

مطالعه تجربی اثر مقدار کرنش اعمالی در هر مرحله از فرآیند اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه دار بر روند تکامل استحکام مس خالص تجاری

محمدامین رعنائی*

مریی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بیرجند، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، بیرجند، ایران

حمید بهلولی

مریی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بیرجند، بیرجند، ایران

خلیل خلیلی

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

هدف از این مطالعه بررسی تأثیر مقدار کرنش اعمالی در هر مرحله از فرآیند اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه دار (ECAP) بر روند تکامل استحکام مکانیکی (دستیابی به استحکام‌های بیشتر) مس خالص تجاری تولیدشده با این روش است. از آنجایی که زاویه‌ی برخورد کانال‌های هم مقطع، عامل اساسی و تعیین کننده‌ی مقدار کرنش اعمالی است که در هر مرحله از فرآیند ECAP به وقوع می‌پیوندد، دو قالب یک پارچه با زاویه‌ی انحنای خارجی $37^\circ \sim$ و زاویه‌ی برخورد 90° و 110° طراحی و ساخته شدند. کرنش اعمالی طی هر مرحله از فرآیند ECAP توسط قالب 110° در مقایسه با قالب 90° به مقدار ۲۵ درصد کمتر است. مس خالص تجاری تحت شرایط یکسان و حداکثر تا ۸ مرحله در دمای محیط درون هر دو قالب تحت فرآیند ECAP قرار گرفته و سپس خواص مکانیکی حاصل شده توسط آزمون سختی و فشار در دمای محیط اندازه گیری و تغییرات آنها گزارش شده است. نتایج حاصله نشان دادند که، حداکثر سختی و استحکام ماده‌ی تولیدشده توسط قالب 90° با اعمال پنج مرحله فرآیند ECAP به‌دست‌آمده و مقدار آن به ترتیب برابر $74/9\text{HB}$ و 390MPa اندازه گیری گردید. از طرفی خواص مکانیکی مطلوب تری در ماده‌ی تولیدشده توسط قالب 110° مشاهده شده به‌طوری‌که حداکثر سختی برابر $77/5\text{HB}$ (حدود ۵۱ درصد نمونه اولیه) و استحکام برابر 424MPa (حدود ۶۳ درصد نمونه اولیه) پس از ۸ مرحله انجام فرآیند ECAP بر روی مس خالص تجاری به دست آمد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان ادعا داشت که با کاهش کرنش اعمالی به میزان ۲۵ درصد در هر مرحله از فرآیند ECAP و افزایش مراحل آن، می‌توان به استحکام‌های بیشتر در مس خالص تجاری دست یافت.

واژه‌های کلیدی: تغییر شکل پلاستیک شدید، اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه دار، تکامل استحکام مکانیکی، کرنش معادل، مس خالص تجاری.

Experimental Study on Effect of Equivalent Strain on Evolution Strength of Commercially Pure Copper Produced by Equal Channel Angular Pressing

M. A. Ranaei

Instructor, Young Researchers Club, Birjand Branch, Islamic Azad University, Birjand, Iran

H. Bohlooli

Instructor, Young Researchers Club, Birjand Branch, Islamic Azad University, Birjand, Iran

Kh. Khalili

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

Abstract

The aim of this study was to investigate the effect of equivalent strain amount on evolution strength of commercially pure copper produced by equal channel angular pressing (ECAP). For this purpose, two ECAP dies with channel angle (ϕ) 90° and 110° , and the angle associated with the arc of curvature (ψ) $37^\circ \sim$ were designed and manufactured. The equivalent strain at each pass of ECAP process is reduced by 25% for ECAP die with $\phi = 110^\circ$ compared to ECAP die with $\phi = 90^\circ$. The cylindrical shaped commercial pure copper in the same condition undergone ECAP process at room temperature up to eight passes through two dies, and then the obtained mechanical properties using hardness and compression tests were measured and their changes reported. The obtained results showed that the maximum value of strength and hardness of copper were measured about 390 MPa and 74.9 HB respectively after applying the fifth pass by using ECAP die with $\phi = 90^\circ$. On the other hand, the better mechanical properties were observed in the material produced by ECAP die with $\phi = 110^\circ$. The maximum values of hardness and strength of copper after the eighth pass by using ECAP die with $\phi = 110^\circ$ was achieved about 77.5 HB (approximately 51% of the initial sample) and 424 MPa (approximately 63% of the initial sample) respectively. According to obtained results for commercially pure copper produced by ECAP, it can be concluded that the more enhancement mechanical properties such as hardness and strength can be achieved by reducing the applied strain in each pass about 25% and also by increasing the ECAP-ed passes.

Keywords: Severe plastic deformation, Equal channel angular pressing, Equivalent strain, evolution strength, commercially pure copper.

۱- مقدمه

رابطه‌ی ۱ (رابطه‌ی هال-پچ^۱)، استحکام ماده با عکس مجذور اندازه‌ی دانه‌ی آن ارتباط دارد. به عبارت دیگر با کوچک شدن اندازه‌ی دانه، استحکام ماده افزایش می‌یابد.

امروزه بررسی خواص مکانیکی فلزات و بهبود آن مطالعات بسیاری از محققان را به خود اختصاص داده است. خواص مکانیکی و فیزیکی مواد کریستالی تحت تأثیر فاکتورهای متعددی می‌باشند که اندازه متوسط دانه ماده در تعیین این خواص تأثیر بسزایی دارد. مطابق

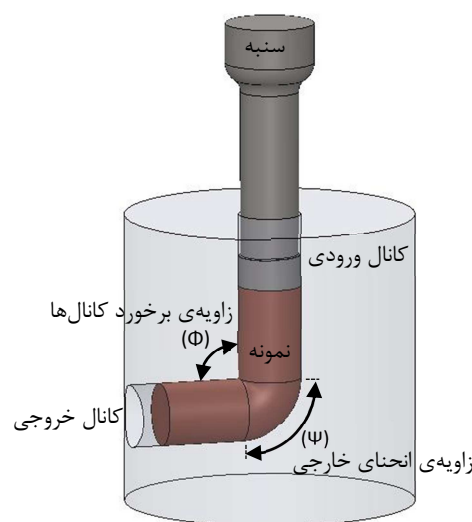
¹Hall-Petch relation

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-\frac{1}{2}}$$

(۱)

در این رابطه σ_y تنش تسلیم، σ_0 مقاومت شبکه، d اندازه‌ی دانه و k_y ثابتی است که به جنس ماده بستگی دارد (ضریب هال-پیچ). مشکلی که در عمل برای تولید مواد ریز دانه وجود دارد این است که معمولاً تولید مواد با دانه‌های ریزتر منجر به تولید قطعاتی در ابعاد کوچک با هزینه زیاد می‌شود. روش‌های جدیدی به منظور کاهش اندازه دانه‌ها به وجود آمده است که روش‌های تغییر شکل پلاستیک بسیار شدید^۱ (SPD) به خاطر کنترل خواص مکانیکی ماده در حین فرآیند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده‌اند. فرآیندهای SPD به عنوان روش‌هایی علمی و جذاب به منظور ایجاد خصوصیات مکانیکی منحصر به فرد در فلزات به واسطه ایجاد ساختارهایی با دانه‌های بسیار ریز^۲ (UFG) در حد نانومتر و یا چند صد نانومتر (کمتر از میکرون) علاقه‌مندی بسیاری از محققان این حوزه را، به خود معطوف کرده است. از میان فرآیندهای SPD، اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه دار^۳ (ECAP) روشی مؤثر جهت تولید مواد با ساختار UFG بوده تا از این طریق خواص مکانیکی و فیزیکی آنها را به طور چشم‌گیری بهبود بخشد [۴-۲]. از دیگر مزایای این فرآیند می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود. ۱- دستیابی به حجم بسیار قابل توجه از دانه‌های بسیار ریز درون مواد پلی‌کریستال برای مصارف صنعتی با قیمت تمام شده مناسب ۲- توانایی تولید موادی با چگالی بیشتر دانه‌های بسیار ریز با انجام تکرار فرآیند ۳- بدون در نظر گرفتن مراحل طراحی و ساخت قالب، روش ECAP نسبتاً ساده بوده و تجهیزات مورد نیاز آن تقریباً در دسترس می‌باشد.

