



# Experimental Investigation of the Effects of Two-Pass Hydrostatic Cyclic Expansion Extrusion Process on the Mechanical Properties and Microstructure of Pure Copper Tubes

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Motallebi Savarabadi M.<sup>1</sup> MSc,  
Faraji Gh.\*<sup>1</sup> PhD,  
Eftekhari M.<sup>1</sup> MSc

### How to cite this article

Motallebi Savarabadi M, Faraji Gh, Eftekhari M. Experimental Investigation of the Effects of Two-Pass Hydrostatic Cyclic Expansion Extrusion Process on the Mechanical Properties and Microstructure of Pure Copper Tubes. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(4):933-941.

## ABSTRACT

Hydrostatic tube cyclic expansion extrusion process is a newly invented severe plastic deformation technique for producing long ultrafine-grained and nanostructured tubes with higher mechanical properties. In the present research, this process was applied through two passes at room temperature on the commercial purity copper. Then, the hardness, tensile properties, fracture surface and microstructure of the samples were evaluated. The main goal of this research was to achieve a material with a simultaneous high strength and desirable ductility. In this process, the utilization of pressurized fluid between the die and the tube leads to first, the desired improvement of mechanical properties due to the effects of hydrostatic compressive stress. Second, the reduction of a required deforming force to eliminating the friction between the die and the tube leads to the facilitation of producing relatively long ultrafine-grained and nanostructured tubes. After two passes of process, a nearly equiaxed and homogeneous ultrafine-grained (UFG) microstructure was observed. The yield strength and ultimate strength increased from 75 MPa and 207 MPa to 310 MPa and 386 MPa, respectively. However, elongation to failure decreased from 55% to 37%. Also, the hardness value of the tube increased significantly from 59 Hv to 143 Hv, and the uniform distribution of hardness was obtained through the thickness of the tube. The fractography evaluations revealed that the predominantly ductile fracture happened in all samples of tensile testing. The hydrostatic tube cyclic expansion extrusion process can be utilized as a practical industrial method for producing relatively long ultrafine-grained tubes.

**Keywords** Severe plastic deformation; AZ31 Alloy; Pure copper; Hydrostatic pressure; Tube; Ultra-fine grain

## CITATION LINKS

[1] Experimental investigation of the effect of temperature in ... [2] Study of Microstructure and mechanical properties of ... [3] Fabricating ultrafine-grained materials through the ... [4] Effects of PTCAP as a severe plastic deformation method on the ... [5] Evaluation of the effects of a combined severe plastic ... [6] Severe plastic deformation of metals by ... [7] Accumulative spin-bonding (ASB) as a novel SPD process for fabrication ... [8] Development of a novel severe plastic deformation method for ... [9] Tubular channel angular pressing (TCAP) as a novel severe plastic ... [10] Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP) as a new ... [11] Tube cyclic expansion-extrusion (TCEE) as a novel severe plastic ... [12] Tubular pure copper grain refining by tube cyclic ... [13] Fabrication of ultra-fine grained aluminium tubes ... [14] Apparatus and method for fabricating high strength ... [15] Hydrostatic tube cyclic expansion extrusion (HTCEE) ... [16] Processing and characterization of nanostructured Grade 2 Ti processed ... [17] Hot tensile deformation behavior ... [18] Enhanced hot tensile ductility of Mg-3Al-1Zn alloy ... [19] Ultra-fine grained bulk CP-Ti processed by multi-pass ... [20] Producing bulk ultrafine-grained materials ... [21] Tensile properties and fracture mechanism of Al-Mg ... [22] Severe mechanical anisotropy of high-strength ... [23] Grain-size distribution effects in plastic flow and ... [24] Hydrostatic radial forward tube extrusion as a new plastic ... [25] Influence of temperature and hydrostatic pressure during ... [26] Three strategies to achieve uniform tensile ... [27] Twist channel angular pressing (TCAP) as a method ... [28] Microstructure, texture and mechanical properties of cyclic ... [29] Repetitive forging (RF) using inclined punches ... [30] Equal-channel angular pressing and high-pressure torsion ... [31] Hot tensile deformation and fracture behaviors ... [32] Direct influence of recovery behaviour on ... [33] Microstructures and mechanical properties of pure ... [34] Microstructure and mechanical properties of ... [35] Microstructure, texture and mechanical properties ... [36] Microstructural evolution, mechanical properties ... [37] Experimental and numerical analyses of pure copper ...

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Tehran, Tehran, Iran

### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Tehran, North Kargar Street, Tehran, Iran  
Phone: +98 (21) 61119966  
Fax: +98 (21) 61119966  
ghfaraji@ut.ac.ir

### Article History

Received: November 22, 2019  
Accepted: August 09, 2019  
ePublished: April 17, 2020

## بررسی تجربی اثر فرآیند شکل‌دهی دو پاسی انبساط و انقباض تناوبی هیدرواستاتیک بر خواص مکانیکی و ریزساختار لوله‌های مسی

محمد مطلبی سوارآبادی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

قادر فرجی\* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

محمد افتخاری MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

### چکیده

فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی شکل‌دهی هیدرواستاتیک لوله روش تغییر شکل پلاستیک شدید جدیدی است که به منظور تولید لوله‌های بلند فوق ریزدانه و نانو ساختار با خواص مکانیکی بالا ابداع شده است. در پژوهش حاضر این فرآیند طی دو پاس در دمای اتاق روی مس خالص تجاری اعمال شد و سپس سختی، خواص کششی، سطح شکست و ریزساختار نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. هدف این پژوهش به دست آوردن ماده‌ای با استحکام بالا و شکل‌پذیری مطلوب بود. وجود سیال تحت فشار بین لوله و قالب در این فرآیند اولاً موجب بهبود مطلوب خواص مکانیکی، تحت تاثیر تنش‌های هیدرواستاتیک فشاری می‌شود ثانیاً، با حذف نمودن اصطکاک بین لوله و قالب باعث کاهش نیروی مورد نیاز شکل‌دهی می‌شود. این امر تولید لوله‌های فوق ریزدانه و نانو ساختار با طول‌های نسبتاً بلند را تسهیل می‌کند. پس از انجام دو پاس از فرآیند، ریزساختاری فوق ریزدانه نسبتاً همگن و هم‌محور مشاهده شد. مقدار حد تسلیم و استحکام نهایی به ترتیب از مقادیر ۷۵ و ۲۰۷ مگاپاسکال به ۳۱۰ و ۳۸۶ مگاپاسکال افزایش یافت ولی درصد ازدیاد طول تا شکست از ۵۵٪ به ۳۷٪ کاهش یافت. همچنین سختی لوله به صورت قابل ملاحظه‌ای از ۵۹ ویکرز به ۱۴۳ ویکرز افزایش یافت و توزیع همگنی از سختی در راستای ضخامت لوله به دست آمد. بررسی‌های شکست‌نگاری حاکی از اتفاق افتادن، غالباً شکست داکتیل در نمونه‌های آزمون کشش بودند. فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی شکل‌دهی هیدرواستاتیک لوله می‌تواند به صورت صنعتی و کاربردی در تولید لوله‌های فوق ریزدانه با طول‌های نسبتاً بلند مورد استفاده قرار گیرد.

