



An Experimental Investigation on a Modified Friction Assisted Tube Straining Method

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mirahmadi J.¹ MSc,
Hosseini S.H.¹ PhD,
Sedighi M.*¹ PhD

How to cite this article

Mirahmadi J, Hosseini S.H, Sedighi M. An Experimental Investigation on a Modified Friction Assisted Tube Straining Method. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(9): 2079-2084.

ABSTRACT

This paper presents a novel severe plastic deformation method entitled modified friction assisted tube straining for producing ultrafine-grained cylindrical tubes. Using friction power generates heat to locally increase temperature of the deformation area and creates severe combined strains and lower pressing force. Experimental tests were executed on Cu/30Zn alloy to investigate applicability of the presented method. The optimum process parameters, 710Rev/min rotary speed and 0.08mm/Rev feed rate were found, applying experimental test to process tubes fault free. Microstructure study of processed specimens showed a significant grain refinement from the initial value of 76 μ m to 9 μ m and 7 μ m in longitudinal and peripheral directions, respectively. Yield stress and ultimate tensile strength of processed specimens increased to 325 and 202MPa from the initial values of 160MPa in peripheral and longitudinal directions, respectively. Also, hardness significantly increased to 72Hv from the initial value of 48Hv.

Keywords Severe Plastic Deformation; Mechanical Properties; Microstructure; Friction

¹Faculty of Mechanical Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Faculty of Mechanical Engineering, Iran University of Science & Technology, Narmak, Tehran, Iran
Phone: +98 (21) 77491228
Fax: +98 (21) 77240488
sedighi@iust.ac.ir

Article History

Received: June 12, 2018
Accepted: January 26, 2019
ePublished: September 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Severe plastic deformation of tubular AA 6061 via equal channel angular pressing [2] Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications [3] Microstructure and properties of AgSnO₂ composites by accumulative roll-bonding process [4] Fabrication of nanostructured aluminum sheets using four-layer accumulative roll bonding. Materials and Manufacturing [5] Severe plastic deformation of metals by high-pressure tube twisting [6] Development of a novel severe plastic deformation method for tubular materials: Tube channel pressing (TCP) [7] Tubular channel angular pressing (TCAP) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes [8] Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP) as a new severe plastic deformation method for cylindrical tubes [9] Tube cyclic expansion-extrusion (TCEE) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes ... [10] Fabrication of ultra-fine grained Aluminium tubes by RTES technique [11] Producing thin-walled tube of pure copper by severe plastic deformation of shear extrusion [12] On the feasibility of a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes; friction assisted tubular channel pressing (FATCP) [13] E8 - 04 Standard test methods for tension testing of metallic materials [Online] [14] Mechanics and full-field deformation study of the ring hoop tension test [15] Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot cold and severe plastic deformation conditions [16] Voronoi diagram and microstructure of weldment. Dordrecht, Netherlands: Springer; 2015 [17] Dynamic recrystallization of copper polycrystals with different purities [18] Microstructural modeling of dynamic recrystallization using irregular cellular automata [19] Severe mechanical anisotropy of high-strength ultrafine grained Cu-Zn tubes processed by parallel tubular channel angular pressing (PTCAP) [20] A novel combined severe plastic deformation method for producing thin-walled ultrafine grained cylindrical tubes [21] Nano-grained 70/30 brass strip produced by accumulative roll-bonding (ARB) process [22] Applicability of a modified backward extrusion process on commercially pure aluminum

بررسی تجربی فرآیند اصطکاکی اصلاح‌شده تغییر شکل پلاستیک شدید لوله برای فرآوری لوله‌های مستحکم

جاسم میراحمدی MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

سیدهادی حسینی PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محمد صدیقی PhD*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله یک روش نوین تغییر شکل پلاستیک شدید لوله تحت عنوان فرآیند اصطکاکی اصلاح‌شده تغییر شکل پلاستیک شدید لوله برای تولید لوله‌هایی با ساختار بسیار ریز و خواص مکانیکی مطلوب ارائه شده است. بدین ترتیب با استفاده از چرخش قالب و تغذیه لوله درون کانال انحنا دار با تبدیل توان اصطکاک به گرمای ورودی، دما در منطقه تغییر شکل افزایش یافته و باعث ایجاد کرنش‌های ترکیبی شدید و کاهش نیروی فشاری شده است. آزمایش‌های تجربی برای بررسی امکان‌پذیری فرآیند روی لوله‌های برنجی تکرار شد و پارامترهای بهینه برای انجام فرآیند به دست آمد. مقدار پارامترهای بهینه برای سرعت دورانی ۷۱۰ دور بر دقیقه و برای نرخ پیشروی ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور انتخاب شد. بررسی میکروساختار نمونه‌های فرآوری‌شده کاهش چشمگیر اندازه دانه از مقدار اولیه ۷۶ میکرومتر تا ۹ و ۷ میکرومتر به ترتیب در راستاهای طولی و محیطی را نشان داده است. استحکام نمونه‌های فرآوری‌شده در راستاهای محیطی و طولی از مقدار اولیه ۱۶۰ مگاپاسکال به ترتیب تا مقادیر ۲۰۲ و ۳۲۵ مگاپاسکال افزایش یافتند. همچنین سختی از مقدار اولیه ۴۸ تا مقدار ۷۲ ویکرز افزایش داشته است.

