

Investigation on Macrostructure and Hardness of Cu Tubes Processed by Tubular Cyclic Extrusion-Compression

Alireza Ahmadi¹, *Bahman Mirzakhani², Yousef Payande³

1- MSc Student, Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

2- Associated professor, department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

3- Assistant professor, Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

Citation: Ahmadi A, Mirzakhani B, Payande Y. Investigation on Macrostructure and Hardness of Cu Tubes Processed by Tubular Cyclic Extrusion-Compression. Metallurgical Engineering 2024; 27(1): 62-71 <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2023.1999760.1379>

doi: <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2023.1999760.1379>

ABSTRACT

Pure copper pipes have various applications in industries. It is necessary to improve their mechanical properties. The main strengthening mechanism in this case is severe plastic deformation in order to achieve ultrafine-grain microstructure. In this research, the deformation method of tube cyclic extrusion-compression (TCEC) was used. The design of punch and mould was performed by Solidwork and Mo40 steel was used for manufacture of both mould and punch. Then, the pure copper tube at ambient temperature and 750 °C deformed in one pass. Investigation of microstructural evaluation and hardness measurement on the cross-sectional surface and side surface of the pipe showed that in the case of cold TCECed pipe, the microstructure of the cross-section is slightly fine-grain and compared to the raw sample, a substantial hardness improvement (60%) was achieved. In the microstructure, orientation of grains and material flow were also observed in the direction of extrusion. In the hot SPD treatment, the cross-sectional area of the sample significantly was fine-grained and the hardness of this part increased considerably by about 93% compared to the raw sample.

Keywords: Pure copper, severe plastic deformation, Tube Cyclic Extrusion-Compression (TCEC), Grain, Hardnes.

Received: 8 May 2023 | Accepted: 6 December 2023

■ ■
* **Corresponding Author:**

Bahman Mirzakhani, PhD

Address: department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

Tel: +98 (86) 32625830

E-mail: b-mirzakhani@araku.ac.ir

بررسی ساختار و سختی لوله مسی در طی تغییر شکل پلاستیک شدید به روش TCEC

علیرضا احمدی^۱، * بهمن میرزاخانی^۲، یوسف پاینده^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی- مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

۲- دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی- مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی- مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

چکیده

لوله‌های مس خالص در صنایع مختلف کاربرد وسیعی دارند. اما لازم است خواص مکانیکی آن‌ها بهبود پیدا کند. یکی از روش‌های بهبود، اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) (Severe Plastic Deformation) به منظور دستیابی به ساختار فوق‌ریزدانه است. در این تحقیق از روش تغییر شکل به نام اکستروژن- فشار متناوب لوله TCEC (Tubular Cyclic Extrusion-Compression) برای انجام تغییر شکل پلاستیک شدید لوله مسی استفاده گردید. برای این منظور به کمک نرم افزار Solidwork طراحی سه بعدی قالب و سنبه انجام و ساخت قالب صورت گرفت. سپس با موفقیت بر روی لوله‌ی مسی خالص در دمای محیط و دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد طی یک مرحله انجام شد. بررسی تحولات ریزساختاری و سختی‌سنجی روی نمونه‌ها نشان داد که در عملیات TCEC سرد، ساختار سطح مقطع اندکی ریزدانه شده است و به نسبت نمونه‌ی خام، بهبود سختی قابل توجهی در حدود ۶۰٪ صورت می‌گیرد. همچنین در ساختار، کشیدگی دانه‌ها و سیلان ماده در جهت اکستروژن مشاهده می‌شود. در عملیات TCEC گرم، سطح مقطع نمونه به شکل قابل ملاحظه‌ای به دلیل وقوع تبلور مجدد دینامیکی ریزدانه شده و سختی این قسمت به نسبت نمونه‌ی خام به شکل چشم‌گیری در حدود ۹۳٪ افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: مس خالص، تغییر شکل پلاستیک شدید، اکستروژن- فشار سیکنی لوله (TCEC)، دانه، سختی.

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۸ | پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۵

۱. مقدمه

به منظور تولید لوله‌های فولادی دو دسته لوله را می‌توان در نظر گرفت. این دو دسته شامل لوله‌های بدون درز و لوله‌های درزدار هستند. برای تولید لوله‌های بدون درز که مانسمان نیز نامیده می‌شوند، از فرآیند جوشکاری استفاده نمی‌شود. در فرآیند تولید این لوله‌ها از فرآیندهایی نظیر اکستروژن استفاده می‌شود [۵-۷]. این فرآیند در ابتدا برای تولید لوله‌های سربی به کار می‌رفت که رفته رفته برای تولید لوله‌های فولادی نیز استفاده شد. امروزه برای تولید لوله‌های فلزی از روش‌هایی نظیر ریخته‌گری، اکستروژن، نورد، کشش عمیق، کشش لوله و فرم دهی روان استفاده می‌شود [۸]. علاوه بر موارد ذکر شده، به منظور تولید لوله‌های فوق ریزدانه از فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید نیز می‌توان استفاده کرد [۹-۱۱]. با وجود اینکه در صنعت نیاز شدیدی به لوله‌هایی با خواص مکانیکی و فیزیکی بالا وجود دارد، تحقیقات اندکی در زمینه توسعه روش‌های

فلزات و آلیاژهای نانوکریستالی با اندازه‌ی دانه‌ی میانگین کمتر از ۱۰۰ نانومتر موضوع بسیاری از تحقیقات در دهه‌های گذشته بوده است [۱۰، ۱۱]. دلیل این موضوع این است که این گونه فلزات و آلیاژها خواص مکانیکی بسیار عالی مانند استحکام بالا، مقاومت به سایش بالا و داکتیلیته‌ی بالا را به همراه دارند. علاوه بر موارد ذکر شده، ساختار نانوکریستالی می‌تواند زمینه ساز تغییر شکل فوق پلاستیک^۱ فلزات در دماهای پایین‌تر و نرخ کرنش بالاتر شود [۱۲]. نیاز به لوله‌هایی با خواص مکانیکی و فیزیکی عالی در محدوده‌ی وسیعی از کاربردهای صنعتی مثل هوافضا، اتومبیل‌سازی، نفت و گاز وجود دارد؛ اما با این حال تا کنون تحقیقات بسیار محدودی در مورد تولید لوله‌های فوق ریزدانه با استفاده از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید انجام شده است [۱۳].

1. Superplastic deformation

* نویسنده مسئول:

دکتر بهمن میرزاخانی

نشانی: اراک، دانشگاه اراک، دانشکده فنی- مهندسی، گروه مهندسی مواد و متالورژی.