**کلیدواژه‌ها:** تغییر شکل پلاستیک شدید، مس خالص، انبساط و روزن‌رانی تناوبی و شکل‌دهی هیدرواستاتیک لوله، فوق ریزدانه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۸

\*نویسنده مسئول: ghfaraji@ut.ac.ir

### ۱- مقدمه

امروزه، روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید یکی از روش‌های موثر و پربازده در تولید مواد فوق ریزدانه و نانو ساختار محسوب می‌شوند. در این روش‌ها، کرنش‌های پلاستیک شدیدی به قطعه اعمال می‌شود که باعث کاهش اندازه دانه‌ها تا مقیاس نانومتری شده و متعاقباً، خواص مکانیکی قطعه بهبود قابل توجهی پیدا می‌کند [1, 2].

تغییر شکل پلاستیک شدید به آن دسته از فرآیندهایی گفته می‌شود که در آن‌ها، کرنش پلاستیک بالایی به قطعه اعمال

می‌شود بدون اینکه در ابعاد قطعه، تغییر محسوسی ایجاد شود. به این ترتیب، اعمال میزان بالایی تغییر شکل پلاستیک به قطعه امکان‌پذیر خواهد بود. زیرا قطعه می‌تواند چندین بار (چند پاس) تحت فرآیند تغییر شکل پلاستیک قرار بگیرد تا کرنش پلاستیکی بالایی در آن تجمع یابد و متعاقباً، ریزدانه شدن ساختار میکروسکوپی قطعه اتفاق بیفتد [3]. برخی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدیدی که امروزه مصارف زیادی برای قطعات بالک (حجیم) دارند عبارت‌اند از [4, 5]: روش فشار در کانال زاویه‌دار مساوی ECAP؛ روش پیچش فشار بالا HPT؛ روش فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای موازی PTCAP؛ روش کنگره‌ای و صاف کردن متناوب CGP؛ روش انبساط و روزن‌رانی تناوبی CEE و روش نورد اتصال تجمعی ARB.

در زمینه تغییر شکل پلاستیک شدید لوله‌ها، توس، لوله‌های فوق ریزدانه را با استفاده از روش پیچش لوله در فشار بالا HPTT تولید نمود [6]. محبی، روشی جدید تحت عنوان چرخش اتصال تجمعی ASB جهت تولید این نوع لوله‌ها معرفی کرد [7]. زنگی‌آبادی و همکاران، با استفاده از روش فشار در کانال لوله‌ای TCP، اقدام به تولید لوله‌های با استحکام بالا کردند [8]. فرجی و همکاران، فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای TCAP را به عنوان روشی ارزان و ساده ابداع نمودند [9]. فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای به صورت موازی PTCAP توسط فرجی و همکاران ابداع و ارائه شد. بابایی و همکاران [10]، با دو روش نوین انبساط و روزن‌رانی متناوب لوله (TCEE) [11] و تراکم و روزن‌رانی تناوبی لوله (TCEG) [12] توانستند گامی نوآورانه در جهت تولید لوله‌های مستحکم بردارند.

جعفرزاده و همکاران [13]، روشی را تحت عنوان انبساط و انقباض تناوبی RTES معرفی نموده‌اند و توانسته‌اند با این روش به موفقیت‌هایی در تولید لوله‌های فوق ریزدانه دست یابند. در این روش‌های رایج تغییر شکل پلاستیک شدید لوله، به دلیل وجود اصطکاک بین لوله و قالب، نیروی شکل‌دهی بالایی مورد نیاز است. لذا روش‌های رایج تغییر شکل پلاستیک شدید لوله، قادر به تولید لوله‌های بلند نیستند (با استفاده از این روش‌های رایج، لوله‌هایی با طول کوتاه و در حدود ۱، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر تولید شده است)؛ زیرا در لوله‌های بلند، اصطکاک بین لوله و قالب زیاد است که این مساله، نیروی شکل‌دهی بسیار بالایی را می‌طلبد که حتی در صورت تامین این نیرو توسط دستگاه پرس، احتمال شکست و کمناش سنبه اعمال بار وجود دارد. لذا امروزه با توجه به افزایش تقاضا برای لوله‌های با استحکام بالا، لزوم ابداع روشی که این محدودیت‌ها را نداشته و نیز دارای قابلیت صنعتی‌سازی باشد، احساس می‌شود. اخیراً، فرآیند تغییر شکل پلاستیک جدیدی به نام فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی شکل‌دهی هیدرواستاتیک لوله [14, 15]، از سوی محققین پژوهش حاضر معرفی شده است که پتانسیل‌های تولید لوله‌های فوق ریزدانه و نانو ساختار با طول‌های نسبتاً بلند (در حدود ۱۰۰ میلی‌متر و حتی چند برابر بیشتر از این

است. به‌منظور بررسی خواص مکانیکی و ریزساختاری نمونه‌ها، از تصاویر تهیه‌شده از میکروسکوپ نوری، آزمون کشش، میکروسختی‌سنجی و بررسی سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش با استفاده از تصاویر اس‌ای‌ام (SEM)، استفاده شد. در نهایت مشاهده شد که روش انبساط و روزن‌رانی تناوبی شکل‌دهی هیدرواستاتیک لوله در تولید لوله‌ای با استحکام بالاتر و شکل‌پذیری کافی کارا است. ایده فرآیند ابداعی انبساط و روزن‌رانی تناوبی شکل‌دهی هیدرواستاتیک لوله از روش انبساط و روزن‌رانی تناوبی لوله یا TCEE<sup>[11]</sup> گرفته شده است.

در شکل ۱، شماتیک و مراحل کاری مختلف فرآیند ابداعی انبساط و روزن‌رانی تناوبی شکل‌دهی هیدرواستاتیک لوله نشان داده شده است. بنا به شکل ۱، اجزای مورد استفاده در این فرآیند شامل قالب، ماندل ثابت (سیستم فشار پشتی)، ماندل متحرک، سنبه و آب‌بند هستند. مطابق شکل ۱-الف، ابتدا، ماندل متحرک درون لوله قرار می‌گیرد؛ سپس قبل از شروع اجرای فرآیند، مجموعه لوله اولیه و ماندل متحرک توسط قالب و ماندل ثابت، مقید می‌شود. در مرحله بعد، مقداری روغن (سیال) درون قالب ریخته می‌شود و این سیال، فضای بین لوله و قالب را پر می‌کند تا حین انجام تغییر شکل پلاستیک شدید، هیچ تماسی بین لوله و قالب ایجاد نشود و صرفاً از فشار سیال برای اعمال تغییر شکل استفاده شود. سپس، برای جلوگیری از نشت روغن از کناره‌های سنبه، از آب‌بند بین سنبه و لوله استفاده می‌شود. در مرحله بعد (شکل ۱-ب)، با اعمال نیرو توسط پرس هیدرولیک روی سنبه و شروع فرآیند، ماندل متحرک و لوله همزمان به سمت پایین حرکت می‌کنند. به‌دلیل وجود مانع (همان ماندل ثابت که نقش فشار پشتی را دارد) بر سر راه حرکت لوله، ماده به‌ناچار در داخل ناحیه شکل‌دهی (همان فضای خالی ایجادشده در داخل قالب، به‌منظور انبساط لوله) منبسط می‌شود. در نهایت، پس از پر شدن ناحیه شکل‌دهی توسط ماده لوله اولیه، ماندل ثابت که وظیفه اعمال فشار پشتی را بر عهده داشت حذف می‌شود و سپس فرآیند ادامه می‌یابد. مطابق شکل ۱-ج، لوله تغییرشکل‌یافته، اکستروود می‌شود و به ابعاد اولیه خود می‌رسد. البته باید توجه داشت، بنا به اصول فرآیند TCEE که در مراجع<sup>[11, 15]</sup> آورده شده است، پس از اینکه انبساط لوله در فضای انبساطی قالب رخ داد، نباید تصور شود که پس از حذف ماندل و به تبع آن، حذف فشار پشتی خارجی، برآمدگی ایجادشده در لوله از بین می‌رود؛ زیرا در واقع، با ادامه حرکت سنبه و انجام عمل اکستروود شدن قسمت انبساط و برآمده‌شده، نیرویی در خلاف جهت حرکت سنبه به قسمت برآمده وارد می‌شود که این نیرو، فشار پشتی لازم برای حفظ قسمت برآمده و پرماندن قسمت انبساطی قالب را حین فرآیند، تامین می‌کند. همچنین، باید متذکر شد که ابداع فرآیند TCEE بعد از فرآیند TCEC<sup>[12]</sup>، به‌علت همین قابلیت فرآیند بود؛ زیرا در فرآیند TCEC لازم بود که ماندل و فشار پشتی، تا انتهای فرآیند روی لوله بماند ولی در فرآیند TCEE پس از پر شدن و انبساط لوله در قالب دیگر نیازی به وجود ماندل