طی فرآیند ECAP، ماده درون قالبی با دو کانال متقاطع و هم مقطع فشرده می‌شود. این دو کانال تحت زاویه‌ی برخورد Φ به هم متصل شده‌اند و ممکن است در گوشه‌ی خارجی تقاطع دو کانال نیز انحنایی با زاویه‌ی Ψ وجود داشته باشد (شکل ۱).



شکل ۱- طرح واره فرآیند ECAP

با عبور ماده از تقاطع دو کانال تغییر شکل برشی ساده درون آن ایجاد می‌شود. با ثابت بودن سطح مقطع ماده در هر عبور (پاس) مقدار قابل ملاحظه‌ای کرنش درون آن ذخیره شده و نیز می‌توان فرآیند را به دفعات بر روی ماده اعمال کرد [۵]. سگال [۵] در سال ۱۹۹۵ کرنش معادل^۴ ایجاد شده به ازای هر پاس را در یک قالب با زاویه‌ی برخورد 2Φ و زاویه‌ی انحنای بیرونی $\Psi=0$ به صورت زیر محاسبه نمود (رابطه‌ی ۲).

$$\varepsilon_N = \frac{2N}{\sqrt{3}} \cotan\Phi \quad (2)$$

پس از آن در سال ۱۹۹۶ ایواهاشی و همکارانش [۶] با ارائه یک رابطه-ی کلی تر (رابطه ۳) علاوه بر زاویه Φ ، تأثیر زاویه Ψ را نیز منظور کردند.

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right] \quad (3)$$

در رابطه‌های بالا N تعداد دفعات عبور ماده از کانال‌های قالب (تعداد پاس) و ε_N کرنش معادل به ازای هر مرحله انجام فرآیند ECAP می‌باشند. رابطه‌های ذکر شده بدون در نظر گرفتن ضریب اصطکاک بین سطح ماده با قالب و همچنین تأثیر ضریب کارسختی ماده بر روی رفتار سیلان آن محاسبه گردیده و فقط تأثیر پارامترهای هندسی قالب در آن گنجانده شده است.

در دهه گذشته بهبود خواص مکانیکی فلزات به واسطه ایجاد ساختارهای بسیار ریز و نانو توسط روش‌های SPD، مطالعات بسیاری از محققان را به خود اختصاص داده است. یکی از رویکردهای نوین مطالعاتی در حوزه بهبود خواص مکانیکی با استفاده از فرآیندهای SPD، تکامل استحکام یا به عبارت بهتر دستیابی به استحکام‌های بیشتر می‌باشد. لذا محققان بسیاری سعی بر آن داشته تا با بکارگیری روش‌های مختلف این مهم را میسر سازند. لوگو و همکارانش [۷] در سال ۲۰۰۸ طی تحقیقی مس خالص با درصد خلوص ۹۹/۹۸ wt.% را در دمای اتاق تحت فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید ECAP، چرخش همزمان با فشار بالا^۵ (HPT) و ترکیبی از هر دو فرآیند قرار دادند. هدف از مطالعه ایشان ایجاد استحکام‌های بیشتر درون مس خالص با استفاده از مسیرهای کرنشی متفاوت از قبیل اعمال کرنش برشی توسط فرآیند ECAP و اعمال کرنش پیچشی به وسیله تغییر شکل پلاستیک شدید ثانویه HPT می‌باشد. آنها فرآیند ECAP را با استفاده از قالبی با مشخصات $\Phi = 90^\circ$ و $\Psi = 20^\circ$ به روش B_C طی هشت مرحله و فرآیند HPT را تحت فشار ۶ گیگاپاسکال طی پنج چرخش بر روی مس خالص انجام دادند. نتایج حاصل از بررسی‌های استحکام ماده تولیدشده نشان دادند که حداکثر استحکام تسلیم و نهایی به دست آمده طی اعمال هشت مرحله فرآیند ECAP بر روی مس خالص به ترتیب ۳۲۲ و ۳۷۸ مگاپاسکال است. از طرفی با اعمال کرنش پیچشی طی پنج مرحله تغییر شکل پلاستیک شدید ثانویه بر روی نمونه‌ی 8pass-ECAP استحکام تسلیم و نهایی آن به ترتیب ۸۴ و ۷۴ مگاپاسکال افزایش می‌یابد.

^۴Equivalent strain

^۵High Pressure Torsion

^۱Sever Plastic Deformation

^۲Ultra-fine Grained

^۳Equal Channel Angular Pressing

استپانوف و همکارانش [۸] در سال ۲۰۱۲ تأثیر فرآیند نورد سرد را بر روند بهبود خواص مکانیکی مس خالص تجاری تولیدشده به روش ECAP مطالعه کردند. برای این منظور مس خالص تجاری را طی ۱۰ مرحله در دمای اتاق توسط قالب با $\phi = 90^\circ$ تحت فرآیند ECAP قرار دادند. پس از فرآیند ECAP میله‌های تولیدشده را به دو نیم قطع کرده و با استفاده از عملیات ماشینکاری دو سطح صاف را با فاصله ۱۵ میلی‌متر بر روی یکی از نیمه‌ها ایجاد کردند. سپس ضخامت نمونه‌های ماشینکاری شده را به صورت تدریجی از ۱۵ میلی‌متر به ۱/۵ میلی‌متر (حدود ۹۰٪) توسط فرآیند نورد سرد کاهش دادند. نتایج به‌دست‌آمده از آزمون کشش در دمای اتاق بیانگر افزایش ۱۰۰ مگاپاسکال استحکام تسلیم نمونه‌های تولیدشده به روش ECAP پس از اعمال نورد سرد می‌باشد.

حبیبی و کتابچی [۹] در سال ۲۰۱۲ به منظور بهبود خصوصیات مکانیکی مس خالص تجاری تولیدشده به روش نورد در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار^۱ (ECAR) از سیکل عملیات حرارتی آنیل کاری استفاده نمودند. نتایج آنها نشان داد که انجام عملیات حرارتی ثانویه آنیل کاری در دمای 200°C به مدت ۲۰ دقیقه پس از فرآیند ECAR باعث افزایش استحکام، ازدیاد طول و رسانایی الکتریکی مس خالص تجاری می‌شود. مقدار استحکام، ازدیاد طول و رسانایی الکتریکی نمونه 8pass-ECAR+annealing در مقایسه با نمونه 8pass-ECAR به ترتیب ۵۰ MPa، ۲٪ و ۸٪ IACS افزایش می‌یابد.

جیانگ و لی [۱۰] در سال ۲۰۱۲ تأثیر عملیات حرارتی را بر تغییر شکل فشاری مس خالص ریز دانه تولیدشده به روش ECAP بررسی کردند. نتایج آنها نشان دادند که آنیل کاری استاتیکی (انجام سیکل عملیات حرارتی آنیل کاری پس از تغییر شکل پلاستیک شدید) و دینامیکی (افزایش دما در محدوده دمایی سیکل آنیل کاری حین تغییر تشکل پلاستیک شدید) اثرات متفاوتی را بر رفتار مکانیکی مس خالص ریز دانه می‌گذارد. به‌طوری‌که آنیل کاری استاتیکی می‌تواند استحکام مس ریز دانه را به‌واسطه کاهش چگالی نابجایی‌ها^۲ و تسهیل در شکل‌گیری مرز دانه‌های جدید افزایش داده در حالی که آنیل کاری دینامیکی باعث کاهش استحکام ماده از طریق افزایش تحریک پذیری نابجایی‌ها طی فرآیند ECAP در دمای بالا می‌شود.

