

اصلاح فرآیند ECAP با استفاده از کانال مارپیچ بیضوی

دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران،
ali93zamani@gmail.com

دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران، hamidgorji@nit.ac.ir

استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران، bakhshi@nit.ac.ir

دانشیار، مهندسی متالورژی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران، j.hosseini@nit.ac.ir

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی آیت ا... آملی، آمل، ایران،
m_hoseinzadeh59@yahoo.com

سید علی زمانی

حمید گرجی*

محمد بخشی جوئیباری

سید جمال حسینی پور

مرتضی حسین زاده امیردهی

چکیده

فلزات و آلیاژهای ریزدانه که به روش‌های مختلف تولید می‌شوند از خواص مکانیکی مناسبی از قبیل استحکام بالا، چقرمگی زیاد و قابلیت شکل‌پذیری مناسب برخوردار بوده و دارای کاربردهای خاصی هستند. در سال‌های اخیر، بررسی روش‌های گوناگون تولید و بهبود خواص مکانیکی نمونه‌ها، موضوع بسیاری از پژوهش‌ها بوده است. اخیراً فرآوری این نوع مواد با استفاده از اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید به طور قابل ملاحظه‌ای مورد توجه محققان واقع شده است. در این تحقیق به منظور اصلاح روش مرسوم ECAP، نمونه مسی توسط یک قالب جدید تحت عنوان قالب ترکیبی، تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفت. به منظور مقایسه خواص مکانیکی نمونه‌های تولید شده به این روش با روش ECAP، تست‌های تجربی انجام شد. با بررسی مقادیر سختی در نقاط گوناگون از سطح مقطع نمونه‌ها و همچنین تعیین استحکام و اندازه دانه در ریزساختارهای ایجاد شده، مشخص شد که پس از انجام فرآیند به روش حاضر، می‌توان به ساختاری ریز دانه‌تر با میزان بالاتری از سختی، استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی در مقایسه با روش ECAP دست یافت. **واژه‌های کلیدی:** تغییر شکل پلاستیک شدید، قالب ترکیبی، استحکام کششی، سختی، ریز ساختار، مس خالص.

A Modification on ECAP Process by Incorporating Elliptical spiral channel

S. A. Zamani

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University, Babol, Iran

H. Gorji

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University, Babol, Iran

M. Bakhshi Jooybari

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University, Babol, Iran

S. J. Hosseinipour

Department of Material Engineering, Babol Noshirvani University, Babol, Iran

M. Hosseinzadeh

Department of Mechanical Engineering, Amol Azad University, Amol, Iran

Abstract

The fine-grained metals and alloys produced in various ways have good mechanical properties such as high strength, high toughness and proper formability and have certain applications. In recent years, studies of different methods of producing and improving the mechanical properties of specimens have been the subject of much research. Recently, the processing of this type of material using severe plastic deformation has received considerable attention from researchers. In this study, in order to modify the conventional ECAP method, the copper specimen was subjected to severe plastic deformation by means of a new die named combined die. In order to compare the mechanical properties of the produced specimens with this method and ECAP, the experimental tests were performed. By investigation the hardness values at different points from the cross-section of the specimens as well as the determination of strength and grain size in the created microstructures, it was found that after performing the present method, a finer grain structure with a higher degree of hardness, yield strength and Ultimate tensile Strength could be obtained compared to the ECAP method.

Keywords: Severe plastic deformation, Combined die, tensile Strength, hardness, Microstructure, Pure copper.

همان مواد با ساختار درشت‌دانه می‌باشند [۱-۳]. از این رو در طی یک دهه گذشته، تولید این گونه مواد فلزی مورد توجه محققان قرار گرفته است و به عنوان نسل جدیدی از محصولات فلزی مطرح هستند که قابلیت شکل‌پذیری آنها نیز در حد مطلوب می‌باشد. به طور کلی بر اساس رابطه هال پچ^۲ استحکام ماده با عکس جذر اندازه دانه آن

۱- مقدمه

ساختار دانه‌ای یا ریزساختار هر ماده، عامل مهمی است که می‌تواند به طور قابل توجهی بر خواص فیزیکی و مکانیکی آن تاثیر بگذارد. نشان داده شده است که مواد با ساختار فوق ریزدانه^۱ در مقیاس میکرو یا نانو، دارای خواص بهتری مانند استحکام کششی و سختی، نسبت به

² Hall-etch

¹ Ultrafine-grained

متناسب است [۴]. به عبارت دیگر، با کوچک شدن اندازه‌ی دانه، استحکام آن بر اساس رابطه (۱) افزایش می‌یابد.

$$\tau = \tau_0 + kd^{-1/2} \quad (1)$$

در رابطه فوق τ استحکام تسلیم بر حسب GPa، d اندازه‌ی قطر دانه بر حسب نانومتر، τ_0 و k ، ثابت‌های مواد می‌باشند.

به منظور توسعه مواد نانو ساختار تحقیق‌های زیادی در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی صورت گرفته و مشخص شده است که یکی از موثرترین روش‌ها، اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید^۱ بر روی نمونه‌ی اولیه می‌باشد. به کمک این روش‌ها و با اعمال کرنش‌های شدید به نمونه در یک یا چند مرحله، اندازه دانه‌های آن کاهش می‌یابد و بدون ایجاد تغییرات محسوس در ابعاد کلی نمونه، خواص مکانیکی آن بهبود می‌یابد. به کمک این روش‌ها می‌توان محصولات فلزی به شکل مفتول یا ورق تولید کرد. از آنجا که موادی که به این ترتیب تهیه می‌شوند فاقد تخلخل و آلودگی هستند، مورد توجه واقع شده اند [۵]. مزیت دیگر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید این است که با تشکیل ساختارهای بسیار ریز، استحکام و چقرمگی در اکثر مواد افزایش می‌یابد. در واقع، تنها راه برای افزایش هم زمان استحکام و چقرمگی، ریزساختار کردن ماده می‌باشد [۶].

نمونه‌هایی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید که تاکنون به میزان گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند شامل اتصال نورد تجمعی^۲ [۷]، پیچش فشار بالا^۳ [۸]، پرس کاری در کانال زاویه‌دار یکسان^۴ یا ECAP [۹]، اکستروژن پیچشی^۵ [۱۰] و اخیراً اکستروژن در کانال یکسان مارپیچ با سطح مقطع بیضی^۶ [۱۱]، می‌باشند. فرآیند ECAP نخستین بار توسط سگال^۷ معرفی شد و طی آن بر اثر ایجاد تنش‌های برشی در ماده، چگالی نابجایی‌ها افزایش می‌یابد و ساختاری ریزدانه ایجاد می‌شود. به علاوه استحکام ماده با انباشته شدن مقدار زیاد کرنش پلاستیک، بدون ایجاد تغییر در مساحت سطح مقطع آن، افزایش می‌یابد [۱۲].

در فرآیند ECAP، ماده خام از طریق قالبی که حداقل دارای دو کانال است تحت فشار قرار می‌گیرد. سطح مقطع کانال‌ها یکسان بوده و در یک زاویه مشخص با یکدیگر تقاطع دارند. به منظور افزایش میزان کرنش ایجاد شده و بهبود خواص مکانیکی ماده، علاوه بر ابعاد هندسی قالب، رایج‌ترین راهکارها تکرار مراحل پرس کاری یا چند پله‌ای ساختن قالبها است که البته محدودیت‌هایی نیز به همراه دارد [۱۳ و ۱۴].