کلیدواژه‌ها: تغییر شکل پلاستیک شدید، خواص مکانیکی، ریزساختار، لوله، اصطکاک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۶

* نویسنده مسئول: sedighi@iust.ac.ir

۱- مقدمه

روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید از جمله روش‌هایی هستند که با استفاده از آنها می‌توان موادی با ساختار دانه‌ای خشن را به مواد نانو ساختار یا فوق ریزدانه تبدیل کرد. در طول دو دهه گذشته، روش‌های مختلف تغییر شکل پلاستیک شدید ابداع شده، به‌گونه‌ای که در سال‌های اخیر تمرکز این روش‌ها به سمت فرآوری مقاطع پرکاربرد صنعتی مانند لوله‌ها سوق یافته است. از جمله روش‌های اصلی و پایه‌ای تغییر شکل پلاستیک شدید می‌توان به پرس در کانال‌های همسان زاویه‌دار [1]، پیچش تحت فشار بالا [2]، نورد تجمعی [3]، فشردن و اکستروژن متوالی [4] اشاره کرد. اگرچه روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید بیان‌شده دارای مزایای فراوانی هستند، ولی محدودیت‌هایی چون شکل و اندازه قطعات فرآوری‌شده در این روش‌ها مشهود است. بدین منظور در طول سال‌های اخیر، روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید روی مقاطع پرکاربردی چون لوله‌ها توسعه قابل توجهی داشته‌اند. برخی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید لوله از فرآیندهای پایه‌ای استخراج شده‌اند که از جمله آنها می‌توان به پیچش لوله تحت فشار بالا [5]، پرس لوله در کانال [6]، پرس لوله در کانال‌های موازی زاویه‌دار [7]، پرس لوله در کانال‌های موازی زاویه‌دار [8]، اکستروژن کردن و فشردن تناوبی لوله‌ها [9]، بزرگ و کوچک کردن تناوبی لوله‌ها [10] و اکستروژن برشی [11] اشاره کرد. علی‌رغم اینکه روش‌های مذکور دارای مزایایی هستند، معایبی نیز در آنها وجود

دارد که از صنعتی‌شدن این روش‌ها جلوگیری به عمل می‌آورد. از جمله آنها می‌توان به توزیع غیریکنواخت کرنش محیطی در فرآیند، طول بسیار کوتاه لوله، توزیع غیریکنواخت سختی در راستای ضخامت لوله و نیاز به نیروهای بالا برای تغییر شکل پلاستیک شدید اشاره کرد. بدین منظور، اخیراً روش تغییر شکل پلاستیک شدید لوله تحت عنوان پرس لوله در کانال به‌کمک اصطکاک [12] برای کاهش معایب روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید لوله ارائه شده است. در این روش از توان اصطکاک برای گرمایش موضعی و کاهش نیروهای مورد نیاز برای تغییر شکل لوله استفاده شده است. این فرآیند یک روش دومرحله‌ای است که در مرحله اول قطر لوله افزایش می‌یابد و در مرحله دوم، لوله به حالت اولیه باز می‌شود. اگرچه این روش طول لوله فرآوری‌شده را به‌طور محسوسی افزایش داده است، با این وجود دومرحله‌ای بودن از جمله معایب این روش محسوب می‌شود. به همین دلیل در این مطالعه، روش اصطکاکی تغییر شکل پلاستیک شدید بهبودیافته به‌منظور تک‌مرحله‌ای کردن این فرآیند معرفی شده است.