تلفن: ۳۲۶۲۵۸۳۰ (۸۶) ۰۹۸+

پست الکترونیکی: b-mirzakhani@araku.ac.ir

کرنش در نواحی مختلف مستلزم انجام شبیه‌سازی و استفاده از روشهای عددی است.

رابطه (۱):

$$\varepsilon = 2N \left\{ \sum_{i=1}^2 \left[\frac{2 \cot(\varphi_i/2 + \omega_i/2) + \omega_i \csc(\varphi_i/2 + \omega_i/2)}{\sqrt{3}} \right] + \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{R_2}{R_1} \right\}$$

آماده سازی لوله‌های اولیه

میلگردی توپر از فلز مس خالص به طول ۴۵۰ میلی‌متر و قطر مقطع ۴۵ میلی‌متر از بازار تهیه شد. به منظور بررسی دقیق عناصر آلیاژی و ناخالصی‌های موجود در ترکیب، آزمون کوآتومتری روی نمونه انجام شد که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است. در نهایت به کمک عملیات ماشین‌کاری از میلگرد توپر مذکور، ۵ لوله به طول ۸۰ میلی‌متر، قطر خارجی ۴۰ میلی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر تهیه شد.

عملیات SPD

عملیات SPD روی لوله‌های مسی در دمای محیط و دمای ۷۵۰ سانتیگراد انجام شد. فرآیند بدون هیچ مشکلی انجام شده و ماده از داخل ناحیه گردنی شکل عبور کرد و نهایتاً تغییر شکل پلاستیک شدید طبق انتظار روی نمونه‌ها اعمال گردید. برای این منظور از دستگاه هیدرولیک با ظرفیت ۲۰۰ تن استفاده شد و کل زمان تغییر شکل ۴۰ ثانیه بود. از روان‌کننده گریس نسوز در سطوح خارجی قطعه و داخل قالب استفاده شد. طول لوله بعد از انجام فرآیند به ۱۰۹ میلی‌متر و ضخامت آن از ۳ میلی‌متر به ۲ میلی‌متر رسید. برای انجام SPD گرم، قالب و سنبه نیز تا دمای ۱۰۰ سانتیگراد پیش‌گرم شدند.

بررسی ساختار و سختی‌سنجی

از لوله‌های اولیه تغییر شکل یافته از سطح مقطع و سطوح جانبی لوله‌ها نمونه‌های متالوگرافی نوری تهیه گردید. آماده سازی نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM E 3 انجام شد و برای محلول‌های اچ از ترکیبات جدول ۲ نیز استفاده شد.

به منظور بررسی سختی، از آزمایش میکروسختی‌سنجی ویکرز طبق استاندارد ASTM E 384 استفاده شد. سختی نمونه‌ی خام و سختی قسمت سطح مقطع و سطح لوله‌ی SPD شده سرد و گرم تعیین گردید. برای این منظور در هر ناحیه از لوله تغییرشکل داده شده در سه نقطه میکروسختی‌سنجی صورت گرفت و میانگین آن سه مقدار به عنوان متوسط مقدار سختی گزارش گردید. سختی قسمت سطح و سطح مقطع در هر دو نمونه‌ی SPD سرد و گرم نیز با یکدیگر مقایسه شدند و همه‌ی نتایج به شکل نمودار جمع‌آوری و تحلیل شدند. برای

SPD در تولید لوله‌های فوق ریزدانه انجام شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به پرس زاویه‌ای چند کاناله (ECAP)، اکستروژن فشاری زاویه‌ای (CEC) فرآیند نورد تجمعی (ARB) و پیچش فشار قوی (HPT) اشاره کرد. روش‌های مذکور از جمله موفق‌ترین روش‌های SPD هستند که برای مقاصد صنعتی نیز استفاده می‌شوند. از دیگر روش‌های تولید لوله که توسط محققان به وجود آمد، فرآیند چرخشی تجمعی (ASB) برای تولید لوله‌های ریزدانه بود. همچنین، فرجی و همکاران نوع کارآمدتری از روش SPD را به اسم فشار زاویه‌ای کانال لوله‌ای (TCAP) ابداع کردند. پس از این روش، به منظور ایجاد همگنی بالاتر ریزساختار، روش پرس زاویه‌ای کانال موازی لوله (PTCAP) توسط محققین ابداع شد [۱۲].

در این تحقیق با به کارگیری فرآیند اکستروژن-فشار سیکی لوله یا TCEC که یکی از جدیدترین فرآیندهای تغییرشکل پلاستیک شدید لوله محسوب می‌شود، سختی و تغییرات ریزساختاری مورد ارزیابی واقع شده است.

۲. مواد و روش تحقیق

ساخت قالب و سنبه

در این تحقیق برای ساخت قالب از فولاد Mo40 استفاده شد. به دلیل دقت لازم جهت تراشکاری قسمت گلوبی، قالب به روش قالب دو تکه، طبق طراحی اولیه ساخته شد. بعد از طراحی نقشه‌ی قالب به صورت دو بعدی، به کمک نرم افزار Solidworks طراحی سه بعدی قالب و سنبه انجام شد (شکل ۱-الف). سپس نقشه‌ی قالب در دستگاه CNC اتوماتیک بارگذاری شد و عملیات براده برداری و ایجاد گلوبی تقریباً به مدت ۲۴۰ دقیقه به طول انجامید. مطابق شکل ۱-ب در این قالب، گلوبی با زاویه‌ای ۱۴۲ درجه با پخ ۴ میلی‌متر ماشینکاری شد. به منظور کاهش حداکثری اصطکاک بین قالب و لوله، سنگ زنی و پولیش‌کاری با دقت بالایی در قسمت گلوبی صورت گرفت. همچنین شیبی ۲ درجه‌ای در قسمت خروجی لوله از ناحیه گردنی ایجاد شد. در نهایت حفرات و پین‌های مورد نیاز در قطعه‌کار ایجاد شده تا نیمه قالب نهایی مطابق شکل ۱-ج آماده شود. سنبه نیز از میلگردی از فولاد Mo40 به طول ۳۸۰ میلی‌متر و قطر ۴۵ میلی‌متر ساخته شد. میزان کرنش وارده در هر مرحله از تغییرشکل به کمک این قالب از رابطه (۱) قابل محاسبه است [۹].

