



مطالعه تأثیر روش اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله بر خواص آلومینیوم 5052

محمد افتخاری¹، قادر فرجی^{2*}، مصطفی بهرامی³، مجید بنی اسدی²

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی 515-14395، ghfaraji@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در پژوهش حاضر، فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله، طی دو پاس بر روی لوله از جنس آلومینیوم 5052 انجام شد و سپس تغییرات ریزساختاری و خواص مکانیکی قطعات مورد مطالعه قرار گرفت. فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله، علاوه بر بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی قطعات لوله‌ای شکل، دارای پتانسیل تولید لوله‌هایی با طول نسبتاً بلند نیز هست. در این فرایند، به دلیل استفاده از سیال تحت فشار بین قطعه و قالب، تقریباً نیروی اصطکاک در این مناطق حذف شده است. این امر باعث تسهیل تولید قطعات بلندتر می‌شود. همچنین، در این فرایند، فشار هیدرواستاتیک بالایی بر قطعه وارد می‌شود و نیز تنش‌ها از نوع فشاری هستند؛ این مسئله باعث به تأخیر افتادن ایجاد و رشد ترک می‌شود، لذا کرنش بیشتری به قطعه می‌توان اعمال نمود. پس از انجام دو پاس از این فرایند مشاهده شد که برخی از خواص ریزساختاری و خواص مکانیکی، بهبود چشم‌گیری پیدا کرد. به عنوان مثال، استحکام نهایی ماده، 1/7 برابر، استحکام تسلیم، 2/6 برابر و سختی، 2/1 برابر شد. همچنین، افت داکتیلیتی معادل 16 درصد مشاهده گردید. نتایج بررسی ریزساختار نشان داد که در اثر دو پاس فرایند، ریزساختار درشت‌دانه با میانگین اندازه دانه‌ی 360 میکرومتر تبدیل به ریزساختاری با سلول/زیردانه‌های فوق ریز با اندازه‌ی میانگین در حدود 635 نانومتر شد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 2 تیر 1400
داوری اولیه: 27 تیر 1400
پذیرش: 9 آبان 1400

کلیدواژه‌ها:

تغییر شکل پلاستیک شدید
فرایند اکستروژن فشاری تناوبی
هیدرواستاتیک لوله
آلومینیوم 5052
لوله

Effects of hydrostatic tube cyclic extrusion compression process on the properties of 5052 aluminum alloy

Mohammad Eftekhari, Ghader Faraji*, Mostafa Bahrami, Majid Baniassadi

Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 14395-515 Tehran, Iran, ghfaraji@ut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 23 June 2021
First Decision: 18 July 2021
Accepted: 31 October 2021

Keywords:

Severe plastic deformation
Hydrostatic tube cyclic extrusion
compression process
Aluminum alloy 5052
Tube

Abstract

In present research, the severe plastic deformation process of hydrostatic tube cyclic extrusion compression was applied through two passes on the aluminum alloy series 5052 tube, and after that the changes of microstructure and mechanical properties of tubes were studied. Hydrostatic tube cyclic extrusion compression process is able to improve the microstructure and the mechanical properties of tubular pieces. Also, this process has the potential to produce relatively long tubes. In this process, owing to the use of pressurized fluid between the tube and die, the friction force is eliminated in these regions. This facilitates the production of longer pieces. Also, in this process, higher hydrostatic compressive stresses are applied on the material causing the delay in the crack formation and propagation. Thus, higher strains can be applied on the material. After two passes of this process, some microstructural and mechanical properties were improved significantly. For instance, the yield strength and the hardness became 1.7, 2.6 and 2.1 times higher, respectively. Also, a loss of ductility of 16% was observed. The microstructure analysis revealed that after two passes of the process, the microstructure was changed from a coarse grain microstructure with an average grain size of about 360 μm to an ultrafine cell/subgrain microstructure with average size of about 635 nm.

1- مقدمه

دلیل، تولید لوله‌های فوق ریزدانه از جنس آلومینیوم 5052 با استحکام بالا و شکل‌پذیری مطلوب، حائز اهمیت است. امروزه، روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید به وفور در تولید مواد فوق ریزدانه و نانو ساختار با استحکام و سختی بالا کاربرد دارند. در این روش‌ها، ریزدانه کردن ساختار میکروسکوپی ماده، منجر

آلومینیوم 5000 دارای نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی عالی در آب دریا و قابلیت جوش‌کاری خوب هستند لذا در صنایع مختلفی نظیر صنایع دریایی، هوافضا و ساخت مخازن تحت فشار استفاده می‌شوند [1-3]. به همین

تولید لوله‌ی فوق ریزدانه‌ی آلومینیومی پراستحکام شدند. روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید سنتی مذکور، یک محدودیت اساسی دارند؛ این‌که این روش‌ها، قادر به تولید لوله‌های فوق ریزدانه با طول بلند نیستند. تولید لوله‌های با طول بلند از نظر تیراژ تولید بالای قطعات و به صرفه بودن زمان و هزینه‌ی تولید حائز اهمیت است. در پژوهش حاضر، روش جدیدی برای حل این محدودیت روش‌های سنتی معرفی شده است. در روش‌های سنتی تغییرشکل پلاستیک شدید لوله‌ها، اصطکاک زیادی بین قطعه و قالب وجود دارد. بنابراین، افزایش طول لوله، منجر به افزایش نیروی اصطکاک و به تبع آن، منجر به افزایش نیروی لازم برای شکل‌دهی می‌شود تا جایی که دیگر امکان انجام فرایند، به‌علت شکستن قطعات قالب، کم‌اندام سنبه و یا نیاز به تجهیزات قوی برای اعمال بار، مقدور نخواهد بود [19، 20]. این مسئله در حالی است که صنایع مختلف، به تولید قطعات لوله‌ای پراستحکام با طول بلند و با تیراژ بالا، نیاز روزافزونی دارند. برای حل این مشکل و تولید لوله‌های فوق ریزدانه‌ی نسبتاً بلند، بهترین و مؤثرترین تدبیر، کاهش یا حذف اثر نیروی اصطکاک موجود در این فرایندها می‌باشد. در پژوهش حاضر برای این مسئله راه‌کاری اندیشیده شده است. در این رابطه، سوارآبادی و همکاران [19، 20] در سال 2019، فرایند انبساط و روزنرانی تناوبی شکل‌دهی هیدرواستاتیک لوله را معرفی نمودند که در آن، با استفاده از سیال تحت فشار، اصطکاک بین قطعه و لوله حذف شده است. لذا این امر موجب کاهش نیروی شکل‌دهی و تسهیل تولید لوله‌های فوق ریزدانه‌ی بلندتر شده است. روش جدیدی به نام فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله در سال 2021 توسط نویسندگان پژوهش حاضر [21] ابداع شده که با موفقیت بر روی مس خالص اجرا شده است. این فرایند، قادر به تولید لوله‌های فوق ریزدانه‌ی پراستحکام با طول نسبتاً بلند است. با استفاده از فرآیندهای سنتی تغییرشکل پلاستیک شدید، بنا به دلایلی که پیش‌تر بیان شد، عمدتاً لوله‌هایی کوتاه (تا طول 35 الی 40 میلی‌متر)، تولید شده‌اند. در فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله (فرایند حاضر)، تمهیداتی اتخاذ شده است که در نتیجه‌ی آن‌ها، این فرایند قابلیت تولید لوله به طول 100 میلی‌متر (یعنی طولی در حدود 2/5 الی 3 برابر طول تولید شده توسط روش‌های سنتی) و حتی پتانسیل تولید طول بالاتر از آن را هم دارد. در فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله به‌دلیل حذف اثر اصطکاک بدلیل استفاده از سیال تحت فشار، نیروی مورد نیاز برای انجام فرایند در مقایسه با روش‌های