آگوا و همکاران [۱۵]، با در نظر گرفتن نمونه‌ای از جنس آلایژ آلومینیوم ۶۰۸۲ و با فرض ایجاد کرنشی با حداقل ضریب واریانس در نمونه، پارامترهای بهینه را در فرآیند ECAP تعیین کردند. آنان به کمک مدل‌سازی اجزای محدود به تحلیل تاثیر پارامترهای مهم هندسی و ضریب اصطکاک بر رفتار تغییر شکل، توزیع کرنش و نیروی پانچ پرداختند. آن‌ها پارامترهای بهینه را برای حالتی که کرنش یکنواخت بیشینه باشد، تعیین نمودند و به علاوه مشاهده کردند که تاثیر ضریب

اصطکاک بر نیروی شکل‌دهی بیشتر از تاثیر هندسه قالب است.

ونگ و همکاران [۱۶] با معرفی یک مسیر جدید برای فرآیند ECAP به فرآوری مس خالص پرداختند. به این منظور ریزساختار و خواص مکانیکی مس خالص که در دمای اتاق تحت فرآیند ECAP قرار گرفت را مورد بررسی قرار دادند. نمونه‌ها در هشت پاس و توسط دو مسیر و یک مسیر جدید، تهیه شدند. در مسیر جدید، برای مس خالص که دارای ساختار FCC می‌باشد نمونه بین پاس‌های متوالی به اندازه ۷۰/۵ درجه دوران داده می‌شود. به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌ها تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری^۸ تهیه شد و تفرق اشعه ایکس^۹ مورد اندازه‌گیری قرار گرفت و نتایج نشان داد که مقادیر چگالی نابجایی‌ها و اندازه دانه نمونه تهیه شده توسط مسیر جدید، از دو مسیر دیگر کمتر است. همچنین نتایج آزمون کشش نشان داد که توسط این مسیر می‌توان به نمونه‌هایی با استحکام و کشیدگی بهتر، دست یافت. مکانیزم شکست نمونه‌ها نیز در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت.

ورلیسن و همکاران [۱۷]، یک روش تغییر شکل پلاستیک شدید جدید تحت عنوان پیچش فشار بالای دینامیکی^{۱۰} را ابداع کردند. به طور کلی به دلیل عدم وجود تکنیک‌های آزمایشی مناسب، روش‌های دینامیکی به سختی مورد پژوهش قرار می‌گیرند. در تحقیق ایشان، برای نمونه‌ای که تحت فشار هیدرواستاتیکی بالا می‌باشد، تجهیزات لازم جهت ایجاد تغییر شکل پیچشی دینامیکی تهیه شد. این روش مجموع ویژگی‌های اصلی دو روش میله چرخشی هاپکینسون^{۱۱} و پیچش فشار بالا را دارا می‌باشد. سرعت دورانی نمونه تا ۳۰،۰۰۰ دور در دقیقه بوده و باعث ایجاد کرنشی به اندازه ۱۰۰۰۰/۸ در نمونه می‌شود. سری اول آزمایش‌ها بر روی آلومینیوم خالص تجاری انجام شد. دستیابی به مقادیر سختی بالاتر و ایجاد ریزساختاری با اندازه دانه کوچکتر نسبت به دو روش مورد مقایسه، از نتایج این تحقیق بوده است.

رنجبر و همکاران [۱۸]، ریزساختار و خواص مکانیکی مس خالص را در نمونه‌های تهیه شده توسط دو فرآیند ECAP و اکستروژن پیچشی با یکدیگر مقایسه کردند و دریافتند که با رسیدن به کرنش یکسان حدود ۲/۴، کاهش میانگین اندازه دانه در فرآیند اکستروژن پیچشی از ECAP بیشتر است و ریزساختار ایجاد شده توسط آن نیز از ECAP همگن‌تر می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از تست کشش نیز نشان داد که اندازه استحکام کششی نمونه حاصل از اکستروژن پیچشی از ECAP بیشتر بوده ولی نمونه تهیه شده توسط فرآیند ECAP دارای شکل‌پذیری بیشتری می‌باشد.

بیسادی و همکاران [۱۹]، در یک تحقیق تلاش کردند به منظور بهینه‌سازی فرآیند ECAP آنرا با فرآیند اکستروژن پیچشی ترکیب کنند. آنها مشابه فرآیند اکستروژن پیچشی، راستای ورودی و خروجی کانال-های ECAP را نسبت به یکدیگر با یک زاویه پیچش در نظر گرفتند. ایشان به منظور بررسی توزیع کرنش در دو راستای عرضی و طولی نمونه‌ها، تست میکروسختی ویکرز انجام دادند و مشاهده کردند که پس از انجام یک پاس فرآیند، میزان سختی نمونه‌ها در روش ترکیبی نسبت

⁹ Transmission electron microscopy (TEM)

¹⁰ X-ray diffraction

¹¹ Dynamic high pressure torsion (DHPT)

¹² Split Hopkinson torsion bar (SHTB)

¹ Sever plastic deformation

² Accumulative role bonding

³ High pressure torsion

⁴ Equal-channel angular pressing (ECAP)

⁵ Twist extrusion

⁶ Elliptic cross-section equal-channel extrusion (ECSEE)

⁷ Segal

کانال یکسان مارپیچ با سطح مقطع بیضوی و اکستروژن پیچشی که هر دو بر پایه‌ی پیچش می باشند را با یکدیگر مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که اکستروژن در کانال یکسان مارپیچ نسبت به اکستروژن پیچشی توزیع کرنش یکنواخت‌تری در نمونه ایجاد می کند. علاوه بر این، با توجه به اضافه شدن مرحله آپستینگ به فرآیند، تنش-های کششی و فشاری نیز به برش ساده اضافه شده و موجب می شود تا در تعداد مراحل کمتر، بهبود دانه‌بندی بهتری نسبت به روش اکستروژن پیچشی صورت پذیرد.

از آنجا که در کلیه روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، هدف ایجاد حداکثر کرنش یکنواخت در نمونه ها و ساختاری با دانه‌بندی ریزتر و در نتیجه استحکام و سختی بالاتر است، از این‌رو، لازم است به ناچار هر فرآیند در چند مرحله تکرار شود تا با افزایش کرنش در هر مرحله، در نهایت مقدار آن به اندازه مطلوب برسد. این امر، دارای دشواری های خاص خود بوده و بسیار زمان‌بر می باشد. از طرف دیگر، به تناسب مقادیر کرنش، معمولا اندازه سختی نیز در سطح مقطع نمونه‌ها دارای یکنواختی مناسبی نمی باشد [۲۳].

در این تحقیق تلاش شد با کمک یک قالب جدید از قابلیت‌های هر دو قالب اکستروژن در کانال یکسان مارپیچ با سطح مقطع بیضوی و قالب ECAP به‌طور همزمان استفاده شود تا بتوان با حداقل تعداد تکرار فرآیند، به استحکام و سختی بالاتر و با یکنواختی بهتر دست یافت. قالب مورد استفاده در روش ارایه شده، تحت عنوان قالب ترکیبی معرفی شده است و از دو کانال تشکیل می شود. با توجه به اینکه سطح مقطع اولیه نمونه در طی فرآیند ثابت می ماند این امکان وجود دارد که نمونه بتواند به‌طور مکرر برای تجمع کرنش، اکستروژن شود که برای اصلاح ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی آن ضروری است.