۱- ب مقادیر $\omega_1 = \omega_2 = 22.5^\circ$ و $\varphi_1 = \varphi_2 = 157.5^\circ$ و $R_1 = 19.2 \text{ mm}$ و $R_2 = 20 \text{ mm}$ و برای یک مرحله تغییرشکل $N=1$ است. با جایگذاری مقادیر فوق در رابطه (۱) مقدار کرنش به صورت تقریبی در هر مرحله از تغییر شکل، ۰/۵۵۸ به دست می‌آید. این مقدار کرنش بصورت میانگین کرنش در نواحی مختلف وارد بر قطعه بوده و تعیین مقادیر

جدول ۲. ترکیب محلول‌های حکاکی مورد استفاده.

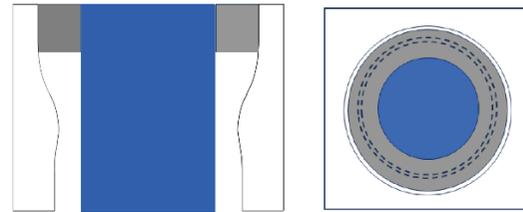
| ردیف | نمونه | ترکیبات | زمان نگهداری | دمای کاری |
|------|---------|--|--------------|-----------|
| ۱ | خام | 45 ml HNO_3 + 45 ml HNO | ۳ ثانیه | محیط |
| ۲ | SPD سرد | 45 ml HNO_3 + 45 ml HNO | ۳ ثانیه | محیط |
| ۳ | SPD گرم | $K_2Cr_2O_7$ (2 gr) + H_2SO_4 (8 ml) + $NaCl$ (4 ml) + H_2O (100 ml) | ۱ ثانیه | محیط |



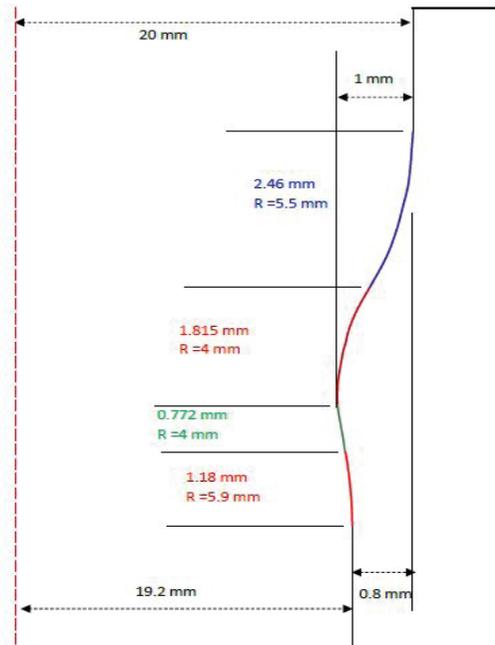
الف



ب



الف



ب

شکل ۲. نقاط و نواحی مختلف از الف- سطح مقطع لوله و ب- سطح لوله برای بررسی ریزساختار

این منظور از دستگاه HV1000B با فرورونده هرم الماسی مربع القاعده با زاویه راس ۱۳۶ درجه، نیروی اعمالی ۱۰۰۰ گرم و زمان اعمال نیرو ۱۵ ثانیه استفاده گردید.

۳. نتایج و بحث

نتایج ریزساختاری

برای بررسی یکنواختی ساختار مس خالص و اثر فرآیند TCEC بر آن، مطابق شکل ۲ از نواحی مختلف لوله شامل سطح مقطع و سطح لوله، نمونه متالوگرافی تهیه گردید.

شکل ۳ تصاویر ریزساختار سطح مقطع لوله قبل و بعد از TCEC سرد را نشان می‌دهد. همچنین به کمک نرم افزار ImageJ اندازه دانه از روی این تصاویر تعیین گردید. همانطور که مشاهده می‌شود، سطح مقطع بعد از انجام فرآیند تغییر شکل پلاستیک سرد نسبت به قبل از سیلان ماده تا حدی ریزدانگی رخ داده است. همچنین تا حدودی زوایای مرزها بیشتر شده است و این امر نوید این مهم را می‌دهد