به بهبود قابل توجه خواص مکانیکی می‌شود. در روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید، مقادیر بالایی از کرنش به ماده اعمال می‌شود بدون این‌که تغییری در ابعاد نهایی قطعه ایجاد شود. به همین دلیل، قطعه را می‌توان طی چندین پاس، مورد انجام فرایند قرار داد و کرنش بالایی به آن اعمال کرد. از مشهورترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید می‌توان به ایکپ [4، 5]، پیچش فشار بالا [6] و نورد اتصال تجمعی [7] اشاره نمود. در این پژوهش، بر روی تغییرشکل پلاستیک شدید قطعات لوله‌ای شکل تمرکز شده است. در این رابطه، ناگاسخار و همکاران [8] در سال 2006 توانستند با استفاده از فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای با قطر مساوی و نیز با استفاده از یک ماندرل انعطاف‌پذیر، لوله‌ی فوق ریزدانه تولید کنند. توپ و همکاران [9] در سال 2009 با به‌کارگیری روش پیچش فشار بالا توانستند لوله‌های فوق ریزدانه تولید کنند. محبی و همکاران [10] در سال 2010، فرایند چرخش اتصال تجمعی را برای تولید لوله‌های فوق ریزدانه ابداع کردند. زنگی آبادی و همکاران [11] در سال 2011 با استفاده از روش فشار در کانال لوله‌ای توانستند لوله‌هایی ریزدانه با برخی خواص مکانیکی قابل توجه تولید کنند. فرجی و همکاران [12] در سال 2011 فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای را ابداع و معرفی کردند. آن‌ها توانستند در این فرایند، با تغییر زاویه‌ی حرکت لوله در قالب، لوله‌هایی فوق ریزدانه با استحکام قابل توجه تولید کنند. فرجی و همکاران [13] در سال 2012، در تکمیل و حل مشکلات روش قبلی خود، فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای به صورت موازی را برای تولید لوله‌های فوق ریزدانه معرفی نمودند. در این فرایند، نیروی پایین‌تری نسبت به فرایند فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای نیاز است. همچنین، در سال 2012 وانگ و همکاران [14] فرایند برش فشار بالا را که حالت بهبود یافته‌ی فرایند پیچش فشار بالا است، برای تولید لوله‌های فوق ریزدانه پیشنهاد دادند. بابایی و همکاران در سال 2014 با معرفی دو روش انبساط و اکستروژن متناوب لوله [15] و تراکم و اکستروژن متناوب لوله [15] توانستند به موفقیت چشم‌گیری در زمینه‌ی تولید لوله‌هایی فوق ریزدانه با برخی خواص مکانیکی قابل توجه برسند. جعفرزاده و همکاران [16] در سال 2015، روش انبساط و انقباض تناوبی را برای تولید لوله‌هایی فوق ریزدانه معرفی کردند. تراب‌زاده و همکاران [17] در سال 2016 با ابداع روش افزایش و کاهش تناوبی قطر خارجی لوله، توانستند لوله‌های آلومینیومی فوق ریزدانه تولید کنند. بابایی و همکاران [18] در سال 2018، روش فشار پیچشی لوله را معرفی کرده و موفق به

فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله طی دو پاس، در دمای اتاق، بر روی لوله‌ی آماده شده، انجام شد. در این فرایند، از روغن هیدرولیک به عنوان سیال استفاده شد. قطعات اصلی قالب از جنس فولاد گرم کار¹ ساخته شدند. بیشینه نیروی پرس لازم برای اجرای فرایند در حدود 12 تن و سرعت حرکت جک در حدود 5 میلی‌متر بر دقیقه بود. در حین فرایند، برای اعمال فشار در پشت قطعه، از یک سیستم پورپک متصل به یک جک دوطرفه استفاده گردید. برای اعمال حرکت اصلی پرس از یک ماشین پرس با توان اسمی 100 تن استفاده شد. در شکل 1، نمای شماتیک فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله به همراه مراحل انجام آن، مشهود است. در شکل 1-1، مقدار پارامترهای R ، r ، r_e ، L و α به ترتیب برابر با 10 میلی‌متر، 7/5 میلی‌متر، 9 میلی‌متر، 7 میلی‌متر، 45 درجه و 155 درجه است. در شکل 2، تصویر قطعات تفکیک شده‌ی قالب نشان داده شده است.

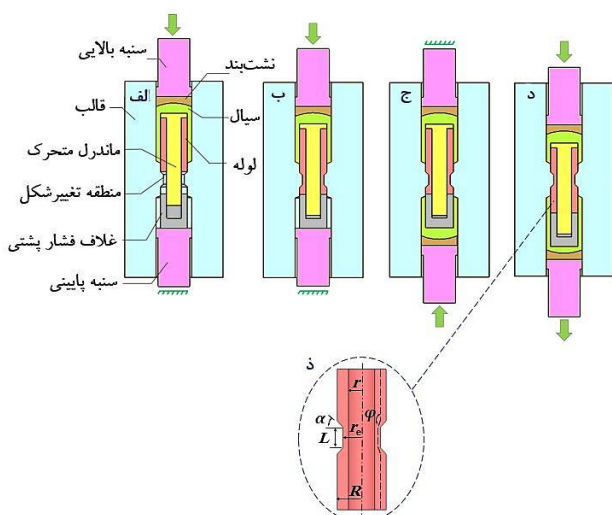


Fig. 1 Schematic view of the die and the stages of hydrostatic tube cyclic extrusion compression process

شکل 1 نمای شماتیک قالب به همراه مراحل اجرای فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله

در شکل 3، مجموعه‌ی استفاده شده برای اجرای فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله مشهود است. در شکل 4، تصویر لوله، قبل، در حین و بعد از انجام فرایند نشان داده است.

مراحل انجام فرایند چنین است که در ابتدا، همان‌طور که در شکل 1- الف مشاهده می‌شود، لوله بر روی یک ماندل متحرک قرار داده شده و سپس در داخل قالب گذاشته می‌شود.

سنتی، می‌تواند کاهش زیادی پیدا کند. به همین دلیل در این فرایند، لوله‌هایی با طول‌های نسبتاً بلند به راحتی قابل تولید هستند. همچنین، در این فرایند، به خاطر اعمال فشار پشتی بر روی قطعه، فشار هیدرواستاتیک بالایی چه در مناطق در تماس با سیال و چه در مناطق فاقد سیال مانند منطقه‌ی شکل‌دهی وجود دارد و تنش‌های وارد بر قطعه عمدتاً از نوع فشاری هستند. این مسئله می‌تواند باعث به تأخیر افتادن مرحله‌ی جوانه‌زنی و رشد ترک شود.

نوآوری‌های مقاله حاضر در مقایسه با کار قبلی [21] عبارت است از:

1- بررسی قابلیت روش به تازگی ابداع شده‌ی فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله بر روی آلیاژ آلومینیوم 5052 که از آلیاژهای مورد توجه در صنایعی مانند نظامی، هوایی و خودرو است.

2- تولید لوله‌ی فوق ریزدانه آلیاژ آلومینیوم 5052 با استحکام بالا، با طولی بیشتر از طول بدست آمده در سایر مقالات مرتبط با انجام روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید بر روی لوله.

3- تولید لوله‌ای از جنس 5052 با خواص ویژه (با بیشترین میزان شکل‌پذیری و درصد ازدیاد طول به همراه استحکام بالای قابل توجه) در بین مقالات دیگر (جدول 1). این مسئله از نظر علمی و کاربرد عملی و صنعتی اهمیت زیادی دارد و یک نوآوری در زمینه‌ی بدست آوردن خواص ویژه محسوب می‌شود زیرا بدست آوردن قطعاتی که همزمان دارای استحکام بالا و شکل‌پذیری مناسب باشند یک چالش جدی در صنایع مختلف است.

در پژوهش حاضر، پس از انجام فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک بر روی لوله از جنس آلیاژ آلومینیوم 5052، تغییرات ریزساختاری و خواص مکانیکی قطعات با استفاده از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی عبوری، آزمون کشش و آزمون میکروسختی سنجی، مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج حاصل از این پژوهش، با نتایج پژوهش‌های دیگران مقایسه شد.

2- آماده‌سازی نمونه‌ها و آزمون‌های تجربی

در پژوهش حاضر، ابتدا، لوله‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیوم 5052 به ابعاد طول 100 میلی‌متر، قطر بیرونی 20 میلی‌متر و ضخامت 2/5 میلی‌متر، ماشینکاری و تهیه شدند، سپس این قطعات به منظور انجام آنیل، به مدت 1 ساعت در دمای 500 درجه‌ی سلسیوس قرار داده شدند و سپس در هوا خنک شدند [22].

¹ H13 Steel



Fig. 4 The images of the tube from left to right related to before, during and after hydrostatic tube cyclic extrusion compression process, respectively

شکل 4 تصویر لوله از چپ به راست به ترتیب در قبل، در حین و بعد از انجام فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله

با هدف هدایت ماندل و نیز تامین فشار لازم برای انبساط لوله‌ی اکستروژن شده که در مرحله‌ی بعد انجام خواهد شد، از یک غلاف در کانال خروجی استفاده می‌شود.

در مرحله‌ی دوم یعنی شکل 1-ب، سنبه بالایی در حالتی که غلاف در مکان خود توسط سنبه پایینی ثابت نگه داشته شده است، به مقدار معینی به سمت پایین حرکت داده می‌شود که در نتیجه‌ی آن، لوله پس از عبور از قسمت گلوبی منطقه‌ی شکل‌دهی، اکستروژن می‌شود و ضخامت و قطر خارجی آن کاهش می‌یابد. سپس، پس از برخورد لوله‌ی اکستروژن شده به غلاف، لوله شروع به انبساط می‌کند. به محض این‌که لوله در فضای انبساطی واقع در کانال خروجی، کاملاً منبسط شد و فضای انبساطی را پر نمود، مرحله‌ی بعد شروع می‌شود. در مرحله‌ی سوم، با توجه به شکل 1-ج، فضای بین غلاف و قالب با سیال پر می‌شود. برای جلوگیری از نشت سیال از کناره‌های سنبه‌ی پایینی، بین سنبه‌ی پایینی و سیال، از یک نشت‌بند، مشابه کانال ورودی، استفاده می‌شود. با اعمال فشار بر روی سنبه‌ی پایینی، سیال موجود در کانال خروجی، تحت فشار قرار گرفته و آماده‌ی انتقال فشار پشتی به لوله می‌شود. در این مرحله، فشار پشتی توسط یک جک هیدرولیک دیگر تامین می‌شود. در مرحله‌ی چهارم یعنی شکل 1-د، هر سه قطعه که شامل لوله، ماندل متحرک و غلاف هستند به همراه هم، تحت تأثیر نیروی جک ماشین پرس و جک هیدرولیک دوم حرکت می‌کنند. در این حالت، سیال و غلاف، با اعمال فشار پشتی به لوله، موجب انبساط پیوسته‌ی ماده‌ای که در منطقه‌ی شکل‌دهی، پیوسته در حال اکستروژن است، می‌شوند. لذا، لوله در کانال خروجی، با همان ابعاد اولیه‌ی خود یعنی همان قطر و

در ادامه، فضای بین لوله و قالب با سیال هیدرولیک پر می‌شود. در جریان فرایند، همین سیال پس از قرارگیری تحت فشار ناشی از سنبه‌ی بالایی، نیروی شکل‌دهی لوله را تامین نموده و از تماس فیزیکی لوله و قالب جلوگیری می‌کند. برای جلوگیری از نشت سیال از کناره‌های سنبه، یک نشت‌بند از جنس پی‌تی‌اف¹ در بین سیال و سنبه قرار داده می‌شود.



