مطالعه تأثیر شکلدهی در دمای آستانه فعالسازی تبلور مجدد دینامیکی بر خصوصیات مکانیکی لوله مسی تولید شده به روش روزنرانی و فشرده سازی چرخهای لوله

احمد افسرى	دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز، شیراز، ایران، afsari@iaushiraz.ac.ir
سید احسان افتخاری شهری	استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران، e.eftekhari@birjandut.ac.ir
حميد بهلولى	استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بیرجند، بیرجند، ایران، hamidb123@gmail.com
محمدامين رعنائي*	مربی، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد بیرجند، دانشگاه آزاد اسلامی، بیرجند، ایران، ma.ranaei@iaubir.ac.ir

چکیدہ

در این تحقیق، فرآیند روزنرانی و فشردهسازی چرخهای لوله (TCEC) بر روی لولههای مسی در دمای محیط و دمای C[°] ۲۰۰ (دمای آستانه فعال سازی تبلور مجدد دینامیکی) انجام گرفته و تأثیر دمای انجام فرآیند بر ریزساختار و خواص مکانیکی این لولهها بررسی گردید. نتایج حاصله نشان دادند که با اعمال فرآیند TCEC در دمای محیط، ساختار کریستالی تقریباً ناهمگن با متوسط اندازه دانه ۳۷۰ نانومتر حاصل گردیده، درحالی که با افزایش دمای شکل دهی در محدوده T[°] ۲۰۰۰، ساختار بدست آمده شامل دانههای هم محور با ابعاد متوسط اندازه دانه ۳۷۰ نانومتر حاصل گردیده، درحالی که با افزایش دمای شکل دهی در محدوده Los ۲[°] ۲۰۰۰، ساختار بدست آمده شامل دانههای هم محور با ابعاد متوسط ۲۷۰ نانومتر دیده شد. با اعمال فرآیند TEEC در دمای محیط و دمای C[°] ۲۰۰ بر روی لوله مسی، استحکام تسلیم از مقدار اولیه ۲۱۴ به ترتیب به مقادیر ۲۴۲ و ۲۲۷ مگاپاسکال و میانگین سختی نیز از مقدار اولیه ۲۹/۲ به ۲۰۰۶ و ۸۶/۸ ویکرز افزایش می ابد. به طور کلی انجام فرآیند TEEC در دمای C[°] ۲۰۰ بر روی فلز مس موجب کاهش ۱۰ درصدی استحکام و افزایش ۲۰ درصدی ازدیاد طول تا نقطه شکست نسبت به حالت شکل دهی در دمای محرود.

واژههای کلیدی: تغییر شکل پلاستیک شدید، روزنرانی و فشرده سازی چرخهای لوله، مس، خواص مکانیکی، شکلدهی گرم.

Studying the effect of forming at the dynamic recrystallization activation threshold temperature on mechanical properties of copper produced by tube cyclic extrusion– compression

A. Afsari	Department of Mechanical Engineering, Shiraz branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran.
S. E. Eftekhari Shahri	Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran
H. Bohluli	Department of Mechanical Engineering, Birjand Branch, Islamic Azad University, Birjand, Iran
M. A. Ranaei	Young Researchers and Elites Club Biriand branch Islamic Azad University Biriand Iran

Abstract

In this study, Tube cyclic Extrusion Compression (TCEC) process was performed on copper pipes at ambient and 200°C (dynamic recrystallization activation threshold temperature) and the effect of process temperature on microstructure and mechanical properties were investigated. The results showed that by applying TCEC at ambient temperature, an equiaxed crystalline structure with an average grain size of 370 nm was obtained while by increasing the forming temperature to 200°C, the equiaxed grains with average size of 720 nm resulted. Applying the TCEC process at ambient temperature on a copper tube, increased its yield strength from 116 to 242 MPa and its average hardness from 69.2 to 101.4 Vickers while at the forming temperature of 200°C, the yield and ultimate strength were about 217 and 225 MPa, respectively, and the average hardness value was about 86.8 Vickers. Therefore, performing TCEC process at 200 °C on copper reduced the strength by 10% and increased the elongation to fracture by 21% compared to the cold forming state.

Keywords: Severe plastic deformation, Tube cyclic extrusion-compression, Copper, Mechanical properties, Hot forming.