طول) و نیز تولید در مقیاس صنعتی را دارا است. در این فرآیند، با بهره‌گیری از سیال تحت فشار بین قطعه و قالب، اصطکاک موجود در این بخش حذف شده است. این مساله باعث کاهش نیروی شکل‌دهی می‌شود و امکان تولید لوله‌های بلندتر را فراهم می‌کند. هدف اصلی این پژوهش، بررسی قابلیت روش انبساط و روزن‌رانی تناوبی شکل‌دهی هیدرواستاتیک لوله در تولید لوله بلند فوق ریزدانه با استحکام بالا و شکل‌پذیری مطلوب است. به این منظور، در پژوهشی<sup>[15]</sup>، مشاهده شد که با اعمال تنها یک پاس فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی شکل‌دهی هیدرواستاتیک لوله روی مس خالص تجاری، استحکام تسلیم و استحکام نهایی آن بهبود قابل توجهی پیدا کردند. همچنین، اُفت شکل‌پذیری کمتری نسبت به مطالعات پیشین گزارش شد (جدول ۱).

**جدول ۱** مقایسه استحکام کششی نهایی و درصد تغییر طول یکنواخت نمونه دو پاس فرآیندشده در پژوهش حاضر، با خواص به‌دست‌آمده از مطالعات پیشین روی مس خالص

شماره	مرجع	فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید	استحکام نهایی (مگاپاسکال)	تغییر طول یکنواخت نهایی (%)	افت شکل پذیری (%)	میزان سختی نهایی (ویکرز)
۱	پژوهش حاضر	۲ پاس HTCEE	۳۸۶	۲۳	۱۸	۱۴۳
۲	[15]	۱ پاس HTCEE	۳۴۵	۲۸	۱۴	۱۳۳
۳	[32]	۱۰ دور HPT	۴۸۷	۴	-	۱۲۷
۴	[33]	۵ دور HPT	۴۶۰	۳/۹	۲۲ ~	۱۳۶ ~
۵	[34]	۵/۵ دور HPT	۳۵۰	۵	۶۵ ~	۱۲۵ ~
۶	[33]	۸ پاس ECAP	۳۷۸	۳	۲۷ ~	۱۱۸ ~
۷	[35]	۴ پاس ECAP	۳۵۰	۱۵	۴۷ ~	-
۸	[12]	۴ پاس TCEC	۳۲۰	۳/۵	۳۴ ~	۱۰۲
۹	[27]	۴ پاس Twist CAP	۴۳۷	-	۳۰ ~	۱۲۶
۱۰	[36]	۱ سیکل ARB	۳۵۷	۱/۵	۵۶ ~	۱۱۲
۱۱	[29]	۲ پاس RF	۳۳۸	۴	۳۳ ~	۷۸ ~
۱۲	[37]	۴ پاس ECFE	۲۸۵	۳/۵	۳۳ ~	۱۲۶ ~

حصول چنین ترکیبی از استحکام بالا و شکل‌پذیری کافی از مهم‌ترین دستاوردهای آن بررسی بود. در پژوهش حاضر، به بررسی تاثیر دو پاس فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی شکل‌دهی هیدرواستاتیک بر خواص مکانیکی و ریزساختاری مس خالص تجاری پرداخته شده و سپس خواص حاصل، با نتایج به‌دست‌آمده از قطعه اولیه فرآیندشده و نتایج مطالعات پیشین مقایسه شده

۲- آماده‌سازی نمونه‌ها و آزمون‌های تجربی

لوله‌هایی از جنس مس خالص تجاری با خلوص ۹۹/۹۰٪ با خواص مکانیکی مندرج در جدول ۲، به ضخامت ۳/۵ میلی‌متر، قطر خارجی ۳۰ میلی‌متر و طول ۱۰۰ میلی‌متر به‌عنوان نمونه اولیه، تهیه شدند. سپس نمونه‌ها بنا به پژوهش‌های [12, 15]، به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد آنیل شدند تا ریزساختاری همگن و تبلور مجدد شده، حاصل شود. در مرحله بعد، فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی شکل‌دهی هیدرواستاتیک لوله طی دو پاس (دو سیکل)، در دمای اتاق، روی نمونه‌های اولیه انجام گرفت. بنا به شکل ۱، اندازه پارامترهای قالب مورد استفاده،  $R=15\text{mm}$ ،  $R_d=17\text{mm}$ ،  $R_{\text{fillet}}=3\text{mm}$  و  $\alpha=91.5^\circ$  است. در نهایت، پس از انجام دو پاس فرآیند روی مس خالص تجاری، خواص مکانیکی و ریزساختاری نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. در شکل ۲، تصویر لوله قبل از انجام فرآیند و نیز حین انجام فرآیند نشان داده شده است. به‌منظور بررسی خواص کششی لوله اعمال فرآیند شده و نیز لوله اولیه، نمونه آزمون کشش با استفاده از وایرکات، در جهت طولی از لوله‌ها بریده شد. نمونه‌های آزمون کشش بنا به پژوهش [15] به ضخامت ۳/۵ میلی‌متر، پهنای گیج (Gauge) ۶ میلی‌متر و طول ۱۸ میلی‌متر انتخاب شدند. برای انجام آزمون کشش، از دستگاه آزمون کشش مدل سنتام با نرخ کرنش  $10^{-3}$ ، در دمای اتاق استفاده شد. به‌منظور بررسی میزان سختی لوله‌ها، نمونه‌های مناسب برای آزمون میکروسختی‌سنجی، از نمونه‌های اصلی بریده شد و بعد از آماده‌سازی سطح آن‌ها و مانند کردن، سختی‌سنجی با استفاده از دستگاه میکروسختی‌سنجی ویکرز مدل کوپا، در مقطع عرضی لوله (در راستای عمود بر محور مرکزی لوله) و با احتساب میانگینی از مقدار سختی ۷ نقطه واقع بر ضخامت لوله انجام گرفت. میزان بار اعمالی در آزمون میکروسختی‌سنجی، بنا به پژوهش [15]، ۵۰ گرم و زمان توقف سنج روی قطعات ۱۵ ثانیه بود. به‌منظور بررسی ریزساختار، نمونه‌ها در راستای عمود بر محوری مرکز لوله، مقطع زده شدند و بعد از مرحله آماده‌سازی که شامل سنباده‌زنی (با استفاده از کاغذهای سیلیسیم‌کارباید تا شماره ۴۰۰۰)، پولیش و آشکارسازی بود، توسط میکروسکوپ نوری مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفتند. به‌منظور تعیین علت شکست و مطالعه سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه‌شده به‌وسیله دستگاه مدل نووا نانو اس‌ای ام ۴۵۰ و ولتاژ ۲۰ کیلو ولت استفاده شد.