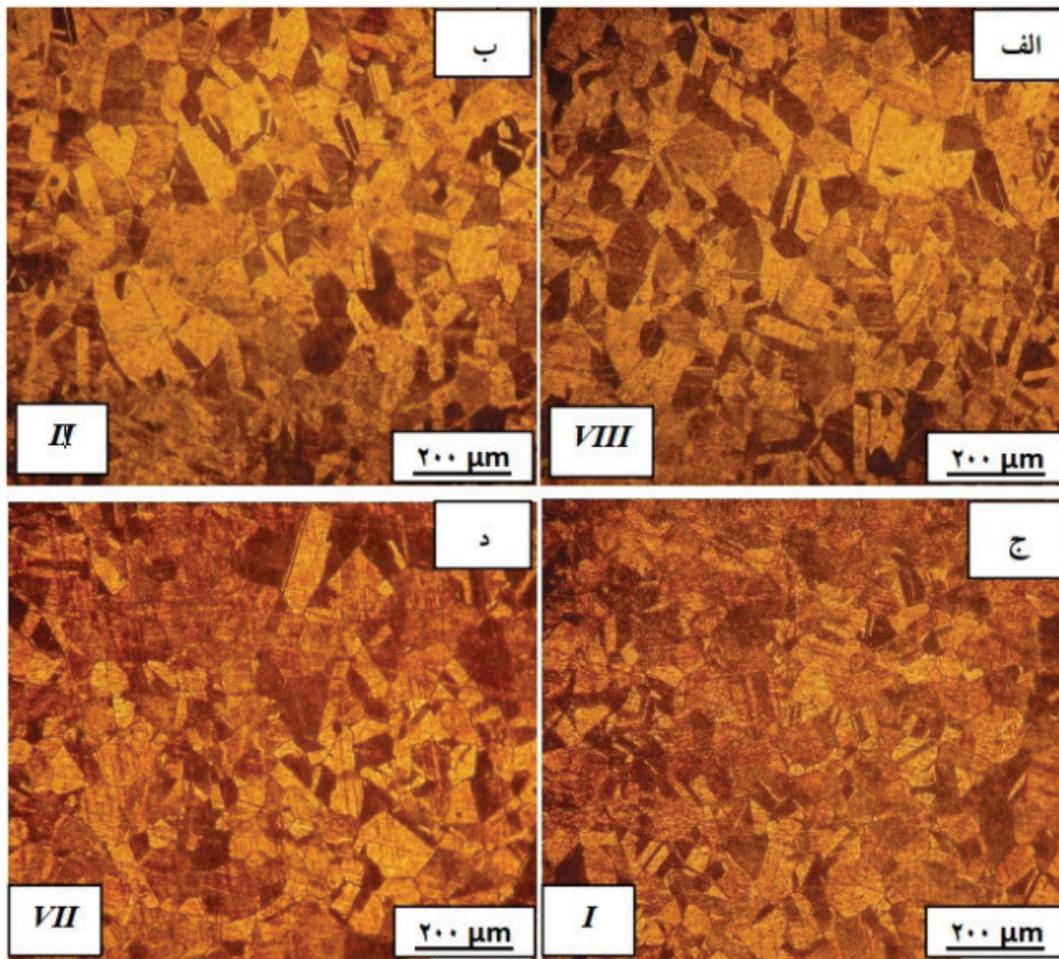


ج

شکل ۱. قالب طراحی و ساخته شده TCEC تحقیق حاضر: الف) تصویر طرح‌واره قالب، ب) هندسه و ابعاد نیمه قالب، ج) تصویر واقعی نیمه قالب

جدول ۱. ترکیب شیمیایی لوله مس خالص (%Wt).

| %Cu | %Al | %Fe | %Mn | %Mg | %Cr | %Ni | %Zn | %Pb | %Sn |
|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| ۹۹/۸۶ | ۰/۰۴ | ۰/۰۵ | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۲ | ۰/۰۲ | ۰/۰۰۲ |



شکل ۳. تصاویر متالوگرافی از سطح مقطع در نواحی معرفی شده. الف و ب- لوله خام و ج و د- لوله TCEC سرد.

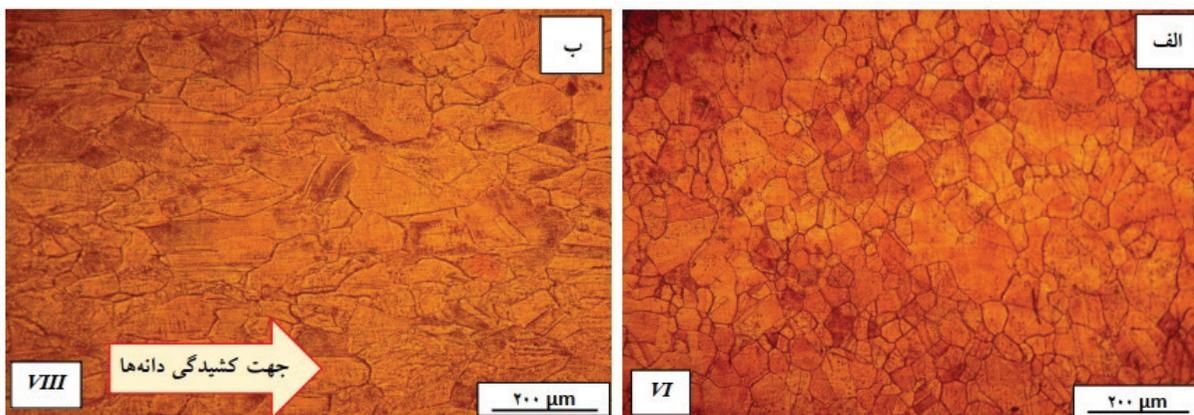
سطح مقطع لوله به نسبت سطح لوله رخ داده و در قسمت سطح لوله بیشتر دانه‌ها کشیده شده‌اند که علت آن به بالا بودن تنش وارده به قسمت سطح مقطع لوله به نسبت سطح لوله مربوط می‌شود. همچنین نوع تنشی که به قسمت سطح لوله وارد می‌شود بیشتر از جنس برشی می‌باشد که نتیجتاً دانه‌ها در آن قسمت به نسبت سطح مقطع لوله بیشتر کشیده می‌شوند.

به منظور بررسی رفتار تغییر شکل گرم لوله‌ی مسی و بررسی تاثیر عملیات ترمومکانیکی بر آن، آزمایش TCEC گرم نیز انجام شد. با توجه به بالا بودن دمای تغییر شکل، امکان وقوع تبلور مجدد دینامیکی وجود دارد. بازیابی دینامیکی و تبلور مجدد دینامیکی نقش مهمی در فرایندهای تغییر شکل گرم ایفا می‌کنند [۱۳-۱۵]. در حقیقت، این دو پدیده سبب کاهش تنش سیلان و نتیجتاً کاهش نیروی لازم در فرایندهای شکل‌دهی فلزات می‌شوند؛ خصوصاً زمانی که نمونه دارای ابعاد بزرگی (همانند قطعات فورج، نورد و اکستروژن) است. همچنین این دو پدیده سبب کاهش تنش‌های وارده بر ابزار تغییر شکل مکانیکی همانند سنبه‌ها می‌شود که این

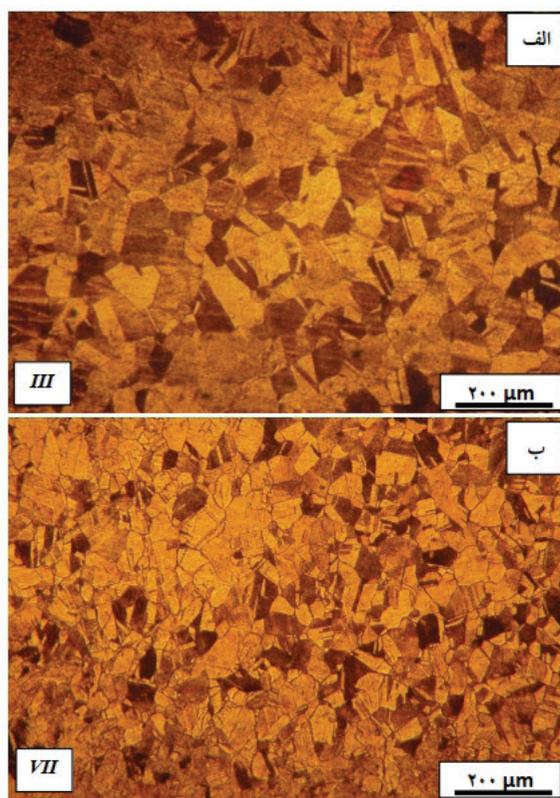
که با تعداد پاس‌های بیشتر سل‌های نابجایی‌ها و مرزهای فرعی داخل دانه‌ها تشکیل شده و ریزدانگی بیشتری رخ دهد. اندازه دانه قبل از TCEC طبق تصاویر ۳- الف و ۳- ب متوسط حدود ۵۷ میکرون است و بعد از TCEC طبق تصاویر ۳- ج و ۳- د متوسط ۴۹ میکرون شده است.