پورسک و همکارانش [۱۱] در سال ۲۰۱۶ خصوصیات مختلف مکانیکی و فیزیکی آلیاژ $\text{Cu-0.80\%Cr-0.080\%Zr (wt.\%)}$ قرار گرفته تحت فرآیند ECAP را با استفاده از مسیرهای مختلف مطالعه نمودند. ایشان آلیاژ مذکور را طی هشت مرحله درون قالبی با $\phi = 90^\circ$ توسط مسیرهای A، B_C و E در دمای محیط تحت فرآیند ECAP قرار دادند. (مسیر A نمونه پس از خروج از کانال خروجی قالب بدون هیچ گونه چرخش حول محور طولی خود، دوباره درون کانال ورودی قالب قرار می‌گیرد، مسیر B_C نمونه پس از خروج از کانال خروجی قالب به میزان ۹۰ درجه تنها در یک جهت، حول محور طولی خود چرخانده شده و دوباره درون کانال ورودی قالب قرار می‌گیرد و مسیر E نمونه پس از هر بار خروج از کانال خروجی قالب به ترتیب به میزان ۱۸۰، ۹۰ و ۱۸۰ درجه حول محور طولی خود

چرخانده شده و دوباره درون کانال ورودی قالب قرار می‌گیرد). نتایج آنها نشان دادند که مسیر B_C بهترین مسیر انجام فرآیند ECAP به منظور دستیابی به کمترین اندازه دانه، بالاترین سختی و استحکام است.

سلیمیان فرد و همکارانش [۱۲] در سال ۲۰۱۳ تأثیر روش‌های انجام فرآیند ECAP را با استفاده از دو مسیر B_C و B_{C60} (همانند مسیر B_C است با این تفاوت که میزان چرخش بین پاسی ۶۰ درجه می‌باشد) بر بافت و خواص مکانیکی مس خالص تجاری مطالعه نمودند. نتایج حاصله از بررسی خواص مکانیکی ایشان نشان دادند که تفاوت قابل ملاحظه‌ای میان خواص مکانیکی مس خالص تجاری تولیدشده به روش ECAP با استفاده از مسیرهای B_C و B_{C60} وجود ندارد. ونگ و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۱۵ مس خالص الکترولیتی تصفیه شده^۳ با مقطع مربع را در دمای محیط درون قالب با مشخصات $\phi = 90^\circ$ و $\psi = 0^\circ$ طی ۱۲ مرحله با استفاده از فشار عقبی^۴ ۱۰۰ مگاپاسکال و همچنین بدون استفاده از فشار عقبی تحت فرآیند ECAP قرار دادند. نتایج حاصل از بررسی‌های خواص مکانیکی آنها بیانگر این مسئله است که استحکام مکانیکی حاصله درون مواد تولیدشده توسط فرآیند ECAP با استفاده از فشار عقبی و بدون آن تقریباً یکسان بوده و تفاوت قابل ملاحظه‌ای میان آنها وجود ندارد. با توجه به طبقه بندی مطالعات صورت گرفته، بطور کلی روش‌های تکامل استحکام ماده تولیدشده به روش ECAP را می‌توان به دو گروه عمده تقسیم نمود.

۱- اعمال فرآیند های تکمیلی (مانند کارسرد مکانیکی و عملیات حرارتی آنیل کاری با مدت زمان کم) بر روی نمونه تولیدشده
۲- کنترل عوامل مؤثر حین فرآیند ECAP (مانند تعداد مراحل، ایجاد مسیرهای کرنشی مختلف از طریق فعال سازی سیستم های لغزشی متفاوت، فشار عقبی و غیره).
با توجه به هزینه بر بودن و مشکلات اجرایی روش‌های گروه ۱ و نداشتن تأثیر مؤثر روش‌های گروه ۲ بر تکامل استحکام ماده‌ی تولیدشده، سعی بر آن شد تا با ارائه روشی کارآمد و مناسب در نحوه-ی انجام فرآیند ECAP امکان ایجاد استحکام‌های بیشتر درون مس خالص حاصل شود.

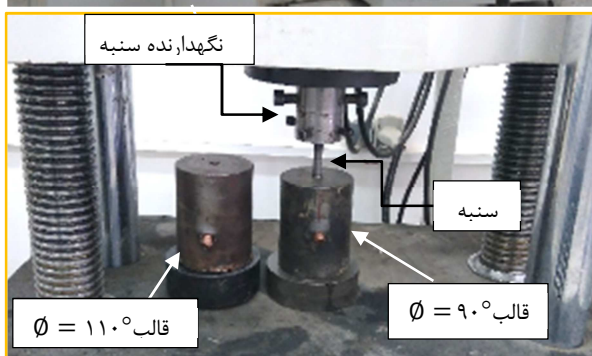
کار پذیری و ریزساختار ماده به‌شدت وابسته به کرنش اعمالی است که طی هر مرحله از فرآیند ECAP درون آن ایجاد می‌شود. از طرفی کرنش اعمالی رابطه‌ی مستقیم با عوامل هندسی قالب دارد. با توجه به اهمیت موضوع، تحقیقات بسیار کمکی راجع به عوامل هندسی قالب ECAP انجام شده است. اکثر تحقیقات صورت گرفته بر اساس مدل سازی اجزاء محدود می‌باشند. به عنوان نمونه، دامولین و همکارانش [۱۴] در سال ۲۰۰۵، دجاوندودی و ابراهیمی [۱۵] در سال ۲۰۱۰، مطالعاتی را با استفاده از شبیه سازی اجزاء محدود به منظور درک بهتر تأثیر اصطکاک، خصوصیات ماده‌ی اولیه و همچنین هندسه قالب بر رفتار تغییر شکل ماده و توزیع یکنواخت کرنش طی فرآیند ECAP انجام دادند. ناکاشیما و همکارانش [۱۶] در سال ۱۹۹۸ در یک مطالعه آزمایشگاهی، تأثیر زاویه برخورد قالب ECAP را بر ریزساختار نهایی آلومینیوم خالص با استفاده از قالب‌هایی با 90°

³Electrolytic Tough Pitch

⁴ Back pressure

¹Equal Channel Angular Rolling

² Dislocation density



شکل ۲- قالب ها ECAP و سنبه به همراه دستگاه پرس

مس خالص تجاری حداکثر تا ۸ مرحله درون قالب ها با استفاده از مسیر B_C تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفت. به منظور کاهش اثر اصطکاک از یک نوع فوم صابون به عنوان روان کار استفاده شد. شکل ۳ نمونه های تولید شده توسط هر دو قالب را پس از فرآیند ECAP نشان می دهد.



شکل ۳- نمونه های مسی تولید شده به روش ECAP توسط قالب های $\phi = 90^\circ$ و $\phi = 110^\circ$.

آزمایش سختی به وسیله ی دستگاه سختی سنج قابل حمل مدل HLN-11A انجام شد. برای انجام آزمایش سختی، نمونه های ECAP شده مطابق شکل ۴ به وسیله ی دستگاه برش سیمی برش داده شده و سختی سنجی به روش برینل بر روی نقاط نشان داده شده انجام گرفت. برای هر نمونه میانگین به دست آمده از اندازه گیری ۱۴ نقطه به عنوان مقدار سختی لحاظ شد.

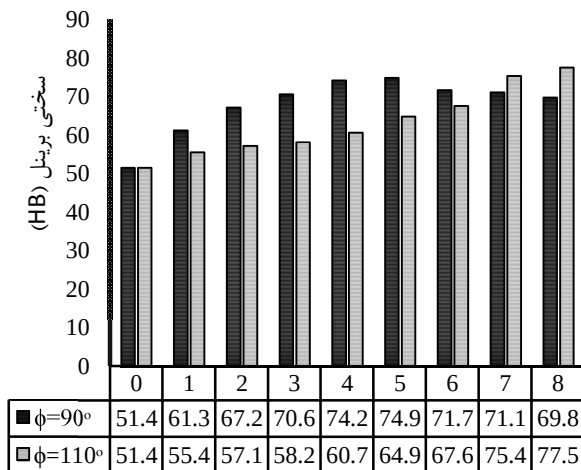
$\phi = 112/5^\circ$ ، $\phi = 135^\circ$ و $\phi = 157/5^\circ$ بررسی کردند. با توجه به نبود مطالعات کافی، در اکثر تحقیقات انجام شده، محققین از قالب هایی با زاویه ی برخورد 90° استفاده کرده لذا نقش عوامل هندسی قالب بر روند تکامل استحکام مواد تولیدی به روش ECAP همچنان مبهم است. اساس مطالعه تحقیق حاضر، تأثیر مقدار کرنش اعمالی در هر مرحله از فرآیند ECAP بر روند تکامل استحکام مس خالص تجاری می باشد.

