



Achieving Desired Microstructure and Mechanical Properties of 40-60 Brass Alloy Processed by Severe Plastic Deformation

Ali Sonboli^{a*}, Alireza Rahimi^b

^a Assistant Professor, Materials Engineering and Metallurgy, Arak University, Arak, P.O.B. 38156-88349, Iran

^b BSc., Materials Engineering and Metallurgy, Arak University, Arak, P.O.B. 38156-88349, Iran

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Sonboli A, Rahimi A, Achieving Desired Microstructure and Mechanical Properties of 40-60 Brass Alloy Processed by Severe Plastic Deformation. *Industrial Innovations*. 2023;1(3):271-284

 <https://doi.org/10.61186/jii.1.3.271>

KEYWORDS

Severe plastic deformation;
Brass alloy;
Microstructure;
Mechanical properties.

ABSTRACT

Copper alloys (brasses) are widely used as engineering materials in shipbuilding, aerospace, petrochemical, and military industries. In this study, brass alloy 60-40, as one of the most important copper-based alloys, was subjected to severe plastic deformation (SPD) in the ECAP (Equal Channel Angular Pressing) process to improve its strength and maintain elongation percentage, which is an indicator of ductility. The process was carried out at 350 °C in C-path and up to six passes for the samples. Microstructural studies performed using optical microscopy showed that discontinuous recrystallization starts from the first pass in the alpha phase. With increasing strain, the fraction of recrystallized grains increased and the size of the new grains was smaller than the initial grains. The grain size reached less than one micron after the fifth and sixth passes. Also, examination of the microstructure of the beta phase showed that recrystallization in this phase started after the third pass and gradually spread in the structure with increasing number of passes. The results of micro hardness and uniaxial tensile tests confirmed the significant increase in the hardness and tensile strength of the alloy with increasing number of passes. Also, the elongation percentage at room temperature of the ECAP-processed samples was over 40%, which is only 15% less than the initial annealed sample. The results of this study showed that ECAP can be used to improve the mechanical properties of Cu-60Zn alloy. The refinement of grains in this process can lead to an increase in tensile strength and hardness, while the elongation can be maintained at an acceptable level.

Extended Abstract

1. Purpose

Brass alloys are widely used as engineering materials in shipbuilding, aerospace, petrochemical, and military industries. Cu-40Zn is one of the most important brass alloys with good mechanical properties and corrosion resistance. The microstructure of this alloy consists of two phases: α -phase with FCC structure and β -phase with CsCl structure. The presence of these two phases with significantly different mechanical properties, chemical composition, and crystal structure makes this alloy unique. The low stacking fault energy (SFE) of α -phase has been the subject of many studies on the physical and mechanical properties of this phase under low strains. Similarly, there is sufficient information on the behavior of β -phase under single-phase conditions. Studies have also been reported on the behavior of these two phases in combination and as single crystals in brass alloys at different temperatures under strains of less than 40%. However, the behavior of these phases under high strains has not been studied enough. Therefore, it is necessary to investigate the deformation behavior of Cu-40Zn alloy to clarify the deformation mechanism in such alloys under high strains.

* Corresponding author.

E-mail address: a-sonboli@araku.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.61186/jii.1.3.271>

Received: November 14, 2023; Received in revised form: December 9, 2023; Accepted: December 16, 2023

Article type: Research Paper

©Author



The use of severe plastic deformation (SPD) processes to improve the mechanical and microstructural properties of metals and alloys has attracted the attention of many researchers. Among these processes, equal-channel angular pressing (ECAP) is one of the few methods for producing cylindrical specimens. In this process, the specimen is passed through a die with two channels of equal diameter. The angle between these two channels can be varied from more than zero to less than 180 degrees. The smaller the angle, the higher the shear stress applied to the specimen. The use of ECAP for brittle alloys such as Cu-40Zn is very difficult. However, in the present study, Cu-40Zn alloy was subjected to ECAP at 350 °C.

2. Methodology

- Brass alloy with the following chemical composition was used:
 - 60 wt% Cu
 - 40 wt% Zn
 - 0.03 wt% Pb
- The annealing treatment was performed at 500 °C for 2 hours.
- The ECAP process was performed at 350 °C in the C-route for six passes.
- The tensile tests were performed at room temperature.
- The hardness tests were performed in the ECAP direction.
- The grain size was measured using image analysis software.

3. Finding

The results of this study showed that ECAP can be an effective method for improving the mechanical properties of Cu-60Zn alloy. The refinement of grains in this process led to an increase in tensile strength and hardness, while the elongation was also acceptable.

Specific points of interest:

- The microstructure of the alloy was significantly refined with increasing the number of passes. The average grain size of the α -phase decreased to less than 1 μm after the sixth pass.
- The tensile strength and hardness of the alloy increased with increasing the number of passes. In the last three passes, these values reached about twice the tensile strength and hardness of the annealed sample, respectively.
- The elongation of the alloy decreased with increasing the number of passes. However, the elongation was still acceptable, especially in the first, third and final passes.

4. Conclusion

The results of this study showed that ECAP can be used to improve the mechanical properties of Cu-60Zn alloy. The refinement of grains in this process can lead to an increase in tensile strength and hardness, while the elongation can be maintained at an acceptable level.



دستیابی به ریزساختار و خواص مکانیکی مطلوب آلیاژ برنج ۴۰-۶۰ فرآوری شده با تغییر شکل پلاستیک شدید

علی سنبل^{الف*}، علیرضا رحیمی^ب

^{الف} استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، a-sonboli@araku.ac.ir

^ب کارشناس، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، a.rahimi.00@bsc.araku.ac.ir

واژگان کلیدی	چکیده
تغییر شکل پلاستیک شدید؛ آلیاژ برنج؛ ریزساختار؛ خواص مکانیکی.	آلیاژهای مس (برنج‌ها) به‌طور وسیعی به‌عنوان مواد مهندسی در صنایع کشتی‌سازی، هواپیماسازی، پتروشیمی و صنایع نظامی استفاده می‌شود. در این پژوهش آلیاژ برنج ۴۰-۶۰ به‌عنوان یکی از مهم‌ترین آلیاژهای پایه مس در فرآیند پرس در کانال زاویه‌دار (ECAP) به‌منظور افزایش استحکام و حفظ درصد ازدیاد طول که معیاری برای انعطاف‌پذیری است، تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفت. فرآیند در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد در مسیر C و تا شش پاس برای نمونه‌ها انجام شد. مطالعات ریزساختاری که با استفاده از میکروسکوپ نوری انجام شد نشان داد تبلور مجدد ناپیوسته از پاس اول در فاز آلفا آغاز می‌شود. با افزایش میزان کرنش، کسر تبلور مجدد افزایش یافت و اندازه دانه‌های جدید کوچک‌تر از دانه‌های اولیه بود و اندازه دانه‌ها پس از پاس پنجم و ششم به کمتر از یک میکرون رسید. همچنین بررسی ریزساختار فاز بتا نشان داد که تبلور مجدد در این فاز پس از پاس سوم آغاز شد و به‌تدریج با افزایش تعداد پاس در ساختار گسترش پیدا کرد. نتایج آزمون‌های ریز سختی و کشش تک‌محوری موید افزایش چشمگیر سختی و استحکام کششی آلیاژ با افزایش تعداد پاس بود. همچنین درصد ازدیاد طول در دمای محیط نمونه‌های ECAP شده بیش از ۴۰ درصد بود که تنها ۱۵ درصد از نمونه آیل اولیه کمتر است. نتایج این مطالعه نشان داد که می‌توان از ECAP برای بهبود خواص مکانیکی آلیاژ برنج ۴۰-۶۰ استفاده کرد. ریز شدن دانه‌ها در این فرآیند می‌تواند منجر به افزایش استحکام کششی و سختی شود، درحالی‌که ازدیاد طول می‌تواند در سطح قابل قبولی حفظ شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۵	