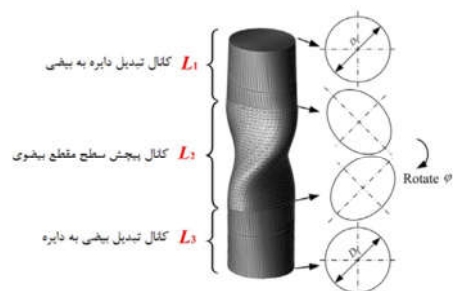
۲- نیاز صنعتی

فلزات و آلیاژهای ریزساختار که توسط روش‌های گوناگون تغییر شکل پلاستیک شدید تهیه می شوند به دلیل دارا بودن استحکام بالا، شکل‌پذیری مناسب و بهبود ویژگی های خستگی دارای کاربردهای فراوانی می باشند. روون^۳ حوزه‌های اصلی کاربردهای صنعتی این مواد را پیش‌بینی کرد که شامل ساخت تجهیزات پزشکی از جمله پروتزها و ایمپلنت‌های استحکام بالا، صنایع هوا فضا، تجهیزات دفاعی، ورزشی، انرژی، صنایع الکترونیک و مخابرات جهت تهیه موادی با خواص مغناطیسی مناسب که در ترانسفورمر ها و دیگر شبکه های مخابراتی مورد استفاده قرار می گیرند، تولید قطعات با هندسه خیلی پیچیده از طریق شکل‌دهی سوپر پلاستیک با نرخ کرنش بالا که برای ساخت بدنه خودروهای جدید و هواپیماها به کار می روند و توسعه فلزات و آلیاژهایی برای مصارف در شرایط دمایی بسیار پایین می باشند. تصاویر مربوط به تعدادی از فلزات و آلیاژها که جهت کاربردهای خاص تهیه شدند در شکل ۲ نشان داده شده است.

به ECAP ساده به اندازه قابل توجهی افزایش می یابد و توزیع سختی نیز در این روش همگن‌تر می شود.

یکی دیگر از روش‌هایی که در سال های اخیر توسط ونگ و همکاران [۲۰]، ابداع شده است روش اکستروژن در کانال های همسان مارپیچ با سطح مقطع بیضوی می باشد که ترکیبی از برش پیچشی، اکستروژن و آپست است. در این روش مطابق شکل ۱، میله با سطح مقطع دایره‌ای از طریق قالبی با سه کانال و شامل سه ناحیه‌ی تبدیل سطح مقطع دایروی به بیضوی به طول L_1 ، ناحیه‌ی پیچش سطح مقطع بیضوی به طول L_2 و ناحیه‌ی تبدیل سطح مقطع بیضوی به دایره ای به طول L_3 ، اکستروژن می شود. در واقع تغییر شکل در دو بخش صورت می گیرد که بخش اول آن در کانال‌های L_1 و L_3 است و مربوط به تبدیل سطح مقطع دایره‌ای به بیضوی و عکس آن می باشد و در بخش دوم، تغییرشکل کانال L_2 صورت می پذیرد که مربوط به پیچش سطح مقطع بیضوی تحت زاویه φ می باشد.

این فرآیند به عنوان یک روش جدید، ضعف روش اکستروژن پیچشی^۱ مرسوم که محدود به اکستروژن قطعه‌کارهایی فقط با سطح مقطع مستطیلی شکل بود را برطرف کرد و از آنجا که مواد خام صنعتی اساسا دارای سطح مقطع دایره‌ای شکل می باشند، طراحی فرآیند اکستروژن پیچشی احتمالا به کاربردهای صنعتی خاص محدود می شود. همچنین به دلیل وجود فرآیند آپستینگ، ترکیبی از برش پیچشی، اکستروژن و آپست به صورت یکجا وجود دارد و اندازه سختی در کل سطح مقطع نمونه افزایش خواهد یافت.



شکل ۱- طرحواره فرآیند اکستروژن در کانال های همسان مارپیچ با سطح مقطع بیضوی [۲۰]

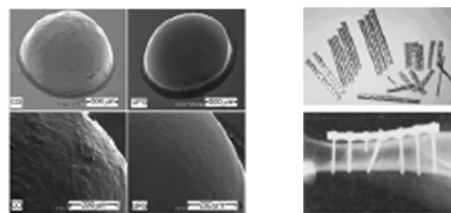
ونگ و همکاران [۲۱]، در تحقیق دیگر به بهینه‌سازی ابعاد قالب اکستروژن در کانال یکسان مارپیچ با سطح مقطع بیضوی پرداختند. به این منظور، طول کانال‌های اکستروژن (L_1 , L_2 , L_3)، زاویه پیچش φ و نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک در ناحیه بیضوی از کانال، m را به عنوان پارامترهای طراحی و میانگین کرنش موثر، ε_{ave} و ضریب یکنواختی تغییر شکل، α که خود از جنس کرنش است و توسط رابطه $(\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}) / \varepsilon_{ave}$ حاصل می شود را به عنوان شاخص‌های بهینه‌سازی در نظر گرفتند و با استفاده از نظریه گری^۲ ابعاد هندسی بهینه قالب را تعیین کردند.

مارات و همکاران [۲۲]، در یک تحقیق، دو فرآیند اکستروژن در

^۳ Roven

^۱ Twist Extrusion

^۲ Grey



(ب)

(الف)



(ت)

(پ)

شکل ۲- کاربردهای گوناگون محصولات تهیه شده به روش تغییر شکل پلاستیک شدید الف- ایملنت‌های ورقه ای ساخته شده از تیتانیوم، ب- ورقه میکروبالج ساخته شده از Al 1070، پ- نمونه پیستون ساخته شده از Al1420، ت- پیچ‌های تولید شده با آلیاژ تیتانیوم



(ب)

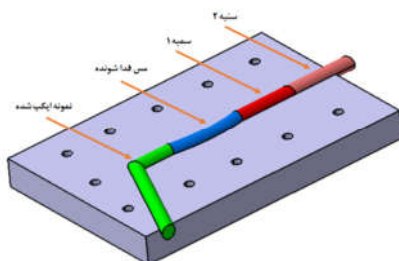
(الف)

شکل ۳- تصاویر دو مجموعه قالب مورد استفاده: الف- قالب ECAP، ب- قالب ترکیبی

از آنجا که نیروی شکل‌دهی زیاد است، در صورت استفاده از یک سنبه با طول زیاد، سنبه دچار خمش خواهد شد. از این رو برای جلوگیری از ایجاد این مشکل، از میلگرد ۲۰۰ VCN برای ساخت آن‌ها استفاده شده و به علاوه مطابق شکل ۴ به صورت چند تکه و با طول‌های کوتاه ساخته شدند و به ترتیب مورد استفاده قرار گرفتند.

لازم به ذکر است که با توجه به شکل ۴، سنبه‌ها وارد منطقه مارپیچی قالب نمی‌شوند و تنها تا ابتدای این منطقه حرکت کرده نمونه مسی را به جلو هدایت می‌کنند ولی از آنجاییکه لازم است نمونه بطور کامل از قالب خارج شود پس از آنکه سنبه‌ها به ابتدای منطقه مارپیچ رسیدند با برعکس کردن قالب و اعمال ضربات کوچکی بر آن، سنبه‌ها از آن خارج می‌شوند سپس یک میلگرد کوتاه مسی بعنوان فدا شونده بین نمونه و سنبه‌ها قرار می‌گیرد و مجدداً توسط سنبه‌ها فشار اعمال می‌شود و این فرآیند آنقدر ادامه می‌یابد تا نمونه بطور کامل از قالب خارج شود. مشخصات هندسی قالب‌ها بر اساس جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد.

