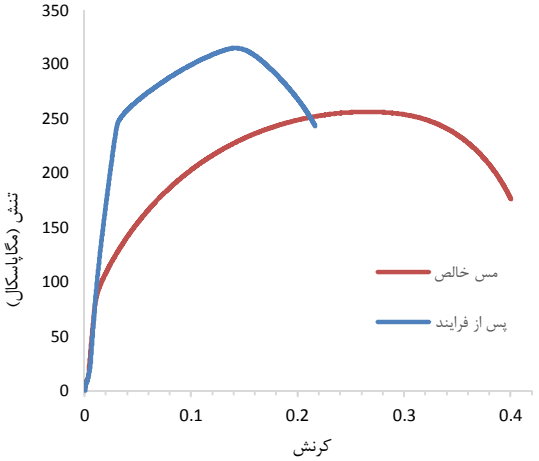
آزمون کشش تک‌محوره

آزمون کشش برای نمونه‌های خام و پس از یک پاس انجام فرآیند منطبق با شکل ۱۳ در دمای اتاق و با نرخ کرنش ۰/۰۰۱ بر ثانیه صورت گرفته است. آزمون کشش در حضور کشش‌سنج (Extensometer) انجام شده است که دقت بهتری ارایه می‌دهد.

گلویی‌شدن نمونه‌ها در شکل ۱۱ مشهود است. همچنین کاملاً مشهود است نمونه‌ای که تحت فرآیند قرارگرفته (ب) شکست تردتری داشته و کمتر گلویی شده است.

حد تسلیم برای ماده خام آنیل‌شده، ۹۰ مگاپاسکال بود که پس از انجام ۱ پاس فرآیند به ۲۴۰ مگاپاسکال رسیده است. مانند سایر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، اصلاح دانه‌بندی با کاهش اندازه دانه‌ها و افزایش چگالی نابجایی‌ها سبب افزایش حد تسلیم و استحکام کششی شده است[10]. پس از انجام فرآیند، درصد تغییر طول نهایی از مقدار ۴۰% در مس خام به حدود ۲۰% در نمونه تحت فرآیند رسیده است. افزایش استحکام ماده، کاهش تغییر طول نهایی را به دنبال دارد. همان‌طور که در نمودار ۷ مشاهده می‌شود، با انجام فرآیند می‌توان به استحکام نهایی ۳۲۰ مگاپاسکال دست یافت که نسبت به مس خالص اولیه، ۶۵ مگاپاسکال افزایش داشته است.

شکل ۱۳) نمونه کشش‌های گسیخته‌شده



نمودار ۷) منحنی تنش- کرنش مهندسی

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله، به بررسی فرآیند انقباض و انبساط متوالی فلز مس در فشار هیدرواستاتیک روغن (HCEC) پرداخته شد. به‌جای تماس مستقیم سنبه با نمونه، روغن با نمونه در تماس است. به‌منظور اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید، قالبی ساخته‌شد و با استفاده از این قالب، فرآیند روی یک میله مسی به قطر ۱۰mm و طول ۷۵mm انجام شد. سپس آزمون‌هایی به‌منظور بررسی تعیین خواص مکانیکی نمونه تحت آزمایش قبل و بعد از فرآیند صورت گرفت. پس از انجام فرآیند حد تسلیم و استحکام نهایی به‌ترتیب از مقادیر ۸۰ و ۲۵۵ مگاپاسکال به ۲۴۰ و ۳۲۰ مگاپاسکال افزایش یافت. همچنین سختی نمونه به‌صورت قابل ملاحظه‌ای از ۶۰ ویکرز به حداکثر ۱۳۳ ویکرز افزایش یافت و توزیع نسبتاً همگنی از سختی در قطر میل‌گرد به‌دست آمد. نتایج ریزساختار، ریزدانه‌شدن قابل توجه‌ای را پس از فرآیند نشان داد که اندازه دانه‌ها تا ۸ میکرومتر در مرکز و ۶ میکرومتر در کناره‌ها کاهش یافته است. این مقدار در یک پاس فرآیند HCEE انجام‌شده توسط *بهرامی*، ۱۰ میکرومتر بیان شده است[11].

مقادیر ریزدانگی فرآیندها نزدیک به هم است؛ ولی همگنی کرنش پلاستیک اعمالی در این فرآیند در مقایسه با فرآیندهای مشابه جزء نقاط قوت این فرآیند محسوب می‌شود. یعنی در قطر نمونه هرچه از مرکز به سمت بیرون جابجایی صورت پذیرد، میزان کرنش معادل تغییرات زیادی نمی‌کند (به میزان ۰/۱) و خواص نمونه تقریباً در همه جا در حد قابل قبولی یکسان است. مشخص است که عدم یکنواختی کرنش، عدم یکنواختی خواص را در پی دارد و این در حالی است که در پژوهش‌های پیشین، این یکنواختی مشاهده نمی‌شود. اختلاف کرنش اعمالی به نمونه در پژوهش HCEE انجام‌شده توسط *بهرامی* در مرکز و بیرونی‌ترین شعاع ۱۶۰% است که در فرآیند موضوع این مقاله ۱۰% است[11].

www.SID.ir

Archive of SID

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

تاییدیه‌اخلاقی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

سهم نویسندگان: مصطفی باغینی‌پور (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی (۵۰%)؛ فریدرضا بیگلری (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۵۰%).

منابع مالی: تمامی هزینه‌های منجر به این مقاله توسط نویسنده اول پرداخت شده است.

منابع

1- Hosford WF, Caddell RM. Metal forming: Mechanics and metallurgy. 4th edition. Cambridge: Cambridge University Press; 2014. pp. 30-41.

2- Valiev RZ, Islamgaliev RK, Alexandrov IV. Nanostructured materials from severe plastic deformation. Nanostructured Materials. 1999;12(1-4):35-40.

3- Rosochowski A. Processing metals by severe plastic deformation. Solid State Phenomena. 2005;101-102:13-22.

4- Murr LE, Trillo EA, Pappu S, Kennedy C. Adiabatic shear bands and examples of their role in severe plastic deformation. Journal of Materials Science. 2002;37(16):3337-3360.

5- Callister WD, Rethwisch DG. Materials science and engineering. 6th edition. New Jeresey: John Wiley & Sons; 2006. pp. 188-190.

6- Kobayashi Sh. A review on the finite-element method and metal forming process modeling. Journal of Applied Metalworking. 1982;2(3):163-169.

7- Motallebi Savarabadia M, Farajia G. Hydrostatic tube cyclic expansion extrusion (HTCEE) as a new severe plastic deformation method for producing long nanostructured tubes. Journal of Alloys and Compounds. 2018;718:412-417.

8- Babaei A, Mashhadi MM, Jafarzadeh H. Tube cyclic expansion-extrusion (TCEE) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes. Journal of Materials Science. 2014;49:3158-3165.

9- Kamachi M, Furukawa M, Horita Z, Langdon TG. Equal-channel angular pressing using plate samples. Materials Science and Engineering: A. 2003;361(1-2):258-266.

10- Máthis K, Gubicza J, Nam NH. Microstructure and mechanical behavior of AZ91 Mg alloy processed by equal channel angular pressing. Journal of Alloys and Compounds. 2005;394(1-2):194-199.

11- Bahrami M, Faraji GH. Numerical and experimental investigation of hydrostatic cyclic expansion extrusion with back pressure [dissertation]. Tehran: Tehran University of Technology; 2016. pp. 140-141.

www.SID.ir