Fig. 2 The images of the die components of hydrostatic tube cyclic extrusion compression process

شکل 2 تصویر اجزای قالب فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله



Fig. 3 The used setup for hydrostatic tube cyclic extrusion compression process

شکل 3 مجموعه‌ی استفاده شده برای اجرای فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله

¹ PTFE

در جهت عمود بر محور لوله مقطع زده شدند. سپس، سنباده زنی با استفاده از کاغذهای سیلیسیم کارباید تا شماره 5000 انجام شد. در نهایت، نمونه‌ها پس از پولیش مکانیکی، با استفاده از محلول پولاتون² [23]، اچ شدند. تصویربرداری نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل سینوون³ صورت گرفت. جهت بدست آوردن اندازه‌ی متوسط دانه از نرم‌افزار جی ماکروویژن⁴ طبق استاندارد ای‌اس‌تی‌ام⁵ مربوطه⁵ استفاده گردید. برای مطالعه‌ی بیشتر ریزساختار لوله‌ی یک و دو پاس فرایند شده، از تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی تی‌ای‌ام استفاده گردید. در این پروسه، نمونه‌ی کوچک دیسکی-شکل از نواحی نزدیک به قطر بیرونی لوله استخراج گردید. سپس، این نمونه پس از انجام الکتروپولیش⁶ با استفاده از محلول ترکیبی 33% نیتریک اسید و 67% متانول، آماده‌ی تصویربرداری تی‌ای‌ام شد. سرانجام، تصاویر لازم با استفاده از میکروسکوپ تی‌ای‌ام مدل تکنای⁷ در ولتاژ 200 کیلوولت گرفته شد. برای بررسی سطوح شکست نمونه‌ها پس از انجام آزمون کشش و نیز آگاهی از علت و مکانیزم غالب شکست، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (اس‌ای‌ام) مدل نووا⁸ با ولتاژ کاری 15 کیلوولت استفاده شد.

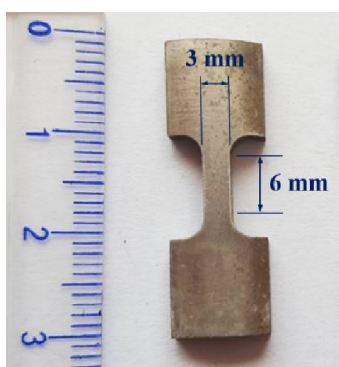


Fig. 5 The image of the sample of tensile testing and its dimensions

شکل 5 تصویر نمونه‌ی آزمون کشش و ابعاد آن

3- نتایج و بحث

3-1- نتایج بررسی ریزساختار

در شکل 6، تصویر میکروسکوپ نوری در مقطع موازی ضخامت لوله یعنی جهت عمود بر محور لوله، برای لوله‌ی آنیل مشهود است. بنا به شکل 6، ریزساختار نمونه‌ی آنیل شامل دانه‌های درشت با میانگین اندازه دانه‌ی در حدود 360 میکرومتر

ضخامت اولیه تولید می‌شود. پس از انجام مرحله‌ی چهارم، یک پاس از فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک بر روی لوله انجام می‌شود. برای انجام پاس‌های بعدی فرایند فقط کافی است که بدون خارج کردن لوله از قالب، جهت حرکت سنبه‌های پایین و بالا معکوس شود و سنبه‌ای که در کانال مقابل قرار دارد نقش فشار پستی را ایفا کند. لازم به ذکر است که پس از انجام کامل یک پاس فرایند، یک ناحیه‌ی گلوبی-شکل ناشی از عبور از منطقه‌ی تغییرشکل، به صورت بخش کوچکی در انتهای لوله باقی خواهد ماند. پس از اتمام پاس‌های فرایند این زائده را می‌توان با ماشین‌کاری حذف نمود. نکته‌ی دیگر لازم به ذکر این است که در جریان فرآیند، برای جلوگیری از رسیدن سر ماندل متحرک به منطقه‌ی شکل‌دهی، سنبه نهایتاً به اندازه‌ی حدوداً 95 میلی‌متر قابلیت جابه‌جایی دارد. در این شرایط، حدوداً 5 میلی‌متر طول اضافی برای جلوگیری از برخورد سر ماندل به منطقه‌ی شکل‌دهی در نظر گرفته می‌شود.

برای بررسی تأثیر فرایند بر روی خواص مکانیکی قطعه، از آزمون کشش و آزمون سختی‌سنجی استفاده شد. آزمون کشش تک‌محوری در دمای اتاق و با نرخ کرنش 0/001 بر ثانیه انجام شد. نمونه‌های مورد نیاز برای آزمون کشش با استفاده از فرایند وایر-کات، در راستای طولی یعنی در جهت موازی محور لوله، بریده و استخراج گردیدند. در این نمونه‌ها، مطابق شکل 5، طول سنبه 6 میلی‌متر، عرض سنبه 3 میلی‌متر و ضخامت 2/5 میلی‌متر بود. از آن‌جا که ابعاد نمونه‌های آزمون کشش کوچک‌تر از حد معمول استاندارد (ساب‌سایز) بود لذا ابعاد نمونه‌ها بر اساس مقالات [21] انتخاب شد. برای مطالعه‌ی تأثیر فرایند بر میزان سختی قطعات، از آزمون میکروسختی‌سنجی ویکرز در دمای اتاق استفاده شد. برای این آزمون، نمونه‌های مناسب از لوله‌ها، با استفاده از مقطع‌زنی در راستای ضخامت لوله، استخراج گردیدند. بعد از آماده‌سازی سطحی، فرایند مانت و سپس سنباده‌زنی انجام گردید. سرانجام، آزمون توسط دستگاه میکروسختی‌سنجی ویکرز مدل ولپرت¹ با بار اعمالی 100 گرم و زمان توقف سنبه بر روی قطعه 10 ثانیه انجام شد. آزمون سختی‌سنجی در 6 نقطه با فاصله‌ی 0/5 میلی‌متر از هم بر روی ضخامت لوله انجام شد.

برای بررسی تغییرات ریزساختاری از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی تی‌ای‌ام و شکست‌نگاری با میکروسکوپ الکترونی اس‌ای‌ام استفاده شد، برای میکروسکوپ نوری، نمونه‌ها

² Poulton

³ Sinowon UMS-410

⁴ J Micro Vision

⁵ ASTM E112 96

⁶ Electropolishing

⁷ FEI Tecnai

⁸ FEI Nova NanoSEM 450

¹ Wolpert machine

تغییر شکل پلاستیک شدید فلزاتی با انرژی نقص چینش متوسط تا زیاد (مانند آلومینیوم) پدیدار می‌شوند [24].

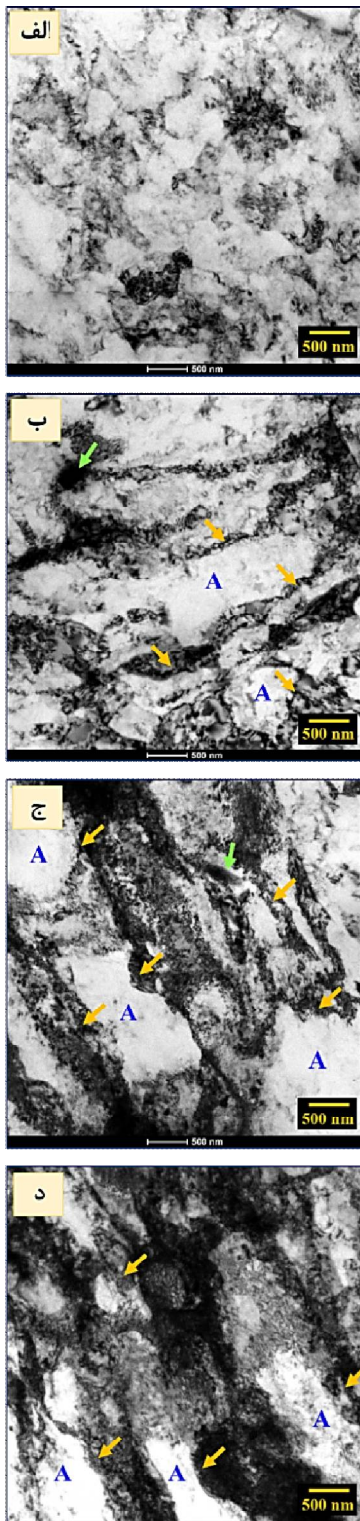


Fig. 7 The transmission electron microscopy (TEM) images of (a) the one-pass and (b, c and d) two-pass hydrostatic tube cyclic extrusion compression processed aluminum alloy 5052 tubes.