همانطور که ملاحظه می‌شود مقادیر زاویه کانال ECAP، α و زاویه گوشه ψ ، در قالب ECAP و کانال ECAP از قالب ترکیبی یکسان می‌باشند. با توجه به شکل ۵ که طرحواره قالب ECAP را به نمایش گذاشته است می‌توان محدوده α و ψ را مشاهده نمود. لازم به ذکر است که قطر کلیه کانال‌ها در هر دو قالب یکسان و برابر ۱۵ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۴- طرحواره یک نیمه‌ی قالب ترکیبی، سنبه‌ها، قطعه مسی فدا شونده و نمونه مسی

فلز مس، به دلیل دارا بودن قابلیت رسانایی الکتریکی و گرمایی بسیار مطلوب، به طور وسیعی برای ساخت تجهیزات الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین، با توجه به پیشرفت روزافزون صنایع الکترونیک و نیاز به افزایش بازدهی تجهیزات مربوطه لازم است تا خواص آن بهبود یابد. به این منظور، پژوهشگران زیادی تلاش کردند تا با آلیاژسازی با عناصری مانند بریلیم، نقره، تیتانیوم و نیوبیم به استحکام‌های بالا در این ماده دست یابند. با این وجود، عمده‌ترین مشکل در این روش‌ها کاهش قابلیت رسانایی الکتریکی می‌باشد. طی بررسی‌های به عمل آمده مشخص شد که در روش تغییر شکل پلاستیک شدید می‌توان بدون کاهش قابل توجه اندازه هدایت الکتریکی، به استحکام مناسب دست یافت لذا به این منظور در این تحقیق از فلز مس استفاده شده است.

۳- مراحل آزمایشگاهی

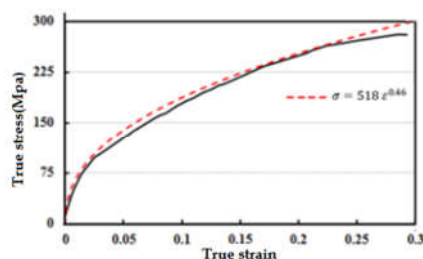
به منظور انجام آزمایش‌ها در این تحقیق، از دو مجموعه قالب مجزا استفاده شد که در شکل ۳ قابل مشاهده است. مورد اول قالب ECAP می‌باشد و قالب دوم به کار گرفته شده، قالب پیشنهادی این پژوهش است که تحت عنوان قالب ترکیبی معرفی شده و از دو کانال هم‌قطر مجزا شامل کانال یکسان مارپیچ با سطح مقطع بیضوی و کانال ECAP تشکیل شده است. نمونه پس از ورود، بر اثر اعمال فشار سنبه‌ها ابتدا از کانال مارپیچ عبور می‌کند و سپس وارد کانال ECAP شده در ادامه از آن خارج می‌شود.

هر دو قالب از جنس MO40 بوده و شامل دو نیمه کاملاً متقارن می‌باشند که پس از ماشینکاری تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. ابتدا قالب‌ها در کوره اولیه با دمای حدود ۶۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۳ تا ۴ ساعت پیش‌گرم شدند تا تنش‌های حاصل از ماشینکاری آن‌ها از بین برود. سپس در کوره‌ای با دمای ۸۴۵ تا ۸۸۰ درجه به مدت حدود یک ساعت قرار گرفتند و پس از خروج از آن، توسط روغن متلاطم با دمای ۴۰ تا ۶۰ درجه کوینچ شدند. در ادامه، به مدت یک ساعت در دمای ۱۵۰ تا ۲۵۰ درجه جهت پیرسختی در کوره قرار گرفته و سپس در

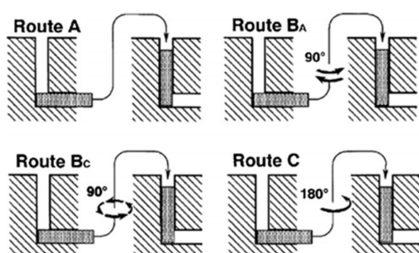
Mg	Ni	Pb	Zn	Sn	Mn	Cu
۰/۰۰۳	۰/۰۳۰	۰/۰۱۰	۰/۰۱۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۹	Base

جدول ۳- مشخصات مکانیکی و فیزیکی نمونه مسی [۲۵]

چگالی (kg/m ³)	استحکام تسلیم (MPa)	کششی نهایی (MPa)	استحکام مدول پانگ (GPa)	ضریب پواسون
۸۹۳۰	۱۸۰	۲۷۰	۱۱۰	۰/۳۴۳

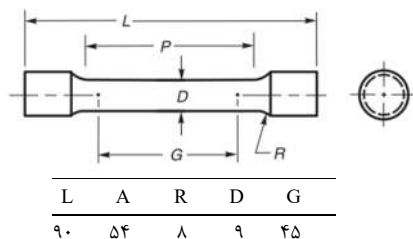


شکل ۷- منحنی تنش واقعی- کرنش واقعی نمونه مس خالص آنیل شده [۲۶]



شکل ۸- تصاویر چهار مسیر اصلی در فرآیند ECAP [۲۴]

در این تحقیق برای مقایسه خواص مکانیکی نمونه‌ها در دو قالب، آزمون‌های کشش و سختی‌سنجی انجام شد. جهت آزمون کشش از دستگاه زوئیک - روتل ساخت کشور آلمان با ظرفیت ۱۰ تن و سرعت جابجایی ۱ میلی‌متر بر ثانیه استفاده شد و ابعاد نمونه‌های تهیه شده جهت این آزمون بر اساس استاندارد ASTM-E8 مطابق شکل ۹ می-باشد.

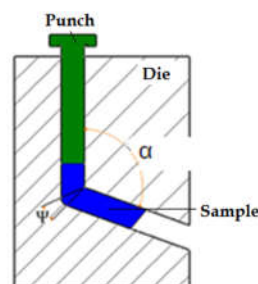


شکل ۹- ابعاد نمونه تهیه شده برای آزمون کشش طبق استاندارد ASTM-E8 (میلی‌متر)

سختی نمونه‌ها با انجام آزمون سختی ویکرز و با استفاده از دستگاه میکروسختی Hv-1000A و مطابق با استاندارد ASTM E-384 اندازه-گیری شد. جهت انجام آزمون، مقدار نیروی فشاری برابر ۰/۲ کیلوگرم و زمان مکث ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شد.

جدول ۱- مشخصات هندسی قالب‌ها

فرآیند	ECAP	پارامتر
ترکیبی		
۱۰	-	L_2
۱/۵۵	-	m
۱۲۰	-	φ درجه
۱۲۰	۱۲۰	α درجه
۱۵	۱۵	ψ درجه



شکل ۵- طرحواره قالب ECAP [۲۴]

شکل ۶ تصویر یک نمونه استفاده شده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. نمونه‌ها از جنس مس خالص است و از میلگردهای اکستروژن شده به قطر ۱۶ میلی‌متر انتخاب شدند که پس از ماشینکاری قطر آنها به حدود ۱۵ میلی‌متر و طول آنها نیز به ۱۴۰ میلی‌متر کاهش یافت. نمونه‌ها به منظور نرم‌تر شدن و افزایش قابلیت کار سرد و شکل‌پذیری، قبل از انجام فرآیند آنیل شده و لایه اکسیدی سطح آن‌ها به کمک سنباده برداشته شد.

جهت تعیین مشخصات شیمیایی نمونه‌ها، آزمایش کوانتومتری انجام شد و ترکیب شیمیایی آن‌ها در جدول ۲ و خواص مکانیکی و فیزیکی آن‌ها در جدول ۳ آمده است. شکل ۷ نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها را نشان می‌دهد که از آزمایش‌ها به دست آمده است.

با توجه به اینکه از بین مسیرهای مرسوم جهت انجام فرآیند ECAP که در شکل ۸ به نمایش گذاشته شد، B_c موثرترین مسیر برای تولید مواد فوق ریزدانه است، در این تحقیق، نمونه‌ها در هر دو قالب با این مسیر شکل داده شدند، به این ترتیب که در بین مراحل تکرار، نمونه‌ها در یک جهت ثابت و به اندازه ۹۰ درجه حول محور مرکزی خود چرخانده شدند [۲۴].