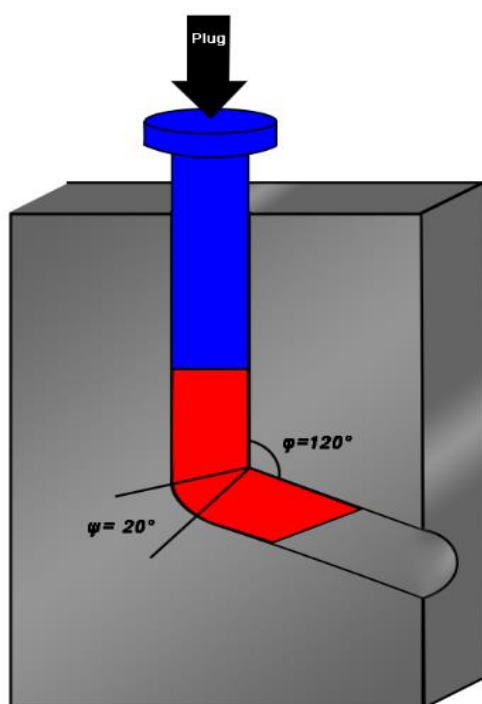
۱- مقدمه

آلیاژهای مس (برنج‌ها) به‌طور وسیعی به‌عنوان مواد مهندسی در صنایع کشتی‌سازی، هواپیماسازی، پتروشیمی و صنایع نظامی استفاده می‌شود. آلیاژ دوفازی Cu-40Zn یکی از مهم‌ترین آلیاژهای مس است و به دلیل خواص مکانیکی مطلوب و مقاومت مناسب در برابر خوردگی، یکی از اولین انتخاب‌ها در تولید شیرها و اتصالات خط است. ریزساختار این آلیاژ حاوی فاز آلفا با ساختار کریستالی FCC به‌عنوان زمینه و فاز بتا با ساختار CsCl است. مجاورت دو فاز کاملاً متفاوت از نظر خواص مکانیکی، ترکیب شیمیایی و ساختار کریستالی و در نتیجه رفتار تغییر شکل، این آلیاژ را ویژه‌تر کرده است. کم بودن انرژی

* نویسنده مسئول؛

نقص در چیده شدن (SFE^1) باعث منجر به مطالعات متعدد در زمینه خواص فیزیکی و مکانیکی برنج فاز α تحت کرنش‌های کم شده است [۳-۱]. به همین ترتیب، اطلاعات کافی در مورد تغییر شکل تک فاز β در آلیاژهای برنج در دسترس است [۴-۶]. همچنین مطالعاتی در مورد رفتار این دو فاز در کنار یکدیگر و به صورت تک‌بلورها در دماهای مختلف در آلیاژهای برنج دو فاز در کرنش‌های کمتر از ۴۰٪ [۷-۹] گزارش شده است. با این حال، رفتار فازهای ترکیبی در کرنش‌های بالا هنوز به اندازه کافی مورد مطالعه قرار نگرفته است. به همین دلیل، بررسی رفتار تغییر شکل آلیاژ برنج ۴۰-۶۰ حاوی این دو فاز برای روشن شدن مکانیزم تغییر شکل در چنین آلیاژی در کرنش‌های بالا ضروری است.

از آنجاکه کم‌بودن انرژی نقص در چیده شدن یک مانع بزرگ برای تغییر شکل آلیاژهای تک فاز است، بدیهی است که اضافه شدن یک فاز ثانویه سخت به ساختار می‌تواند فرآیند تغییر شکل را دشوارتر کند. این دلیل می‌تواند محدود بودن مطالعات انجام شده در خصوص انجام فرآیندهای تغییر شکل این آلیاژ را تا حد زیادی توجیه کند. امروزه استفاده از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید برای بهبود خواص مکانیکی و ریزساختاری فلزات و آلیاژها مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. در این بین، فرآیند پرس در کانال زاویه‌دار ($ECAP^2$) به عنوان یکی از معدود روش‌های تولید نمونه‌های استوانه‌ای شکل به شمار می‌رود. در این روش نمونه وارد قالبی متشکل از کانال‌های ورودی و خروجی هم قطر می‌شود. زاویه بین این دو کانال می‌تواند از بیش از صفر درجه تا کمتر از ۱۸۰ درجه متغیر باشد [۱۰-۱۲]. در طراحی قالب هر چه این زاویه کوچک‌تر در نظر گرفته شود تنش برشی شدیدتری به نمونه وارد می‌شود. نمونه در حین عبور از این زاویه تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار می‌گیرد و تغییرات ریزساختاری در آن ایجاد می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱ شماتیک قالب ECAP

تفاوت روش ECAP با سایر روش‌ها این است که با توجه به قطر یکسان کانال‌های ورودی و خروجی، تغییرات ابعادی در نمونه ایجاد نمی‌شود و تمام انرژی مصرف شده برای تغییر شکل در نمونه ذخیره می‌شود. به همین دلیل استفاده از این روش برای آلیاژهای ترد مانند آلیاژ برنج دوفازی ۴۰-۶۰ بسیار دشوار است. تاکنون مطالعات بسیار محدودی در زمینه اثر فرآیند