همچنین با توجه به شکل ۴ که مربوط به تصاویر متالوگرافی از سطح نمونه در قبل و بعد از اعمال فرآیند SPD سرد است، مشخص است که پس از انجام فرآیند TCEC، دانه‌ها کشیده‌تر شده که در جهت حرکت لوله و پرس است. تنش‌های وارده به ماده در محل عبور از ناحیه گردنی قالب از جنس برشی است و باعث کشیدگی دانه‌ها می‌شود و کارسختی در اثر افزایش چگالی نابجایی‌ها و قفل شدن آن‌ها را به دنبال دارد. اندازه دانه استخراج شده از تصویر ۴- الف متوسط ۴۴ میکرون و تصویر ۴- ب متوسط ۹۵ میکرون است.

تصاویر شکل ۳ و ۴ با مقایسه‌ی ریزساختار نمونه قبل و بعد از انجام فرآیند TCEC، تغییرات زوایای مرزدانه‌ها را به وضوح نشان می‌دهد. بصورت خلاصه می‌توان گفت که در پاس اول TCEC سرد، ریزدانه سازی بیشتری در قسمت



شکل ۴. تصویر متالوگرافی از سطح لوله در ناحیه VI. الف) قبل و ب) بعد از TCEC سرد در قسمت سطح در ناحیه VIII.



شکل ۵. تصویر متالوگرافی نمونه سطح مقطع لوله. الف) قبل و ب) بعد از TCEC گرم.

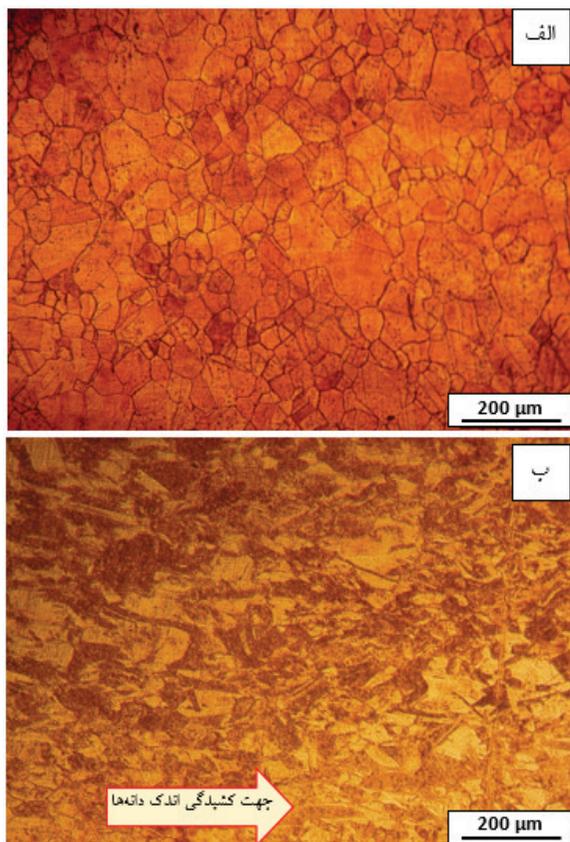
شکل ۶ نیز تصاویر متالوگرافی از لبه‌های داخلی و خارجی نمونه در سطح مقطع نمونه TCEC گرم شده را نشان می‌دهد. همانگونه که از تصاویر شکل ۶ مشخص است، در هر دو لبه ریزدانه‌گی به شدت اتفاق افتاده است. متوسط اندازه دانه در این دو ناحیه ۳۱ میکرون بدست آمد. در واقع به دلیل ماهیت فرآیند TCEC، ماده در طی عبور از منطقه گردنی قالب، لوله در سطوح داخلی و خارجی به شدت تحت تنش برشی قرار داشته و کرنش پلاستیک زیاد در این نواحی اعمال

موضوع عمر آن‌ها را نیز افزایش می‌دهد. این کاهش تنش سبب بهبود انعطاف پذیری یا نرمی می‌شود [۱۶]. در واقع، در طی بازیابی دینامیکی ناهمبندی‌های ناهم علامت یکدیگر را حذف می‌کنند. با توجه به تحقیقات انجام شده، معمولاً تبلور مجدد دینامیکی در ادامه‌ی بازیابی دینامیکی وقتی انرژی داخلی از طریق انباشت کرنش پلاستیک بالا می‌رود رخ می‌دهد [۱۷]. نکته دیگری که وجود دارد این است که در مس و آلیاژهای آن، در دماهای بالا، بازیابی دینامیکی تقریباً انجام نشده لذا در ادامه‌ی آن تبلور مجدد دینامیکی رخ می‌دهد [۱۸ و ۱۹].

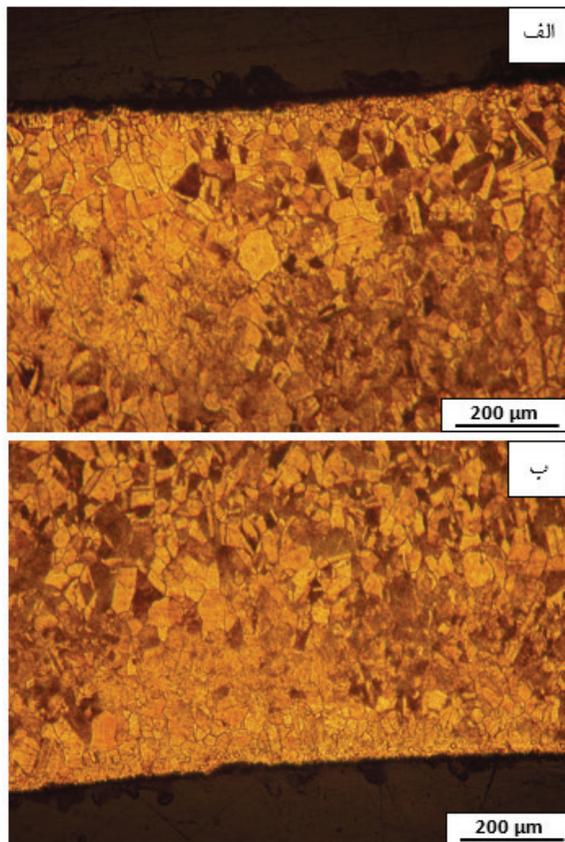
در حقیقت تبلور مجدد دینامیکی^۲ فرآیندی است که به شدت به دما و کرنش اعمالی بستگی دارد [۲۰ و ۲۱]. همچنین، دانه‌هایی که بعد از تبلور مجدد تشکیل می‌شوند دارای اندازه‌ی ریزتری بوده و حالت کشیدگی ناشی از تغییر شکل پلاستیک در آن‌ها دیده نمی‌شود که این مساله به میزان انرژی نقص در چیده شدن (SFE^3) آلیاژ بستگی دارد. از آنجاییکه مس خالص انرژی نقص در چیده شدن نسبتاً بالایی دارد، بازیابی دینامیکی کمتر ولی تبلور مجدد دینامیکی بیشتری در آن اتفاق می‌افتد.