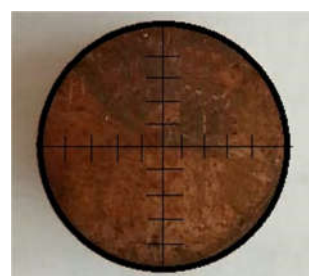
(الف) (ب)

شکل ۶- تصاویر نمونه آنیل شده: الف- قبل از اکسیدزدایی، ب- بعد از اکسیدزدایی

جدول ۲- ترکیب شیمیایی نمونه مسی (درصد وزنی)

به منظور بررسی میزان تغییرات سختی در نقاط گوناگون از سطح مقطع نمونه‌ها، برش‌های عرضی در هر نمونه و در نزدیکی محل خروج آنها از قالب‌ها ایجاد شد و پس از مانسرد، نمونه‌ها توسط سمباده‌زنی و پولیش‌کاری کاملاً صیقلی شده و جهت اندازه‌گیری سختی آماده شدند.

وضعیت ریزساختار توسط میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفت و اندازه دانه‌های تصاویر بدست آمده به کمک نرم‌افزار Image J تعیین شدند. دو نمونه برای هر قالب، و در مجموع چهار نمونه برای پاس اول و دوم، تحت فرآیند اکستروژن قرار گرفتند و پس از برش عرضی و مانسرد، جهت آماده‌سازی مورد سنباده‌زنی و پولیش‌کاری قرار گرفتند. محلول اچ بکار رفته جهت حکاکی، ترکیبی شامل ۱ گرم کلرید آهن III، ۳ میلی لیتر اسید هیدروکلریک و ۲۰ میلی لیتر آب بود. به منظور اعمال نیروی لازم برای انجام فرآیند از یک پرس هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰۰ تن استفاده شد. کلیه فرآیندها با سرعت پرس ثابت و برابر ۲ mm/s انجام شد. برای کاهش اصطکاک بین نمونه و قالب، نمونه پس از روغنکاری توسط نوار تفلون، نوارپیچی شده و کانال‌های قالب نیز روغنکاری شدند.



شکل ۱۰- نقاط تعیین شده جهت اندازه‌گیری مقدار سختی

۴- نتایج و بحث

۴-۱- ریزساختار

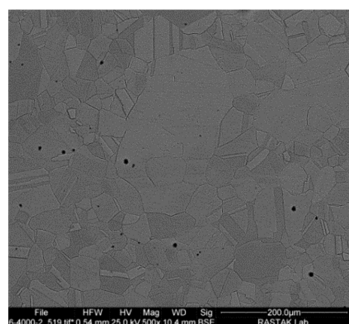
تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی مربوط به چهار نمونه که تحت فرآیند اکستروژن قرار گرفتند در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

با استفاده از تصاویر مذکور و اندازه‌گیری به کمک نرم‌افزار Image J، نمودارهای مربوط به تغییرات اندازه دانه برای هر یک از دو پاس فرآیندهای ECAP و ترکیبی مطابق شکل ۱۲ و مقادیر اندازه دانه بر اساس جدول ۴ حاصل شده است.

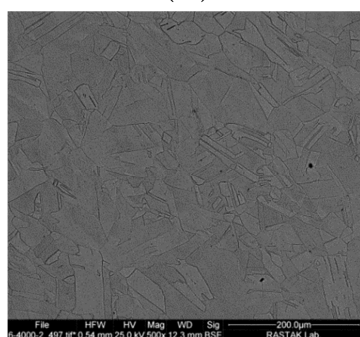
با توجه به مقادیر عددی جدول ۴، مشاهده می‌شود که تغییرات اندازه دانه، دارای سیر نزولی بوده و مقدار میانگین آن پس از پاس اول، در قالب ترکیبی، برابر ۳۰ میکرومتر می‌باشد که نسبت به قالب ECAP، به اندازه ۲۸ درصد کاهش داشت و پس از پاس دوم، مقدار میانگین آن در قالب ترکیبی، برابر ۲۰ میکرومتر می‌باشد که نسبت به قالب ECAP، به اندازه ۳۳ درصد کاهش داشت و به مفهوم ایجاد ساختاری ریزدانه‌تر می‌باشد.

تغییرات مقادیر انحراف استاندارد اندازه‌ها نیز دارای سیر نزولی بوده و مقدار آن پس از پاس اول، در قالب ترکیبی، برابر ۱۶/۲ می‌باشد که نسبت به پاس اول قالب ECAP، به اندازه ۳۶ درصد، کاهش داشت و مقدار آن پس از پاس دوم، در قالب ترکیبی، برابر ۱۱/۶ می‌باشد که

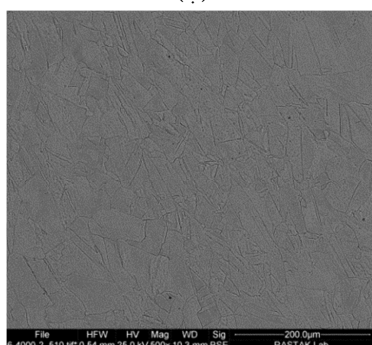
نسبت به پاس دوم قالب ECAP، به اندازه ۴۸ درصد، کاهش داشت و این مورد نیز به مفهوم ایجاد ریزساختاری همگن‌تر است که از اهداف هر فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشد.



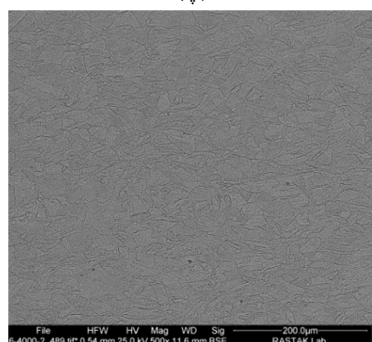
(الف)



(ب)



(پ)



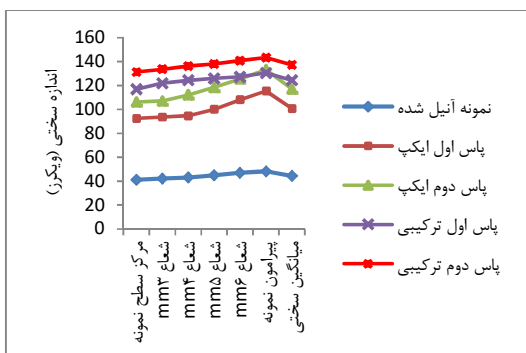
(ت)

شکل ۱۱- تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی مربوط به سطح مقطع نمونه‌ها: الف- پاس اول ECAP، ب- پاس دوم ECAP، پ- پاس اول ترکیبی، ت- پاس دوم ترکیبی

سرد در این فرآیندها، ناهنجاری‌های زیادی به وجود می‌آیند و با ادامه تغییر شکل، این ناهنجاری‌ها حرکت می‌کنند و تا موقعی که به مانعی برخورد نکنند به حرکت خود ادامه می‌دهند و در نهایت درمرزها یا موانع دیگر جمع می‌شوند و از برخورد آنها با یکدیگر، نواحی با چگالی زیاد ناهنجاری یا گره-ها ایجاد خواهند شد. با ادامه این روند مرزخانه‌های کوچک زاویه تشکیل می‌شوند و با ادامه کار سرد، چگالی ناهنجاری-ها افزایش و ضخامت مرزها کاهش می‌یابد و در نتیجه زاویه بین سلول‌های همسایه، افزایش می‌یابد و مرزهای کوچک زاویه به مرزهای بزرگ زاویه تبدیل می‌شوند و با ادامه کار سرد بیشتر، مجدداً از محل تقاطع مرزها، ناهنجاری‌های جدید ایجاد می‌شوند و دانه را به بخش‌های دیگر تقسیم می‌کنند و در نهایت با ادامه این فرآیند و تقسیم شدن ساختار به اجزای کوچکتر، ساختار فوق‌ریزدانه حاصل خواهد شد [۲۵].