۲- مواد و روش آزمایش

در این تحقیق از مس خالص تجاری به صورت میلگرد به عنوان ماده-ی مورد مطالعه استفاده گردیده که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ آورده شده است.

عنصر	Mg	Cl	S	Ca	Sn	Sb	Cu
درصد	۴۷	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۷	۴۴
وزنی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹۹

در ابتدا به منظور تهیه ی نمونه های مناسب جهت انجام فرآیند ECAP، عملیات ماشینکاری در راستای طولی (محور اکستروژن) بر روی میلگرد اولیه صورت گرفت. نمونه هایی با قطر 16 ± 0.05 میلی متر و طول تقریبی ۶۵ میلی متر توسط عملیات ماشینکاری تهیه شدند. به منظور انجام فرآیند ECAP، دو قالب با مقطع گرد و زوایای برخورد 90° و 110° همراه با یک سنبه طراحی و ساخته شد. مقطع کانال-های ورودی و خروجی قالب ها دایروی بوده و قطر آنها برابر با 16 ± 0.05 میلی متر و زاویه ی انحنای خارجی هر دو قالب برابر 37° می باشد. جهت ساخت قالب ها، موادی از جنس فولاد ابزار سرد کار 1.2510 انتخاب گردید. از مشخصه ی بارز این فولاد می توان به مقاومت اصطکاکی بسیار بالای آن جهت ساخت قطعات کار سرد اشاره نمود. قالب ها در دمای $800^\circ C$ به مدت ۸۰ دقیقه تحت عملیات انحلال قرار گرفته و سپس در محیط روغن سرد گردیدند. عملیات بازپخت نیز در دو دمای $250^\circ C$ و $400^\circ C$ به مدت ۱۲۰ دقیقه انجام گرفت و سختی حدود ۴۸ راکول C در قالب ها ایجاد شد. جنس سنبه از فولاد سرد کار 1.2080 انتخاب شده و توسط عملیات تراشکاری با ابعاد لازم و متناسب با قالب ها ماشینکاری گردید. سنبه در دمای $960^\circ C$ به مدت ۳۰ دقیقه تحت عملیات انحلال قرار گرفته و سپس در محیط روغن سرد گردید. عملیات بازپخت نیز در دو دمای $210^\circ C$ و $420^\circ C$ به مدت ۶۰ دقیقه انجام گرفت و سختی حدود ۵۰ راکول C در سنبه ایجاد شد. فرآیند ECAP توسط دستگاه پرس Gotech با ظرفیت ۱۰۰ تن در دمای اتاق و با سرعت ثابت ۱ میلی متر بر ثانیه انجام گردید. شکل ۲ قالب ها و سنبه را به همراه دستگاه پرس نشان می دهد.



شکل ۵- تغییرات سختی مس خالص تجاری تولیدشده توسط قالب‌های $\phi = 90^\circ$ و $\phi = 110^\circ$ بر حسب مراحل انجام فرآیند ECAP

همانطور که بیان شد، بهبود خواص مکانیکی طی فرآیندهای SPD متأثر از دگرگونی ساختاری و کاهش اندازه دانه می‌باشد بر اساس مطالعات اولیه انجام شده بر روی فلز مس [۲۱-۱۷] کل فرآیند پالایش دانه به واسطه تغییر شکل پلاستیک شدید طی روش ECAP را می‌توان به سه مرحله با توجه به تغییرات چگالی نابجایی‌ها و مرز دانه‌های زاویه بزرگ^۴ که منجر به تغییرات استحکام می‌شوند، تقسیم کرد. شکل ۷ طرح واره نمودار سه مرحله‌ای پالایش دانه و بهبود استحکام طی فرآیند ECAP را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود طی فرآیند ECAP دو عامل به صورت همزمان و مشترک باعث افزایش استحکام و سختی مس خالص می‌شوند. عامل اول استحکام بخشی از طریق افزایش چگالی نابجایی‌ها است که در حین فرآیند ECAP بدلیل کرنش‌های پلاستیک بسیار زیاد در ماده ایجاد شده و عامل دوم تغییرات اندازه دانه و شکل‌گیری مرز دانه‌های بی‌شمار است به‌طوری‌که با کوچک شدن اندازه‌ی دانه، استحکام ماده افزایش می‌یابد. مرحله اول عمدتاً شامل پاس‌های اولیه خصوصاً پاس اول فرآیند ECAP است. در طول این مرحله چگالی نابجایی‌ها به‌شدت افزایش یافته در حالی که مقدار تغییرات مرز دانه‌ها و به طبع آن اندازه دانه جزئی است. در این مرحله کلیت ریزساختار به وجود آمده متشکل از باندهای لایه‌ای کشیده با مرز دانه‌های فرعی که در اثر قفل شدن نابجایی‌ها به وجود آمده‌اند می‌باشد. مرحله دوم کاهش ملموس اندازه دانه و شکل‌گیری دانه‌های بسیار ریز با مرز دانه‌های زاویه بزرگ است (پاس-های میانی). در پایان این مرحله، حجم دانه‌های بسیار ریز تقریباً به مقدار نهایی (حالت اشباع) خود نزدیک می‌شود.



شکل ۴- نحوه‌ی برش نمونه‌های ECAP شده و الگوی نقاط سختی سنجی

برای انجام آزمایش فشار از دستگاه Zwick-155944 با ظرفیت ۶۰۰ KN بهره گرفته شد. آزمایش فشار در درمای محیط با سرعت ۰/۲ میلی‌متر بر ثانیه با توجه به استاندارد ASTM-E9 انجام گردید. ریزساختار نمونه‌های مسی تولیدشده توسط میکروسکوپ نوری متالوگرافی ساخت شرکت صایران و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۱ (FE-SEM) مدل Hitachi-S4160 مورد مطالعه قرار گرفت. نمونه‌ها در راستای عمود بر محور اکستروژن برش خورده و بوسیله‌ی پولیش کاری مکانیکی با توجه به روش‌های استاندارد متالوگرافی صیقل کاری گردیدند. سپس نمونه‌های صیقل کاری شده در محلول محتوی ۲ گرم دی کرومات پتاسیم، ۴ میلی‌لیتر محلول اشباع کلرید سدیم و ۸ میلی‌لیتر اسید سولفوریک حکاکی^۲ شدند. اندازه دانه‌ی متوسط به روش برخورد خطی^۳ محاسبه گردید.

۳- نتایج و بحث

شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب تغییرات سختی و استحکام تسلیم نمونه‌های تولیدشده به روش ECAP را در قالب‌های $\phi = 90^\circ$ و $\phi = 110^\circ$ بر حسب تعداد مراحل انجام فرآیند نشان می‌دهند. سختی و استحکام نمونه‌ی اولیه (پاس صفر) نیز برای مقایسه آورده شده است. به‌طور کلی، همان‌طور که مشاهده می‌شود سختی و استحکام نمونه‌های تولیدشده توسط هر دو قالب پس از فرآیند ECAP افزایش می‌یابد. اما تفاوت عمده‌ای، در روند تغییرات خصوصیات مکانیکی نمونه‌های تولیدشده به روش ECAP مشاهده می‌شود. بررسی نتایج آزمون‌های سختی سنجی و فشار نشان می‌دهند که قبل از انجام فرآیند ECAP سختی و استحکام تسلیم مس خالص تجاری مورد مطالعه، به ترتیب برابر HB ۵۱/۴ و ۲۶۰ مگاپاسکال است. با قرار دادن ماده تحت فرآیند ECAP درون قالب $\phi = 90^\circ$ سختی و استحکام آن همواره تا پاس پنج به طور پیوسته افزایش یافته و حداکثر مقدار اندازه گیری شده به ترتیب برابر HB ۷۴/۹ و ۳۹۰ مگاپاسکال می‌باشد. روند تغییرات سختی و استحکام تسلیم نمونه‌های تولیدشده توسط قالب $\phi = 110^\circ$ در مقایسه با قالب $\phi = 90^\circ$ کاملاً متفاوت بوده به‌طوری‌که با اعمال هشت مرحله فرآیند ECAP، سختی و استحکام تسلیم همواره افزایش می‌یابد. حداکثر سختی و استحکام تسلیم به‌دست آمده به ترتیب HB ۷۷/۵ و ۴۲۴ مگاپاسکال اندازه گیری شد.