شکل 7 تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (تی‌ای‌ام) برای لوله‌ی (الف) یک پاس و (ب، ج و د) دو پاس فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک شده از جنس آلیاژ آلومینیوم 5052

می‌باشد. در شکل 7، تصاویر ریزساختاری گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری (تی‌ای‌ام) برای لوله‌ی یک پاس (شکل 7- الف) و دو پاس (شکل 7- ب، ج و د) فرایند شده، در مقطع موازی ضخامت لوله (جهت عمود بر محور لوله)، نشان داده شده است.

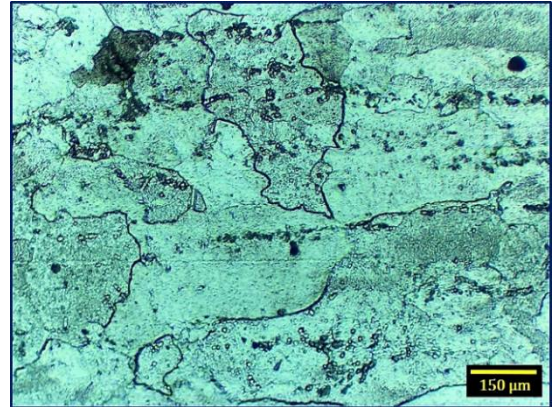


Fig. 6 The optical microscopy microstructure of the annealed aluminum alloy 5052 tube

شکل 6 تصویر میکروسکوپ نوری برای لوله‌ی آنیل شده از جنس آلیاژ آلومینیوم 5052

بنا به شکل 7- الف، پس از یک پاس فرایند، نابه‌جایی‌های زیادی بوجود آمده که به صورت نامنظم، پراکنده و در هم تنیده شده‌اند. همچنین، شکل 7- الف حاوی تعدادی زیردانه‌ی کوچک می‌باشد که مرز آن‌ها به سختی قابل تشخیص است. با اعمال کرنش بیشتر طی انجام پاس‌های بعدی، نابه‌جایی‌های درهم تنیده شده قادر خواهند بود به سوی مرز زیردانه‌ها حرکت کنند و یا مرزهای جدیدی تشکیل دهند که منجر به تشکیل سلول‌ها یا زیردانه‌های کوچکتر شود. بنا به شکل 7- ب، ج و د که مربوط به سه منطقه‌ی مختلف لوله‌ی دو پاس فرایند شده است، در پاس دوم فرایند، نابه‌جایی‌های قبلی و نابه‌جایی‌های جدید به شکل ساختارهایی با مرز زاویه‌ی کم¹ و سپس به شکل سلول (مشخص شده با حروف A)، آرایش پیدا می‌کنند تا انرژی کرنش را به حداقل رسانده و مرز سلول‌ها را ایجاد کنند. به عبارت دیگر، یک ساختار سلولی پدید می‌آید که در آن، مرز سلول‌ها عمدتاً از نابه‌جایی‌های در هم تنیده شده و یا انباشته‌های نامنظمی از تعداد زیادی نابه‌جایی (مشخص شده با پیکان‌های نارنجی) تشکیل شده است. در این شرایط، مشاهده می‌شود که در مقایسه با درون سلول‌ها، مرز سلول‌ها حاوی چگالی بیشتری از نابه‌جایی‌ها می‌باشد. ساختار سلولی متشکل از نابه‌جایی‌ها، ساختارهایی با انرژی پایین می‌باشند که معمولاً در حین

¹ Low angle boundaries

20، [28-30] نیز گزارش شده است. همچنین، مشاهده شده است که اعمال پاس‌های بیشتر فرایند تغییرشکل پلاستیک شدید می‌تواند به ساختار فوق ریزدانه هم‌محورتری منجر شود [31-35].

با نظر به نتایج پژوهش حاضر، مکانیزم ریزدانه شدن ماده‌ی مورد بررسی، تحت تأثیر فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله را می‌توان چنین شرح داد: در مراحل آغازین فرایند تغییرشکل پلاستیک شدید، چگالی زیادی از نابه‌جایی‌ها تولید می‌شود. سپس نابه‌جایی‌ها با هم برخورد کرده و ساختارهای در هم تنیده شده‌ای را تشکیل می‌دهند. این حالت مخصوصاً در پاس‌های اول فرایند اتفاق می‌افتد. با ادامه‌ی تغییرشکل و اعمال کرنش بیشتر، نابه‌جایی‌ها، بازآرایی کرده و مرزهای زاویه‌ی کم³ و سپس سلول‌ها را تشکیل می‌دهند تا انرژی کرنش را تقلیل دهند و مرزهای سلول‌ها را ایجاد کنند. در حقیقت در این حالت، مرزهای زاویه‌ی کم، سلول‌ها را از هم جدا می‌کنند. همچنین، در این حالت، ناهم‌جهتی کمی بین زیردانه‌ها وجود دارد. با افزایش بیشتر کرنش، نه تنها نابه‌جایی‌های بیشتری تولید شده و به سوی مرزهای زاویه‌ی کم حرکت می‌کنند، بلکه سلول‌ها می‌توانند شروع به چرخش کنند. در این حالت، زاویه‌ی ناهم‌جهتی بین سلول‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه، برخی از مرزهای زاویه‌ی کم به مرزهای زاویه‌ی بالا⁴ تبدیل می‌شوند. بنابراین، سلول‌ها به دانه تبدیل می‌شوند و ساختار فوق ریزدانه بوجود می‌آید. مشابه چنین روالی در مطالعات دیگران [16، 36-41] نیز گزارش شده است. چنین ساختار فوق ریزدانه‌ای، معمولاً در روش‌های رایج شکل‌دهی دیده نمی‌شود زیرا این فرایندها در اعمال کرنش‌های بالا به ماده، محدودیت دارند. بنا به مطالعات انجام شده، با افزایش تعداد پاس‌های فرایند تغییرشکل پلاستیک شدید، درصد مرزدانه‌های زاویه بالا در ساختار افزایش می‌یابد. این اتفاق ناشی از افزایش چرخش زیردانه‌ها تحت تأثیر کرنش اعمالی، افزایش ناهم‌جهتی زیردانه‌ها به دلیل جذب نابه‌جایی‌ها در مرزها و نیز ناشی از تأثیرات کرنش‌های برشی است [15، 42، 43].

3-2- نتایج آزمون کشش

در شکل 8، نتایج آزمون کشش برای نمونه‌ی آنیل اولیه و نمونه‌های تحت یک و دو پاس فرایند، مشهود است. مطابق شکل 8، پس از یک پاس فرایند، استحکام تسلیم، استحکام نهایی،

بنا به شکل 7، در مقایسه با ریزساختار لوله‌ی آنیل اولیه، نمونه‌ی دو پاس دارای ساختار ریزتری متشکل از سلول‌ها/زیردانه‌های¹ فوق ریز با اندازه‌ی میانگین 636 نانومتر است. در کل، در شکل 7، سلول‌ها/زیردانه‌های فوق ریز که توسط انباشته‌ها و شبکه‌ی در هم تنیده‌ای از نابه‌جایی‌ها از هم جدا شده‌اند، مشهود است. مشاهده می‌شود که با اعمال کرنش بیشتر به ماده از طریق انجام پاس دوم فرایند، نابه‌جایی‌های در هم تنیده شده قادر خواهند بود به سوی مرز زیردانه‌ها حرکت کنند و یا مرزهای جدیدی تشکیل دهند که منجر به تشکیل سلول‌ها یا زیردانه‌های کوچکتر شود. به عبارت دیگر، در کرنش‌های پایین، آرایه‌های پراکنده و در هم تنیده شده‌ای از نابه‌جایی‌ها شکل می‌گیرد. با اعمال کرنش بیشتر طی انجام پاس دوم فرایند، بسیاری از نابه‌جایی‌ها، مرزهای سلول‌ها و زیردانه‌ها را ایجاد می‌کنند. چنین رفتاری در مطالعات دیگران [25] نیز قابل مشاهده است. در این شرایط، با افزایش بیشتر کرنش، چگالی بیشتری از نابه‌جایی‌ها در مرز زیردانه‌ها تجمع می‌کنند که می‌توانند باعث ایجاد دانه‌هایی با مرز زاویه‌ی بالا² شوند.