۲-۴- سختی

نمودارهای مربوط به تغییرات مقادیر سختی در نقاط گوناگون از سطح مقطع نمونه‌ها، در هر دو قالب و برای پاس‌های اول و دوم در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

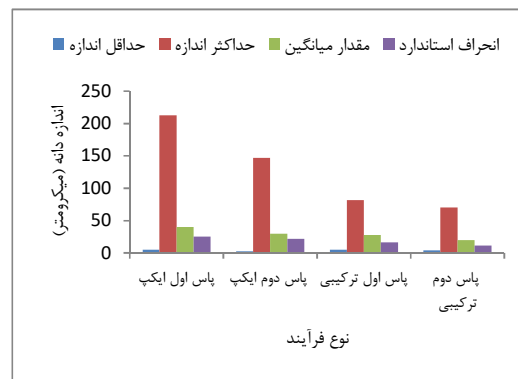


شکل ۱۳- اثر تغییر مکان اندازه‌گیری و نوع فرآیند بر سختی نمونه‌ها

با توجه به نمودارهای ترسیم شده، واضح است که روند تغییرات سختی در قالب ترکیبی از مرکز سطح تا محیط پیرامون نمونه، دارای سیر صعودی بوده و اندازه سختی در محیط اطراف آن، دارای بیشترین مقدار می‌باشد. مقادیر عددی سختی اندازه‌گیری شده در نقاط گوناگون از سطح مقطع نمونه‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است.

با توجه به موارد فوق و همانطوری که پیش‌بینی نیز می‌شد، مقادیر سختی به طور قابل توجهی با تعداد پاس و نوع فرآیند در ارتباط بوده و افزایش تعداد پاس و استفاده از قالب ترکیبی منجر به افزایش قابل توجه سختی شده است.

به‌طور کلی بر اساس نتایج حاصل از اندازه‌گیری، در پاس اول میانگین اندازه سختی در قالب ترکیبی نسبت به قالب ECAP به اندازه ۲۳ درصد و در پاس دوم به اندازه ۱۷ افزایش یافته است. این امر نشان می‌دهد که توسط قالب پیشنهادی می‌توان به مقدار سختی بیشتری دست یافت. همچنین مقدار انحراف استاندارد توزیع سختی در قالب



شکل ۱۲- تغییرات اندازه دانه با تغییر نوع فرآیند

جدول ۴- اندازه دانه‌های تعیین شده توسط نرم‌افزار Image J (میکرومتر)

فرآیند	حداقل اندازه	حداکثر اندازه	مقدار میانگین	انحراف استاندارد
پاس اول ECAP	۵	۲۱۳	۴۰	۲۵/۲
پاس دوم ECAP	۳	۱۴۷	۳۰	۲۲/۱
پاس اول ترکیبی	۵	۸۲	۲۸	۱۶/۲
پاس دوم ترکیبی	۴	۷۰	۲۰	۱۱/۶

موثرترین عامل ریزدانه شدن نیز وجود کرنش‌های برشی می‌باشد. به طور کلی مکانیزم اصلی ریزدانه شدن در دو فرآیند مورد مطالعه، موارد زیر می‌باشند:

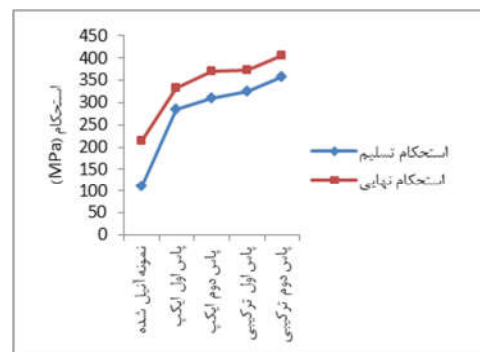
- تکه‌تکه شدن دانه‌های کشیده شده به وسیله یک پدیده موضعی نظیر باندهای برشی: دانه‌ها قبل از رسیدن به منطقه برش در راستای طولی نمونه‌ها کشیده می‌شوند و با توجه به جهت‌گیری آن‌ها و جهت‌های صفحه‌های لغزش هر یک، در برخی از آن‌ها میکروباندها یا باندهای تغییر شکل ایجاد می‌شود و ضمن تغییر مسیر کرنش، میکروباندهای جدیدی تشکیل می‌شوند که جهت‌گیری متفاوتی نسبت به میکروباندهای قبلی دارند و آن‌ها را قطع می‌کنند. با افزایش تغییر شکل، تعداد میکروباندهای متقاطع زیاد می‌شود و ریزساختار را به سلول‌هایی با دیواره‌های باریک ناهنجاری، تقسیم می‌کنند. به همین ترتیب با پیشرفت تغییر شکل، این سلول‌ها تکامل می‌یابند و ریزدانه‌ها را تشکیل می‌دهند.

- ایجاد مرزهای بزرگ زاویه با استفاده از مکانیزم تقسیم دانه-ها: در محل تقاطع کانال‌های هر قالب، کرنش‌های شدیدی در نمونه ایجاد می‌شود و چگالی ناهنجاری‌ها افزایش یافته موجب ریزدانه شدن خواهد شد. به‌طور کلی بر اثر انجام کار

ترکیبی نسبت به قالب ECAP کمتر بوده و نشان می‌دهد که توسط قالب ترکیبی، توزیعی بسیار یکنواخت‌تر و ساختاری همگن‌تر ایجاد شده است.

۳-۴- استحکام

نمودارهای مربوط به میزان تغییرات استحکام نمونه‌ها ضمن تغییر نوع قالب در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۴- تغییرات استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی نمونه با تغییر نوع فرآیند و افزایش تعداد پاس

همانطور که ملاحظه می‌شود، این نمودارها دارای سیر صعودی می‌باشند و پس از پاس اول، مقدار استحکام تسلیم نمونه در هر دو فرآیند نسبت به حالت پایه یا آیل شده، به حدود سه برابر افزایش یافت. روند افزایش استحکام تسلیم در پاس دوم نیز وجود دارد ولی میزان افزایش

در پاس اول بسیار بیشتر می‌باشد. استحکام کششی نهایی نمونه نیز با افزایش تعداد پاس، رشد کرده و بعد از دو پاس نسبت به حالت اولیه، به حدود دو برابر افزایش یافت که این افزایش قابل توجه مقادیر استحکام، حاصل از ریز شدن اندازه دانه و افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها می‌باشد. مقادیر عددی استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی نمونه‌ها نیز به همراه از یاد طول نسبی، در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶- مقادیر استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی

اندازه‌گیری شده به همراه درصد افزایش طول				
فرآیند	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی نهایی (MPa)	از یاد طول نسبی	استحکام نهایی / استحکام تسلیم
نمونه آیل شده	۱۱۱	۲۱۴	۴۵	۱/۹۳
پاس اول ECAP	۲۸۵	۳۳۲	۱۶	۱/۱۶
پاس دوم ECAP	۳۰۹	۳۷۰	۱۶	۱/۲۰
پاس اول ترکیبی	۳۲۵	۳۷۲	۱۳	۱/۱۴
پاس دوم ترکیبی	۳۵۸	۴۰۶	۱۳	۱/۱۳

جدول ۵- مقادیر سختی اندازه‌گیری شده در نقاط گوناگون از سطح مقطع نمونه‌ها (ویکرز)

فرآیند	مرکز سطح نمونه	شعاع 3mm	شعاع 4mm	شعاع 5mm	شعاع 6mm	پیرامون نمونه	میانگین سختی	انحراف استاندارد
نمونه آیل شده	۴۱/۱	۴۲/۲	۴۳/۱	۴۴/۹	۴۷	۴۸/۲	۴۴/۴	۲/۸
پاس اول ECAP	۹۲/۴	۹۳/۶	۹۴/۷	۱۰۰/۱	۱۰۸/۲	۱۱۵/۵	۱۰۰/۸	۸/۵
پاس دوم ECAP	۱۰۶/۳	۱۰۷/۱	۱۱۲/۲	۱۱۸/۴	۱۲۵/۵	۱۳۳/۲	۱۱۷/۱	۹/۸
پاس اول ترکیبی	۱۱۶/۸	۱۲۱/۹	۱۲۴/۳	۱۲۵/۹	۱۲۷/۱	۱۳۰/۴	۱۲۴/۴	۴/۳
پاس دوم ترکیبی	۱۳۱/۲	۱۳۳/۶	۱۳۶/۲	۱۳۸	۱۴۰/۸	۱۴۳/۳	۱۳۷/۲	۴/۱

می‌دهد که اختلاف بین مقادیر استحکام کششی نهایی و استحکام تسلیم کمتر شده و در واقع نرخ کارسختی نمونه کاهش می‌یابد.