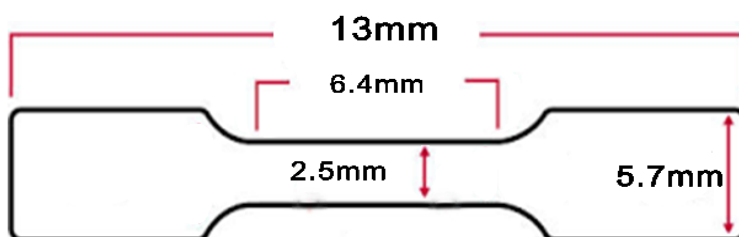
¹ Stacking Fault Energy

² Equal-Channel Angular Pressing

ECAP بر خواص این آلیاژ انجام شده است. به عنوان مثال شاه میرزالو و همکاران [۱۳] تأثیر تغییر شکل پلاستیک شدید را بر آلیاژ دوفازی برنج ۴۰-۶۰ به صورت پرس با قالب دنداندار بررسی کرده و تأثیر این فرایند را بر ریزساختار، خواص مکانیکی و مکانیک شکست آن بررسی کرده‌اند. موسوی و همکاران [۱۴] خواص خوردگی این آلیاژ را در فرآیند جوشکاری اغتشاشی - اصطکاکی که به نوعی فرآیند تغییر شکل شدید محسوب می‌شود بررسی کرده‌اند. ریزساختار و خواص مکانیکی این آلیاژ در اکستروژن معکوس توسط فارابی و همکاران [۱۵] مورد بررسی قرار گرفته است. تنها کار جدید در زمین ECAP این آلیاژ مربوط به سال ۲۰۲۰ است. در این تحقیق هینوال و همکاران [۱۶] تأثیر ECAP بر خواص مکانیکی و بافت این آلیاژ را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این تحقیق، دمای محیط اجازه انجام پاس‌های بیشتر را فراهم نکرده است، چراکه تردی زیاد این آلیاژ سبب می‌شود که نمونه در همان پاس‌های اول دچار ترک‌های شدید و بعضاً شکست ناگهانی شود. موفقیت در اعمال روش ECAP بر چنین آلیاژی مستلزم انتخاب مناسب پارامترهای مختلف فرآیند از جمله دما، نرخ کرنش، تعداد پاس (کرنش) و مسیر انجام فرآیند است. انتخاب این پارامترها بر ریزساختار و خواص مکانیکی حاصل بسیار مؤثر است. بنابراین در تحقیق پیش رو، آلیاژ برنج دوفازی ۴۰-۶۰ در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد تحت فرآیند ECAP قرار گرفت. این تحقیق می‌تواند از جنبه‌های مختلفی با تحقیقات سایر محققین که در بالا به آن‌ها اشاره شد متفاوت باشد. با توجه به عدم تغییرات ابعادی نمونه در فرآیند ECAP میزان تنش اعمالی به مراتب بیشتر از فرآیندهای نورد و اکستروژن است. همچنین، در پژوهش حاضر فرآیند تغییر شکل در دمای بالا انجام شده است که همراه با تغییر در رفتار تغییر شکل آلیاژ است. در ادامه پس از بیان روش انجام تحقیق به بررسی نتایج ریزساختاری و خواص مکانیکی آلیاژ برنج ۴۰-۶۰ تحت فرآیند ECAP پرداخته شده است.

۲- مواد مورد استفاده و روش انجام آزمایش‌ها

ماده مورد استفاده در مطالعه حاضر، میله آهنگری از آلیاژ برنج دو فاز با ترکیب شیمیایی ۶۰/۱۷ درصد وزنی مس، ۳۹/۸۲ درصد وزنی روی، ۰/۰۰۳ درصد وزنی سرب و باقی مانده سایر عناصر بود. آلیاژ برنج فورج شده ابتدا در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت آنیل شد. فرآیند ECAP در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد در مسیر C برای شش پاس انجام شد. شماتیک قالب ECAP در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زاویه داخلی قالب و زاویه انحنای قالب در این فرآیند به ترتیب ۱۲۰ درجه و ۲۰ درجه بودند. قطر نمونه‌ها ۲۰ و طول آن‌ها ۶۰ میلی‌متر بود. لازم به ذکر است که از اسپری MoS_2 به عنوان ماده روان‌کننده استفاده شده است. برای بررسی ریزساختار، نمونه‌ها در محلول کلرو فریک اچ شدند. ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری Olympus در جهت اکستروژن مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش کشش توسط دستگاه H50KS Hounsfield در دمای اتاق برای بررسی خواص مکانیکی نمونه‌هایی که در جهت ECAP بریده شده بودند، انجام شد [۱۷]. ابعاد نمونه کششی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ ابعاد نمونه کششی

مطالعات سختی در جهت ECAP با بار ۵۰ گرم به مدت ۱۰ ثانیه انجام شد. اندازه دانه‌ها با استفاده از نرم‌افزار image J اندازه‌گیری شد. در سه پاس اول که اندازه دانه‌ها بیش از یک میکرون بود، اندازه‌گیری به راحتی انجام شد. اما در سه پاس بعدی که دانه‌ها به شدت ریز شدند، انجام این کار نیاز به صرف زمان و دقت زیادی پیدا کرد. برای انجام دقیق این کار نیاز بود

که مرز دانه‌های ریز تشکیل شده با وضوح بیشتری مشخص باشند. به این منظور نمونه‌ها در زمان‌های مختلفی اچ شدند و ریزساختار آن‌ها بررسی شد. هرچند مشاهده دقیق دانه‌های با اندازه کمتر از یک میکرون با استفاده از میکروسکوپ نوری بسیار دشوار است و اندازه دانه‌ها به صورت تقریبی و با در نظر گرفتن خطا گزارش شد.