اختصاص داده است. از زمان پیدایش روشهای SPD اکثر تحقیقات انجام گرفته معطوف به مواد بالک و ورقها بوده و مطالعات کمتری بر روی مقاطع لوله صورت گرفته است. لذا این حوزه از تحقیقات تا حدودی جدید بوده و توجه بیشتری را میطلبد. مبنای اگثر تحقیقات صورت گرفته بر پایه ارائه روش جدید جهت تغییر شکل پلاستیک شدید لوله در دمای محیط میباشد وکمتر مطالعاتی در راستای بهبود ساختار کریستالی و یا خواص مکانیکی بهینه انجام شده است.

۱- مقدمه

در دهه گذشته بهبود خواص مکانیکی فلزات به واسطه ایجاد ساختارهای بسیار ریز^۱ (UFG) و نانو توسط روشهای تغییر شکل پلاستیک شدید^۲ (SPD)، مطالعات بسیاری از محققان را به خود

¹ Ultra-fine Grained

[®] نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: ma.ranaei@iaubir.ac.ir تاریخ دریافت: ۱/۰۲/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱/۰۶/۲۸

² Sever Plastic Deformation (SPD)

۱-۱- معرفی روشروزنرانی و فشردهسازی چرخهای لوله

بابایی و مشهدی [۱] در سال ۲۰۱۴ روش روزنرانی و فشردهسازی چرخهای لوله⁽(TCEC) جهت تولید لولههای مستحکم با استفاده از اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید معرفی کردند. در تحقیق حاضر، این فرآیند در دمای آستانه فعالسازی تبلور مجدد دینامیکی مورد توجه قرار گرفته است. شکل ۱-الف طرح واره فرآیند TCEC را نشان میدهد. لوله اولیه درون یک محفظه که قطر آن برابر قطر خارجی لوله و سنبه ای که قطر آن برابر قطر داخلی لوله است قرار می-گیرد. بر روی سنبه یک زائده به نحوی طراحی شده که از قطر داخلی لوله بزرگتر و از قطر خارجی لوله کوچکتر بوده تا یک ناحیه گلویی شکل مابین محفظه و سنبه ایجاد کند. در نهایت لوله از تمامی جهات به وسیله بسته شدن دو کلاهک در بالا و پایین محفظه، محصور می-شود. این کلاهکها به گونهای طراحی شدهاند که سنبه با یک تلرانس بسیار کم (از نوع انطباق آزاد) از درون آنها براحتی عبور میکند. فضای مابین محفظه، سنبه و دو کلاهک به گونهای است که لوله را به طور كامل طى فرآيند تغيير شكل محصور نموده و مانع از خروج و يا حركت آن به درون قالب می شود. لوله محصور شده توسط حرکت سنبه در جهت پایین تا زمانی که زائده تعبیه شده بر روی آن از تمامی امتداد طولى أن عبور كند، تحت فرأيند تغيير شكل پلاستيك شديد قرار مى-گیرد. فرآیند TCEC یک فرآیند چرخهای است به طوری که در ابتدا با حركت سنبه در امتداد طولى لوله، ضخامت سطح مقطع آن به وسيله اکستروژن مابین محفظه و زائده سنبه کاهش یافته و سپس با عبور ماده از زائده سنبه فرآیند فشردهسازی آن صورت گرفته و ضخامت سطح مقطع به حالت اوليه خود باز مي گردد.



شکل ۱- الف: طرح واره فرآیند TCEC ب: مناطق تغییر شکل پلاستیک و عوامل هندسی قالب فرآیند TCEC [۱]

TCEC الگوی جریان ماده و وضعیت تنش- کرنش طی فرآیند TCEC، مشابه فرآیند روزنرانی میباشد (شکل ۱-ب). علاوه بر این، در طول هر نیم چرخه دو تغییر شکل برشی ساده مشابه فرآیند ECAP بر روی نمونه اعمال میشود. بنابراین، کل کرنش پلاستیک انباشته شده در نیم چرخه اول از فرآیند TCEC ($\varepsilon_{fir.}$) شامل دو بخش به شرح ذیل می-باشد [۱]:

کرنش فشاری ایجاد شده در اثر اکسترود شدن نمونه در فضای بین زائده و محفظه (ϵ_1) و کرنش برشی ساده، زمانی که نمونه از منطقه گلویی مانند سنبه عبور میکند (ϵ_2). در نیم چرخه دوم که سطح مقطع ماده فشرده شده و مجدداً به وضعیت اولیه خود باز میگردد، دو تغییر شکل برشی ساده دیگر نیز در ماده ایجاد میگردد که منجر به انباشته شدن کرنش پلاستیک به میزان نیم چرخه اول در آن میشود (بنابراین $\epsilon_{sec} = \epsilon_{sec}$). بطور کلی میتوان کل کرنش معادل انباشته شده در ماده را پس از N چرخه در قالب با رابطه ۱محاسبه نمود.

$$\varepsilon_{Nt} = N\varepsilon_{total} = 2N \left[Ln \left(\frac{R_0^2 - r_0^2}{R^2 - r^2} \right) + \frac{4}{\sqrt{3}} \cot(\frac{\emptyset}{2}) \right] \tag{1}$$

تغییر شکل پلاستیک شدید لوله در دمای محیط سبب کاهش قابل ملاحظه انعطاف پذیری می شود. لذا در این تحقیق با انجام فرآیند در آستانه فعالسازی تبلور مجدد دینامیکی حین اعمال فرآیند تغییر شکل لوله، این امکان فراهم شد که بتوان به ترکیبی خاص و کار آمد در خواص مکانیکی ماده تولید شده دست پیدا کرد. منظور از ترکیب کار آمد در خواص مکانیکی، دستیابی توأمان به استحکام بالا همراه با انعطاف پذیری مناسب می باشد. لوله های تولید شده با روش های SPD که دارای خواص مکانیکی بهبود یافته باشند، می توانند با ضخامت کمتری در جداره ها استفاده شوند. این امر باعث صرفه جویی در مواد و همچنین بهبود عملکرد آنها می شود.

۲- روش های آزمایش

در این تحقیق از لوله Cu-DHP ساخت شرکت مس شهید باهنر کرمان به عنوان ماده مورد مطالعه استفاده شده است.

از فولاد گرم کار 1.2344 (AISI H13) به منظور ساخت قطعات قالب استفاده گردید. شکل ۲ قطعات قالب TCEC را قبل و پس از مونتاژ نشان میدهد. مشخصات هندسی قالب TCEC، به شرح زیر می-باشد.

 $R_0 = R = 13.5, r_0 = 11.2, r = 12.35, L = 1.15, \phi_1 = \phi_2 = 150^{\circ}$

کل کرنش انباشته شده در انتهای هر چرخه (_{Etotal}) با توجه به رابطه ۱ برابر ۲/۳۳ است.

با توجه به هدف پژوهش، فرآیند TCEC در دماهای اتاق و ۲۰۰ درجه سلسیوس طی یک چرخه کامل با سرعت ۵/۰ میلیمتر بر ثانیه توسط دستگاه پرس GOTECH مدل GT-7001-LS100 انجام گرفت. برای انجام فرآیند TCEC در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس از یک محفظه عایق که از نوعی بتن متخلخل استفاده گردید. از یک گرم کن با ظرفیت ۲۰۰۰ وات جهت تولید گرما و رساندن قالب تا دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس استفاده گردید. شکل ۳ الف نحوه قرارگیری محفظه، گرم کن و قالب را به منظور انجام فرآیند در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس نشان میدهد. شکل ۳ ب لوله مسی را پس از اعمال نیم چرخه فرآیند TCEC نمک محیط و فرآیند در دمای ۲۰۰ درجه فرآیند TCEC (یک حرکت رفت و یک حرکت برگشت سنبه) در دمای محیط به صورت چرخه در دمای محیط و فرآیند در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس به صورت چرخه گرم به کار خواهد رفت.

در این تحقیق خواص مکانیکی شامل استحکام تسلیم، استحکام نهایی تسلیم و ازدیاد طول تا شکست لوله مسی تولید شده به روش TCEC به وسیلهٔ آزمون کشش تک محوره با توجه به استاندارد ASTM

¹ Tube cyclic extrusion–compression (TCEC)

E8M مورد بررسی قرار گرفتند. آزمایش کشش با سرعت۵ میلیمتر بر دقیقه در دمای محیط توسط دستگاه GOTECH انجام گرفت.