جدول ۷- مقایسه مقادیر استحکام تسلیم و استحکام کششی

نهایی		فرآیند
استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی نهایی (MPa)	
۲۸۵	۳۳۲	پاس اول ECAP ۱۲۰° این تحقیق
۳۰۹	۳۷۰	پاس دوم ECAP ۱۲۰° این تحقیق

با توجه به نتایج ارایه شده در جدول فوق پس از پاس اول، اندازه استحکام تسلیم در قالب ترکیبی نسبت به قالب ECAP، به اندازه ۱۴ درصد رشد داشته است و مقدار استحکام کششی نهایی آن نیز به اندازه ۱۲ درصد افزایش یافته است و پس از پاس دوم، مقدار استحکام تسلیم در قالب ترکیبی نسبت به قالب ECAP، به اندازه ۱۶ درصد افزایش یافت و اندازه استحکام کششی نهایی آن نیز، به اندازه ۱۰ درصد رشد داشت و این موضوع نشان می‌دهد که قالب ترکیبی توانسته است به نتایجی بهتر از قالب ECAP دست یابد. همچنین نسبت استحکام کششی نهایی به استحکام تسلیم پس از پاس اول و دوم در هر دو قالب، از مقدار ۱/۹۳ در نمونه آیل شده کاهش یافته به عدد یک نزدیک‌تر شد. کاهش این نسبت که در قالب ترکیبی بیشتر بود، نشان

قالب ECAP و $124/4$ ویکرز در قالب ترکیبی افزایش یافت و در پاس دوم نیز به $117/1$ ویکرز در قالب ECAP و $137/2$ ویکرز در قالب ترکیبی افزایش یافت و به طور کلی، پس از پاس اول میانگین اندازه سختی در قالب ترکیبی نسبت به قالب ECAP به اندازه 23 درصد و در پاس دوم به اندازه 17 افزایش یافته است و این موضوع نشان می دهد که توسط قالب ترکیبی می توان به مقادیر سختی بیشتری دست یافت. علاوه بر این پس از پاس اول، مقادیر انحراف استاندارد توزیع سختی در قالب ترکیبی نسبت به قالب ECAP، به اندازه 98 درصد و در پاس دوم نیز، به اندازه 139 درصد کاهش یافته است. این موضوع نشان می دهد که توسط قالب ترکیبی، توزیعی بسیار یکنواخت تر و ساختاری همگن تر ایجاد شده است که یکی از اهداف مهم کلیه فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید می باشد.

۳- پس از پاس اول مقدار استحکام تسلیم از 111 مگاپاسکال، در نمونه آتیل شده به 285 مگاپاسکال، در قالب ECAP و 325 مگاپاسکال، در قالب ترکیبی افزایش یافت و در پاس دوم نیز مقدار استحکام تسلیم به 309 مگاپاسکال، در قالب ECAP و 358 مگاپاسکال، در قالب ترکیبی افزایش یافت. همچنین پس از پاس اول مقدار استحکام کششی نهایی از 214 مگاپاسکال در نمونه آتیل شده به 332 مگاپاسکال، در قالب ECAP و 372 مگاپاسکال، در قالب ترکیبی افزایش یافت و در پاس دوم نیز مقدار استحکام کششی نهایی به 370 مگاپاسکال، در قالب ECAP و 406 مگاپاسکال، در قالب ترکیبی افزایش یافت. در واقع پس از پاس اول، اندازه استحکام تسلیم در قالب ترکیبی نسبت به قالب ECAP، به اندازه 14 درصد رشد داشته است و مقدار استحکام کششی نهایی آن نیز به اندازه 12 درصد افزایش یافته است و پس از پاس دوم، مقدار استحکام تسلیم در قالب ترکیبی نسبت به قالب ECAP، به اندازه 16 درصد افزایش یافت و اندازه استحکام کششی نهایی آن نیز، به اندازه 10 درصد رشد داشت. نکته قابل توجه دیگر این است که مقدار استحکام تسلیم نمونه پس از پاس اول قالب ترکیبی، به اندازه 5 درصد بیشتر از استحکام تسلیم نمونه پس از پاس دوم قالب ECAP است و استحکام کششی نهایی آن نیز پس از پاس اول قالب ترکیبی کمی بیشتر از استحکام کششی نهایی نمونه پس از پاس دوم قالب ECAP است و این موضوع نشان می دهد که توسط قالب ترکیبی می توان با تعداد پاس کمتر، به نتایجی حتی بهتر از قالب ECAP دست یافت.

۶- مراجع

- [1] Yuntian Zhu., Ruslan Z Valiev., Terence G. Langdon., Nobuhiro Tsuji., Processing of nanostructured metals and alloys via plastic deformation. *MRS Bull.*, Vol. 35, No.12, pp. 977-981, 2010.
- [2] Leo P., Cerri E., De Marco P.P., Roven H.J., Properties and deformation behavior of severe plastic deformed aluminium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, No.182, pp. 207-214, 2007.
- [3] Zhu C.F., Du F.P., Jiao Q.Y., Wang X.M., Chen A.Y., Liu F., Microstructure and strength of pure Cu with large grains processed by equal channel angular pressing. *Materials and Design*, Vol. 52, pp. 23-29, 2013.
- [4] Pande C.S., Cooper K.P., Nanomechanics of Hall-Petch relationship in nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*, Vol. 54, No.6, pp. 689-706, 2009.

پاس اول ECAP	۳۰۹	۳۹۲
۹۰° این تحقیق		
پاس دوم ECAP	۳۷۲	۴۲۴
۹۰° این تحقیق		
پاس اول ECAP	۲۸۰	۳۹۵
۹۰° منبع ۲۴		
پاس دوم ECAP	۳۵۷	۴۱۷
۹۰° منبع ۲۴		

لازم به ذکر است که زاویه بهینه کانال ECAP که می تواند بیشترین کرنش را ایجاد کند برابر 90° درجه می باشد و نمونه ای که توسط چنین قالبی تهیه شود دارای خواص مکانیکی از جمله سختی و استحکام بیشتری نسبت به همان قالب با زاویه کانال بیشتر می باشد ولی از آنجاکه هدف از این تحقیق مقایسه نتایج قالب ECAP با قالب ترکیبی پیشنهادی بود لازم بود که مقادیر این زاویه در هر دو قالب یکسان باشد و برای سهولت بیشتر در انجام مراحل آزمایشگاهی، اندازه آن برابر 120° درجه در نظر گرفته شد. به منظور مقایسه نتایج حاصل از قالب با زاویه کانال 90° درجه با قالبی که دارای زاویه کانال 120° درجه می باشد دو نمونه در پاس های اول و دوم توسط یک قالب ECAP با زاویه کانال 90° درجه تهیه شده و نتایج مربوط به استحکام آن با نتایج قالب 120° درجه و منبع ۲۴ در جدول ۷ مورد مقایسه قرار گرفتند.