۳- نتایج و بحث

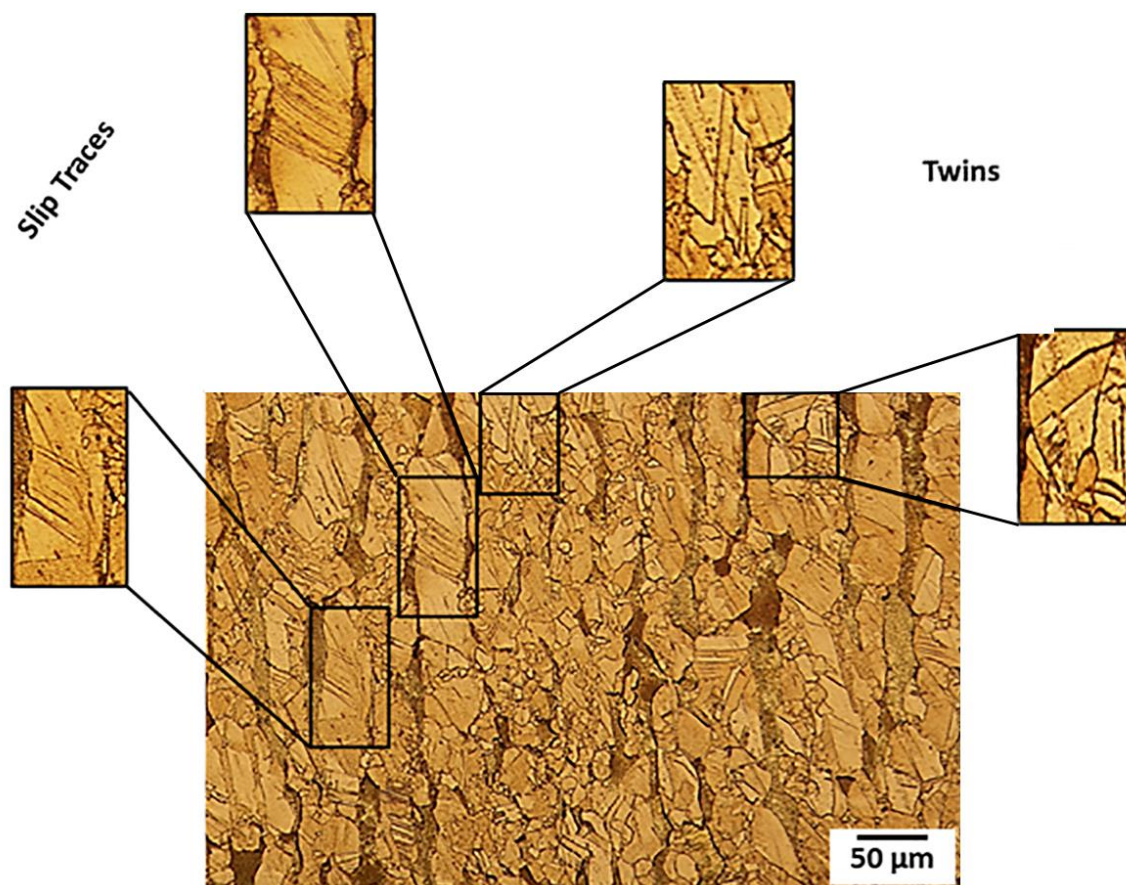
۳-۱- بررسی ریزساختار

شکل ۳ ریزساختار نمونه اولیه را پس از آنیل در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. تفاوت رنگ در دو فاز آلفا و بتا کاملاً مشهود است. در این تصویر، فازی که با رنگ روشن مشاهده می‌شود فاز زمینه آلفا است و فاز تیره‌تر معرف فاز بتا است. شکل ۴ ریزساختار نمونه را پس از پاس اول نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که دانه‌ها در هر دو فاز در راستای محور فرآیند کشیده شده‌اند اما تفاوت مشهود، وقوع تبلور مجدد در برخی از دانه‌های فاز آلفا است که می‌تواند به دلیل تفاوت ساختاری دو فاز باشد. فاز آلفا به‌عنوان فاز زمینه دارای ساختار کریستالی FCC و فاز بتا دارای ساختار کریستالی سزیم کلرید است. این تفاوت باعث می‌شود که در فاز آلفا سیستم‌های لغزشی راحت‌تر (در تنش‌های کمتر) فعال شود، به همین دلیل میزان انرژی ذخیره شده در فاز آلفا به مراتب بیشتر از فاز بتا خواهد بود.



شکل ۳ ریزساختار نمونه اولیه، آنیل شده در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد

اشاره به این نکته ضروری است که هرچند بازیابی در فاز آلفا سریع‌تر از فاز بتا است، انرژی ذخیره شده به قدری زیاد است که برای کاهش آن علاوه بر بازیابی، تبلور مجدد نیز رخ داده است. این در حالی است که در فاز بتا، احتمالاً میزان انرژی ذخیره شده در حدی است که تنها بازیابی برای کاهش آن کافی بوده است که این امر سبب به تعویق افتادن تبلور مجدد در این فاز می‌شود [۱۸].



شکل ۴ ریزساختار نمونه پس از پاس اول ECAP

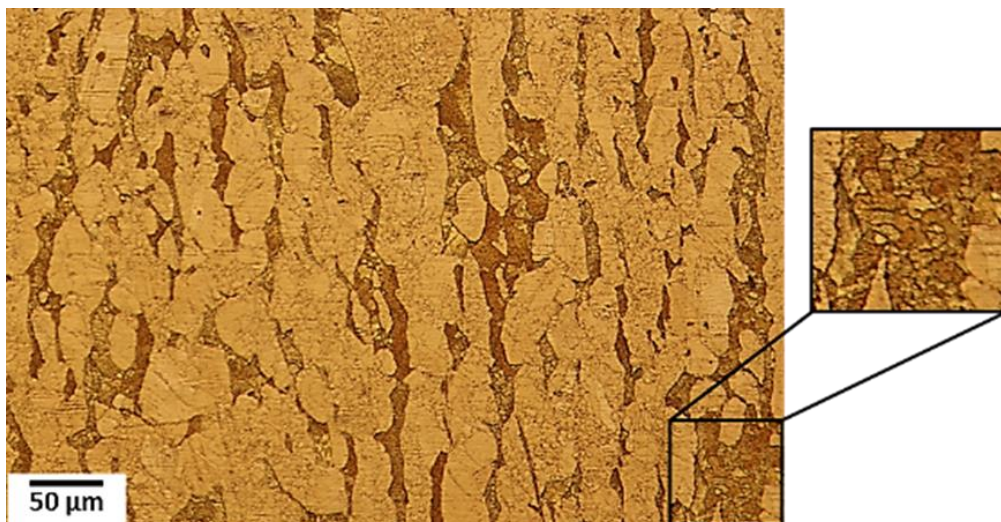
در تصویر شکل ۴، همچنین چند دسته خطوط موازی در فاز آلفا و در دانه‌های تبلور مجدد نیافته مشاهده می‌شود که معرف مسیرهای لغزش هستند. لازم به ذکر است که دیگر محققین نیز در تحقیقاتی مشابه این خطوط را به‌عنوان مسیرهای لغزش معرفی کرده‌اند [۱۹، ۲۰].



شکل ۵ ریزساختار نمونه پاس دوم پس از فرآیند ECAP در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد در مسیر C