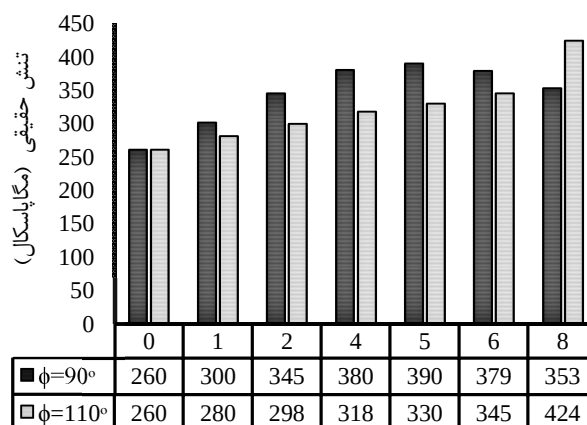
¹Field Emission Scanning Electron Microscope

²Etching

³linear Intercept

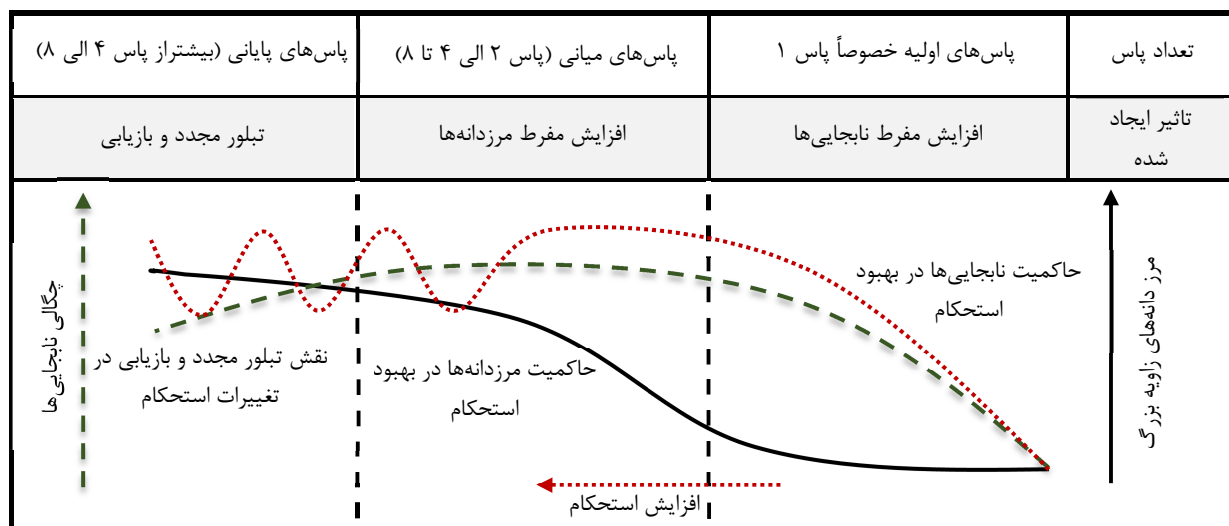
⁴High angle grain boundaries

موجود حاوی مقدار زیادی نابجایی بوده که امکان تشکیل دانه‌های جدید را نمی‌دهد.

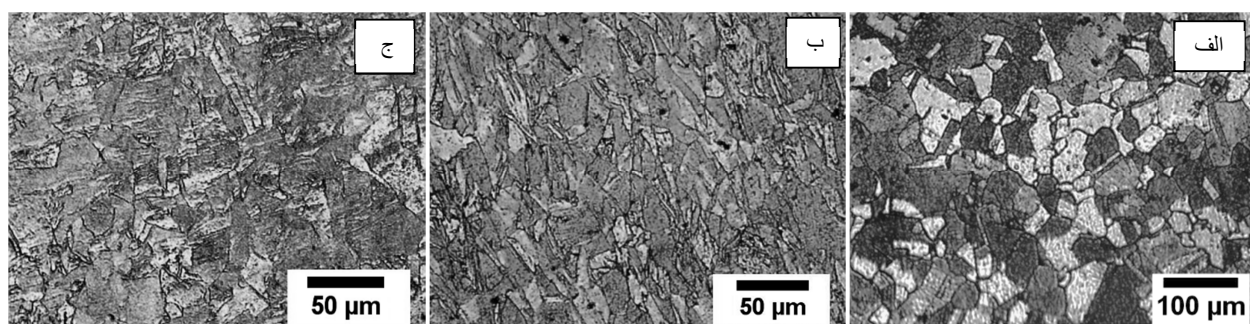


شکل ۶- تغییرات استحکام تسلیم مس خالص تجاری تولیدشده توسط قالب‌های $\phi = 90^\circ$ و $\phi = 110^\circ$ بر حسب مراحل انجام فرآیند ECAP

مرحله سوم شامل پاس‌های بیشتر از ۴ و ۸ است. در این مرحله اندازه دانه در اثر افزایش کرنش ذخیره شده به شدت کاهش می‌یابد. دانه‌های



شکل ۷- طرح واره نمودار سه مرحله‌ای پالایش دانه و بهبود استحکام طی فرآیند ECAP



شکل ۸- تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار - الف) نمونه اولیه ب) پاس ۱- قالب $\phi = 90^\circ$ ج) پاس ۱- قالب $\phi = 110^\circ$

در این مرحله شرایط برای تبلور مجدد و بازیابی دینامیکی^۱ محیا شده، بنابراین استحکام تغییرات نوسانی دارد. با توجه به تغییرات ساختاری و متالورژیکی بیان شده در قالب سه مرحله که در اثر اعمال

^۱ Dynamic recrystallization and Dynamic recovery

کرنش‌های متفاوت در هر پاس و ذخیره‌سازی آنها به وقوع می‌پیوندد، خواص مکانیکی روندهای متفاوتی را دنبال می‌کنند.

شکل ۸ (الف) تا (ج) تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار سطح عمود بر محور اکستروژن (صفحه‌ی عرضی) نمونه اولیه و نمونه‌های تولیدشده پس از اعمال یک مرحله فرآیند ECAP را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود ساختار نمونه‌ی اولیه دارای دانه‌های درشت متعارف^۱ با اندازه‌ی متوسط ۲۸ میکرون است. با اعمال یک پاس فرآیند ECAP توسط قالب $\phi = 90^\circ$ ریزساختار نمونه مسی به‌شدت تحت تأثیر کرنش اعمالی قرار گرفته به‌طوری‌که ساختار لایه‌لایه کشیده^۲ (ELS)، ساختار غالب نهایی است. ساختار ELS به وجود آمده با اعمال کرنش ۰/۹۹ (مراجعه به جدول ۲) تقریباً همگن بوده و متوسط اندازه دانه آن تقریباً برابر ۸ میکرون می‌باشد. کلیت ساختار تولیدشده در پاس ۱ با ریزساختار به‌دست‌آمده توسط زو و همکارانش [۲۲] پس از اعمال ۱ پاس فرآیند ECAP بر روی مس خالص تجاری به‌وسیله قالب $\phi = 90^\circ$ تطابق بسیار زیادی دارد.