۲- اصول روش اصطکاکی بهبودیافته تغییر شکل پلاستیک شدید لوله

شماره فرآیند اصلاح‌شده تغییر شکل پلاستیک شدید لوله به‌کمک اصطکاک در شکل ۱ نشان داده شده است. مجموعه آزمایشگاهی در این فرآیند، متشکل از ماندلر، قالب و محفظه نگهدارنده است. نحوه قراگیری قالب و ماندلر به‌گونه‌ای است که کانالی مانند آنچه که در شکل ۱- b نشان داده شده است را تشکیل می‌دهد. نحوه انجام این فرآیند به این صورت است که مجموعه قالب با استفاده از دستگاهی مانند دستگاه تراش می‌چرخد و لوله با پیشروی دستگاه به سمت قالب هدایت می‌شود. با رسیدن لوله به منطقه تغییر شکل، اصطکاک شدید بین لوله و قالب به گرما تبدیل می‌شود و دمای ناحیه تغییر شکل را افزایش می‌دهد. این افزایش دما چندین اثر را در این فرآیند به‌دنبال خواهد داشت. اول اینکه باعث کاهش شدید نیروهای لازم برای انجام فرآیند خواهد شد. همچنین اصطکاک به‌وجودآمده بین قالب و لوله سبب ایجاد کرنش‌های موضعی به لوله شده و سبب تحولات ریزساختاری و مکانیکی خواهد شد. در این فرآیند، پارامترهای متغیر، نرخ پیشروی و سرعت دورانی دستگاه تراش هستند. به‌طور کلی هرچه سرعت دورانی قالب بیشتر باشد، دمای ایجادشده در ناحیه تغییر شکل بیشتر خواهد بود. افزایش پیشروی نیز اثر معکوس سرعت دورانی دارد. یعنی با افزایش نرخ پیشروی دمای ناحیه تغییر شکل کاهش خواهد یافت. لوله فلزی در فرآیند مذکور از یک کانال با شکل خاص عبور می‌کند که در شکل ۱- b می‌توان مشاهده کرد. بدین ترتیب لوله از سه منطقه زاویه‌دار با زوایای نشان‌داده‌شده عبور می‌کند و به حالت اولیه خود باز می‌گردد. با عبور لوله از این کانال، کرنش‌های پلاستیک محوری و برشی به لوله وارد می‌شود که مقادیر آنها را می‌توان از رابطه ۱ تخمین زد [6]:

$$\varepsilon_{rz} = 2Cot\left(\frac{\psi}{2}\right) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \ln \frac{R_0}{R_1}$$

که در آن ε_{rz} کرنش برشی، ε_{θ} کرنش محیطی منتج از عبور لوله از کانال، ψ زاویه برشی هر انحنا و R_0 و R_1 شعاع‌های داخلی قالب است [6]. بدین ترتیب مقدار کرنش معادل ε_{eq} را می‌توان از

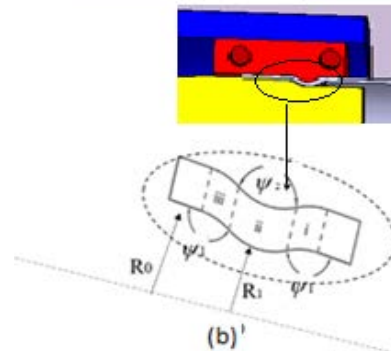
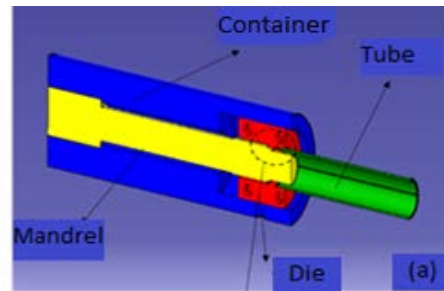
$$\varepsilon_{eq} = 2\sqrt{\frac{2}{3}(2\varepsilon_{\theta}^2 + 2\varepsilon_{r_{z\psi_1}}^2 + 2\varepsilon_{r_{z\psi_2}}^2)} \quad (2)$$

یافت، دمای قسمت تغییر شکل نیافته افزایش یافت و سبب پیچش لوله در منطقه تغییر شکل نیافته شد. در سرعت ۷۱۰ حالت بهینه اتفاق افتاد و فرآیند بدون هیچ مشکلی کامل شد. بدین ترتیب حالت بهینه برای پارامترهای متغیر به صورت سرعت دورانی ۷۱۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور به دست آمد.

نمونه‌های آنیل و فرآوری شده برای انجام آزمایش‌های کشش، سختی و متالوگرافی برش داده شده و آماده شدند. آزمایش‌های کشش با سرعت کشش فک یک میلی‌متر بر ثانیه، در راستای محیطی و طولی برای نمونه‌های آنیل و فرآوری شده با استفاده از دستگاه سنتام براساس استاندارد ASTM E8M انجام شد [13, 14]. آزمایش میکروسختی ویکرز با اعمال بار ۳۰۰ گرم در ۱۵ ثانیه انجام شد. ریزساختار نمونه‌های آنیل و فرآوری شده با استفاده از میکروسکوپ نوری با نور پولاریزه بررسی شد. برای حکاکی شیمیایی نمونه‌ها از محلول نیتریک اسید ۶۸٪ با زمان نگهداری ۳ ثانیه استفاده شده است. برای انجام آزمون کشش محیطی از فک‌های مخصوصی استفاده شده که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲) نمایش تجهیزات مورد استفاده برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی در راستای محیطی