جدول ۲) خواص اولیه مس خالص تجاری مورد بررسی

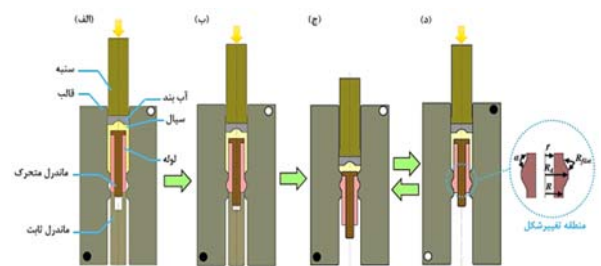
مقدار	پارامتر
۲۰۷	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)
۷۵	استحکام نهایی (مگاپاسکال)
۵۵	درصد تغییر طول یکنواخت نهایی
۳۶	درصد تغییر طول یکنواخت نهایی

و فشار پشتی خارجی برای ادامه فرآیند نیست؛ لذا نیازی به استفاده از جک دوطرفه (دو عدد جک که یکی کار فشار و دیگری کار فشار پشتی مداوم را انجام دهد) در فرآیند TCEE نیست و این فرآیند با راحتی بیشتر و نیز با تجهیزات ساده‌تر و ارزان‌تری قابل انجام است.

از آنجا که فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی شکل‌دهی هیدرواستاتیک لوله یک فرآیند تناوبی است، لذا برای انجام تعداد پاس‌های بیشتر، باید قالب را ۱۸۰ درجه چرخاند، ماندل متحرک را از سمت دیگر درون لوله قرار داد و سپس پاس بعدی فرآیند را انجام داد (شکل ۱-د). همچنین، به‌دلیل اینکه طی انجام پاس‌های بعدی فرآیند، لوله در داخل ناحیه شکل‌دهی پرس می‌شود، دیگر نیازی به استفاده از فشار پشتی در پاس‌های بعدی نیست. با توجه به اصول ذکرشده برای این فرآیند، نیروی شکل‌دهی به‌دلیل استفاده از سیال (که منجر به حذف اصطکاک بین لوله و قالب در کانال ورودی قالب و متعاقباً کاهش نیروی شکل‌دهی می‌شود)، مستقل از طول لوله است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با این روش می‌توان لوله‌هایی فوق ریزدانه با طول بلند تولید نمود. لذا این روش، پتانسیل‌های صنعتی‌سازی را دارد.

قبلاً، مشاهده شد که با اعمال تنها یک پاس فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی شکل‌دهی هیدرواستاتیک لوله روی مس خالص تجاری، استحکام تسلیم و استحکام نهایی آن بهبود قابل توجهی پیدا کردند [15]. همچنین بنا به جدول ۱، اُفت شکل‌پذیری کمتری نسبت به مطالعات پیشین گزارش شد. حصول چنین ترکیبی از استحکام بالا و شکل‌پذیری کافی از مهم‌ترین دستاوردهای این بررسی بود.

در پژوهش حاضر، به بررسی تاثیر دو پاس فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی شکل‌دهی هیدرواستاتیک بر خواص مکانیکی و ریزساختاری مس خالص تجاری پرداخته شده و سپس خواص حاصل، با نتایج به‌دست‌آمده از قطعه اولیه فرآیند نشده و نتایج مطالعات پیشین مقایسه شده است. به‌منظور بررسی خواص مکانیکی و ریزساختاری نمونه‌ها، از تصاویر تهیه‌شده از میکروسکوپ نوری، آزمون کشش، میکروسختی‌سنجی و بررسی سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش با استفاده از تصاویر اس‌ای ام، استفاده شد.

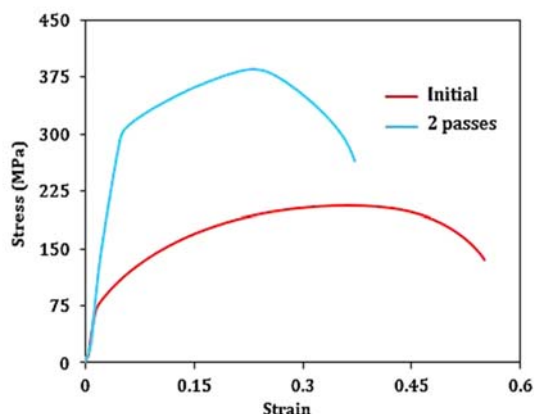


شکل ۱) نمای شماتیک از مراحل فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی شکل‌دهی هیدرواستاتیک لوله همراه پارامترهای قالب

از طریق فعالیت نابه‌جایی‌ها صورت می‌گیرد [12, 20]. در واقع، در فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، با اعمال کرنش به قطعه، چگالی نابه‌جایی‌ها در داخل دانه‌ها افزایش می‌یابد. سپس، درهم‌تنیده شدن نابه‌جایی‌ها داخل دانه‌ها رخ می‌دهد و طی آرایش منظمی از آن‌ها، سلول‌های نابه‌جایی ایجاد می‌شود. با ادامه تغییر شکل و اعمال کرنش، تجمع نابه‌جایی‌ها در دیواره این سلول‌ها افزایش می‌یابد که به تشکیل زیردانه‌ها با زاویه مرزانه کم، داخل دانه‌ها منجر می‌شوند. با ادامه تغییر شکل، تعداد زیردانه‌ها افزایش می‌یابد. اعمال کرنش‌های برشی حین انجام فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید باعث چرخش زیردانه‌ها نسبت به هم خواهد شد. این مساله موجب تبدیل تدریجی مرزانه‌های با زاویه کم به مرزانه‌های با زاویه بالا خواهد شد. این فرآیند آن‌قدر تکرار می‌شود تا ساختاری فوق ریزدانه با درصد بالایی از مرزانه‌های با زاویه بالا ریزساختار را فرا می‌گیرد. همچنین، مشاهده شده است که با افزایش تعداد پاس‌های انجام فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید، درصد مرزانه‌های با زاویه بالا افزایش می‌یابد که علت این مساله، افزایش تمایل ریزدانه‌ها به چرخش تحت تاثیر کرنش تجمعی و به‌خصوص تحت تاثیر کرنش‌های برشی است [12].

### ۲-۳. خواص مکانیکی به‌دست‌آمده از آزمون کشش و میکروسختی‌سنجی

نمودارهای تنش-کرنش مهندسی حاصل از انجام آزمون کشش در دمای اتاق، روی نمونه اولیه فرآیند نشده و نمونه دو پاس فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی هیدرواستاتیک لوله‌شده، در نمودار ۱ مشهود است. مشاهده می‌شود که نمونه‌ای که تحت فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفته، استحکام تسلیم و استحکام نهایی بالاتری نسبت به نمونه اولیه دارد. این روال افزایش استحکام بعد از انجام فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید، در مطالعات دیگری نیز گزارش شده است [1, 2, 4, 5, 16-18].