انجام تعداد پاس‌های بیشتر فرایند تغییرشکل پلاستیک شدید، می‌تواند منجر به کاهش چگالی نابه‌جایی‌ها در داخل دانه‌ها شود. این پدیده می‌تواند ناشی از دو دلیل عمده باشد: الف) بازیابی دینامیکی که باعث برقراری تعادل بین تولید و از بین رفتن نابه‌جایی می‌شود؛ و ب) حرکت نابه‌جایی‌ها از داخل زیردانه‌ها به سوی مرزها برای ایجاد دانه‌ها [16، 26، 27]. همچنین، در شکل 7، ذرات ریز فاز ثانویه (مشخص شده با پیکان‌های سبز) در زمینه‌ی آلومینیومی قابل مشاهده است. در واقع، کرنش‌های برشی وارد بر ماده در حین انجام فرایند می‌توانند باعث خرد شدن ذرات درشت فاز ثانویه‌ی نمونه‌ی آنیل و تبدیل آن‌ها به ذرات کوچکتر شوند. این ذرات ریز، نقش مهمی در کنترل خواص مکانیکی ماده دارند زیرا این ذرات، باعث ایجاد مانع در برابر حرکت نابه‌جایی‌ها و قفل شدن آن‌ها می‌شوند. لذا استحکام ماده افزایش می‌یابد. در حین انجام فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید، سه پارامتر کرنش معادل، کرنش‌های برشی و تنش‌های هیدرواستاتیک فشاری نقش اصلی را در وقوع ریزدانه‌ی ایفا می‌کنند. به این صورت که، کرنش معادل بالا و کرنش‌های برشی بالا موجب ریزدانه‌ی بیشتر ماده می‌شود. بنا به شکل 7، با اعمال دو پاس فرایند، ساختار ماده ریزتر و همگن‌تر می‌شود، این رویداد در مطالعات دیگر [5،

³ LAGBs

⁴ HAGBs

¹ Cells/Subgrains

² High angle boundaries

نابه‌جایی‌ها به مرزخانه‌ها به‌عنوان یک فرایند بازیابی مؤثر باشد [46]. در جدول 1، مقدار درصد ازدیاد طول، استحکام و سختی نمونه‌ی دو پاس فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله شده با نتایج فرایندهای دیگر انجام شده بر روی آلیاژ آلومینیوم 5052، مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول 1 مشهود است، در مقایسه با فرایندهای دیگر، نمونه‌ی دو پاس فرایند شده (پژوهش حاضر)، علاوه بر داشتن استحکام بالای خوب، دارای بیشترین مقدار درصد ازدیاد طول است. بنابراین، به نظر می‌رسد که فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله، پتانسیل‌های لازم برای تولید لوله‌هایی با استحکام بالا و داکتیلیتی خوب را دارا می‌باشد. این ویژگی می‌تواند یکی از مزایای مهم این فرایند محسوب شود زیرا دست‌یابی به ترکیبی از استحکام بالا و داکتیلیتی بالا یکی از نیازهای روز برای صنایع مختلف و حساس است. این خصوصیت فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله عمدتاً به تنش‌های هیدرواستاتیک فشاری بالای موجود در این فرایند، مربوط است. تنش‌های هیدرواستاتیک فشاری، با به تأخیر انداختن جوانه‌زنی و رشد ترک و همچنین با بستن ترک‌ها و سایر عیوب کوچک، نقش برجسته‌ای در بروز شکل‌پذیری بهتر و نیز جلوگیری از افت داکتیلیتی ایفا می‌کنند [47]. لذا این امکان وجود دارد که قبل از وقوع شکست، بتوان تعداد پاس بیش‌تری از فرایند و متعاقباً، کرنش بیش‌تری به قطعه اعمال کرد.

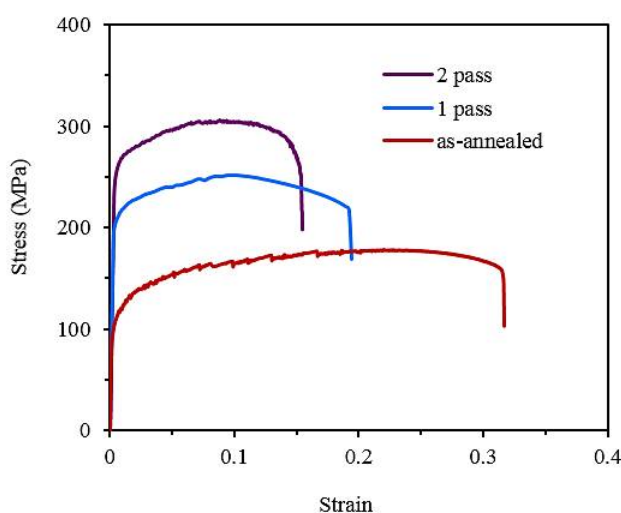


Fig. 8 The engineering stress-strain curves of the annealed tube, the one-pass and two-pass hydrostatic tube cyclic extrusion compression processed aluminum alloy 5052 samples

شکل 8 نمودار تنش-کرنش مهندسی برای نمونه‌ی آنیل و نمونه‌های یک و دو پاس فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک شده از جنس آلیاژ آلومینیوم 5052

درصد ازدیاد طول یکنواخت و درصد ازدیاد طول، به‌ترتیب به حدود 205 مگاپاسکال، 250 مگاپاسکال، 10/5 درصد و 19/5 درصد، رسیده است. همچنین، بنا به شکل 8، در نتیجه‌ی انجام دو پاس فرایند، استحکام تسلیم، استحکام نهایی، درصد ازدیاد طول یکنواخت و درصد ازدیاد طول، به‌ترتیب به حدود 255 مگاپاسکال، 305 مگاپاسکال، 9 درصد و 15/5 درصد، رسیده است. این در حالی است که همین مقادیر برای نمونه‌ی آنیل اولیه، به‌ترتیب برابر با حدود 100 مگاپاسکال، 180 مگاپاسکال، 23 درصد و 31/5 درصد می‌باشد. افزایش استحکام پس از انجام فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید، اتفاقی رایج است. افزایش استحکام ناشی از انجام فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله می‌تواند ناشی از سه عامل مهم باشد: الف) کرنش‌سختی؛ در پاس‌های اول فرایند، چگالی زیادی از نابه‌جایی‌ها تولید می‌شود که باعث کرنش‌سختی قابل توجهی می‌گردد. این عامل، دلیل اصلی افزایش استحکام و کاهش مقدار ازدیاد طول در پاس‌های اول فرایند است. ب) استحکام‌بخشی مرزخانه‌ای¹: همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، با ادامه‌ی فرایند تغییرشکل پلاستیک شدید، مخصوصاً در تعداد پاس‌های بالا، کاهش اندازه‌ی دانه، تشکیل زیردانه‌های نانواندازه و تشکیل دانه‌های فوق ریزدانه اتفاق می‌افتد که منجر به افزایش استحکام ماده می‌شود [39]. این رویداد به این خاطر است که در این شرایط، مرزخانه‌ها نقش مانع را در برابر حرکت نابه‌جایی‌ها ایفا می‌کنند و باعث افزایش مقاومت به تغییرشکل و متعاقباً، افزایش استحکام ماده می‌شوند [44]. همچنین، رابطه‌ی هال‌پیچ² برای استحکام نیز نشان‌دهنده‌ی افزایش استحکام در اثر کاهش اندازه‌ی دانه‌هاست [45]. ج) استحکام‌بخشی ذرات: همان‌طور که در بخش نتایج بررسی ریزساختار مشاهده شد، کرنش اعمالی به ماده در فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله می‌تواند باعث خرد شدن ذرات درشت فاز ناخالصی و متعاقباً، تشکیل ذرات ریزتر و همگن‌تر شود. این ذرات می‌توانند با جلوگیری از حرکت نابه‌جایی‌ها، باعث افزایش استحکام ماده شوند.

نکته‌ی دیگری که در شکل 8 قابل مشاهده است این است که در نمونه‌ی دو پاس فرایند شده، کرنش‌سختی کمتری نسبت به نمونه‌ی آنیل اتفاق افتاده است. این مشاهده، یکی از خصوصیات مواد فوق ریزدانه تولید شده توسط فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید است. دلیل این اتفاق می‌تواند جذب

¹ Grain boundary strengthening

² Hall-Petch relationship

جدول 1 مقایسه مقادیر استحکام کششی نهایی، درصد ازدیاد طول و سختی نمونه‌ی دو پاس فرایند شده در پژوهش حاضر، با نتایج بدست آمده از مطالعات دیگر بر روی آلیاژ آلومینیوم 5052

Table 1 The comparison of the ultimate strength, elongation to failure and hardness of the two-pass processed sample in this study with the results of other studies performed on aluminum alloy 5052

شماره	فرایند	استحکام نهایی در صد ازدیاد طول (MPa)	سختی کرنش (HV)	مرجع
1	2 پاس فرایند حاضر	305	120	پژوهش حاضر
2	2 پاس CGP	243	93	[48]
3	فرایند RASP	210	116	[24]
4	4 پاس DSR	390	120	[49]
5	4 پاس ECAP	365	115	[50]
6	5 پاس ARB	387	-	[51]
7	2 پاس ECAP	266	121	[36]
8	2 پاس CGP	260	85	[48]
9	6 پاس ECAP	303	135	[52]
10	33 درصد CR	255	85	[53]