شکل ۱) شماتیک مجموعه آزمایشگاهی فرآیند اصطکاکی اصلاح‌شده تغییر شکل پلاستیک شدید لوله

۳- آزمایش‌های تجربی

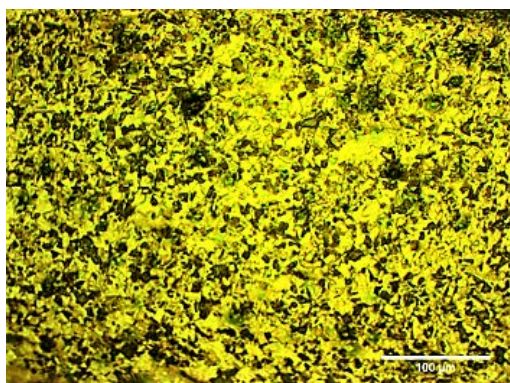
در این تحقیق از لوله برنجی با ضخامت یک میلی‌متر، طول ۱۷۰ میلی‌متر و قطر خارجی ۲۰ میلی‌متر به منظور انجام آزمایش‌های تجربی استفاده شده است. قبل از انجام فرآیند برای دستیابی به ساختار دانه‌ای کاملاً هم‌محور، نمونه‌ها تحت عملیات آنیلینگ قرار گرفتند. عملیات آنیل برای لوله برنجی به مدت ۱ ساعت و در دمای ۶۰۰°C در کوره انجام شد. آزمایش‌های عملی با استفاده از دستگاه تراش معمولی انجام شد. بدین منظور لوله روی مرغک و قالب روی سه نظام سوار شدند. روند انجام آزمایش‌ها به گونه‌ای بود که با دوران قالب لوله با یک سرعت پیشروی ثابت به درون قالب تغذیه شد. انتخاب پارامتر بهینه بر مبنای کامل شدن فرآیند بدون هیچ‌گونه عیبی صورت گرفت. به طور کلی دو عامل مانع از کامل شدن فرآیند اصطکاکی می‌شود. افزایش نیرو و کماتش لوله به دلیل کم بودن دمای منطقه تغییر شکل و افزایش دمای منطقه تغییر شکل نیافته و نرم شدن این قسمت سبب پیچش لوله در این قسمت در گشتاورهای بسیار پایین می‌شود. در عمل، آزمایش‌ها در سه سرعت دورانی ۵۰۰، ۷۱۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه در پیشروی ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور انجام شده است. در حالتی که سرعت دورانی ۵۰۰ انتخاب شد، نیروی مورد نیاز در فرآیند به قدری بالا بود که سبب کماتش لوله شد. در حالتی که سرعت دورانی به ۱۰۰۰ افزایش

۴- نتایج و بحث

شکل ۳ لوله فرآوری شده با استفاده از فرآیند اصطکاکی تغییر شکل پلاستیک شدید لوله را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود لوله با پارامترهای انتخاب شده با کیفیت بسیار بالایی فرآوری شده و از کانال انحنا دار عبور کرده است. بدین ترتیب با استفاده از روش مذکور، لوله برنجی تنها در یک مرحله فرآوری شده و به حالت اولیه خود باز می‌شود که نشان‌دهنده مزیت این روش نسبت به روش دومرحله‌ای است. یعنی در فرآیند ارائه شده، میزان زمان فرآوری لوله به مراتب کمتر خواهد بود، در صورتی که میزان کرنش‌های اعمالی در هر دو حالت تقریباً ۴ است [12].

شکل ۴ تحولات ریزساختار را برای نمونه فرآوری شده با استفاده از فرآیند اصطکاکی تغییر شکل پلاستیک شدید لوله را برای نمونه طولی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ابتدا قبل از اینکه لوله وارد کانال نشان داده شده در شکل ۴ شود، ساختاری کاملاً یکنواخت با دانه‌هایی هم‌محور دارد. به عبارت دیگر ساختار نشان داده شده در شکل ۴- a همان ریزساختار آنیل شده قبل از فرآیند است. به علاوه تعدادی دوقلوبی در ریزساختار اولیه قابل مشاهده است. اندازه متوسط دانه برای این ناحیه، با در نظر گرفتن مرزهای دوقلوبی ۷۶ میکرون اندازه‌گیری شد. با ورود لوله درون