**نمودار ۱)** نمودار تنش-کرنش مهندسی نمونه اولیه فرآیند نشده [15] و نمونه دو پاس فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی شکل‌دهی هیدرواستاتیک لوله‌شده

در پژوهش [15]، مشاهده شد که پس از انجام پاس اول فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی هیدرواستاتیک لوله، تنش نهایی، تنش

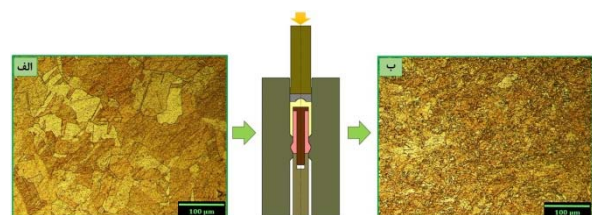


**شکل ۲)** تصویر لوله قبل از انجام فرآیند و نیز حین انجام فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی شکل‌دهی هیدرواستاتیک لوله

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱-۲ نتایج بررسی ریزساختار

در شکل ۳، تصاویر ریزساختار نمونه اولیه و نمونه دو پاس فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی هیدرواستاتیک لوله‌شده، نشان داده شده‌اند. بنا به شکل ۳-الف، نمونه اولیه (فرآیند نشده) دارای ریزساختاری با میانگین اندازه  $65\mu\text{m}$  است. بنا به پژوهش [15] مشاهده شد که پس از انجام پاس اول فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی هیدرواستاتیک لوله، ریزساختاری فوق ریزدانه با درصد بالایی از مرزانه‌های زاویه بالا و نیز تراکم بالایی از نابه‌جایی‌ها به‌دست آمد. در پژوهش حاضر، با توجه به شکل ۳-ب، مشاهده می‌شود که بعد از انجام دو پاس فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی هیدرواستاتیک لوله، یک ریزساختار فوق ریزدانه (UFG) با عموماً دانه‌هایی با اندازه کوچک‌تر از  $1\mu\text{m}$  شکل گرفته است. همچنین، مشاهده می‌شود که با انجام دو پاس فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی هیدرواستاتیک لوله، علاوه بر ریزتر شدن ساختار میکروسکوپی، همگنی و هم‌محوری ریزساختار نیز افزایش یافته است. این روال کاهش اندازه دانه با انجام فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید (خصوصاً با انجام تعداد پاس‌های بیشتر فرآیند) در مطالعات بسیاری گزارش شده است [16-19].



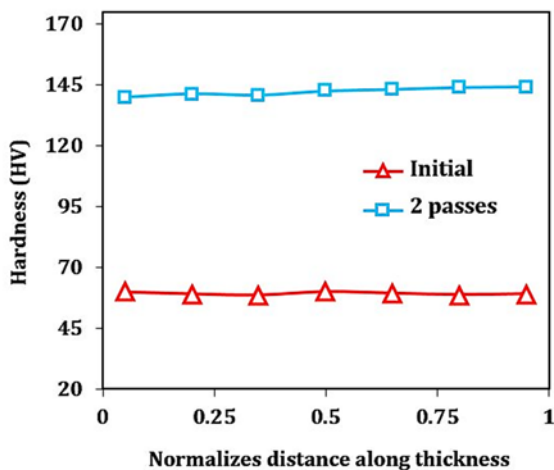
**شکل ۳)** تصاویر ریزساختاری تهیه‌شده به‌وسیله میکروسکوپ نوری از نمونه اولیه فرآیند نشده (الف) و نمونه دو پاس فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی شکل‌دهی هیدرواستاتیک لوله‌شده (ب).

وجود فشار هیدرواستاتیک بالا و کرنش‌های برشی شدید در فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، باعث افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها می‌شود. همچنین، مشاهده شده است که در مواد دارای انرژی نقص چیدمان (SFE) متوسط به بالا مانند مس، ریزشدن دانه‌ها طی انجام فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید،

هیدرواستاتیک فشاری، با به تعویق انداختن جوانه زنی و رشد ترک یا با بستن عیوب کوچک باعث افزایش شکل پذیری می شود. [24, 25]

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

در نمودار ۲، نتایج میکروسختی سنجی در راستای ضخامت نمونه اولیه و نمونه دو پاس فرآیند انبساط و روزن رانی تناوبی هیدرواستاتیک لوله شده، آورده شده است. مشاهده می شود که پس از انجام تغییر شکل پلاستیک، سختی نمونه نسبت به نمونه اولیه، افزایش می یابد. چنین روالی در مطالعات پیشین [16-18] نیز مشهود است.



نمودار ۲) توزیع سختی در راستای ضخامت نمونه اولیه فرآیند نشده [15] و نمونه دو پاس فرآیند انبساط و روزن رانی تناوبی شکل دهی هیدرواستاتیک لوله شده

این افزایش سختی، ناشی از ریزترشدن ساختار میکروسکوپی ماده، افزایش میزان مرزخانه ها و نیز افزایش چگالی نابه جایی ها است. مشاهده شد که بعد از انجام دو پاس فرآیند انبساط و روزن رانی تناوبی هیدرواستاتیک لوله، مقدار میانگین سختی از ۵۹HV به ۱۴۳HV رسید. همچنین، با توجه به نمودار ۲، توزیع سختی در راستای ضخامت لوله، حالت تقریباً یکنواختی دارد و این مساله از آن جهت مهم است که در فرآیند پژوهش حاضر بر خلاف بسیاری از روش های دیگر تغییر شکل پلاستیک شدید که پس از انجام آن ها، توزیع سختی در ضخامت قطعه حالت غیریکنواخت پیدا می کند، همچنان توزیع سختی، حالت تقریباً یکنواختی دارد؛ لذا انتظار توزیع یکنواخت خواص مکانیکی و بعضاً فیزیکی در راستای ضخامت لوله وجود دارد. این مساله می تواند مزیت دیگر فرآیند انبساط و روزن رانی تناوبی هیدرواستاتیک لوله باشد. بنا به معادله هال پیچ برای سختی (معادله ۲)، ریزترشدن دانه ها منجر به افزایش سختی ماده می شود. در این معادله،  $d$  اندازه میانگین دانه ها،  $H$  سختی،  $H_0$  و  $K'$  ثابت های مربوط به ماده هستند [15].