از طرفی، با اعمال کرنش ۰/۷۴ به‌واسطه انجام یک مرحله فرآیند ECAP توسط قالب $\phi = 110^\circ$ ساختار به وجود آمده دارای نظم خاصی نبوده به‌طوری‌که حجم کمی از دانه‌های کشیده همراه با دانه‌هایی با شکل هندسی نامنظم درون آن مشاهده می‌شود. متوسط اندازه دانه تقریباً برابر ۱۴ میکرومتر است. با توجه به شکل و اندازه دانه‌ی ساختارهای به وجود آمده و مقایسه آنها با استحکام و سختی به‌دست‌آمده پس از اعمال یک پاس فرآیند ECAP می‌توان نتیجه گرفت که ساختار ELS به وجود آمده در نمونه تولیدشده به‌وسیله قالب $\phi = 90^\circ$ موجب افزایش بیشتر استحکام و سختی شده است. شایان ذکر است که مکانیزم اصلی استحکام‌بخشی طی فرآیند ECAP در پاس‌های اولیه بر پایه افزایش افراطی چگالی نابجایی‌ها استوار است. با اعمال فرآیند ECAP چگالی نابجایی‌ها با توجه به ایجاد کرنش‌های پلاستیک بسیار زیاد و کاهش فاصله‌ی مرزخانه‌ها در اثر ایجاد دانه‌های جدید به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. این مسئله توسط دله توره و همکاران [۱۸] طی بررسی‌های ریزساختار مس خالص تغییر شکل یافته به‌وسیله فرآیند ECAP توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری گزارش شده است. ایشان چگالی نابجایی‌ها را برای مس با ساختار درشت دانه پس از یک مرحله انجام فرآیند ECAP در حدود $m^{-2} \times 10^{14}$ درون سلول‌ها^۳ و $m^{-2} \times 10^{15}$ در دیواره‌های سلول^۴ گزارش کرده‌اند. زو و همکارانش [۲۳] نیز چگالی نابجایی‌های مس خالص تجاری با استحکام اولیه ۲۶۰ مگاپاسکال را پس از اعمال فرآیند ECAP و افزایش استحکام آن به ۳۷۷ مگاپاسکال در حدود $m^{-2} \times 10^{15}$ تخمین زده‌اند.

اساساً افزایش بیش از اندازه نابجایی‌ها موجب مسدود شدن حرکت آنها توسط دیواره‌ها یا سلول‌های نابجایی به وجود آمده شده بنابراین سختی و استحکام در اثر کرنش سختی^۵ افزایش می‌یابد. با شکل‌گیری دانه‌های بسیار ریز در پاس‌های میانی عامل استحکام‌بخشی از مکانیزم

تولید نابجایی و قفل شدن حرکت آنها به مکانیزم تغییرات ساختاری و اندازه دانه تغییر پیدا می‌کند.

شکل‌های ۹ (الف) تا (د) به ترتیب تصویر FE-SEM گرفته شده از مقطع عرضی نمونه‌های تولیدشده توسط قالب‌های $\phi = 90^\circ$ و $\phi = 110^\circ$ در پاس‌های ۴ و ۸ را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود پس از اعمال ۴ مرحله فرآیند ECAP توسط هر دو قالب تغییرات اندازه دانه بسیار چشم‌گیر بوده به‌طوری‌که اندازه‌ی دانه‌ها، با توجه به تقسیم دانه‌های درشت اولیه و تشکیل مجموعه‌ای از دانه‌های ریز در اثر اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید کاهش قابل ملاحظه‌ای یافته‌اند. با افزایش کرنش پلاستیک، فاصله‌ی مرزخانه‌ها کوچکتر شده که منجر به ایجاد ساختار UFG درون ماده می‌شود. پس از ۴ مرحله اعمال فرآیند ECAP توسط قالب‌های $\phi = 90^\circ$ و $\phi = 110^\circ$ به ترتیب مس خالص با ساختار UFG با متوسط اندازه دانه‌ی ۲۱۶ و ۳۴۵ نانومتر به دست آمد. ریزساختار تولیدشده توسط قالب $\phi = 90^\circ$ در مقایسه با قالب $\phi = 110^\circ$ ، دارای حجم بسیار زیادی از دانه‌های بسیار ریز با اندازه کمتر بوده لذا استحکام و سختی نمونه پاس ۴ تولیدشده توسط آن از مقدار بیشتری برخوردار است.

با افزایش مراحل ECAP تا ۸ پاس دانه‌هایی در مقیاس نانو درون ماده حاصل شد. با توجه به ایجاد مرزخانه‌های بی‌شمار در اثر کاهش شدید اندازه دانه و واکنش‌پذیری بسیار زیاد آنها با محلول حکاکی (نواحی سیاه رنگ در تصویرهای ج-۷ و د-۷) امکان ارائه متوسط اندازه دانه میسر نبوده، لذا تغییرات اندازه دانه در قالب میانگین اندازه دانه گزارش شده است. میانگین اندازه دانه ساختار کریستالی مس تولیدشده توسط قالب‌های $\phi = 90^\circ$ و $\phi = 110^\circ$ در پاس ۸ به ترتیب حدود ۱۰۹ و ۹۲ نانومتر می‌باشد. از آنجایی که اندازه دانه ریزساختار تولیدشده توسط اعمال ۸ مرحله فرآیند ECAP به‌وسیله قالب $\phi = 110^\circ$ نسبت به قالب $\phi = 90^\circ$ از اندازه کمتری برخوردار است لذا خواص مکانیکی مس تولیدشده از قبیل سختی و استحکام افزایش بیشتری یافته‌اند.

روند بهبود استحکام نمونه‌های مسی تولیدشده توسط قالب $\phi = 90^\circ$ از پاس ۵ به بعد متأثر از پدیده‌ی نرم شوندگی متوقف شده و مقداری از استحکام و سختی آن کاسته می‌شود. با شکل‌گیری دانه‌های فوق‌العاده ریز در حد چند صد نانومتر که حاوی مقدار زیادی نابجایی بوده (از ویژگی‌های ساختار UFG تولیدشده توسط فرآیند ECAP است [۲۳-۱۷]).

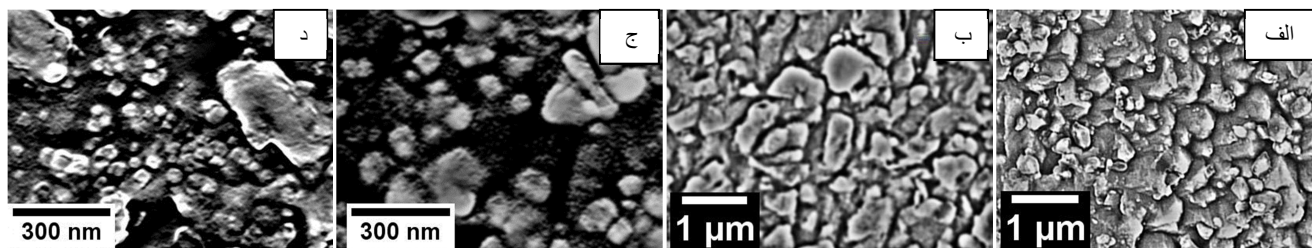
^۱Conventional coarse-grained

^۲Elongated laminar substructures

^۳Within cells

^۴Cell walls

^۵Strain hardening



شکل ۹- تصویر FE-SEM از ریز ساختار مس تولیدشده توسط الف) پاس ۴- قالب 90° (ب) پاس ۴- قالب 110° (ج) پاس ۸- قالب 90° (د) پاس ۸- قالب 110°

ایجاد شده که تأثیرات متفاوتی بر ریزساختار آنها می‌گذارد. به‌طوری‌که با اعمال کرنش بیشتر طی یک پاس، ریزساختار همگن‌تر با مورفولوژی ساختاری لایه‌لایه کشیده حاصل شده و به طبع آن میزان افزایش سختی و استحکام بیشتر است. با ذخیره‌سازی کرنش $3/97$ و $2/92$ به ترتیب طی اعمال ۴ پاس توسط قالب‌های 90° و 110° ساختار UFG درون مس خالص به‌دست‌آمده با این تفاوت که ذخیره کرنش بیشتر سبب تولید UFG با حجم بالایی از دانه‌های فوق‌العاده ریز گردیده است. به همین علت است که سختی و استحکام نمونه پاس ۴ قالب 90° به ترتیب $13/5\text{HB}$ و 62 مگاپاسکال از نمونه تولیدشده توسط قالب 110° بیشتر است. با ذخیره‌ی کرنش به مقدار $5/95$ درون مس خالص، روند افزایشی بهبود سختی و استحکام متوقف شده و تا کرنش معادل $7/94$ روندی نزولی به خود می‌گیرد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که کرنش معادل $5/95$ نقطه عطفی در روند بهبود خواص مکانیکی همانند سختی و استحکام برای فلز مس است.