کاهش اندازه دانه و ایجاد ریزساختار کاملاً متفاوت با ساختار اولیه را می‌توان به پدیده تبلور مجدد دینامیکی نسبت داد [13]. به‌طور کلی با اعمال کرنش، دانسیته نابه‌جایی‌ها در فلزات افزایش می‌یابد. با افزایش دانسیته نابه‌جایی‌ها، مرزهای فرعی در نواحی مستعد جوانه‌زنی مانند مرز دانه‌ها ایجاد می‌شوند و دانه‌های جدید شروع به جوانه‌زنی می‌کنند [12]. به این ترتیب اندازه دانه با تشکیل دانه‌های جدید کاهش می‌یابد. در مواد با انرژی نقص چیدمان پایین مانند آلیاژ برنج، تبلور مجدد دینامیکی به‌صورت ناپیوسته انجام می‌شود. یعنی در ابتدا با اعمال کرنش تا حد مشخصی، چگالی نابه‌جایی افزایش یافته و با رسیدن به این حد، تبلور مجدد دینامیکی آغاز خواهد شد [15]. نیروی محرکه برای تبلور مجدد انرژی تغییر شکل ذخیره‌شده به‌کمک کرنش پلاستیک است و نرخ تبلور مجدد با افزایش کرنش، نرخ کرنش و دما افزایش می‌یابد [16]. اندازه دانه متبلور شده در تغییر شکل حالت پایدار به دما و نرخ کرنش بستگی دارد. به‌طور کلی، هرچه نرخ کرنش بیشتر باشد، اندازه دانه بعد از تبلور مجدد دینامیکی کوچک‌تر خواهد بود. به‌علاوه هرچه دمای تغییر شکل بیشتر باشد، اندازه دانه بعد از تبلور مجدد دینامیکی بزرگ‌تر خواهد بود [18]. به همین علت، اندازه دانه به‌دست‌آمده در روش اصطکاکی تغییر شکل پلاستیک شدید لوله در مقایسه با سایر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید با ماده مشابه و میزان کرنش تقریباً یکسان بزرگ‌تر است [8]. شکل ۵ ریزساختار نهایی حاصل از فرآوری لوله با روش اصطکاکی تغییر شکل پلاستیک شدید لوله را در جهت محیطی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دانه‌هایی هم‌محور کاملاً متبلور شده در این شکل مشهود است. اندازه متوسط دانه در این نمونه به ۷ میکرون می‌رسد. با مقایسه ریزساختار حاصله در دو جهت طولی و عرضی می‌توان دریافت که تفاوت چندانی در دو جهت وجود ندارد. بدین ترتیب تفاوت اندک در اندازه دانه و نوع ریزساختار در دو جهت طولی و عرضی به همسان‌گردی خواص مکانیکی در دو جهت کمک خواهد کرد. با مقایسه میزان ناهمسان‌گردی در روش ارائه‌شده با فرآیند پرس لوله در کانال‌های موازی زاویه‌دار می‌توان دریافت که میزان ناهمسان‌گردی در روش ارائه‌شده بسیار کمتر است [19]. نمودار ۱، منحنی تنش-کرنش را برای لوله‌های آنیل و فرآوری‌شده با روش ارائه‌شده در راستای طولی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تنش تسلیم و استحکام نهایی در راستای طولی برای نمونه فرآوری‌شده افزایش قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. در مقابل، درصد ازدیاد طول به مقدار کمی کاهش می‌یابد. برای نمونه طولی، استحکام تسلیم از ۱۶۰ به ۲۰۲ مگاپاسگال و استحکام نهایی از ۲۶۰ به ۳۲۵ مگاپاسگال افزایش یافته است.