شکل ۲- قطعات قالب TCEC قبل و پس از مونتاژ



شکل ۳- الف: تصویر انجام آزمایش عملی TCEC (دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس) ب: لوله مسی را پس از اعمال نیم چرخه فرآیند TCEC

آزمایش سختی به روش ویکرز^۱ به وسیلهٔ دستگاه سختی سنج ویلسون- ولپرت۲-۹۳۰N با نیروی ۱۰ نیوتن به مدت ۱۰ ثانیه انجام شد. اندازه گیری سختی در هر نمونه حداقل ۵ مرتبه تکرار و سپس میانگین بدست آمده به عنوان سختی نمونه در نظر گرفته شد.

به منظور بررسی میکروسکوپی ریز ساختار نمونههای مسی تغییر شکل یافته توسط میکروسکوپ SEM مدل (Cold Field Emission (Hitachi S4160) یک مقطع عرضی (مقطعی که عمود بر محور اکستروژن می باشد) از هر نمونه تهیه شده و مانت گردید.

۳- نتايج

۳-۱- تعیین پایداری گرمایی نمونه تولید شده و تعیین در حالت گرم

به منظور تعیین دمای شکل دهی در حالت گرم از قابلیت پایداری گرمایی که به ازای میزان سختی در دماهای مختلف قابل اندازه گیری است، استفاده گردید. منظور از پایداری گرمایی، مقاومت شبکه کریستالی ماده تغییر شکل یافته در برابر تغییرات ساختاری خصوصاً تبلور مجدد طی چرخههای گرمایی می باشد.

¹Vickers ²Wilson-wolpert

ابتدا شش نمونه مسی تحت یک چرخه کامل فرآیند TCEC در دمای محیط قرار گرفتند. سپس نمونههای مسی تولید شده، در دماهای ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه تحت عملیات آنیل کاری قرار گرفتند. در ادامه با انجام آزمایش سختیسنجی از نمونههای آنیل شده در دماهای مختلف، نمودار پایداری گرمایی، به ازای درجه گرما و سختی نمونهها رسم گردید (شکل ۴).



شکل۴- نمودار پاسخ میزان سختی نمونههای TCEC در عملیات آنیل در دماهای مختلف

همانگونه که در شکل ۴ مشخص است، سختی نمونهی مسی تا دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس به صورت جزئی افزایش مییابد. در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس سختی نمونه به میزان ۸/۸ ویکرز کاهش و پس از آن نمودار سختی با شیب زیاد کاهش مییابد. چنین به نظر میرسد که پایداری گرمای لوله مسی پس از اعمال فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید نسبتاً کم شده است. علت این امر را میتوان به ذخیره شدن حجم نسبتاً بالایی از انرژی پلاستیکی درون شبکه کریستالی و به دنبال آن، کاهش انرژی فعال سازی مورد نیاز برای تبلور مجدد مرتبط دانست.

بر اساس شکل ۵ میتوان دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس را به صورت تقریبی دمای آستانه فعالسازی تبلور مجدد در نظر گرفت، چرا که پس از تبلور مجدد در دمای مذکور به دلیل ایجاد و رشد دانههای جدید عاری از عیوب کریستالی و تنشهای پسماند، سختی کاهش یافته است. لذا در ادامه تغییر شکل چرخهی گرم در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس انجام شده است.

۲-۳- نتایج حاصل از بررسی استحکام و سختی ماده

شکل ۵ منحنیهای تنش-کرنش مهندسی حاصل از آزمایش کشش تک محوری را برای نمونههای مسی اولیه، یک چرخه در دمای محیط و یک چرخه گرم نشان میدهد. در خصوص نمونه اولیه مسی همان طور که مشاهده میشود، استحکام به صورت خطی تا مقدار استحکام تسلیم افزایش میاند. نکته قابل توجه در خصوص نمودار استحکام تدریجاً افزایش مییابد. نکته قابل توجه در خصوص نمودار تنش- کرنش مهندسی نمونه مسی اولیه، انعطاف پذیری بسیار زیاد آن میباشد. با قرارگیری نمونه ی اولیه تحت فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید TEC به علت اعمال کرنش سختی استحکام آن به شدت افزایش یافته در حالی که انعطاف پذیری آن به مقدار قابل ملاحظهای افزایش یافته در حالی که انعطاف پذیری آن به مقدار قابل ملاحظهای نمونههای مورد آزمایش تعیین و خلاصه نتایچ حاصله در شکل ۶ ارائه



شکل۵- منحنی های تنش- کرنش مهندسی برای نمونههای اولیه مسی، یک چرخه در دمای محیط و در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس.