دو پاس فرایند شده به ترتیب در حدود 95 و 120 ویکرز است. این در حالی است که سختی نمونه‌ی آنیل تنها 56 ویکرز است. در فرایند حاضر و نیز در سایر فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد پاس‌های فرایند، از میزان افزایش سختی کاسته شده و مقدار سختی تمایل دارد که به یک حد اشباع برسد [35، 55]. یک دلیل اصلی برای بروز این رفتار می‌تواند برقراری یک تعادل بین تولید نابه‌جایی‌ها و از بین رفتن آن‌ها، ناشی از فرایند بازیابی دینامیکی، در تعداد پاس‌های بالاتر فرایند باشد [56]. به عبارت دیگر می‌توان گفت که در تعداد پاس‌های بالا، نقش چگالی نابه‌جایی‌ها در استحکام‌بخشی کاهش می‌یابد درحالی‌که نقش مرزخانه‌ها تقریباً ثابت می‌ماند. بنابراین، مقدار سختی و تنش تسلیم به یک حد اشباع می‌رسد [46]. در جدول 1، مقدار سختی نمونه‌ی دو پاس فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله شده با نتایج فرایندهای دیگر انجام شده بر روی آلیاژ آلومینیوم 5052 مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که نمونه‌ی دو پاس فرایند شده (پژوهش حاضر)، سختی قابل توجهی دارد. این ویژگی در کنار سایر خواص مشاهده شده برای لوله‌های فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله شده، در توصیف قابلیت‌های این فرایند حائز اهمیت است.

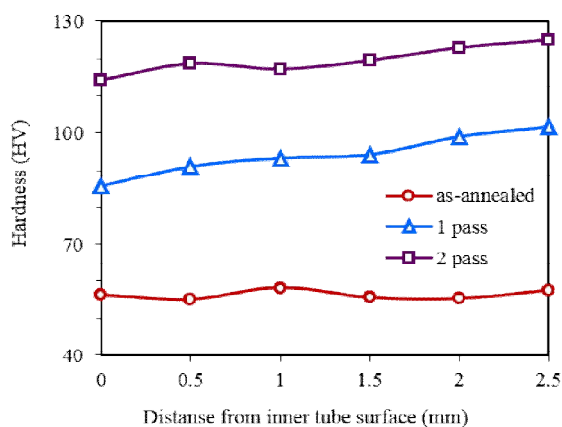


Fig. 9 The microhardness variation along the tube thickness for the annealed and the one-pass and two-pass hydrostatic tube cyclic extrusion compression processed aluminum alloy 5052 samples

شکل 9 نمودار تغییرات سختی در امتداد ضخامت برای نمونه‌ی آنیل و نمونه‌های یک و دو پاس فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک شده از جنس آلیاژ آلومینیوم 5052

3-4- نتایج شکست‌نگاری

تصاویر شکست‌نگاری بدست آمده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (اس‌ای‌ام) از سطح شکست نمونه‌های کشیده شده در

3-3- نتایج سختی‌سنجی

در شکل 9، تغییرات میکروسختی در امتداد ضخامت لوله برای نمونه‌ی آنیل و نمونه‌های یک و دو پاس فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله شده، مشهود است. مطابق شکل 9، پس از انجام فرایند، سختی ماده افزایش می‌یابد.

در شکل 9 مشاهده می‌شود که توزیع سختی، در راستای ضخامت و در جهت گذر از سطح داخلی لوله به سمت سطح خارجی آن، سیری صعودی دارد. این سیر صعودی، هم‌سو با سیر صعودی توزیع کرنش در راستای ضخامت است. بنابراین، علت سختی بالاتر نواحی خارجی لوله نسبت به نواحی داخلی‌تر، اعمال کرنش بیشتر به ماده در این نواحی، در حین انجام فرایند است. افزایش سختی ماده پس از انجام فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید یک اتفاق رایج است. علت این رویداد، وقوع ریزدانه‌گی، افزایش مرزخانه‌ها، افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها، وقوع کارسختی در حین تغییرشکل پلاستیک، و توزیع ذرات رسوب فاز ثانویه در ماده‌ی زمینه است. همچنین، بنا به رابطه‌ی هال‌پیچ برای سختی، با کاهش اندازه‌ی دانه‌ها، سختی ماده افزایش می‌یابد [54]. بنا به شکل 9، مقدار میانگین سختی نمونه‌ی یک و

حفره‌ها، سپس رشد و اتصال آن‌ها به یکدیگر به‌منظور تشکیل ترک، در ادامه‌ی آن، رشد ترک و شکست نهایی، می‌باشد. این مشاهده، حاکی از وقوع عمدتاً شکست داکتیل در نمونه‌هاست. با این وجود، نشانه‌هایی از وقوع شکست ترد نیز در نمونه‌ی دو پاس فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله شده، قابل تشخیص است. به‌نظر می‌رسد که انجام پاس‌های بعدی فرایند، منجر به بروز رفتار شکست عمدتاً ترد شود.

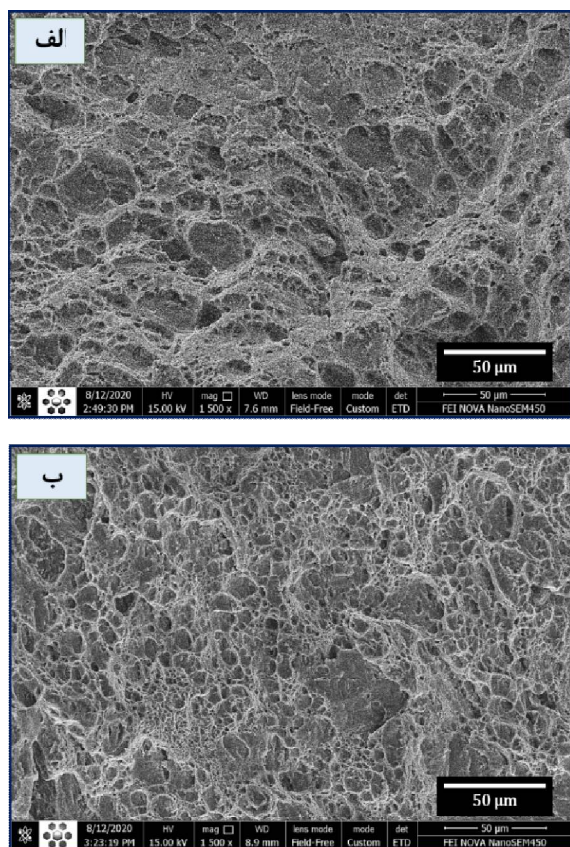


Fig. 10 The scanning electron microscopy (SEM) images taken from the fracture surface of the annealed and the two-pass hydrostatic tube cyclic extrusion compression processed aluminum alloy 5052 samples

شکل 10 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (اس‌ای‌ام) گرفته شده از سطح شکست (الف) نمونه‌ی آنیل و (ب) نمونه‌ی دو پاس فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک شده از جنس آلیاژ آلومینیوم 5052

4- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، روش تغییرشکل پلاستیک شدید اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله طی دو پاس بر روی لوله از جنس آلیاژ آلومینیوم 5052 انجام شد. سپس تأثیر فرایند بر ریزساختار و خواص مکانیکی قطعه مطالعه گردید. برخی از مهم‌ترین نتایج این پژوهش عبارت‌اند از:

1- فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله قابلیت تولید لوله‌های فوق ریزدانه با خواص مکانیکی قابل توجه را دارد.

آزمون کشش، در شکل 10 نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشهود است، سطح شکست نمونه‌ی آنیل دارای حفره‌های درشت‌تر، عمیق‌تر و هم‌محورتر می‌باشد که می‌تواند گویای رفتار شکست داکتیل باشد [16، 57]. همچنین، این مشاهده، نشان‌دهنده‌ی خاصیت شکل‌پذیری بالای نمونه‌ی آنیل در مقایسه با نمونه‌ی دو پاس فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله شده می‌باشد. بنا به شکل 10، با انجام دو پاس فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله و متعاقباً با اعمال کرنش بالا به ماده، حفره‌های کوچک‌تر و کم‌عمق‌تری بوجود می‌آیند. چنین رفتاری در فرایندهای دیگر تغییرشکل پلاستیک شدید نیز گزارش شده است [58-60]. این اتفاق عمدتاً به وقوع ریزدانه‌گی و کارسختی در حین فرایند تغییرشکل پلاستیک شدید مربوط است [57، 61]. بنا به نتایج آزمون کشش که در بخش‌های قبل آورده شد، دو پاس فرایند اکستروژن فشاری تناوبی هیدرواستاتیک لوله به افزایش استحکام و کاهش درصد ازدیاد طول منجر می‌شود. بنابراین، با انجام دو پاس فرایند، از میزان تغییرشکل پلاستیک کاسته می‌شود. در این شرایط، حفره‌ها فرصت کافی برای رشد و اتصال به یکدیگر را ندارند که نتیجه‌ی این رویداد، ایجاد حفره‌های کوچک‌تر و کم‌عمق‌تر در سطح شکست است. همان‌طور که در شکل 10 قابل مشاهده است، سطح شکست نمونه‌ی دو پاس HTCEC شده دارای کوچک‌ترین و کم‌عمق‌ترین حفره‌هاست. همچنین، سطح شکست این نمونه، دارای بیشترین لبه‌ی برش است. این ویژگی نیز می‌تواند یکی از مشخصه‌های شکست داکتیل باشد که در آن، به‌جای این که حفره‌های از قبل ایجاد شده رشد کنند، تعداد زیادی حفره‌ی جدید ایجاد می‌شود [62، 63]. فازهای بین‌فلزی موجود در مرزدانه‌ها به عنوان یک نوع عیب، مکان‌های مناسبی برای جوانه‌زنی و رشد ترک هستند زیرا این فازها در محل‌هایی که قرار دارند، پیوستگی فاز زمینه را قطع می‌کنند و محل‌هایی آسیب‌پذیر محسوب می‌شوند. در محل این فازها، تمرکز تنش می‌تواند باعث جوانه‌زنی ترک شود [63]. ساختار فوق ریزدانه، می‌تواند توسط یک مکانیزم کند کردن¹ و لایه‌سازی² از انتشار ترک جلوگیری کند [48]. همچنین، توزیع همگن ذرات فاز بین‌فلزی در فاز زمینه می‌تواند رشد ترک را محدود کند. در این شرایط، ذرات بین‌فلزی نقشی سازنده در کنترل رشد ترک دارند [63]. در کل، رفتار شکست نمونه‌های شکل 10 نشان‌دهنده‌ی وقوع مراحل جوانه‌زنی