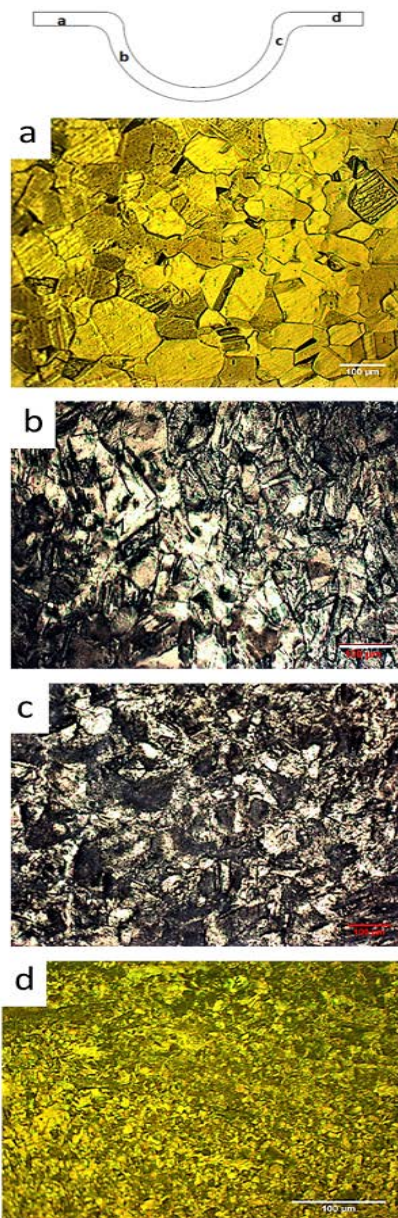


شکل ۵) تصویر متالوگرافی نمونه فرآوری‌شده در راستای محیطی

کانال، کرنش برشی حاصل از کانال زاویه‌دار، لوله را تحت تأثیر قرار می‌دهد و دچار تغییرات ریزساختاری می‌کند. مقدار کرنش‌های اعمال شده برای موضع b برابر با ۱/۴ است. همان‌طور که در شکل ۴-b نشان داده شده است ریزساختار اولیه پس از عبور از کانال زاویه‌دار دچار تحول می‌شود و اندازه متوسط دانه به ۲۵ میکرون کاهش می‌یابد. با رسیدن مواد به ناحیه c مقدار کرنش اعمال شده نسبت به منطقه b، ۰/۹ افزایش می‌یابد و اندازه دانه در ناحیه c به ۱۶ میکرون کاهش می‌یابد (شکل ۴-c). در نهایت ریزساختار لوله پس از عبور از کانال و اعمال کرنش ۱/۴ به‌طور کامل متحول می‌شود و اندازه آن به حدود ۹ میکرون می‌رسد.

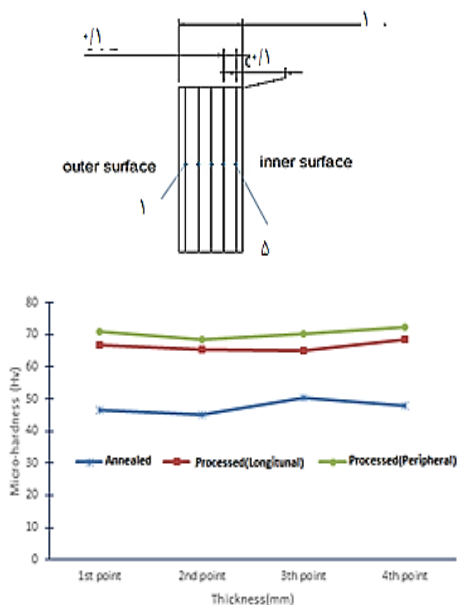


شکل ۳) لوله فرآوری‌شده با فرآیند اصطکاکی تغییر شکل پلاستیک شدید لوله



شکل ۴) تحول ریزساختار نواحی مختلف برای لوله فرآوری‌شده با روش اصطکاکی تغییر شکل پلاستیک شدید لوله در جهت طولی

خارجی بیشتر از نقاط میانی بوده که ناشی از تمرکز کرنش پلاستیک نزدیک در سطوح داخلی و خارجی است. متوسط سختی برای نمونه فرآوری‌شده در راستای طولی به ۶۸ و در راستای محیطی به ۷۲ ویکرز رسیده است. تغییر سختی در حین تغییر شکل پلاستیک شدید، نتیجه دو پدیده چگالی ناهنجاری و مرز دانه‌ها است [21, 22]. همان‌طور که بیان شد با اعمال کرنش به لوله، چگالی ناهنجاری‌ها درون دانه‌ها افزایش و اندازه دانه کاهش می‌یابد. در نتیجه با کاهش اندازه دانه نمونه فرآوری‌شده، سختی لوله افزایش یافته است.

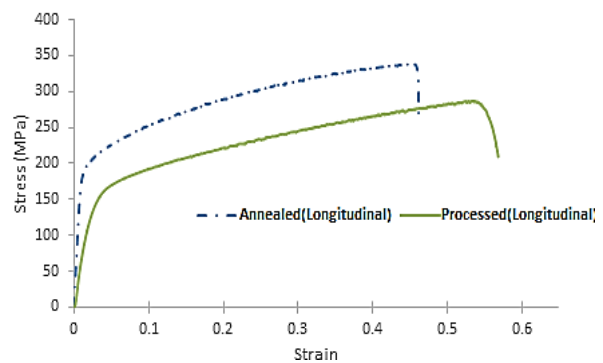


نمودار ۳) مقایسه میکروسختی ویکرز برای نمونه‌های آنیل و فرآوری‌شده در راستای محیطی در موقعیت‌های مشخص شده

۵- نتیجه‌گیری

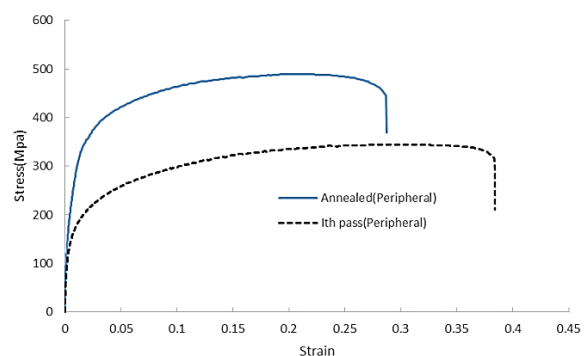
در این پژوهش، روش جدید تغییر شکل پلاستیک شدید لوله تحت عنوان تغییر شکل پلاستیک شدید لوله به کمک اصطکاک ارائه شده است. آزمایش‌های تجربی روی این فرآیند نتایج زیر را به همراه داشته است:

- ۱- امکان‌پذیری فرآیند اصطکاکی اصلاح‌شده تغییر شکل پلاستیک شدید لوله روی آلیاژ برنج نشان داده شد.
- ۲- با انجام آزمایش‌های تجربی، متغیرهای بهینه برای فرآیند به دست آمد، به گونه‌ای که سرعت دورانی ۷۱۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۰/۸ میلی‌متر بر دور، حالت بهینه در نظر گرفته شد.
- ۳- ریزساختار قطعات فرآوری‌شده با روش ارائه شده به طور کامل دچار تبلور مجدد دینامیکی شده و اندازه متوسط دانه به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است، به طوری که اندازه متوسط دانه از ۷۶ به ۹ میکرون در راستای طولی و ۹ میکرون در راستای محیطی کاهش پیدا کرد.
- ۴- بهبود در استحکام تسلیم و استحکام نهایی لوله‌های فرآوری‌شده مشاهده شد، به طوری که حداکثر مقدار استحکام تسلیم و استحکام نهایی در راستای طولی به ترتیب ۲۰۲ و ۳۰۹ مگاپاسکال به دست آمد که در مقایسه با نمونه آنیل در راستای طولی افزایشی در حدود ۲۱٪ در استحکام تسلیم و افزایش ۱۰ درصدی را نشان می‌دهد. به علاوه حداکثر مقدار استحکام تسلیم و استحکام نهایی در راستای محیطی به ترتیب ۳۲۵ و



نمودار ۱) مقایسه منحنی تنش-کرنش برای نمونه‌های آنیل و فرآوری‌شده در راستای طولی

افزایش استحکام در فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید را می‌توان به افزایش چگالی ناهنجاری‌ها و کاهش اندازه دانه نسبت داد [20]. براساس رابطه هال-پچ، کاهش اندازه دانه استحکام تسلیم را افزایش می‌دهد [12]. همان‌طور که بیان شد اندازه دانه ۷۶ میکرونی بعد از فرآیند به ۹ میکرون کاهش یافته است. در نتیجه میزان افزایش استحکام تسلیم بعد از فرآیند را می‌توان به کاهش اندازه دانه نسبت داد. اگرچه میزان استحکام تسلیم بعد از فرآیند اصطکاکی افزایش یافته، با این وجود میزان درصد ازدیاد طول در نمونه فرآوری‌شده ۴۸٪ است. به عبارت دیگر، وجود دانه‌های هم‌محور ریز با وجود اینکه استحکام لوله فرآوری‌شده را افزایش داده، شکل‌پذیری آن را به مقدار ناچیز کاهش داده است. روند مشابهی در مورد خواص مکانیکی نمونه‌های محیطی نیز دیده می‌شود. همان‌طور که در نمودار ۲ مشاهده می‌شود، خواص مکانیکی در نمونه‌های محیطی افزایش قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهد. برای نمونه‌های محیطی استحکام تسلیم از ۱۷۰ به ۳۲۵ مگاپاسکال و استحکام نهایی از ۳۴۰ به ۴۸۰ مگاپاسکال افزایش یافته است. میزان افزایش استحکام در نمونه محیطی بیشتر از افزایش آن برای نمونه طولی است. علت این پدیده را می‌توان به اختلاف اندازه دانه در دو راستا نسبت داد. نمودار ۳ تغییرات میکروسختی را برای نمونه اولیه و نمونه‌های فرآوری‌شده با روش ارائه شده در دو راستای طولی و عرضی مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات سختی در ضخامت در نمونه آنیل ناچیز است و متوسط سختی برای نمونه آنیل به ۵۰ ویکرز می‌رسد. توزیع سختی برای نمونه‌های فرآوری‌شده در راستای طولی و محیطی تقریباً یکنواخت باقی مانده است.