با توجه به نتایج جدول فوق مشاهده می شود که مقادیر استحکام در قالب با زاویه کانال 90° درجه نسبت به 120° درجه افزایش چشم گیری داشت و حتی نسبت به تحقیق ۲۴ نیز بهتر می باشد.

۵- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر اثر ترکیب فرآیند اکستروژن در کانال مارپیچ با فرآیند ECAP مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور توسط دو قالب گوناگون و در دو پاس، فرآیند اکستروژن میله های مسی انجام شد و نمونه های تولید شده از نظر ریزساختار و خواص مکانیکی با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفتند که نتایج حاصل به شرح زیر می باشد:

۱- نتایج حاصل از بررسی تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی نشان دهنده وجود سیر نزولی در تغییرات اندازه دانهی ریزساختارهای ایجاد شده در نمونه ها می باشد و مقادیر اندازه دانه در قالب ترکیبی، دارای بیشترین کاهش بود بطوریکه مقدار میانگین آن پس از پاس دوم قالب ترکیبی، به 20 میکرومتر رسید که نسبت به پاس دوم قالب ECAP، به اندازه 33 درصد کاهش داشت. تغییرات مقادیر انحراف استاندارد اندازه ها نیز دارای سیر نزولی بود و مقدار آن پس از پاس دوم قالب ترکیبی، برابر $11/6$ شد که نسبت به پاس دوم قالب ECAP، به اندازه 48 درصد کاهش داشت که به مفهوم ایجاد ریزساختاری همگن تر است که از اهداف هر فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید می باشد.

۲- اندازه سختی به طور قابل توجهی با تعداد پاس و نوع فرآیند در ارتباط بوده و افزایش تعداد پاس و استفاده از قالب ترکیبی منجر به افزایش قابل توجه مقدار آن شده است. در پاس اول، میانگین اندازه سختی از مقدار $44/4$ ویکرز در نمونه آتیل شده به $100/8$ ویکرز در

- deformation method for fabricating ultrafine grained pure copper. *Materials and Design*, Vol. 43, pp. 492-498, 2013.
- [21] Chengpeng Wang., Fuguo Li., Hongya Lu., Yuan Zhanwei., Chen Bo., Optimization of Structural Parameters for Elliptical Cross-Section Spiral Equal-Channel Extrusion Dies Based on Grey Theory. *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 26, No.1, pp. 209-216, 2013.
- [22] Marat I. Latypov., Yan Beygelzimer., Hyoung Seop Kim., Comparative Analysis of Two Twist-Based SPD Processes: Elliptical Cross-Section Spiral Equal-Channel Extrusion vs. Twist Extrusion. *Materials Transactions*, Vol. 54, No.9, pp. 1587-1591, 2013.
- [23] Pawet Chyta., Sylwia Bednarek., Aneta Tukaszek-Sotek., Channel cross-section influence on effective strain distribution in ECAP process. *Metallurgy and Foundry Engineering*, Vol. 43, No.1, pp. 31-40, 2017.
- [24] F. Djavanroodi., M. Ebrahimi., B. Rajabifar., S. Akramizadeh., Fatigue design factors for ECAPed materials. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, No.2, pp. 745-750, 2010.
- [25] Morteza Hosseinzadeh., Mehran Ghasempour Mouziraji., An analysis of tube drawing process used to produce squared section from round tubes through FE simulation and response surface methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 87, No.5-8, pp. 2179-2194, 2016.
- [26] F. Djavanroodi., A.A. Zolfaghari., M. Ebrahimi., K.M. Nikbin., Equal Channel Angular Pressing of Tubular Samples. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, Vol. 26, No.5, pp. 574-580, 2013.
- [۲۷] تلافی نوغانی م. و شاعری م.ح. بررسی اثر تغییر شکل پلاستیک شدید به وسیله فرآیند پرس در کانال‌های زاویه‌دار همسان (ECAP) بر چقرمگی آلیاژ Al 7075. *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، د. ۱۷، ش. ۱۲، ص ۱۱-۲۰، ۱۳۹۶.
- [5] ChengPeng Wang., FuGuo Li., Lei Wang., HuiJuan Qiao., Review on modified and novel techniques of severe plastic deformation. *Science China Technological Sciences*, Vol. 55, No.9, pp. 2377- 2390, 2012.
- [6] Richard W.Hertzberg., Richard P.Vinci., Jason L. Hertzberg., Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials. *John Wiley & Sons, New York*, 1996.
- [7] Saito Y., Tsuji , Utsunomiya H., Sakai T., Hong R.G., Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process. *Scripta Materialia*, Vol. 39, No.9, pp. 1221-1227, 1998.
- [8] Seung Chae Yoon., Zenji Horita., Hyoung Seop Kim., Finite element analysis of plastic deformation behavior during high pressure torsion processing. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 201, No.1-3, pp. 32-36, 2008.
- [9] Ranjbar Bahadori S.H., Dehghani K., Comparison of microstructure and mechanical properties of pure copper processed by twist extrusion and equal channel angular pressing. *Materials Letters*, Vol. 152, pp. 48-52, 2015.
- [10] Latypov M.I., Alexandrov I.V., Beygelzimer Y.E., Lee S., Kim H.S., Finite element analysis of plastic deformation in twist extrusion. *Computational Materials Science*, Vol. 60, pp. 194-200, 2012.
- [11] Chengpeng Wang., Li Fuguo., Lu Hongya, Yuan Zhanwei., Chen Bo., Optimization of Structural Parameters for Elliptical Cross-Section Spiral Equal-Channel Extrusion Dies Based on Grey Theory. *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 26, No.1, pp. 209-216, 2013.
- [12] Valiev R.Z., Langdon T.G., Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progress in Materials Science*, vol. 51, No.7, pp. 881-981, 2006.
- [13] Dong-Hwan Kang., Tae-Won Kim., Mechanical behavior and microstructural evolution of commercially pure titanium in enhanced channel multi-pass equal channel angular pressing and cold extrusion. *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 554-560, 2010.
- [14] Kiyotaka Nakashima., Zenji Horita., Minoru Nemoto., Terence G. Langdon., Development of a multi-pass facility for equal-channel angular pressing to high total strains. *Materials Science & Engineering A*, V. 281, No.1-2, pp. 82-87, 2000.
- [15] Agwa M.A., Ali M.N., Amal E., Al-Shorbagy., Optimum processing parameters for equal channel pressing. *Mechanics of Materials*, Vol. 100, pp. 1-11, 2016.
- [16] Hongfei Wang., Chunyan Ban., Nannan Zhao., Qingfeng Zhu., Jianzhong Cui., Effective grain refinement of pure Cu processed by new route of equal channel angular pressing. *Materials Science & Engineering A*, Vol. 751, pp. 246-252, 2019.
- [17] Patricia Verleysen., Harishchandra Lanjewar., Dynamic high pressure torsion: A novel technique for dynamic severe plastic deformation. *Journal of materials processing tech*, Vol. 276, 2020.
- [18] Sh. Ranjbar Bahadori., K. Dehghani., S.A.A Akbari Mousavi., Comparison of microstructure and mechanical properties of pure copper processed by twist extrusion and equal channel angular pressing. *Materials Letters*, Vol. 152, pp. 48-52, 2015.
- [19] Hosein Bisadi., Mehdi Rezazadeh Mohamadi., Hadi Miyanaji., Maryam Abdoli., A Modification on ECAP Process by Incorporating Twist Channel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 22, No.3, pp. 875-881, 2013.
- [20] Chengpeng Wang., Fuguo Li., Qinghua Li., Jiang Li., Lei Wang., Junzhe Dong., A novel severe plastic