گردید. همان طور که مشاهده می شود، پس از اعمال کرنش به میزان ۲/۳۳ طی انجام یک چرخه در دمای محیط بر روی لولهی مسی، استحکام تسلیم آن به مقدار قابل ملاحظهای در حدود ۱۰۸ درصد نمونه اولیه افزایش می یابد. از طرفی استحکام نهایی به میزان فزآینده-ای که به استحکام تسلیم افزوده شده، تغییر نمی کند. حداکثر تغییرات این کمیت پس از انجام یک چرخه یکامل در دمای محیط در حدود ۱۳ درصد است. علاوه براین ازدیاد طول تا شکست نمونه ی یک چرخه در دمای محیط نسبت به نمونه ی اولیه به شدت کاهش می یابد. با انجام فرآیند به روش گرم، استحکام تسلیم و نهایی لوله مسی تولید شده به ترتیب در حدود ۸۷ و ۴ درصد افزایش می یابد.



شکل۶- تغییرات استحکام و ازدیاد طول تا شکست لولههای مسی

با توجه به مقایسه خواص مکانیکی بدست آمده مشخص می گردد که به ترتیب استحکام تسلیم و نهایی نمونهی تولید شده طی چرخه در دمای محیط، نسبت به نمونهی تولید شده طی چرخهی گرم در حدود ۱۱ و ۱۰ درصد بیشتر و به همین ترتیب درصد ازدیاد طول تا شکست ۲۱ درصد کمتر است. لذا ماده بدست آمده در حالت شکلدهی گرم نسبت به حالت شکلدهی سرد دارای انعطاف پذیری بیشتری می باشد.

شکل ۷ مقادیر سختی نمونههای تولید شده به روش TCEC را نشان می دهد. برای مقایسه نیز سختی نمونه ی اولیه آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود، پس از اعمال چرخه در دمای محیط بر روی یافت. میانگین مقادیر سختی آن ۴۷ درصد نسبت به نمونه اولیه افزایش حدود ۱۰۱/۴ ویکرز است. با اعمال کرنشهای پلاستیک طی فرآیند تغییر شکل در حالت گرم، سختی افزایش یافته اما مقدار آن نسبت به حالت سرد در حدود ۲۱ درصد کمتر می باشد. میانگین سختی برای نمونه ی ولیه در حدود ۶۲ درصد بیشتر است.



۳-۳- نتایج حاصل از بررسی ریز ساختار نمونه های مسی تغییر شکل یافته

شکلهای ۸ الف تا ج به ترتیب تصویر میکروسکوپ FE-SEM از سطح عمود بر راستای طولی نمونه اولیه و نمونههای تولید شده توسط فرآیند TCEC را در حالت شکل دهی سرد و گرم نشان می دهند. به منظور اندازه گیری متوسط اندازه دانه با استفاده از نرم افزار Image J از روش برخورد خطی^۱ استفاده شد. ساختار نمونه اولیه مطابق شکل ۸-الف دارای دانهبندی درشت متعارف^۲ با اندازه متوسط در حدود ۹۰ میکرومتر می باشد. با اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید توسط یک چرخه فرآیند TCEC در دمای محیط و قرارگیری ماده تحت کرنشهای فشاری و برشی ساده و ذخیره سازی آن درون نمونه لوله ای شکل، ساختار دانه ای هم محور^۳با اندازه دانه متوسط ۳۷۰ نانومتر به

در این حالت ترکیبی غیر همگن از دانه های ریز ۲۵۰ نانومتر و دانه های با ابعاد حدود ۵۰۰ نانومتر مشاهده می شود. ساختار کریستالی نمونهی تولید شده به روش گرم، همگن و هم محور میباشد، در حالی که ساختار کریستالی نمونهی چرخهی دمای محیط همگن نبود. از طرفی اندازه دانه متوسط در نمونهی چرخه گرم برابر ۲۷۰ نانومتر به دست آمد که نسبت به نمونهی چرخهی دمای محیط بزرگتر میباشد. هنگامی که لوله مسی در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد تحت فرآیند TCEC قرار میگیرد، با توجه به پایداری حرارتی کم ماده تولید شده، نمونه در معرض پدیده تبلور مجدد دینامیکی و رشد دانه قرار میگیرد. این پدیده باعث دگرگونی ساختاری و شکلگیری ساختار همگنتر با اندازه دانه بزرگتر در حین فرآیند TCEC میشود.