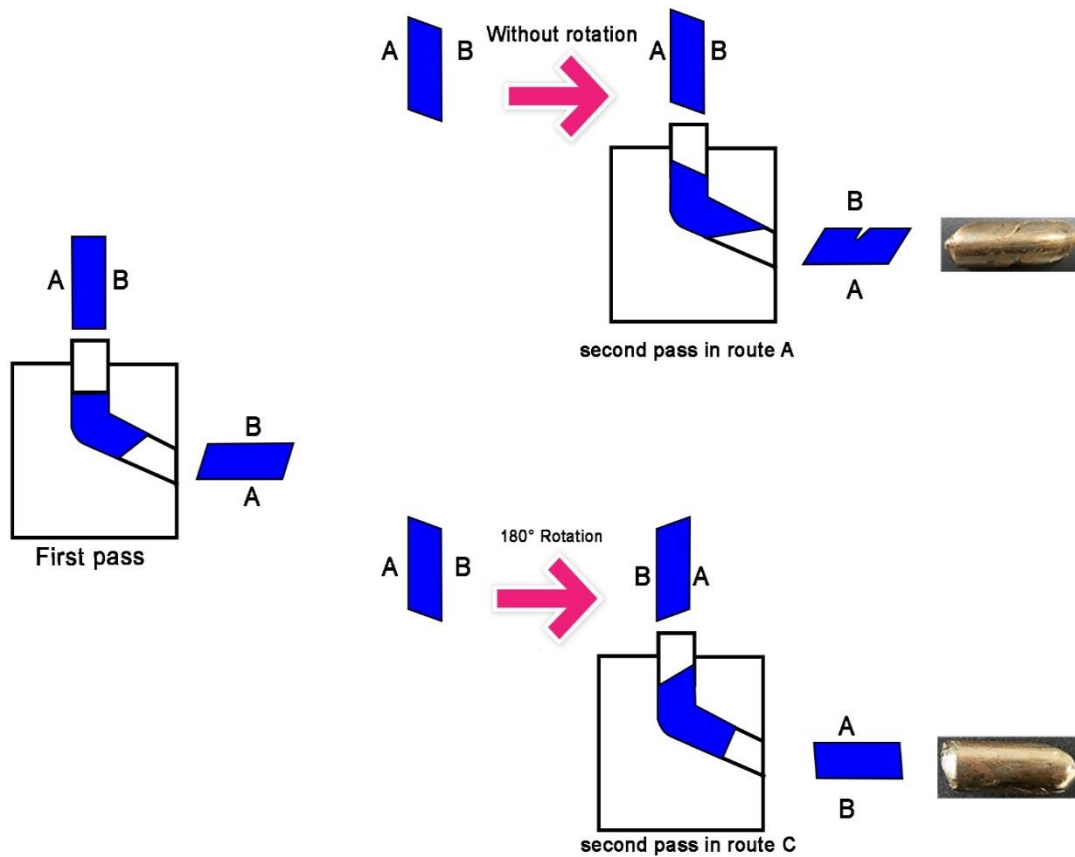
این خطوط موید لغزش نابجایی‌ها هستند و نشان می‌دهند که علی‌رغم کم بودن انرژی نقص در چیده شدن در فاز آلفا،

لغزش نابجایی‌ها سهم زیادی در تغییر شکل این فاز دارد. مشخصه دیگر ریزساختار نمونه در پاس اول، تشکیل تعدادی دوقلوبی در فاز آلفا است که با توجه به کم بودن انرژی نقص در چیده شدن این فاز دور از انتظار نبود. طبق شکل ۵ پس از پاس دوم، ریزساختار کاملاً تغییر کرد. مشاهده می‌شود که برخلاف پاس اول، دانه‌ها کاملاً هم‌محور و اندازه آن‌ها چند برابر شده است. این در حالی است که با توجه به شکل ۶ پس از پاس سوم، همچون پاس اول، فازها به شدت کشیده شده و دانه‌های ریز تبلور مجدد یافته بخش عمده‌ای از ساختار را در بر گرفته‌اند. نکته قابل توجه دیگر در شکل ۶ آغاز تبلور مجدد در فاز بتا است که نشان می‌دهد میزان انرژی ذخیره شده در این فاز پس از سه پاس به مقدار مورد نیاز برای تبلور مجدد رسیده است.



شکل ۶ دانه‌های تبلور مجدد در فاز β و دوقلوب‌های باز پخت در فاز α

شکل ۷ به صورت شماتیک دلیل تغییر مورفولوژی فازها در پاس‌های زوج و فرد را نشان می‌دهد. نمونه اولیه که به شکل استوانه است وارد قالب می‌شود. شکل هندسی این نمونه پس از خروج از قالب، استوانه‌ای با سطح مقطع دایره‌ای شکل نیست. با توجه به هندسه قالب، در حین عبور نمونه از قسمت تغییر شکل قالب، سطح B در اثر اعمال تنش برشی شدید به سمت جلو رانده می‌شود که دلیل کشیده شدن فازها به حساب می‌آید. در نتیجه نمونه‌ای که پس از پاس اول از قالب خارج می‌شود، سطح مقطع بیضوی دارد. چنانچه نمونه با همین جهت برای انجام پاس دوم وارد قالب شود، مسیر انجام فرآیند با نام مسیر A شناخته می‌شود [۲۱، ۲۲]. در این مسیر مجدداً سطح B با دیواره داخلی قالب در تماس خواهد بود. در این مسیر تنش‌ها در همان جهت قبلی به سطح B وارد می‌شوند که باعث ذخیره انرژی فوق‌العاده زیادی در المان‌های نزدیک به این سطح می‌شود. از آنجاکه SFE آلیاژ مورد بررسی بسیار کم است و از قابلیت شکل‌پذیری کمی برخوردار است، اعمال تنش در مسیر A احتمال شکست را افزایش می‌دهد [۲۳]. برای جلوگیری از این مشکل به جای مسیر A از مسیر C استفاده شد. به عبارت دیگر پس از پاس اول نمونه ۱۸۰ درجه در امتداد محور استوانه چرخید و برای انجام پاس دوم وارد قالب شد. در این حالت، به جای سطح B سطح A با دیواره داخلی قالب در تماس است. در چنین شرایطی تنش برشی به جای سطح B به سطح A وارد می‌شود. در واقع چرخش نمونه سبب می‌شود که مسیر اعمال تنش بر نمونه ۱۸۰ درجه تغییر کند که این امر سبب فشردگی و هم‌محور شدن فازهایی می‌شود که در پاس قبلی کشیده شده‌اند. پس از خروج نمونه از قالب مشاهده می‌شود که سطح مقطع نمونه تا حدودی به حالت اولیه خود یعنی دایره‌ای شکل نزدیک شده است (حداقل می‌توان گفت که به طور کامل بیضوی نیست). این سیکل برای پاس‌های فرد و زوج به صورت مداوم تکرار می‌شود.