همانطور که از مقایسه شکل ۵ الف و ب به وضوح دیده می‌شود، پس از TCEC در دمای ۷۵۰ سانتیگراد ریزدانه سازی به نسبت نمونه‌ی قبل از عملیات، اتفاق افتاده است (اندازه دانه متوسط ۳۹ میکرون). که این مساله به وقوع پدیده‌ی تبلور مجدد دینامیکی مربوط می‌شود؛ چراکه دو علت اصلی تبلور مجدد دینامیکی مربوط می‌شود. زیرا با توجه به انرژی نقص در چیدمان نسبتاً بالای مس [۲۲] و کرنش پلاستیک زیاد اعمالی در دمای ۷۵۰ سانتیگراد، شرایط برای وقوع تبلور مجدد دینامیکی فراهم بوده و ریزسازی دانه‌ها اتفاق افتاده است.

2. Dynamic Recrystallization
3. Stacking Fault Energy



شکل ۷. تصویر متالوگرافی سطح لوله، الف) اولیه و ب) TCEC گرم



شکل ۶. تصویر متالوگرافی نوری از قسمت الف- لبه خارجی و ب- لبه داخلی نمونه سطح مقطع لوله TCEC گرم شده.

سطح مقطع و سطح لوله آورده شده است. در واقع از ۸ ناحیه‌ی مختلف معرفی شده در قسمت‌های قبل، در سه نقطه سختی گرفته شده است که میانگین آن سه مقدار در جدول ۳ آورده شده است.

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که سختی سطح و سطح مقطع لوله بعد از انجام فرآیند TCEC سرد نسبت به نمونه خام (قبل از فرآیند) افزایش یافته است. علت این مساله به کار سختی فلز و اثر فرآیند مربوط می‌شود. مقایسه میانگین سختی سطح مقطع و سطح لوله SPD سرد شده نشان از سختی بالاتر سطح مقطع دارد که نتایج ریزساختاری بخش قبل نیز تایید کننده این مطلب است.

با توجه به توزیع سختی در نقاط مورد آزمون در هر دو قسمت لوله، می‌توان نتیجه گرفت که توزیع کرنش در مناطق مختلف در پاس اول حدوداً یکنواخت بوده است؛ چراکه تفرانس میزان سختی بالا نبوده و اعداد اختلاف چندانی ندارند و به مقدار میانگین نزدیک هستند.

در عملیات SPD سرد، با اعمال تنش و نتیجتاً بوجود آمدن کرنش در ریزساختار، عیوبی نظیر نابجایی تولید و به عیوب قبل از اعمال تنش اضافه می‌شوند. همین امر باعث افزایش سختی می‌شود. همچنین حرکت این عیوب باعث می‌شود که در مناطقی همچون مرزدانه‌ها انباشتگی عیوب

می‌شود. این کرنش بیشتر باعث تبلور مجدد دینامیکی و ریزدانه‌سازی بیشتر شده است.

در شکل ۷ تصاویر متالوگرافی نوری سطحی لوله قبل و بعد از فرآیند SPD گرم نشان داده شده است. می‌توان گفت که ریزدانه سازی رخ داده است و علت همان تبلور مجدد دینامیکی در شرایط دمایی بالا و کرنش پلاستیک زیاد است. همین امر باعث شده است که اختلاف اندازه دانه در قسمت سطح مقطع و سطح نمونه خیلی متفاوت نباشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند TCEC گرم تاثیر بیشتری در در ریزدانه سازی داشته است.

نکته قابل توجه دیگر در مورد لوله TCEC گرم شده این است که همانطور که در تصاویر شکل ۵ تا ۷ دیده می‌شود کشیدگی دانه‌ها به نسبت نمونه‌ی خام و نمونه کار سرد شده خیلی کمتر است. علت این امر وقوع بلور مجدد دینامیکی نمونه SPD گرم شده است که منجر به تشکیل مرزدانه‌های جدید و در نتیجه ریزدانه‌تر شدن ساختار می‌شود. اندازه دانه استخراج شده از تصاویر متالوگرافی TCEC گرم متوسط ۴۳ میکرون می‌باشد.

سختی اندازه‌گیری شده نمونه‌ی میلگرد مس خالص قبل از انجام فرآیند مقدار Hv ۷ اندازه گیری شد. در جدول ۳ نتایج میکروسختی‌سنجی از نمونه TCEC شده سرد در قسمت

جدول ۳. نتایج میکروسختی نمونه‌ی TCEC شده‌ی سرد در قسمت‌های سطح مقطع و سطح لوله

| ناحیه | I | III | III | IV | V | VI | VII | VIII | میانگین |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| سطح مقطع لوله | ۱۳۲/۵ | ۱۲۸/۲ | ۱۱۷/۷ | ۱۱۵/۳ | ۱۱۸/۰ | ۱۱۰/۹ | ۱۲۰/۱ | ۱۳۷/۲ | ۱۲۲/۴۸ |
| سطح لوله | ۸۳/۹ | ۹۱/۱ | ۹۰/۷ | ۸۱/۴ | ۸۵/۷ | ۹۱/۲ | ۸۶/۸ | ۹۷/۶ | ۸۸/۵۵ |

جدول ۴. نتایج میکروسختی سنجی از نمونه‌ی TCEC شده‌ی گرم در قسمت‌های مختلف سطح مقطع و سطح لوله

| ناحیه | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | میانگین |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| سطح مقطع لوله | ۱۴۷/۹ | ۱۳۹/۵ | ۱۳۷/۴ | ۱۴۸/۷ | ۱۴۳/۴ | ۱۳۸/۶ | ۱۴۴/۸ | ۱۴۰/۶ | ۱۴۲/۶۱ |
| سطح لوله | ۱۱۳/۶ | ۱۱۸/۰ | ۱۱۹/۴ | ۱۱۱/۹ | ۱۱۶/۳ | ۱۱۰/۱ | ۱۱۹/۱ | ۱۱۷/۵ | ۱۱۵/۷۴ |

می‌توان ریزدانه‌ی بیشتری که به دلیل تبلور مجدد دینامیکی در عملیات SPD گرم حاصل شده است را دلیل دیگر توزیع یکنواخت سختی و در نتیجه توزیع یکنواخت کرنش دانست. این امر در هر دو قسمت سطح و سطح مقطع قابل مشاهده است. از طرفی اختلاف چندانی در سختی قسمت سطح در مقایسه با سختی سطح مقطع دیده نمی‌شود. علت را می‌توان دمای حدوداً یکسان در حین انجام تست و غالب بودن تاثیر دما بر عملیات SPD گرم دانست که نتیجه‌ی آن اختلاف نه چندان زیاد در اندازه‌ی دانه در دو قسمت سطح و سطح مقطع و همچنین میزان یکنواختی تقریباً یکسان در توزیع سختی و کرنش در این دو قسمت از لوله می‌باشد.