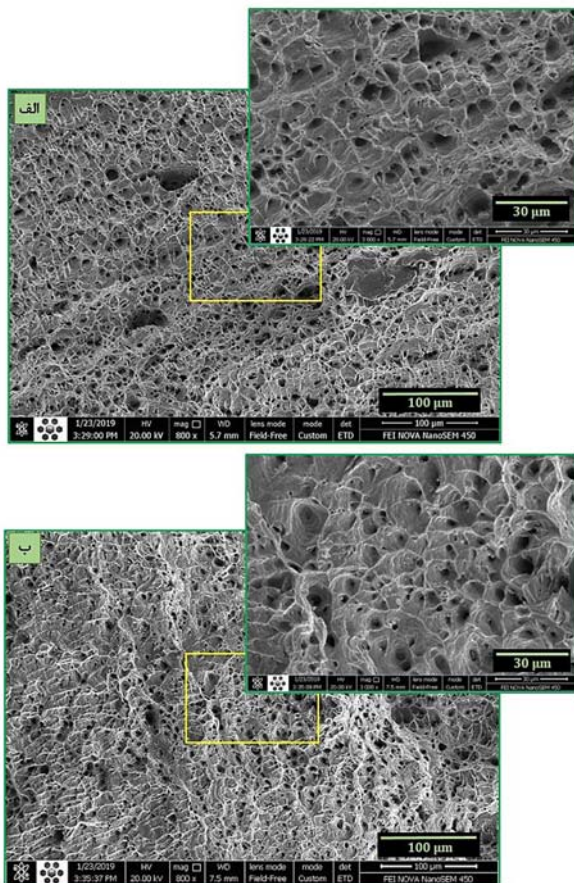
با توجه به نمودار ۲، مشاهده می شود که نمونه دو پاس فرآیند شده (که بنا به نتایج ارائه شده در بخش ریزساختار، ریزترین میکروساختار را دارد)، دارای بیشترین مقدار سختی است و این

تسلیم، درصد تغییر طول شکست و درصد تغییر طول یکنواخت به ترتیب به ۳۴۵ مگاپاسکال، ۲۷۰ مگاپاسکال، ۴۱٪ و ۲۸٪ رسید. در پژوهش حاضر، بعد از انجام دو پاس فرآیند، تنش نهایی، تنش تسلیم، درصد تغییر طول شکست و درصد تغییر طول یکنواخت به ترتیب از مقادیر اولیه ۲۰۷ مگاپاسکال، ۷۵ مگاپاسکال، ۵۵٪ و ۳۶٪ به مقادیر نهایی به ترتیب ۳۸۶ مگاپاسکال، ۳۱۰ مگاپاسکال، ۳۷٪ و ۲۳٪ رسید.

با توجه به جدول ۱، میزان آفت شکل پذیری در نمونه های فرآیند انبساط و روزن رانی تناوبی هیدرواستاتیک لوله شده، کمتر از مقادیر گزارش شده در پژوهش های پیشین است. این مساله می تواند از دیگر مزایای مهم این فرآیند باشد؛ زیرا تولید قطعاتی که همزمان دارای استحکام بالا و شکل پذیری کافی باشند، به عنوان یک چالش مهم در صنعت تلقی می شود. افزایش استحکام مشاهده شده در نمونه دو پاس فرآیند انبساط و روزن رانی تناوبی هیدرواستاتیک لوله شده، ناشی از افزایش چگالی نابه جایی ها و نیز کاهش اندازه دانه ها است. همچنین، مرز دانه ها و دوقلوبی ها به عنوان مانعی در برابر حرکت نابه جایی ها عمل می کنند و با ایجاد مقاومت در برابر تغییر شکل، باعث افزایش استحکام ماده می شوند [21, 22]. معادله هال پیچ (معادله ۱) نیز افزایش استحکام فلز را با ریزترشدن میکروساختار تایید می کند. در این معادله،  $d$  اندازه میانگین دانه ها،  $\sigma_y$  استحکام تسلیم،  $\sigma_0$  و  $K$  ثابت های مربوط به ماده هستند. لازم به ذکر است که در اندازه دانه های کوچک تر از حدود ۲۰ نانومتر، رفتار هال پیچ دیگر صادق نیست و با ریزترشدن دانه ها، استحکام کاهش پیدا می کند [23]. از آنجا که در اکثر فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید و نیز در پژوهش حاضر، اندازه میانگین دانه ها بزرگ تر از ۲۰ نانومتر است، لذا رابطه هال پیچ قابل استناد است.

در جدول ۱، استحکام کششی نهایی و درصد تغییر طول یکنواخت نمونه دو پاس فرآیند شده، با خواص به دست آمده از مطالعات پیشین بر روی مس خالص، مقایسه شده است. از جدول ۱ دریافت می شود که مقدار افت یا کاهش داکتیلیتی در این پژوهش، کم تر از نتایج مطالعات پیشین است و این یعنی در پژوهش حاضر، به داکتیلیتی بالاتری نسبت به روش های پیشین می توان دست یافت لذا فرآیند انبساط و اکستروژن تناوبی هیدرواستاتیک لوله، پتانسیل تولید لوله هایی با همزمان استحکام و داکتیلیتی بالاتری را دارد. یکی از مهم ترین دلایل این امر، اعمال میزان بالای تنش هیدرواستاتیک فشاری (توسط سیال تحت فشار) به قطعه است. اگر چه در فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، کرنش پلاستیک، نقش مهمی در ریزدانه کردن مواد دارد ولی تنش هیدرواستاتیک فشاری و کرنش برشی نقشی کلیدی در این امر دارند. تنش هیدرواستاتیک فشاری می تواند باعث افزایش کارپذیری ماده شود. این مساله موجب خواهد شد که ماده، قبل از جوانه زنی و رشد ترک، بتواند کرنش پلاستیک زیادی را تحمل کند و در نتیجه، شکل پذیری افزایش پیدا کند. به عبارت دیگر، تنش

کافی برای رشد و رسیدن به هم را نخواهند داشت، لذا حفره‌های کم‌عمق‌تری در نمونه تغییر شکل پلاستیک شدید شده شکل می‌گیرند. با این حال، سطح شکست نمونه‌ها، نشان‌دهنده وقوع غالباً شکست داکتیل است که ناشی از جوانه‌زنی میکروفضا‌های خالی و متعاقباً رشد و تداخل آن‌ها با یک‌دیگر و متعاقباً تشکیل ترک و گسترش آن است. همچنین، وجود تعداد زیادی حفره‌های کوچک همراه میزان بالایی از لبه‌های برش از علایم رایج وقوع شکست داکتیل است. در این حالت، به‌جای رشد قابل توجه حفره‌هایی که قبلاً ایجاد شده‌اند، حفره‌های کوچک جدیدی شکل می‌گیرند[31]. البته در نمونه دو پاس فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی هیدرواستاتیک لوله‌شده، نشانه‌هایی از وجود صفحات کلیواژ و شکست ترد هم تا حدی قابل رویت است که نشان می‌دهد با افزایش کرنش اعمالی به قطعه، مکانیزم شکست در حال تغییر از حالت داکتیل به حالت ترد است.



شکل ۴) تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه‌شده از سطح شکست؛ الف) نمونه اولیه فرآیند نشده و ب) نمونه دو پاس فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی شکل‌دهی هیدرواستاتیک لوله‌شده

#### ۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، به بررسی تاثیر فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی شکل‌دهی هیدرواستاتیک لوله بر ریزساختار و خواص مکانیکی مس خالص تجاری پرداخته شد. در ادامه، به مهم‌ترین نتایج حاصل از این بررسی اشاره می‌شود:

مساله در موافقت با روال پیش‌بینی‌شده در معادله ۲ است. باید توجه داشت که در فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، چنین نیست که با انجام هر پاس از فرآیند، افزایش چشمگیر استحکام و سختی رخ دهد؛ بلکه بررسی مطالعات نشان داده است که با انجام پاس‌های بعدی فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید، نرخ افزایش سختی و استحکام، کاهش می‌یابد و این خواص، تمایل به رسیدن به یک حد اشباع را دارند[16, 17]. علت این مساله چنین است که در پاس‌های بالاتر فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید، تعادلی بین تولید نابه‌جایی‌ها در جریان اعمال فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید، با حذف نابه‌جایی‌ها که طی پروسه بازیابی دینامیکی اتفاق می‌افتد، برقرار می‌شود[26] که حالت اشباعی را برای سختی و استحکام رقم می‌زند. با بررسی مطالعات پیشین این نکته حاصل شد که میزان سختی به‌دست‌آمده پس از انجام دو پاس فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی هیدرواستاتیک لوله، بیشتر از مقادیر به‌دست‌آمده از انجام دو پاس از فرآیندهایی مانند Twist [27]، ECAP [30]، TCEC [12]، RF [29]، CEE [28]، و روی مس خالص است. همچنین در جدول ۱ نیز مشهود است که در پژوهش حاضر، سختی قابل توجهی نسبت به مطالعات دیگر به‌دست آمده است.

$$H = H_0 + \frac{K'}{\sqrt{d}} \quad (2)$$

#### ۳-۳- نتایج شکست‌نگاری

در شکل ۴، تصاویر میکروسکوپ الکترونی به‌دست‌آمده از سطح شکست نمونه اولیه فرآیند نشده و نمونه دو پاس فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی شکل‌دهی هیدرواستاتیک لوله‌شده، پس از انجام آزمون کشش در دمای اتاق و نرخ کرنش  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  نشان داده شده است.