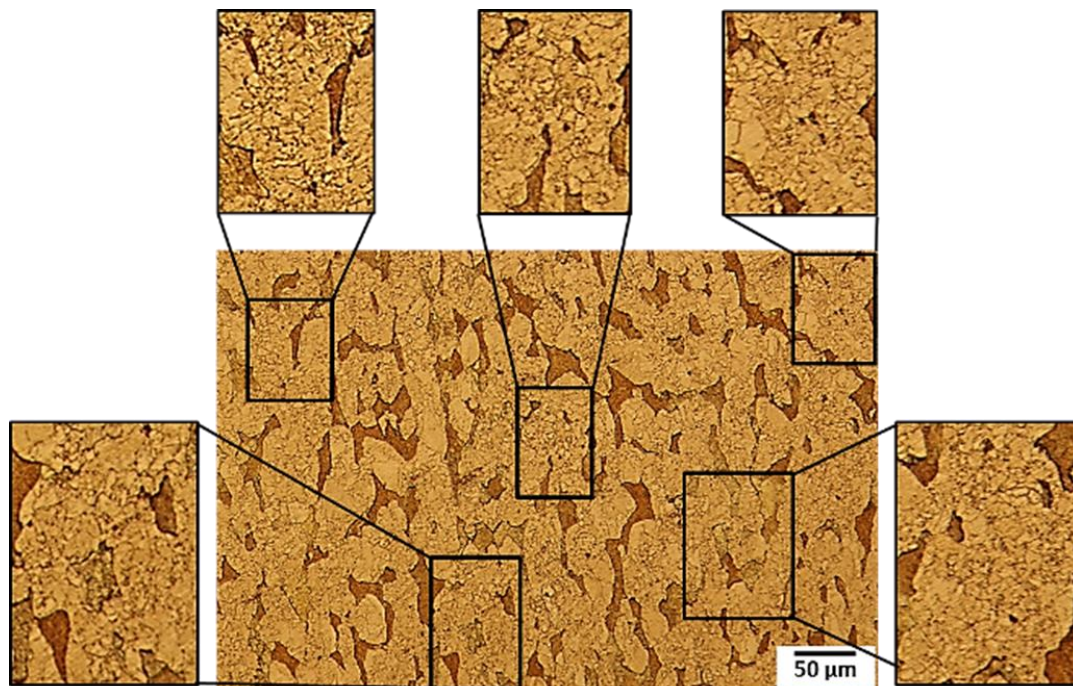
شکل ۷ شماتیک تغییرات هندسی نمونه در پاس یک و دو

شکل ۸ ریزساختار نمونه را پس از پاس چهارم نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، کسر دانه‌های تبلور مجدد یافته در فاز آلفا به صورت قابل توجهی افزایش یافته است. بررسی اندازه دانه‌های فاز آلفا نشان داد که در این پاس دانه‌ها تا حدی نسبت به پاس قبلی بزرگ‌تر شده‌اند (جدول ۱).

جدول ۱ میانگین اندازه دانه در تعداد پاس‌های مختلف

Number of passes	1	2	3	4	5	6
Fine grain size (μm)	0.9 ± 0.5	-	2.2 ± 1	2.9 ± 1	0.5 ± 0.3	-
Coarse grain sizes (μm)	13.3 ± 3.4	23.5 ± 2	21 ± 2.2	22 ± 3	-	-

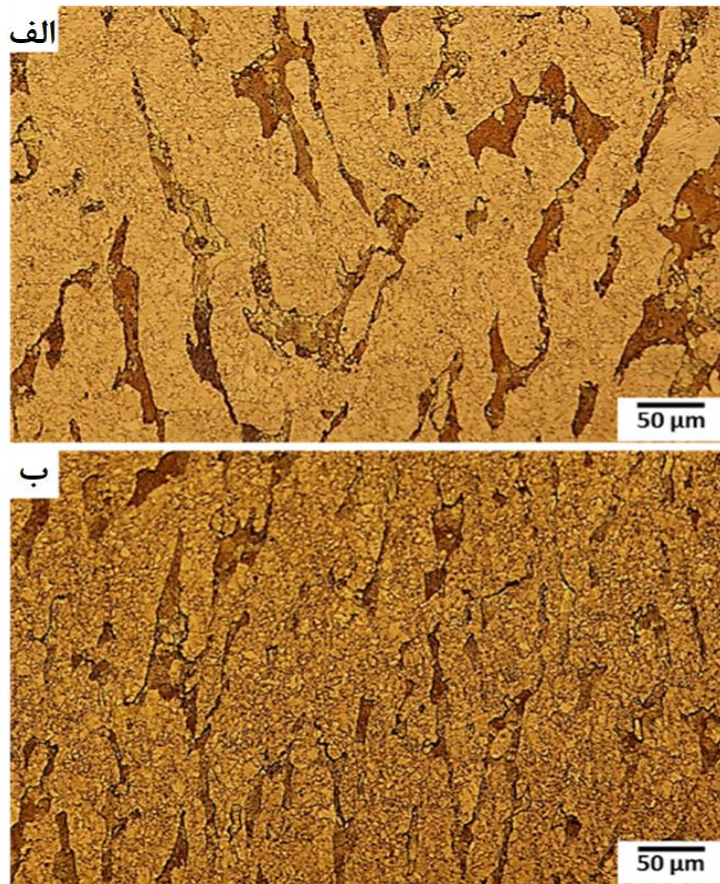
همان‌طور که در قسمت قبل توضیح داده شد در پاس‌های فرد میزان انرژی ذخیره‌شده در ساختار بیشتر است و دانه‌های ریز تبلور مجدد یافته تشکیل می‌شوند. این در حالی است که در پاس‌های زوج به دلیل تغییر صفحه‌ای که به آن تنش برشی اعمال می‌شود، میزان افزایش انرژی ذخیره‌شده به مراتب از پاس قبلی کمتر است. این باعث می‌شود که ساختار، رشد دانه را به جوانه‌زنی دانه‌های جدید ترجیح دهد. این مورد به خوبی در پاس دوم و چهارم مشاهده می‌شود. البته در شکل ۸ مشاهده می‌شود که در پاس چهارم به صورت هم‌زمان علاوه بر رشد دانه‌ها، جوانه‌زنی هم تا حدی انجام شده است. در این پاس، کرنشی در حدود ۲۶۰٪ در نمونه ایجاد می‌شود [۲۴] که دو برابر نمونه پاس دوم است. این میزان کرنش بیانگر مقدار زیادی انرژی است که شرایط را برای جوانه‌زنی نسبت به پاس دوم به مراتب راحت‌تر می‌کند.



شکل ۸ ریزساختار نمونه پس از پاس چهارم

شکل ۹ ریزساختار نمونه‌ها را پس از پاس‌های پنجم و ششم نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در پاس پنجم تبلور مجدد کامل شده است و دانه‌های ریز به‌طور کامل ساختار را فراگرفته‌اند. با افزایش تعداد پاس دانه‌ها به‌شدت ریز شده به‌گونه‌ای که اندازه آن‌ها پس از پاس پنجم به کمتر از یک میکرون رسیده است. این در حالی است که این پارامتر برای پاس ششم قابل‌اندازه‌گیری نبود اما بررسی‌ها نشان داد که اندازه دانه‌ها کمتر از پاس پنجم است (جدول ۱). به نظر می‌رسد که از پاس چهارم، تأثیر جهت تنش اعمالی بر کشیدگی و فشردگی فازها بسیار کم‌رنگ شده است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد پاس اندازه دانه‌ها تغییر چندانی نکرده است و به نظر می‌رسد در دو پاس نهایی، ساختار از این حیث به حالت اشباع رسیده باشد.