¹ Blunting

² Delamination

- 2- در این فرایند، به خاطر اعمال فشار پشتی بر روی قطعه، فشار هیدرواستاتیک بالایی وجود دارد که با به تأخیر انداختن مرحله‌ی جوانه‌زنی و رشد ترک، باعث جلوگیری از افت زیاد داکتیلیتی در لوله‌ی تولید شده می‌شود.
- 3- انجام دو پاس فرایند، ریزدانگی قابل توجهی را سبب شد. به طوری که، ریزساختاری شامل سلول/زیردانه‌های فوق ریز، با اندازه‌ی میانگین در حدود 635 نانومتر، که مرزهای آن‌ها را انباشته‌ی نابه‌جایی‌ها و نابه‌جایی‌های در هم تنیده شده تشکیل می‌داد، مشاهده شد. این در حالی بود که میانگین اندازه دانه‌ی قطعه‌ی آنیل در حدود 360 میکرومتر بود.
- 4- پس از دو پاس فرایند، مقدار استحکام نهایی و استحکام تسلیم، به ترتیب، 1/7 برابر و 2/6 برابر شد.
- 5- پس از دو پاس فرایند، میانگین مقدار سختی در راستای ضخامت لوله 2/1 برابر شد. همچنین، توزیع سختی در راستای ضخامت، مقداری غیریکنواخت شد؛ به این صورت که رفته‌رفته به سمت سطح خارجی لوله، سیری صعودی داشت.
- 5- فهرست علائم**
- d اندازه میانگین دانه (mm)
 r شعاع داخلی (mm)
 R شعاع خارجی (mm)
 r_e شعاع اکستروژن (mm)
 L طول اکستروژن (mm)
- علائم یونانی**
- α زاویه اکستروژن (° درجه)
 φ زاویه شمول (° درجه)
- 6- مراجع**
- [1] M. Eftekhari, M. Ahmadi, and M. R. Farahani, "Evaluation of Ultrasonic Method Capability in Measurement of Longitudinal Welding Residual Stress through Thickness," *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 8, No. 3, pp. 29-47, 2018.
- [2] M. Eftekhari, m. ahmadi najaf abadi, and M. Farahani, "Evaluation of longitudinal residual stress variations along the thickness of welded joint of 5086 aluminum alloy," *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 7, No. 3, pp. 1-16, 2017.
- [3] M. Eftekhary, and M. Ahmadi Najafabadi, "Evaluation of the Capability of Ultrasonic Method for Measuring Longitudinal Welding Residual Stress, by Validating with X-Ray Diffraction Method," *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 1-10, 2015.
- [4] M. Eftekhari, Gh. Faraji, O. Shapoorgan, M. Baniassadi, "Experimental investigation of the effect of temperature in extrusion process of ECAPed nanostructured Titanium," *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 52-60, 2017.
- [5] M. Eftekhari, G. Faraji, S. Nikbakht, R. Amin, R. Sharifzadeh, M. Mohammadpour, and R. Hildyard, "Processing and characterization of nanostructured Grade 2 Ti processed by combination of warm isothermal ECAP and extrusion," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 703, pp. 551-558, 2017.
- [6] A. P. Zhilyaev, and T. G. Langdon, "Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications," *Progress in Materials Science*, Vol. 53, No. 6, pp. 893-979, 2008.
- [7] Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji, and T. Sakai, "Novel ultra-high straining process for bulk materials—development of the accumulative roll-bonding (ARB) process," *Acta materialia*, Vol. 47, No. 2, pp. 579-583, 1999.
- [8] A. Nagasekhar, U. Chakkingal, and P. Venugopal, "Candidature of equal channel angular pressing for processing of tubular commercial purity-titanium," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 173, No. 1, pp. 53-60, 2006.
- [9] L. Tóth, M. Arzaghi, J. Fundenberger, B. Beausir, O. Bouaziz, and R. Arruffat-Massion, "Severe plastic deformation of metals by high-pressure tube twisting," *Scripta Materialia*, Vol. 60, No. 3, pp. 175-177, 2009.
- [10] M. Mohebbi, and A. Akbarzadeh, "Accumulative spin-bonding (ASB) as a novel SPD process for fabrication of nanostructured tubes," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 1, pp. 180-188, 2010.
- [11] A. Zangiabadi, and M. Kazeminezhad, "Development of a novel severe plastic deformation method for tubular materials: Tube Channel Pressing (TCP)," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 15, pp. 5066-5072, 2011.
- [12] G. Faraji, M. M. Mashhadi, and H. S. Kim, "Tubular channel angular pressing (TCAP) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes," *Materials Letters*, Vol. 65, No. 19-20, pp. 3009-3012, 2011.
- [13] G. Faraji, A. Babaei, M. M. Mashhadi, and K. Abrinia, "Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP) as a new severe plastic deformation method for cylindrical tubes," *Materials Letters*, Vol. 77, pp. 82-85, 2012.
- [14] J. T. Wang, Z. Li, J. Wang, and T. G. Langdon, "Principles of severe plastic deformation using tube high-pressure shearing," *Scripta Materialia*, Vol. 67, No. 10, pp. 810-813, 2012.
- [15] A. Babaei, and M. Mashhadi, "Tubular pure copper grain refining by tube cyclic extrusion-compression (TCEC) as a severe plastic deformation technique," *Progress in Natural Science: Materials International*, Vol. 24, No. 6, pp. 623-630, 2014.
- [16] H. Jafarzadeh, and K. Abrinia, "Fabrication of ultra-