نمونه پاس ۴ قالب 90° ، استحکام و سختی با ذخیره‌سازی مقدار $4/96$ کرنش به حداکثر ظرفیت خود رسیده و با ادامه اعمال فرآیند ECAP کرنش به مقدار اشباع در ماده ذخیره می‌شود. با توجه به وجود حجم بسیاری از دانه‌های بسیار ریز درون ساختار UFG نمونه و افزایش درجه حرارت حین فرآیند تغییر شکل در اثر افزایش استحکام آن و نیز ذخیره کرنش به مقدار اشباع، شرایط مناسبی برای به وقوع پیوستن تبلور مجدد دینامیکی به وجود آمده و به طبع آن استحکام و سختی کاهش می‌یابد. سؤالی که اینجا ممکن است در ذهن خوانندگان مطرح شود، "چرا این اتفاق برای نمونه‌ها مسی تولیدشده توسط قالب 110° نمی‌افتد" در قالب یک تشبیه ساده به بحث گذاشته می‌شود. ظرفیت استحکام‌پذیری فلز مس طی فرآیند ECAP را می‌توان به یک ظرف با حجم معین نسبت داده و کرنش اعمالی طی هر پاس، مانند جریان آب با دبی قابل تنظیم است. اگر در هنگام پر شدن ظرف از آب، دبی جریان آب کنترل شود به نحوی که ایجاد تلاطم نکند، کل حجم ظرف با حداقل آب ممکن پر می‌شود اما اگر دبی جریان آب بیش از

از تولید نابجایی‌های جدید جلوگیری می‌کند. بنابراین سهم چگالی نابجایی‌ها در افزایش استحکام و سختی کاهش یافته در حالی که سهم مرزدانه‌ها با توجه به کاهش تدریجی اندازه دانه از پاس ۴ تا ۸ تقریباً ثابت می‌ماند. از طرفی با افزایش حجم دانه‌های بسیار ریز درون ساختار UFG و نزدیک شدن آن به مقدار نهایی خود (حالت اشباع) استحکام و سختی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. با مقایسه شکل‌های ۷- الف و ۷- ب، کاملاً واضح است که حجم دانه‌های ریز درون ساختار UFG تولیدشده توسط قالب 90° بیشتر بوده و اساساً با ادامه مراحل سریع تر به مقدار نهایی خود می‌رسد. با اعمال کرنش بیشتر طی افزایش پاس، چگالی نابجایی‌ها و حجم دانه‌های ریز به حداکثر مقدار ممکن افزایش یافته و شرایط برای تبلور مجدد دینامیکی^{۲۱} در اثر افزایش دما حین تغییر شکل پلاستیک با توجه به افزایش استحکام ماده مهیا می‌شود. در نتیجه استحکام و سختی مس خالص تولیدشده توسط قالب 90° از پاس ۵ به بعد کاهش می‌یابد (وقوع پدیده نرم شوندگی در اثر تبلور مجدد دینامیکی). البته وقوع پدیده نرم شوندگی در بررسی‌های خواص مکانیکی مس خالص تولیدشده به روش ECAP توسط دیگر محققان نیز گزارش شده است. کوبوس و کابرا^{۲۲} [۲۴] طی بررسی رفتار مکانیکی مس خالص تجاری به‌وسیله اعمال ۱۶ مرحله فرآیند ECAP گزارش دادند که همواره تنش تسلیم تا پاس ۴ افزایش می‌یابد. از پاس ۴ به بعد تغییرات تنش تسلیم رفتار نوسانی از خود نشان داده به‌طوری‌که از پاس ۴ تا ۶ استحکام تسلیم کاهش و از پاس ۶ تا ۷ افزایش و سپس تا پاس ۱۶ مقدار بسیار کمی کاهش می‌یابد. حبیبی و همکارانش [۲۵] گزارش دادند که استحکام تسلیم مس خالص تجاری طی اعمال ۱۰ پاس فرآیند ECAR^{۲۳} در پاس ۷ به حداکثر مقدار خود رسیده و سپس از پاس ۸ تا ۱۰ کاهش می‌یابد.

با توجه به این موضوع که استحکام نمونه‌های تولیدشده متأثر از ریزساختار حاصله و ریزساختار حاصله نیز خود متأثر از کرنش اعمالی و کرنش معادل ایجاد شده (روند ذخیره‌سازی آن) است، لذا می‌توان تغییرات استحکام را از این دریچه بررسی کرد. بر اساس رابطه‌ی ۳ کرنش معادل ایجاد شده در نمونه‌ها، بر حسب تعداد مراحل ECAP محاسبه و مقادیر به‌دست‌آمده در جدول ۲ ارائه گردید.

با انجام فرآیند ECAP، در هر مرحله کرنش $0/99$ و $0/74$ به ترتیب در نمونه‌های تولیدشده توسط قالب‌های 90° و 110°

²¹Dynamic recrystallization

²²Cobos and Cabrera

²³Equal channel angular rolling

جدول ۲- مقادیر کرنش معادل بر حسب تعداد مراحل انجام فرآیند ECAP

تعداد مراحل (پاس)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
کرنش معادل ایجاد شده در نمونه‌ها توسط قالب $90^\circ = \emptyset$	۰/۹۹	۱/۹۸	۲/۹۸	۳/۹۷	۴/۹۶	۵/۹۵	۶/۹۵	۷/۹۴
کرنش معادل ایجاد شده در نمونه‌ها توسط قالب $110^\circ = \emptyset$	۰/۷۴	۱/۴۶	۲/۱۹	۲/۹۲	۳/۶۵	۴/۳۹	۵/۱۱	۵/۸۴

اندازه باشد به‌طوری‌که ایجاد تلاطم کند، نه تنها کل حجم ظرف پر نمی‌شود بلکه مقداری از آب به بیرون ظرف پرت می‌شود. با این پیش زمینه و نیز مقایسه‌ی کرنش‌های معادل در پاس ۶ (مرحله‌ای که پدیده نرم شوندگی آغاز شده) برای قالب $90^\circ = \emptyset$ و پاس ۸ برای قالب $110^\circ = \emptyset$ می‌توان اذعان داشت که مقادیر ذخیره‌سازی کرنش تا ۵/۸۴ (کرنش معادل مؤثر) می‌تواند موجب افزایش پیوسته استحکام گردد. حال اگر در هر مرحله ۱۲/۵ درصد از کل مقدار کرنش معادل مؤثر را طی ۸ پاس به نمونه مسی اعمال کرده میزان استحکام‌پذیری آن افزایش می‌یابد (کنترل دبی جریان آب). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که، با کاهش کرنش اعمالی در هر مرحله از فرآیند ECAP به میزان ۲۵ درصد، استحکام حاصل شده درون مس خالص پس از هشت پاس حدود ۷۱ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. بنابراین برای تولید مس خالص با استحکام بیشتر توسط فرآیند ECAP می‌توان کرنش اعمالی در هر مرحله را کاهش و تعداد مراحل ECAP را افزایش داد.

ذخیره‌سازی آن است. به‌طوری‌که با کاهش کرنش اعمالی در هر مرحله انجام فرآیند ECAP از ۰/۹۹ به ۰/۷۴ (در حدود ۲۵ درصد) می‌توان استحکام مس خالص تجاری را طی هشت پاس به میزان ۷۱ مگاپاسکال افزایش داد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان اذعان داشت که افزایش استحکام مس خالص تولیدشده به روش ECAP با ذخیره‌سازی کرنش معادل در حدود ۵ تا ۵/۸۴ قابل توجه است و پس از آن روند افزایشی آن نسبت به تغییر شکل حساسیت نشان نداده، بلکه اندکی کاهش می‌یابد. لذا توصیه می‌شود زاویه برخورد کانال‌های قالب ECAP با توجه به استحکام مد نظر، روش و تعداد مراحل انجام فرآیند انتخاب گردد.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این پژوهش کمال قدردانی و تشکر را از کمک‌های مالی ستاد ویژه توسعه فناوری نانو جهت انجام این طرح دارند.