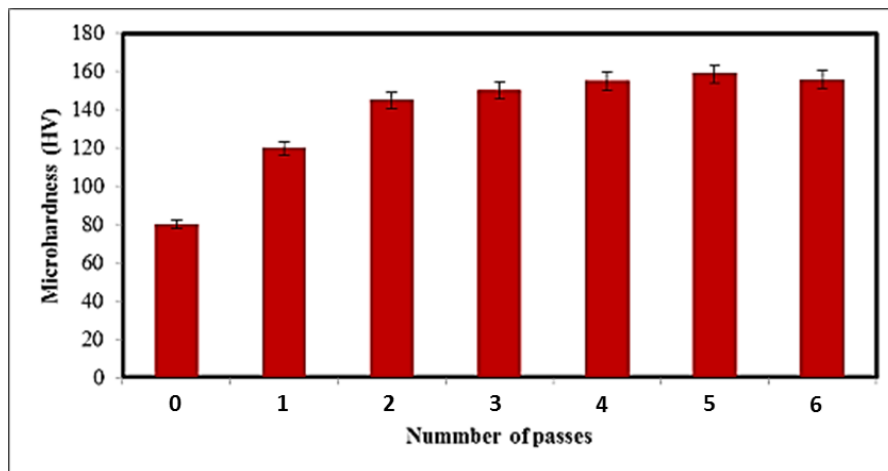
اشاره به این نکته ضروری است، طبق دیاگرام فازی آلیاژ مس-روی [۲۵]، درصد وزنی فاز بتا نسبت به فاز آلفا کمتر است. به همین دلیل همان‌طور که در تمامی تصاویر ریزساختار مشاهده می‌شود، دانه‌های فاز بتا به‌مراتب کوچک‌تر از فاز آلفا بوده است. این امر سبب شده است که امکان بررسی دقیق اندازه دانه‌های تبلور مجدد یافته به‌خصوص در پاس‌های چهارم به بعد فراهم نباشد. با این‌وجود روند کاهش اندازه دانه در اثر افزایش تعداد پاس به‌خصوص در دو پاس نهایی به‌طور تقریبی قابل تشخیص است.



شکل ۹ ریزساختار نمونه پس از پاس الف) پنجم و ب) ششم

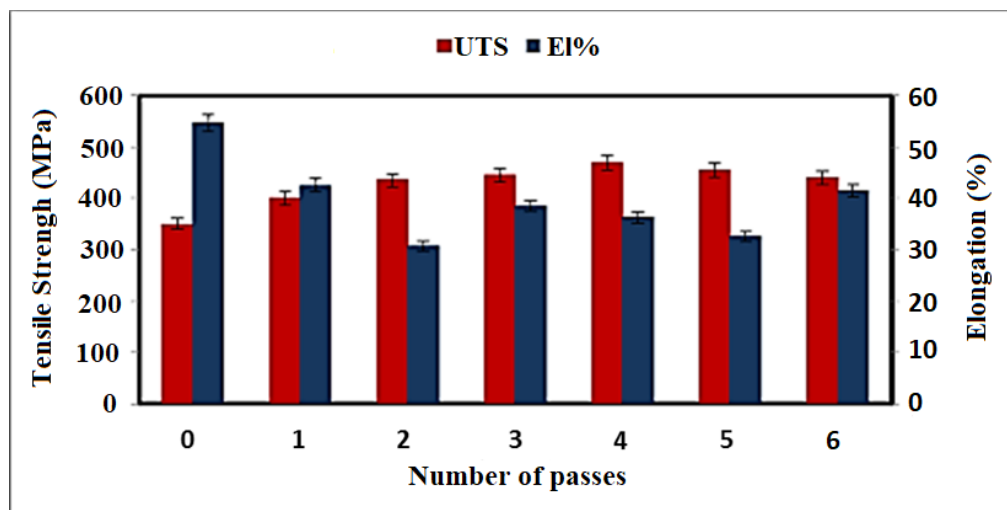
۳-۲- بررسی خواص مکانیکی

شکل ۱۰ تغییرات ریز سختی فاز آلفا را برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد پاس سختی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در سه پاس آخر این مقدار حدوداً به ۲ برابر ریز سختی نمونه آنیل می‌رسد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد پاس، شیب نمودار به تدریج کاهش یافته به گونه‌ای که در پاس‌های نهایی به حدود صفر می‌رسد که این رفتار تطابق کاملی با ریزساختار نمونه‌های نهایی در شکل ۹ دارد.



شکل ۱۰ تغییرات ریزسختی فاز آلفا برای نمونه‌های مختلف بر اساس تعداد پاس

شکل ۱۱ تغییرات استحکام کششی و میزان افزایش طول را بر اساس تعداد پاس نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که روند تغییرات استحکام کششی تا حدودی مشابه با تغییرات میزان سختی است. همچون تغییرات ریزسختی، شیب نمودار از پاس دوم به سوم کاهش یافته که به دلیل وقوع تبلور مجدد در این پاس است. هرچند در پاس چهارم میزان استحکام بیشتر از پاس‌های پنجم و ششم به نظر می‌رسد اما با در نظر گرفتن درصد خطاها می‌توان گفت تغییرات در آن ناحیه بسیار ناچیز است.



شکل ۱۱ تغییرات استحکام کششی و افزایش طول بر اساس تعداد پاس

در شکل ۱۱ همچنین تغییرات میزان افزایش طول نهایی نیز مشاهده می‌شود. مشاهده می‌شود که در پاس اول و سوم که تعداد زیادی دانه ریز تبلور مجدد یافته در فاز آلفا ایجاد شد، افزایش طول نهایی نمونه‌ها نسبت به پاس دوم که دانه‌های تبلور مجدد یافته قبلی رشد کردند بیشتر است. در این حالت میزان افزایش طول نمونه تنها حدود ۱۵ درصد از نمونه آنیل اولیه کمتر است که بسیار مطلوب به نظر می‌رسد، چراکه در تحقیقات گذشته میزان افزایش طول نمونه پس از سیکل‌های متوالی ECAP حدود ۱۷ تا ۲۱ درصد از نمونه آنیل اولیه کمتر گزارش شده است [۲۶]. لازم به ذکر است که در پاس سوم، تبلور مجدد در پاس بتا نیز آغاز می‌شود که می‌تواند دلیل دیگری بر افزایش میزان افزایش طول در این پاس باشد. افزایش طول نمونه نهایی در پاس چهارم تغییر چندانی نکرده و در پاس پنجم به حدود ۳۲ درصد کاهش یافته است. این مساله نشان می‌دهد که تعداد زیادی از دانه‌های ریز تبلور مجدد یافته در پاس چهارم (شکل ۸)، در پاس پنجم کاملاً کار سخت شده و احتمالاً بخش اعظم نابجایی‌ها قفل شده‌اند که منجر به کاهش میزان افزایش طول در این پاس شده است. نکته جالب توجه مربوط به پاس نهایی است که افزایش طول نمونه به حدود ۴۲ درصد رسیده است. می‌توان نتیجه گرفت که کار سخت شدن نمونه‌ها در پاس قبل، منجر به افزایش انرژی ساختار شده و این منجر به تبلور مجدد دانه‌های جدید عاری از کرنش در پاس ششم می‌شود. وجود انبوهی از این دانه‌ها سبب افزایش خارق‌العاده افزایش طول در دمای محیط شده است که بی‌شک نقش بسزایی در کاهش احتمال شکست نمونه در کاربردهای تحت بار خواهد داشت. از طرفی استحکام نیز در اثر کاهش اندازه دانه حفظ شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر تغییر شکل پلاستیک شدید (ECAP) که یکی از روش‌های مهم در ساخت مواد پیشرفته محسوب می‌شود، در خواص مکانیکی آلیاژ برنج ۴۰-۶۰ مورد مطالعه قرار گرفته است. مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق به صورت زیر است:

۱- فرآیند پرس در کانال زاویه‌دار (ECAP) به‌عنوان یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید جهت بهبود خواص مکانیکی آلیاژ برنج ۴۰-۶۰ معرفی شد.