مقادیر سختی لوله اولیه و لوله‌های TCEC در حالت سرد و گرم، در شکل ۸ مقایسه شده اند. همانگونه که مشاهده می‌شود سختی لوله‌ها بعد از انجام یک پاس عملیات SPD چه به صورت گرم و چه به صورت سرد افزایش یافته است. با مقایسه‌ی میزان سختی نمونه‌های SPD سرد و SPD گرم، به طور کلی در هر دو قسمت سطح و سطح مقطع، سختی نمونه‌ی SPD گرم افزایش بیشتری داشته است. علت آن، وقوع تبلور مجدد دینامیکی و ریزدانه‌ی ساختار نمونه گرم است. اما با مقایسه‌ی دو قسمت سطح و سطح مقطع در هر دو عملیات TCEC گرم و سرد، می‌توان نتیجه گرفت که به دلیل هندسه قسمت گردنی شکل قالب و میزان تنش‌ی که در حین انجام عملیات به قسمت سطح مقطع در مقایسه با قسمت سطحی، وارد می‌شود، این قسمت کرنش بیشتری را تجربه کرده و ریزدانه‌تر شده و در نتیجه سختی بیشتری به خود گرفته است. این اختلاف میزان سختی در دو قسمت سطح مقطع و سطح نمونه در عملیات TCEC گرم، به دلیل بالا بودن دما و ریزدانه‌ی بیشتر، مشهودتر است.

بوجود آمده که باعث افزایش بیشتر سختی می‌شود. از طرفی ریزدانه شدن ریزساختار نیز باعث افزایش سختی می‌شود؛ چرا که چگالی مرزدانه‌ها افزایش یافته و در نتیجه عیوب بیشتری تولید می‌شود [۲۳-۲۵]. همچنین محل انباشتگی و قفل شدن آن‌ها در یکدیگر افزایش می‌یابد. در عملیات SPD گرم، به دلیل ریزدانه سازی بیشتر نسبت به عملیات SPD سرد، به دلیل بالا بودن دما که منجر به افزایش چگالی نابجایی‌ها و افزایش مرزدانه‌ها و همچنین تسهیل در حرکت عیوبی چون نابجایی‌ها می‌شود، انتظار می‌رود قطعه مورد نظر سختی بیشتری به خود گیرد.

در جدول ۴ نیز نتایج میکروسختی سنجی از نمونه‌ی TCEC شده‌ی گرم در دو قسمت سطح و سطح مقطع در ۸ ناحیه مختلف آورده شده است.

مقایسه مقادیر میانگین سختی هم سطح مقطع لوله و هم سطح مقطع لوله TCEC گرم شده با سختی HV ۷۷ نمونه خام، حاکی از تاثیر فرآیند SPD بر ساختار دارد بطوریکه تاثیر توأمان کارسختی و ریزشدن دانه‌ها منجر به افزایش سختی شده است.

همانطور که نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد، مقادیر سختی اختلاف بسیار کمی با یکدیگر دارند و در نتیجه اختلاف کمی با مقدار میانگین مشاهده می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت که توزیع سختی در عملیات SPD گرم بسیار همگن‌تر از توزیع سختی در عملیات SPD سرد است. نتیجتاً توزیع کرنش در عملیات SPD گرم به طور یکنواخت انجام شده است و همچنین می‌توان نتیجه گرفت که در عملیات SPD گرم، توزیع کرنش نسبت به عملیات SPD سرد، کمی یکنواخت‌تر بوده است. علت این امر دمای بالای انجام تست بوده است که منجر به حرکت آسان‌تر نابجایی‌ها و در نتیجه انجام کرنش پلاستیک یکنواخت نواحی مختلف می‌شود. همچنین

References

- [1] K.S. Kumar, H. Van Swygenhoven, S. Suresh Mechanical behavior of nanocrystalline metals and alloys, *Acta Mater.* 51 (2003) 5743-5774.
- [2] A.J. Detor, C.A. Schuh, Tailoring and patterning the grain size of nanocrystalline alloys, *Acta Mater.* 55 (2007) 371-379. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2006.08.032>.
- [3] Inoue, A. Takeuchi, Recent progress in bulk glassy, nano-quasicrystalline and nanocrystalline alloys, *Mater. Sci. Eng. A.* 375-377 (2004) 16-30. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2003.10.159>.
- [4] Babaei, M. Mosavi Mashadi, H. Jafarzadeh, Tube Cyclic Extrusion-Compression (TCEC) as a novel severe plastic deformation method for cylindrical tubes, *Mater. Sci. Eng. A.* 598 (2014) 1-6.
- [5] S.S. Jamali, G. Faraji, K. Abrinia, Hydrostatic radial forward tube extrusion as a new plastic deformation method for producing seamless tubes, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 88 (2017) 291-301. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8754-6>.
- [6] N. Mathew, I. Dinaharan, S.J. Vijay, N. Murugan, Microstructure and Mechanical Characterization of Aluminum Seamless Tubes Produced by Friction Stir Back Extrusion, *Trans. Indian Inst. Met.* 69 (2016) 1811-1818. <https://doi.org/10.1007/S12666-016-0841-8/METRICS>.
- [7] S.S. Jamali, G. Faraji, K. Abrinia, Evaluation of mechanical and metallurgical properties of AZ91 seamless tubes produced by radial-forward extrusion method, *Mater. Sci. Eng. A.* 666 (2016) 176-183. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2016.04.048>.
- [8] M. Mahmoodian, Introduction, *Reliab. Maintainab. In-Service Pipelines.* (2018) 1-48.
- [9] G. Faraji, H.S. Kim, Review of principles and methods of severe plastic deformation for producing ultrafine-grained tubes, *Mater. Sci. Tech.* 33 (2017) 905-923.
- [10] [Http://Dx.Doi.Org/10.1080/02670836.2016.1215064](http://Dx.Doi.Org/10.1080/02670836.2016.1215064). 33 (2016) 905-923. <https://doi.org/10.1080/02670836.2016.1215064>
- [11] M. Eftekhari, G. Faraji, M. Bahrami, Processing of commercially pure copper tubes by hydrostatic tube cyclic extrusion-compression (HTCEC) as a new SPD method, *Arch. Civ. Mech. Eng.* 21 (2021) 1-12. <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00272-w>.
- [12] M.S. Mohebbi, A. Akbarzadeh, Accumulative spin-bonding (ASB) as a novel SPD process for fabrication of nanostructured tubes, *Mater. Sci. Eng. A.* 528 (2010) 180-188. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2010.08.081>.
- [13] M. Motallebi Savarabadi, G. Faraji, M. Eftekhari, Microstructure and Mechanical Properties of the Commercially Pure Copper Tube After Processing by Hydrostatic Tube Cyclic Expansion Extrusion (HTCEE), *Met. Mater. Int.* 27 (2021)