۳-۴- بررسی ارتباط عوامل ساختاری با بهبود خواص مکانیکی

بهبود خواص مکانیکی طی فرآیند های تغییر شکل پلاستیک شدید را می توان متأثر از دگر گونی ساختاری و کاهش اندازه دانه دانست. بر اساس مطالعات اولیه انجام شده بر روی تغییرات استحکام و سختی فلز مس [۵-۲] که تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفتهاند مشخص شده که دو عامل باعث بهبود خواص مکانیکی در آنها می شوند. عامل اول، استحکام بخشی از طریق افزایش چگالی نابجایی ها است که در حین فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدیدTCEC لوله

¹ linear Intercept

²Conventional coarse-grained

³ Equiaxed grains



شکل ۸– تصویر FE-SEM از ریز ساختار لوله مسی الف) نمونه اولیه و نمونههای تغییر شکل یافته در ب) دمای محیط ج) دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس.

بدلیل کرنشهای پلاستیک بسیار زیاد در ماده ایجاد می شود. با اعمال فرآيندچگالى نابجايىها باتوجه به ايجاد كرنشهاى پلاستيك بسيار زیاد و کاهش فاصلهی مرزدانهها در اثر ایجاد دانههای جدید به میزان قابل توجهی افزایش مییابد [۶]. اساساً افزایش بیش از اندازه نابجاییها موجب مسدود شدن حركت آنها توسط ديوارهها يا سلولهاى نابجايي به وجود آمده می شود و لذا سختی و استحکام در اثر کرنش سختی افزایش می یابد [۵]. عامل دوم تغییرات اندازه دانه و شکل گیری مرزدانههای بیشمار است، به طوری که با کوچک شدن اندازهی دانه، استحکام ماده افزایش می یابد. همانطور که گزارش شده است، با قرار گیری فلز مس تحت فرآیند TCEC و اعمال کرنش پلاستیک شدید به مقدار ۲/۳۳، ساختار کریستالی آن به شدت دگرگون شده (ساختار پالایش شده) و متوسط اندازه دانه تحت تأثیر کرنش اعمالی از ۹۰ میکرومتر به ۳۷۰ نانومتر کاهش یافته است. بنابراین می توان اذعان داشت که سختی و استحکام نمونهی چرخهی دمای محیط، با توجه به شکل گیری طیف گستردهای از مرزدانههای اصلی و فرعی و شکل گیری ساختار UFG افزایش مییابد. از طرفی با مقایسه ساختار کریستالی نمونهی چرخهی دمای محیط با نمونهی چرخهی گرم مشاهده می شود که اندازه دانه در اثر گرم کردن نمونه حین فرآیند TCEC افزایش می یابد. لذا سختی و استحکام نمونه ی تولید شده به روش گرم نسبت به نمونهی تولید شده در دمای محیط کمتر میباشد.

در خصوص درصد ازدیاد طول تا شکست نمونهها، انجام فرآیند آنیل موجب آزاد سازی تنشهای پسماند شده و لذا باعث ازدیاد طول تا شکست نمونه یاولیه تا ۳۹/۷ می گردد. با قرارگیری نمونههای اولیه تحت فرآیند TCEC، ساختار کریستالی متأثر از کرنشهای پلاستیک دچار تغییر شده و مقادیر زیادی نابجایی تولید میشود. با توجه به محدود بودن ظرفیت ساختار کریستالی ماده در خصوص تجمع نابجاییها و همچنین ارتباط آن با میزان کرنش اعمالی، درصد ازدیاد طول تا شکست ماده ی تغییر شکل یافته بشدت کم شده و به حدود ریز شدن دانهها میشود ولی دمای نسبتاً بالا ۲۰۰ درجه برای مس باعث بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی محدود و در نتیجه کاهش محدود استحکام تسلیم و کششی و افزایش ۲۱ درصدی در تغییر طول نسبی نمونه تولید شده به روش گرم می گردد.