۶- مراجع

- Hansen N., Hall-Petch relation and boundary strengthening, Scripta Materialia, Vol.51, pp: 801-806, 2004.
- [1] Afsari A., Ranaei M.A., Equal Channel Angular Pressing to Produce Ultrafine Pure Copper with Excellent Electrical and Mechanical Properties, International Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 10, No. 4, pp. 215-222, 2014.
 - [2] Yang Gon Kim, Byoungchul Hwang, Sunghak Lee, Dynamic deformation and fracture behavior of ultra-fine-grained pure copper fabricated by equal channel angular pressing, Materials Science and Engineering: A, Vol. 504, Issues 1-2, pp. 163-168, 2009.
 - [3] Ranjbar Bahadori Sh., Dehghani K., Bakhshandeh F., Microstructure, texture and mechanical properties of pure copper processed by ECAP and subsequent cold rolling, Materials Science and Engineering: A, Vol. 583, pp: 36-42, 2013.
 - [4] Segal V.M., Materials processing by simple shear, Materials Science and Engineering A, Vol.197, pp: 157-164, 1995.
 - [5] Iwahashi Y., Wang J., Horita Z., Nemoto M., Langdon T.G., Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials, Scripta Materialia, Vol. 35, pp: 143-146, 1996.
 - [6] Lugo N., Llorca N., Cabrera J.M., Horita Z., Microstructures and mechanical properties of pure copper deformed severely by equal-channel angular pressing and high pressure torsion, Materials Science and Engineering A, Vol. 477, pp: 366-371, 2008.
 - [7] Stepanov N.D., Kuznetsov A.V., Salishchev G.A., Raab G.I., Valiev R.Z., Effect of cold rolling on microstructure and mechanical properties of copper subjected to ECAP with various numbers of passes, Materials Science and Engineering A, 554, pp: 105-115, 2012.
 - [8] Asiyeh Habibi, Mostafa Ketabchi, Enhanced properties of nano-grained pure copper by equal channel angular rolling and post-annealing, Materials and Design, Vol.34, pp: 483-487, 2012.
 - [9] Qing-Wei Jiang, Xiao-Wu Li. Effect of pre-annealing treatment on the compressive deformation and damage be-

۴- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در تحقیق حاضر تأثیر مقدار کرنش اعمالی در هر مرحله از فرآیند ECAP بر روند تکامل استحکام مکانیکی (دستیابی به استحکام‌های بیشتر) مس خالص تجاری با استفاده از دو قالب با زوایای برخورد $90^\circ = \emptyset$ و $110^\circ = \emptyset$ بررسی گردید. اعم نتایج به‌دست‌آمده به صورت خلاصه به شرح زیر است. با ایجاد کرنش ۰/۹۹ توسط قالب $90^\circ = \emptyset$ در هر مرحله از فرآیند ECAP درون مس خالص تجاری روند تغییرات سختی و استحکام آن تا مرحله پنجم (کرنش معادل ۴/۹۶) به طور پیوسته صعودی بوده و حداکثر مقدار در این مرحله حاصل می‌شود. با افزایش ذخیره‌سازی کرنش از پاس پنجم به بعد روند تغییرات سختی و استحکام با توجه به وقوع پدیده نرم شوندگی نزولی شده و مقداری کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد که کرنش اعمالی در هر مرحله از فرآیند ECAP و روند ذخیره‌سازی آن عاملی مؤثر در وقوع پدیده نرم شوندگی است. از طرفی با استفاده از قالب $110^\circ = \emptyset$ و کاهش کرنش اعمالی در هر مرحله از فرآیند ECAP به میزان ۲۵ درصد، تغییرات سختی و استحکام مس خالص تا مرحله‌ی هشتم (کرنش معادل ۵/۸۴) کاملاً روند صعودی داشته به‌طوری‌که سختی نمونه‌ها از ۵۱/۴ HB به ۷۷/۵ HB (حدود ۵۱ درصد نمونه اولیه) و استحکام آنها از ۲۶۰ MPa به ۴۲۴ MPa (حدود ۶۳ درصد نمونه اولیه) افزایش می‌یابد. بنابراین برای تولید مس خالص با استحکام بیشتر توسط فرآیند ECAP، می‌توان کرنش اعمالی در هر مرحله را کاهش و تعداد مراحل فرآیند را افزایش داد.

روی هم رفته، تکامل استحکام مس خالص تجاری تولیدشده به روش ECAP تابع ریزساختار، کرنش اعمالی در هر مرحله از فرآیند و روند

- havior of ultrafine-grained copper, *Materials Science and Engineering A*, Vol.546, pp: 59– 67, 2012.
- [10] Purcek G., Yanar H., Demirtas M., Alemdag Y., Shangina D.V., Dobatkin S.V., Optimization of strength, ductility and electrical conductivity of Cu–Cr–Zr alloy by combining multi-route ECAP and aging, *Materials Science and Engineering A*, Vol.649, pp: 114–122, 2016.
- [11] Salimyanfard F., Toroghinejad M.R., Ashrafizadeh F., Hoseini M., Szpunar J. A., Investigation of texture and mechanical properties of copper processed by new route of equal channel angular pressing, *Materials and Design*, Vol.44, pp: 374–381, 2013.
- [12] Ya Li Wang, Rimma Lapovok, Jing Tao Wang, Yuan Shen Qi, Yuri Estrin, Thermal behavior of copper processed by ECAP with and without back pressure, *Materials Science & Engineering A*, Vol.628, pp:21–29, 2015.
- [13] Dumoulin S., Roven H.J., Werenskiold J.C., Valberg H.S., Finite element modeling of equal channel angular pressing: Effect of material properties, friction and die geometry”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 410–411, pp: 248–251, 2005.
- [14] Djavanroodi F., Ebrahimi M., Effect of die channel angle, friction and back pressure in the equal channel angular pressing using 3D finite element simulation, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No 4–5, pp: 1230–1235, 2010.
- [15] Kiyotaka Nakashima, Zenji Horita, Minoru Nemoto, Terence G. Langdon, Influence of channel angle on the development of ultrafine grains in equal-channel angular pressing, *Acta Materialia*, Vol. 46, No 5, pp: 1589–1599, 1998.
- [16] Qu S., An X.H., Yang H.J., Huang C.X., Yang G., Zang Q.S., Wang Z.G., Wu S.D., Zhang Z.F., Microstructural evolution and mechanical properties of Cu–Al alloys subjected to equal channel angular pressing, *Acta Materialia*, Vol. 57, pp. 1586-1601, 2009.
- [17] Dalla Torre F.H., Pereloma E.V., Davies C.H.J., Strain hardening behaviour and deformation kinetics of Cu deformed by equal channel angular extrusion from 1 to 16 passes, *Acta Materialia*, Vol. 54, pp: 1135–1146, 2006.
- [18] Wang Y.M., MA E., Three strategies to achieve uniform tensile deformation in a nanostructured metal, *Acta Materialia*, Vol. 52, pp.1699–1709., 2004.
- [19] Dalla Torre F., Lapovok R., Sandlin J., Thomson P.F., Davies C.H.J. Pereloma., E.V., Microstructures and properties of copper processed by equal channel angular extrusion for 1–16 passes, *Acta Materialia*, Vol. 52, pp.4819–4832, 2004.
- [20] Shih M.H., Yu C.Y., Kao P.W., Chang C.P., Microstructure and flow stress of copper deformed to large plastic strains, *Scripta Materialia*, Vol. 45, pp. 793-799, 2001. Xue Q., Beyerlein I.J., Alexander D.J., Gray III G.T., Mechanisms for initial grain refinement in OFHC copper during equal channel angular pressing, *Acta Materialia*, Vol. 55, 2007, pp: 655–668.
- [21] Zhu C.F., Du F.P., Jiao Q.Y., Wang X.M., Chen A.Y., Liu F., Pan D., Microstructure and strength of pure Cu with large grains processed by equal channel angular pressing, *Materials and Design*, Vol. 52, pp. 23–29, 2013.
- [22] Higuera-Cobos O.F., Cabrera J.M., Mechanical, microstructural and electrical evolution of commercially pure copper processed by equal channel angular extrusion, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 571, pp. 103–114, 2013.
- [23] Habibi A., Ketabchi M., Eskandarzadeh M., Nano-grained pure copper with high-strength and high-conductivity produced by equal channel angular rolling process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, pp.1085–1090, 2011.
- [24] Sakai T., Belyakov A., Kaibyshev R., Miura H., Jonas J. J., Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions, *Progress in Materials Science*, Vol. 60, pp. 130-207, 2014.