بنا به شکل ۴، سطح شکست نمونه اولیه فرآیند نشده، حفره‌های بزرگ‌تر و عمیق‌تری نسبت به نمونه دو پاس فرآیند شده دارد که نشان‌دهنده خاصیت شکل‌پذیری بالاتر آن است. به عبارت دیگر، سطح شکست نمونه دو پاس فرآیند شده که کرنش بیشتری را تجربه کرده و میکروساختار ریزتری دارد، شامل حفره‌های کوچک‌تر، کم‌عمق‌تر و سطح همگن‌تری نسبت به نمونه اولیه فرآیند نشده است. همچنین در پژوهشی [15]، در نمونه یک پاس فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی هیدرواستاتیک لوله‌شده نیز مشاهده شد که حفره‌های کوچک‌تر و کم‌عمق‌تری نسبت به نمونه اولیه فرآیند نشده، پدید آمده است. این روال کاهش اندازه حفره‌ها در اثر اعمال کرنش پلاستیک به نمونه در مطالعات پیشین مربوط به فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید نیز دیده می‌شود که علت آن، ریزتر شدن اندازه دانه‌ها و کارسختی اتفاق‌افتاده در جریان تغییر شکل پلاستیک شدید است [16-18].

قبلاً بیان شد که فرآیند انبساط و روزن‌رانی تناوبی هیدرواستاتیک لوله باعث کاهش درصد تغییر طول شکست و نیز کاهش درصد تغییر طول یکنواخت می‌شود که این مساله، قابلیت کار سختی ماده را کاهش می‌دهد. بنابراین حفره‌های جوانه‌زده‌شده، فرصت

$H_0$	ثابت ماده (HV)
$K$	ثابت ماده ( $\text{MPam}^{1/2}$ )
$K'$	ثابت ماده ( $\text{HVm}^{1/2}$ )
$r$	شعاع داخلی (mm)
$R$	شعاع خارجی (mm)
$R_d$	شعاع انبساط (mm)
$R_{\text{fillet}}$	شعاع گوشه (mm)
<b>علایم یونانی</b>	
$\alpha$	زاویه قالب (° درجه)
$\sigma_y$	استحکام تسلیم (MPa)
$\sigma_0$	ثابت ماده (MPa)
<b>زیرنویسها</b>	
fillet	گوشه (کمان)
y	تسلیم

### منابع

- 1- Eftekhari M, Faraji Gh, Shapoorgan O, Baniassadi M. Experimental investigation of the effect of temperature in extrusion process of ECAPed nanostructured Titanium. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(4):52-60. [Persian]
- 2- Nikbakht S, Eftekhari M, Faraji Gh. Study of Microstructure and mechanical properties of pure commercial titanium via combination of Equal channel angular pressing and Extrusion. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(1):453-461. [Persian]
- 3- Figueiredo RB, Langdon TG. Fabricating ultrafine-grained materials through the application of severe plastic deformation: A review of developments in Brazil. *Journal of Materials Research and Technology*. 2012;1(1):55-62.
- 4- Fata A, Eftekhari M, Faraji GH, Mosavi Mashhadi M. Effects of PTCAP as a severe plastic deformation method on the mechanical and microstructural properties of AZ31 magnesium alloy. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;17(12):409-416. [Persian]
- 5- Eftekhari M, Fata A, Faraji Gh, Mosavi Mashhadi M. Evaluation of the effects of a combined severe plastic deformation method on the hot deformation behavior of Mg-3Al-1Zn magnesium alloy. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;18(5):100-107. [Persian]
- 6- Tóth LS, Arzaghi M, Funderberger JJ, Beausir B, Bouaziz O, Arruffat-Massion R. Severe plastic deformation of metals by high-pressure tube twisting. *Scripta Materialia*. 2009;60(3):175-177.
- 7- Mohebbi MS, Akbarzadeh A. Accumulative spin-bonding (ASB) as a novel SPD process for fabrication of nanostructured tubes. *Materials Science and Engineering: A*. 2010;528(1):180-188.
- 8- Zangiabadi A, Kazeminezhad M. Development of a novel severe plastic deformation method for tubular materials: Tube Channel Pressing (TCP). *Materials Science and Engineering: A*. 2011;528(15):5066-5072.
- 9- Faraji G, Mosavi Mashhadi M, Kim HS. Tubular channel angular pressing (TCAP) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes. *Materials Letters*. 2011;65(19-20):3009-3012.
- 10- Faraji Gh, Babaei A, Mosavi Mashhadi M, Abrinia K. Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP) as a new severe plastic deformation method for cylindrical tubes. *Materials Letters*. 2012;77:82-85.

۱- فرآیند انبساط و روزن رانی تناوبی شکل دهی هیدرواستاتیک لوله قابلیت تولید لوله های فوق ریزدانه با طول نسبتاً بلند را دارد؛ زیرا در این فرآیند، به دلیل استفاده از سیال تحت فشار بین قطعه و قالب، اصطکاک در بسیاری از مناطق تماس حذف شده است. این مساله موجب شده است که فرآیند انبساط و روزن رانی تناوبی شکل دهی هیدرواستاتیک لوله، تقریباً مستقل از طول قطعه باشد.

۲- پس از انجام دو پاس فرآیند انبساط و روزن رانی تناوبی شکل دهی هیدرواستاتیک لوله، ریزساختار ماده، بهبود قابل توجهی پیدا کرد به طوری که ساختاری فوق ریزدانه (UFG) با عموماً دانه های کوچکتر از ۱ میکرومتر، تقریباً همگن و هم محور ایجاد شد.

۳- نتایج آزمون کشش حاکی از آن بود که پس از انجام دو پاس فرآیند، استحکام تسلیم و استحکام نهایی نسبت به حالت اولیه فرآیند نشده، بهبود قابل توجهی یافته بود. در این جریان، تنش نهایی، تنش تسلیم، درصد تغییر طول شکست و درصد تغییر طول یکنواخت به ترتیب از مقادیر اولیه ۲۰۷ مگاپاسکال، ۷۵ مگاپاسکال، ۳۶٪ و ۵۵٪ به مقادیر نهایی به ترتیب ۳۸۶ مگاپاسکال، ۳۱۰ مگاپاسکال، ۲۳٪ و ۳۷٪ رسید. مشاهده شد که میزان اُفت شکل پذیری در نمونه های فرآیند شده، کمتر از مقادیر گزارش شده در پژوهش های پیشین است. همچنین، با مقایسه نتایج پژوهش حاضر با پژوهش های پیشین، این نتیجه به دست آمد که فرآیند انبساط و روزن رانی تناوبی شکل دهی هیدرواستاتیک لوله، پتانسیل تولید لوله هایی با استحکام بالا و شکل پذیری کافی را دارد.