- [28] M. Motallebi Savarabadi, G. Faraji, and M. Eftekhari, "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*, Vol. 20, No. 4, pp. 933-941, 2020.
- [29] A. Fata, M. Eftekhari, G. Faraji, and M. M. Mashhadi, "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*, Vol. 27, No. 5, pp. 2330-2337, 2018.
- [30] M. Eftekhari, A. Fata, G. Faraji, and M. Mashhadi, "Hot tensile deformation behavior of Mg-Zn-Al magnesium alloy tubes processed by severe plastic deformation," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 742, pp. 442-453, 2018.
- [31] H. Lanjewar, S. Naghdy, F. Vercruysse, L. A. Kestens, and P. Verleysen, "Severe plastically deformed commercially pure aluminum: Substructure, micro-texture and associated mechanical response during uniaxial tension," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 764, pp. 138195, 2019.
- [32] A. Mishra, V. Richard, F. Gregori, R. Asaro, and M. Meyers, "Microstructural evolution in copper processed by severe plastic deformation," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 410, pp. 290-298, 2005.
- [33] N. Pardis, C. Chen, M. Shahbaz, R. Ebrahimi, and L. S. Toth, "Development of new routes of severe plastic deformation through cyclic expansion-extrusion process," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 613, pp. 357-364, 2014.
- [34] M. R. Toroghinejad, R. Jamaati, J. Dutkiewicz, and J. A. Szpunar, "Investigation of nanostructured aluminum/copper composite produced by accumulative roll bonding and folding process," *Materials & Design*, Vol. 51, pp. 274-279, 2013.
- [35] M. Mesbah, G. Faraji, and A. R. Bushroa, "Characterization of nanostructured pure aluminum tubes produced by tubular channel angular pressing (TCAP)," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 590, pp. 289-294, 2014.
- [36] M. Howeyze, H. Arabi, A. Eivani, and H. Jafarian, "Strengthening of AA5052 aluminum alloy by equal channel angular pressing followed by softening at room temperature," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 720, pp. 160-168, 2018.
- [37] T. G. Langdon, "The principles of grain refinement in equal-channel angular pressing," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 462, No. 1-2, pp. 3-11, 2007.
- [38] S. S. Kumar, and T. Raghu, "Structural and mechanical behaviour of severe plastically deformed high purity aluminium sheets processed by constrained groove pressing technique," *Materials & Design*, Vol. 57, pp. 114-120, 2014.
- [39] M. Alizadeh, and E. Salahinejad, "Processing of fine grained aluminium tubes by RTES technique," *Materials Characterization*, Vol. 102, pp. 1-8, 2015.
- [17] H. Torabzadeh, G. Faraji, and E. Zalnezhad, "Cyclic Flaring and Sinking (CFS) as a new severe plastic deformation method for thin-walled cylindrical tubes," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 69, No. 6, pp. 1217-1222, 2016.
- [18] A. Babaei, H. Jafarzadeh, and F. Esmaeili, "Tube twist pressing (TTP) as a new severe plastic deformation method," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 71, No. 3, pp. 639-648, 2018.
- [19] M. M. Savarabadi, G. Faraji, and E. Zalnezhad, "Hydrostatic tube cyclic expansion extrusion (HTCEE) as a new severe plastic deformation method for producing long nanostructured tubes," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 785, pp. 163-168, 2019.
- [20] M. M. Savarabadi, G. Faraji, and M. Eftekhari, "Microstructure and Mechanical Properties of the Commercially Pure Copper Tube After Processing by Hydrostatic Tube Cyclic Expansion Extrusion (HTCEE)," *Metals and Materials International*, Vol. 27, No. 6, pp. 1686-1700, 2021.
- [21] M. Eftekhari, G. Faraji, and M. Bahrami, "A novel severe plastic deformation technique with potential for producing relatively long ultrafine grained tubes," *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 21, No. 10, pp. 661-672, 2021.
- [22] M. Howeyze, A. Eivani, H. Arabi, and H. Jafarian, "Effects of deformation routes on the evolution of microstructure, texture and tensile properties of AA5052 aluminum alloy," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 732, pp. 120-128, 2018.
- [23] K. Yogesha, A. Joshi, N. Kumar, and R. Jayaganthan, "Effect of cryo groove rolling followed by warm rolling (CGW) on the mechanical properties of 5052 Al alloy," *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 32, No. 12, pp. 1336-1344, 2017.
- [24] Y. Li, L. Li, J. Nie, Y. Cao, Y. Zhao, and Y. Zhu, "Microstructural evolution and mechanical properties of a 5052 Al alloy with gradient structures," *Journal of Materials Research*, Vol. 32, No. 23, pp. 4443, 2017.
- [25] R. Vafaei, M. Toroghinejad, and R. Pippan, "Evaluation of mechanical behavior of nano-grained 2024 Al alloy during high pressure torsion (HPT) process at various temperatures," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 536, pp. 73-81, 2012.
- [26] N. Kamikawa, and T. Furuhashi, "Accumulative channel-die compression bonding (ACCB): A new severe plastic deformation process to produce bulk nanostructured metals," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, No. 8, pp. 1412-1418, 2013.
- [27] C. Chang, P. Sun, and P. Kao, "Deformation induced grain boundaries in commercially pure aluminium," *Acta Materialia*, Vol. 48, No. 13, pp. 3377-3385, 2000.

- [50] T. Tsai, P. Sun, P. Kao, and C. Chang, "Microstructure and tensile properties of a commercial 5052 aluminum alloy processed by equal channel angular extrusion," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 342, No. 1-2, pp. 144-151, 2003.
- [51] H. Song, Y. Kim, and W. Nam, "Mechanical properties of ultrafine grained 5052 Al alloy produced by accumulative roll-bonding and cryogenic rolling," *Metals and Materials International*, Vol. 12, No. 1, pp. 7-12, 2006.
- [52] M. Howeyze, A. Eivani, H. Arabi, H. Jafarian, and N. Park, "The effect of amount of pre-strain using equal channel angular pressing on softening response of AA5052 alloy," *Journal of Materials Research and Technology*, 2020.
- [53] W. Bo, X.-h. Chen, F.-s. Pan, J.-j. Mao, and F. Yong, "Effects of cold rolling and heat treatment on microstructure and mechanical properties of AA 5052 aluminum alloy," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 25, No. 8, pp. 2481-2489, 2015.
- [54] K. Bhansali, A. Keche, C. Gogte, and S. Chopra, "Effect of grain size on Hall-Petch relationship during rolling process of reinforcement bar," *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- [55] C. Xiang, G.-s. Huang, S.-s. Liu, T.-z. Han, B. Jiang, A.-t. Tang, Y.-t. Zhu, and F.-s. Pan, "Grain refinement and mechanical properties of pure aluminum processed by accumulative extrusion bonding," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 29, No. 3, pp. 437-447, 2019.
- [56] Y. Wang, and E. Ma, "Three strategies to achieve uniform tensile deformation in a nanostructured metal," *Acta Materialia*, Vol. 52, No. 6, pp. 1699-1709, 2004.
- [57] H. Alvandi, and K. Farmanesh, "Microstructural and mechanical properties of nano/ultra-fine structured 7075 aluminum alloy by accumulative roll-bonding process," *Procedia Materials Science*, Vol. 11, pp. 17-23, 2015.
- [58] S. Nikbakht, M. Eftekhari, Gh. Faraji, "Study of Microstructure and mechanical properties of pure commercial titanium via combination of Equal channel angular pressing and Extrusion," *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 453-461, 2017.
- [59] A. Fata, M. Eftekhari, Gh. faraji, M. Mosavi Mashhadi, "Effects of PTCAP as a severe plastic deformation method on the mechanical and microstructural properties of AZ31 magnesium alloy," *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 409-416, 2017.
- [60] M. Eftekhari, A. Fata, Gh. faraji, M. Mosavi Mashhadi, "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*, Vol. 18, No. 5, pp. 100-107, 2018.
- [61] D. Fang, Q. Duan, N. Zhao, J. Li, S. Wu, and Z. ultrafine-grained aluminum by cross accumulative roll-bonding," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 595, pp. 131-134, 2014.
- [40] S. Naghdy, L. Kestens, S. Hertelé, and P. Verleysen, "Evolution of microstructure and texture in commercial pure aluminum subjected to high pressure torsion processing," *Materials Characterization*, Vol. 120, pp. 285-294, 2016.
- [41] B. Omranpour, Y. Ivanisenko, R. Kulagin, L. Kommel, E. G. Sanchez, D. Nugmanov, T. Scherer, A. Heczal, and J. Gubicza, "Evolution of microstructure and hardness in aluminum processed by High Pressure Torsion Extrusion," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 762, pp. 138074, 2019.
- [42] H. T. Kashi, M. Bahrami, J. S. Karami, and G. Faraji, "Microstructure and Mechanical Properties of the Ultrafine-Grained Copper Tube Produced by Severe Plastic Deformation," *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 32-40, 2017.
- [43] Y. Ito, and Z. Horita, "Microstructural evolution in pure aluminum processed by high-pressure torsion," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 503, No. 1-2, pp. 32-36, 2009.
- [44] J. F. Derakhshan, M. Parsa, and H. Jafarian, "Microstructure and mechanical properties variations of pure aluminum subjected to one pass of ECAP-Conform process," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 747, pp. 120-129, 2019.
- [45] G. Ebrahimi, A. Barghamadi, H. Ezatpour, and A. Amiri, "A novel single pass severe plastic deformation method using combination of planar twist extrusion and conventional extrusion," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 47, pp. 427-436, 2019.
- [46] M. Reihanian, R. Ebrahimi, N. Tsuji, and M. Moshksar, "Analysis of the mechanical properties and deformation behavior of nanostructured commercially pure Al processed by equal channel angular pressing (ECAP)," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 473, No. 1-2, pp. 189-194, 2008.
- [47] S. Jamali, G. Faraji, and K. Abrinia, "Hydrostatic radial forward tube extrusion as a new plastic deformation method for producing seamless tubes," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 88, No. 1-4, pp. 291-301, 2017.
- [48] M. Moradpour, F. Khodabakhshi, S. Mohebpour, H. Eskandari, and M. Haghshenas, "Finite element modeling and experimental validation of CGP classical and new cross routes for severe plastic deformation of an Al-Mg alloy," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 37, pp. 348-361, 2019.
- [49] Y. G. Ko, "Effect of differential speed rolling strain on microstructure and mechanical properties of nanostructured 5052 Al alloy," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 586, pp. S205-S209, 2014.

- magnesium alloy,” *Materials & Design*, Vol. 49, pp. 209-219, 2013.
- [63] J. Jiang, T. Yuan, W. Zhang, A. Ma, D. Song, and Y. Wu, “Effect of equal-channel angular pressing and post-aging on impact toughness of Al-Li alloys,” *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 733, pp. 385-392, 2018.
- Zhang, “Tensile properties and fracture mechanism of Al-Mg alloy subjected to equal channel angular pressing,” *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 459, No. 1-2, pp. 137-144, 2007.
- [62] J. Deng, Y. Lin, S.-S. Li, J. Chen, and Y. Ding, “Hot tensile deformation and fracture behaviors of AZ31