نمودار ۲) مقایسه منحنی تنش-کرنش برای نمونه‌های آنیل و فرآوری‌شده در راستای محیطی

مقدار سختی در هر دو راستا در نقاطی نزدیک به سطوح داخلی و

- 8- Faraji G, Babaei A, Mosavi Mashadi 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.
- 9- Babaei A, Mosavi Mashadi M, Jafarzadeh H. Tube cyclic expansion-extrusion (TCEE) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes. *Journal of Materials Science*. 2014;49(8):3158-3165.
- 10- Jafarzadeh H, Abrinia K. Fabrication of ultra-fine grained Aluminium tubes by RTES technique. *Materials Characterization*. 2015;102:1-8.
- 11- Chengpeng W, Fuguo L, Jinghui L. Producing thin-walled tube of pure copper by severe plastic deformation of shear extrusion. *Rare Metal Materials and Engineering*. 2015;44(10):2391-2395.
- 12- Hosseini SH, Sedighi M. On the feasibility of a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes; friction assisted tubular channel pressing (FATCP). *Journal of Mechanical Science Technology*. 2016;30(11):5153-5157.
- 13- ASTM International. E8 - 04 Standard test methods for tension testing of metallic materials [Internet]. ASTM International; 2004. Available from: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/E8-04.htm>
- 14- Dick CP, Korkolis YP. Mechanics and full-field deformation study of the ring hoop tension test. *International Journal of Solids and Structures*. 2014;51(18):3042-3057.
- 15- Sakai T, Belyakov A, Kaibyshev R, Miura H, Jonas JJ. Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot cold and severe plastic deformation conditions. *Progress in Materials Science*. 2014;60:130-207.
- 16- Cho J, Choi M. Voronoi diagram and microstructure of weldment. Dordrecht, Netherlands: Springer; 2015. pp. 1-9.
- 17- Gao W, Belyakov A, Miura H, Sakai T. Dynamic recrystallization of copper polycrystals with different purities. *Materials Science and Engineering: A*. 1999;265(1-2):233-239.
- 18- Yazdipour N, Davies CHJ, Hodgson PD. Microstructural modeling of dynamic recrystallization using irregular cellular automata. *Computational Materials Science*. 2008;44(2):566-576.
- 19- Tavakkoli V, Afrasiab M, Faraji G, Mashadi 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.
- 20- Abdolvand H, Sohrabi H, Faraji G, Yusof F. A novel combined severe plastic deformation method for producing thin-walled ultrafine grained cylindrical tubes. *Materials Letters*. 2015;143:167-171.
- 21- Pasebani S, Toroghinejad MR. Nano-grained 70/30 brass strip produced by accumulative roll-bonding (ARB) process. *Materials Science and Engineering: A*. 2010;527(3):491-497.
- 22- Hosseini SH, Abrinia K, Faraji G. Applicability of a modified backward extrusion process on commercially pure aluminum. *Materials & Design*. 2015;65:521-528.

۸۸مگاپاسکال بود که در مقایسه با نمونه آنیل، افزایشی در حدود ۴۷٪ در استحکام تسلیم و ۳۰٪ در استحکام نهایی ایجاد شد.

۵- بررسی نمودار تنش- کرنش نشان داد تغییر طول نمونه تا شکست برای نمونه فرآوری شده در راستای محیطی ۳۹٪ و در راستای طولی ۴۸٪ به دست آمد که در مقایسه با نمونه آنیل حدود ۱۰٪ افزایش در تغییر طول تا شکست در راستای محیطی و ۱۶٪ کاهش در درصد ازدیاد طول شکست در راستای طولی مشاهده شد.

۶- انجام فرآیند، بهبود میکروسختی در راستای طولی و محیطی نمونه فرآوری شده را نشان می‌دهد. حداکثر مقدار سختی بعد از انجام فرآیند برای نمونه طولی و محیطی به ترتیب ۷۲ و ۶۸ ویکرز بود که در راستای طولی و محیطی سختی به ترتیب حدود ۳۴ و ۳۰٪ افزایش یافت.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان این مقاله در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مد نظر گرفته و هنگام استفاده از منابع علمی به آن به عنوان مرجع اشاره کرده‌اند.

تعارض منافع: تمامی مطالب مذکور در این مقاله توسط نویسندگان آن انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

سهم نویسندگان: جاسم میراحمدی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۴۰٪)؛ سیدهادی حسینی (نویسنده دوم)، نگارنده بحث (۳۰٪)؛ محمد صدیقی (نویسنده سوم)، روش‌شناس (۳۰٪)

منابع مالی: تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

منابع

- 1- Jafarlou DM, Zalnezhad E, Hassan MA, Ezazi MA, Mardi NA, Hamouda AMS. Severe plastic deformation of tubular AA 6061 via equal channel angular pressing. *Material & Design*. 2016;90:1124-1135.
- 2- Zhilyaev AP, Langdon TG. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. *Progress in Materials Science*. 2008;53(6):893-979.
- 3- Xiaolong Z, Qiyang T, Yunhong Z. Microstructure and properties of AgSnO₂ composites by accumulative roll-bonding process. *Rare Metal Materials and Engineering*. 2017;46(4):942-945.
- 4- Yu HL, Lu C, Tieu AK, Kong C. Fabrication of nanostructured aluminum sheets using four-layer accumulative roll bonding. *Materials and Manufacturing Processes*. 2014;29(4):448-453.
- 5- Tóth LS, Arzaghi M, Fundenberger 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.
- 6- 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.
- 7- Faraji G, Mosavi Mashadi 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.