۴- نتایج آزمون سختی نشان داد که پس از انجام دو پاس فرآیند، سختی ماده نسبت به حالت اولیه فرآیند نشده، بهبود قابل توجهی پیدا کرد به طوری که مقدار میانگین سختی از ۵۹HV به ۱۴۳HV رسید. همچنین، توزیع سختی در راستای ضخامت لوله دو پاس فرآیند شده، نسبتاً یکنواخت بود.

۵- سطح شکست نمونه های آزمون کشش گویای آن بود که غالباً شکست داکتیل در نمونه ها اتفاق افتاده است که ناشی از جوانه زنی میکروفضا های خالی و متعاقباً رشد و تداخل آن ها با یکدیگر و تشکیل ترک و گسترش آن بود. البته در نمونه دو پاس فرآیند شده، نشانه هایی از وجود صفحات کلیواژ و شکست ترد هم تا حدی قابل رویت بود.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

**تاییدیه اخلاقی:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

**تعارض منافع:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

**سهم نویسندگان:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

**منابع مالی:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

### فهرست علایم

$d$	اندازه میانگین دانه (m)
$H$	سختی (HV)



- Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017;88:291-301.
- 25- Raab GI, Soshnikova EP, Valiev RZ. Influence of temperature and hydrostatic pressure during equal-channel angular pressing on the microstructure of commercial-purity Ti. *Materials Science and Engineering: A*. 2004;387-389:674-677.
- 26- Wang YM, Ma E. Three strategies to achieve uniform tensile deformation in a nanostructured metal. *Acta Materialia*. 2004;52(6):1699-1709.
- 27- Kocich R, Greger M, Kurša M, Szurman I, Macháčková A. Twist channel angular pressing (TCAP) as a method for increasing the efficiency of SPD. *Materials Science and Engineering: A*. 2010;527(23):6386-6392.
- 28- Pardis N, Chen C, Ebrahimi R, Toth LS, Gu CF, Beausir B, et al. Microstructure, texture and mechanical properties of cyclic expansion-extrusion deformed pure copper. *Materials Science and Engineering: A*. 2015;628:423-432.
- 29- Babaei A, Faraji G, Mashhadi MM, Hamdi M. Repetitive forging (RF) using inclined punches as a new bulk severe plastic deformation method. *Materials Science and Engineering: A*. 2012;558:150-157.
- 30- Edalati K, Imamura K, Kiss T, Horita Z. Equal-channel angular pressing and high-pressure torsion of pure copper, evolution of electrical conductivity and hardness with strain. *Materials Transactions*. 2012;53(1):123-127.
- 31- Deng J, Lin Y, Li SS, Chen J, Ding Y. Hot tensile deformation and fracture behaviors of AZ31 magnesium alloy. *Materials & Design*. 2013;49:209-219.
- 32- Alawadhi MY, Sabbaghianrad S, Huang Y, Langdon TG. Direct influence of recovery behaviour on mechanical properties in oxygen-free copper processed using different SPD techniques: HPT and ECAP. *Journal of Materials Research and Technology*. 2017;6(4):369-377.
- 33- Lugo N, Llorca N, Cabrera JM, Horita Z. Microstructures and mechanical properties of pure copper deformed severely by equal-channel angular pressing and high pressure torsion. *Materials Science and Engineering: A*. 2008;477(1):366-371.
- 34- Edalati K, Fujioka T, Horita Z. Microstructure and mechanical properties of pure Cu processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering: A*. 2008;497(1-2):168-173.
- 35- Ranjbar Bahadori S, Dehghani K, Bakhshandeh F. Microstructure, texture and mechanical properties of pure copper processed by ECAP and subsequent cold rolling. *Materials Science and Engineering: A*. 2013;583:36-42.
- 36- Fattah-alhosseini A, Imantalab O, Mazaheri Y, Keshavarz MK. Microstructural evolution, mechanical properties, and strain hardening behavior of ultrafine grained commercial pure copper during the accumulative roll bonding process. *Materials Science and Engineering: A*. 2016;650:8-14.
- 37- Ebrahimi M, Djavanroodi F. Experimental and numerical analyses of pure copper during ECFE process as a novel severe plastic deformation method. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2014;24(1):68-74.
- 11- Babaei A, Mosavi Mashhadi M, 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.
- 12- Babaei A, Mashhadi M. Tubular pure copper grain refining by tube cyclic extrusion-compression (TCEC) as a severe plastic deformation technique. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2014;24(6):623-630.
- 13- Jafarzadeh H, Abrinia K. Fabrication of ultra-fine grained aluminium tubes by RTES technique. *Materials Characterization*. 2015;102:1-8.
- 14- Faraji Gh, Savarabadi MM, inventors. Apparatus and method for fabricating high strength long nanostructured tubes. *United States Patent* 20180272400. 2018 sep. 27.
- 15- Motallebi Savarabadi M, Faraji G, Zalnezhad E. Hydrostatic tube cyclic expansion extrusion (HTCEE) as a new severe plastic deformation method for producing long nanostructured tubes. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;785:163-168.
- 16- Eftekhari M, Faraji G, Nikbakht S, Rashed R, Sharifzadeh R, Hildyard R, et al. Processing and characterization of nanostructured Grade 2 Ti processed by combination of warm isothermal ECAP and extrusion. *Materials Science and Engineering: A*. 2017;703:551-558.
- 17- Eftekhari M, Fata A, Faraji G, Mashhadi MM. Hot tensile deformation behavior of Mg-Zn-Al magnesium alloy tubes processed by severe plastic deformation. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;742:442-453.
- 18- Fata A, Eftekhari M, Faraji G, Mashhadi MM. Enhanced hot tensile ductility of Mg-3Al-1Zn alloy thin-walled tubes processed via a combined severe plastic deformation. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2018;27(5):2330-2337.
- 19- Hajizadeh K, Eghbali B, Topolski K, Kurzydowski K. Ultra-fine grained bulk CP-Ti processed by multi-pass ECAP at warm deformation region. *Materials Chemistry and Physics*. 2014;143(3):1032-1038.
- 20- Valiev RZ, Estrin Y, Horita Z, Langdon TG, Zechetbauer MJ, Zhu YT. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*. 2006;58:33-39.
- 21- Fang DR, Duan QQ, Zhao NQ, Li JJ, Wu SD, Zhang ZF. Tensile properties and fracture mechanism of Al-Mg alloy subjected to equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*. 2007;459(1):137-144.
- 22- Tavakkoli V, Afrasiab M, Faraji G, Mashhadi MM. Severe mechanical anisotropy of high-strength ultrafine grained Cu-Zn tubes processed by parallel tubular channel angular pressing (PTCAP). *Materials Science and Engineering: A*. 2015;625:50-55.
- 23- Phaniraj MP, Prasad MJNV, Chokshi AH. Grain-size distribution effects in plastic flow and failure. *Materials Science and Engineering: A*. 2007;463(1-2):231-237.
- 24- Jamali SS, Faraji G, Abrinia K. Hydrostatic radial forward tube extrusion as a new plastic deformation method for producing seamless tubes. *The International*