۲- طراحی آزمایش مناسب یعنی انتخاب دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و مسیر C در فرآیند ECAP منجر به بهترین

شرایط استحکام و تغییر طول در نمونه شد.

۳- شش پاس ECAP منجر به افزایش ۱/۳ برابری استحکام شد به گونه‌ای که تغییر طول (انعطاف‌پذیری) نمونه نسبت به نمونه آنیل شده تنها ۲۵ درصد کاهش پیدا کرد.

۴- بررسی‌ها نشان داد دلیل اصلی دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب پس از فرآیند ECAP در شرایط بیان‌شده، رفتار متقابل دو فاز آلفا/بتا و ایجاد یک ریزساختار مطلوب در این آلیاژ است.

۵- منابع

- [1] Dlubek G, Brümmer O, Alam A. Recovery and recrystallization of plastically deformed α brass—a comparison of positron annihilation, electrical resistance and microhardness results. *Solid State Communications*. 1979;29:597-9.
- [2] Jamison R, Sherrill F. The critical shear stress in α -brass as a function of zinc concentration and temperature. *Acta Metallurgica*. 1956;4:197-200.
- [3] Raj S. Grain boundary sliding behaviour of copper and alpha brass at intermediate temperatures. *Journal of materials science*. 1991;26:1000-8.
- [4] Brown N. The cause of the strengthening in quenched beta brass. *Acta Metallurgica*. 1959;7:210-5. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(59\)90076-8](https://doi.org/10.1016/0001-6160(59)90076-8)
- [5] Delaey L, Perkins A, Massalski T. on the structure and microstructure of quenched beta-brass type alloys. *Journal of materials science*. 1972;7:1197-215.
- [6] Lee TD, Margolin H. Beta brass bicrystal and tricrystal stress strain behavior. *Metallurgical Transactions A*. 1977;8:157-67.
- [7] Eberhardt A, Baudalet B. Interphase boundary sliding at high temperature in two-phase (α/β)-brass bicrystals. *Philosophical Magazine A*. 1980;41:843-69.
- [8] Honeycombe R, Boas W. The deformation and recrystallization of an alloy containing two phases. *Australian Journal of Chemistry*. 1948;1:70-84.
- [9] Khezri-Yazdan A, Subramanian K. Elevated temperature deformation behaviour of alpha-beta brass bicrystals: Part 1 Ordered beta. *Journal of materials science*. 1984;19:3185-90.
- [10] Iwahashi Y, Horita Z, Nemoto M, Langdon T. An investigation of microstructural evolution during equal-channel angular pressing. *Acta materialia*. 1997;45:4733-41.
- [11] Segal V. Equal channel angular extrusion: from macromechanics to structure formation. *Materials Science and Engineering: A*. 1999;271:322-33.
- [12] Zhu YT, Lowe TC. Observations and issues on mechanisms of grain refinement during ECAP process. *Materials Science and Engineering: A*. 2000;291:46-53.
- [13] Shahmirzaloo A, Hosseini S, Siahsarani A, Rahmatabadi D, Hashemi R, Faraji G. Influences of the constrained groove pressing on microstructural, mechanical, and fracture properties of brass sheets. *Materials Research Express*. 2020;7:116526.
- [14] Mousavi Z, Karimi S, Heidarpour A, Hosseini S, Ghasemi S. Microstructural Variation and Corrosion Behavior of 60/40 Brass/Ti 2 SC Surface Composite through Friction Stir Processing. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022:1-12.
- [15] Farabi E, Zarei-Hanzaki A, Moghaddam M, Hodgson P, Beladi H. Microstructural evolution and mechanical properties of accumulative back extruded duplex ($\alpha + \beta$) brass. *Materials Characterization*. 2019;152:101-14.
- [16] Dhinwal SS, Shukla AJ, Biswas S, Chouhan DK. Evolution of microstructure and crystallographic texture in α - β Brass during equal channel angular pressing. *Materials Characterization*. 2020;163:110270.
- [17] Raheem Z. Designation: E8/E8M—13a Standard test methods for tension testing of metallic materials 1. 2019.

- [18] Mousavi SE, Meratian M, Rezaeian A. Investigation of mechanical properties and fracture surfaces of dual-phase 60–40 brass alloy processed by warm equal-channel angular pressing. *Journal of materials science*. 2017;52:8041-51.
- [19] Fat-Halla N, Takasugi T, Izumi O. Deformation and fracture of α - β brass two-phase bicrystals at 150 K. *Metallurgical Transactions A*. 1979;10:1341-9.
- [20] Fat-Halla N, Takasugi T, Izumi O. Deformation and Fracture of α - β Brass Two-Phase Bicrystals at 450 K. *Transactions of the Japan Institute of Metals*. 1979;20:493-500.
- [21] Furukawa M, Horita Z, Nemoto M, Langdon T. Processing of metals by equal-channel angular pressing. *Journal of materials science*. 2001;36:2835-43.
- [22] Stolyarov VV, Zhu YT, Alexandrov IV, Lowe TC, Valiev RZ. Influence of ECAP routes on the microstructure and properties of pure Ti. *Materials Science and Engineering: A*. 2001;299:59-67.
- [23] Humphreys FJ, Hatherly M. Recrystallization and related annealing phenomena. Second Edition ed: Elsevier, Oxford, 2004. <https://doi.org/10.1016/B978-008044164-1/50006-2>
- [24] Iwahashi Y, Horita Z, Nemoto M, Wang J, Langdon TG. Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials. *Scripta materialia*. 1996;35.
- [25] Kattner U, Burton B. *ASM Handbook Volume 3: Alloy Phase Diagrams*. ASM International, Materials Park, OH, USA. 1992.
- [26] Kim H, Kim W, Song K. Effect of post-heat-treatment in ECAP processed Cu–40% Zn brass. *Journal of Alloys and Compounds*. 2012;536:S200-S3.