شکل ۸. نمودار میله‌ای قیاس میزان سختی نمونه‌ها در نواحی مختلف.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق قالبی بر مبنای روش TCEC برای اعمال کرنش پلاستیک شدید طراحی و ساخته شد. سپس لوله‌های مسی خالص تحت فرآیند TCEC به دو صورت سرد و گرم قرار گرفتند. از بررسی ساختار و سختی نمونه‌ها نتایج زیر حاصل گردید.

- ۱- قالب طراحی و ساخته شده به خوبی برای اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید لوله مسی قابل استفاده است.
- ۲- پس از انجام فرایند TCEC سرد، کاهش اندازه دانه در سطح مقطع به میزان ۱۴٪ و در سطح لوله کشیدگی قابل توجهی مشاهده می‌شود.
- ۳- سختی نمونه‌ی TCEC شده‌ی سرد به نسبت نمونه‌ی خام در قسمت سطح مقطع حدود ۶۰٪ و در قسمت بدنه حدود ۲۰٪ افزایش یافت.
- ۴- پس از انجام فرآیند TCEC گرم، ریزدانه‌سازی بیشتری به نسبت فرآیند SPD سرد در نمونه لوله مشاهده شد. کاهش اندازه دانه در فرایند TCEC گرم به میزان ۳۲٪ به نسبت نمونه خام رخ داده است. دلیل این موضوع به نظر می‌رسد وقوع پدیده تبلور مجدد دینامیکی مس باشد. همچنین، در سطح لوله کشیدگی دانه کمتر و اندکی ریزدانه شدن دیده می‌شود.
- ۵- سختی نمونه لوله‌ی SPD گرم به نسبت نمونه‌ی خام در قسمت سطح مقطع حدود ۹۳٪ و در قسمت سطح حدود ۵۳٪ افزایش یافت.

- [14] Hadadzadeh, M.A. Wells, S.K. Shaha, H. Jahed, B.W. Williams, Role of compression direction on recrystallization behavior and texture evolution during hot deformation of extruded ZK60 magnesium alloy, *J. Alloys Compd.* 702 (2017) 274-289. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2017.01.236>.
- [15] X.G. Fan, H. Yang, P.F. Gao, Deformation behavior and microstructure evolution in multistage hot working of TA15 titanium alloy: On the role of recrystallization, *J. Mater. Sci.* 46 (2011) 6018-6028. <https://doi.org/10.1007/S10853-011-5564-Y/METRICS>.
- [16] S. Mandal, A.K. Bhaduri, V.S. Sarma, Role of twinning on dynamic recrystallization and microstructure during moderate to high strain rate hot deformation of a ti-modified austenitic stainless steel, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 43 (2012) 2056-2068. <https://doi.org/10.1007/S11661-011-1012-5/METRICS>.
- [17] H.J. McQueen, Dynamic Recovery and Recrystallization, *Enycl. Mater. Sci. Technol.* (2001) 2375-2381.
- [18] L.N. Larikov, Dynamic recovery and dynamic recrystallization, *Izv. Akad. Nauk SSSR, Met.* (n.d.) 69-75.
- [19] Belyakov, W. Gao, H. Miura, T. Sakai, Strain-Induced Grain Evolution in Polycrystalline Copper during Warm Deformation, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 29 (1998) 2957-2965.
- [20] X. Gao, H. bin Wu, M. Liu, Y. xiang Zhang, X. dong Zhou, Dynamic Recovery and Recrystallization Behaviors of C71500 Copper-Nickel Alloy Under Hot Deformation, *J. Mater. Eng. Perform.* 29 (2020) 7678-7692.
- [21] H. Zhang, J. Wang, Q. Chen, D. Shu, C. Wang, G. Chen, Z. Zhao, Study of dynamic recrystallization behavior of T2 copper in hot working conditions by experiments and cellular automaton method, *J. Alloys Compd.* 784 (2019) 1071-1083.
- [22] S. Andiarwanto, H. Miura, T. Sakai, Dynamic Recrystallization at Triple Junction during High-Temperature Deformation in Copper Tricrystal, *Mater. Sci. Forum.* 408-412 (2002) 761-766.
- [23] Y.H. Zhao, Y.T. Zhu, X.Z. Liao, Z. Horita, T.G. Langdon, Tailoring stacking fault energy for high ductility and high strength in ultrafine grained Cu and its alloy, *Appl. Phys. Lett.* 89 (2006) 121906. <https://doi.org/10.1063/1.2356310>.
- [24] Y.H. Zhao, Z. Horita, T.G. Langdon, Y.T. Zhu, Evolution of defect structures during cold rolling of ultrafine-grained Cu and Cu-Zn alloys: Influence of stacking fault energy, *Mater. Sci. Eng. A.* 474 (2008) 342-347. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2007.06.014>.
- [25] M.J. Starink, Dislocation versus grain boundary strengthening in SPD processed metals: Non-causal relation between grain size and strength of deformed polycrystals, *Mater. Sci. Eng. A.* 705 (2017) 42-45. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2017.08.069>.
- [26] M.S. Mehranpour, H. Shahmir, M. Nili-ahmadabadi, Microstructure and excess free volume of severely cold shape rolled CoCrFeNiMn high entropy alloy, *J. Alloys Compd.* 840 (2020) 155672. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2020.155672>.