۴- نتیجهگیری

اهم نتایج بدست آمده در این تحقیق به شرح زیر میباشد:

پایداری گرمایی (دمای آغاز تبلور مجدد دینامیکی) لوله مسی تولید شده در یک چرخهی TCEC در حدود ۲۰۰ درجه سلسیوس

TCEC تعیین شد. لذا در ادامه لوله مسی در این دما تحت فرآیند TCEC گرم قرار گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده از متالوگرافی، مشخص گردید که به واسطه اعمال کرنشهای پلاستیک شدید توسط فرآیند

کامل فرآیند در دمای محیط، ساختار دانه ای هم محور شامل ترکیبی غیر همگن از دانه های ریز ۲۵۰ تا ۵۰۰ نانومتر ایجاد شد. ساختار کریستالی نمونهی تولید شده به روش گرم، همگن و هم محور بوده و متوسط اندازه دانهی آن ۷۲۰ نانومتر است. نتایج آزمون خواص مکانیکی نشان داد که سختی و استحکام با کاهش اندازه دانه و تشکیل ساختار بسیار ریز به میزان قابل ملاحظه ای بهبود مییابد. به گونهای که با اعمال یک چرخه کامل فرآیند TCEC در دماهای محیط و ۲۰۰ درجه سلسیوس بر روی لوله مسی، استحکام تسلیم به ترتیب در حدود ۱۰۸ و ۸۷ درصد استحکام اولیه افزایش یافت. به همین ترتیب نیز سختی در حدود ۴۷ و ۲۶ درصد نسبت به نمونه اولیه افزایش مییابد. همزمان با بهبود خواص مکانیکی، درصد ازدیاد طول تا شکست نمونه تولید شده در دمای محیط و فرآیند گرم کاهش مییابد. از طرفی افزایش دمای شکلدهی تا محدودهی پایداری گرمایی حین انجام فرآیند TCEC بر روی لوله مسی موجب کاهش ۱۰ درصدی استحکام و افزایش ۲۱ درصدی ازدیاد طول تا شکست ماده تولید شده نسبت به حالت شکل دهی سرد می شود. لذا در این حالت از شکل دهی گرم، میزان بهبود انعطاف پذیری نسبت به میزان کاهش استحکام بیشتر

TCEC ساختار کریستالی به شدت تغییر یافته و پس از یک چرخه

۵- مراجع

[1] Babaei A, Mashhadi MM, Jafarzadeh H. Tube Cyclic Extrusion-Compression (TCEC) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes. *Materials Science and Engineering: A.* Vol. 598, No.1, pp. 1-6, 2014.

[2] Afsari A, Ranaei MA. Equal channel angular pressing to produce ultrafine pure copper with excellent electrical and mechanical properties. *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. Vol. 10, No.4, pp. 215-222, 2014.

[3] Eftekhari Shahri SE, Ranaei MA, Jamshidi H, Rezaei E. Experimental study of the simultaneous effects of severe plastic deformation and secondary radial strain on copper. *Proceedings* of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. Vol. 235, No.6, pp. 1921-1929, 2021.

[۴] رعنائی م. ا. و بهلولی ح. و خلیلی خ.، مطالعه تجربی اثر مقدار کرنش اعمالی در هر مرحله از فرآیند اکستروژن در کانالهای هم مقطع زاویهدار بر روند تکامل استحکام مس خالص تجاری. مجلهٔ مهندسی مکانیک دانشگاه

[4] Ranaei MA, Moshksar MM, Afsari A, Ahmadi SY. Microstructure, mechanical and electrical properties of commercially pure copper deformed severely by equal channel angular pressing. *Modares Mechanical Engineering*. Vol. 14, No.15, pp. 257-266, 2015.

[5] Faraji G, Mashhadi MM, Bushroa AR, Babaei A. TEM analysis and determination of dislocation densities in nanostructured copper tube produced via parallel tubular channel angular pressing process. *Materials Science and Engineering: A.* Vol. 563, No.1, pp 193-198, 2013.