مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 15، ص‌ص 257-266

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# بررسی خصوصیات مکانیکی، الکتریکی و ریز ساختار مس تولید شده به روش اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه دار

محمدامین رعنائی[1]، احمد افسری[2]، سید یوسف احمدی بروغنی[3]، محمدمحسن مشکسار[4*]

1- مربی، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بیرجند، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، بیرجند
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی شیراز، شیراز
3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
4- استاد، مهندسی مواد، دانشگاه شیراز، شیراز
* شیراز، صندوق پستی 7186885838، moshksar@shirazu.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 07 مرداد 1393
پذیرش: 07 مهر 1393
ارائه در سایت: 30 مهر 1393

*کلید واژگان:*
ساختار کریستالی نانو و بسیار ریز دانه
تغییر شکل پلاستیک شدید
خواص مکانیکی
خواص الکتریکی

**چکیده**

در این تحقیق، مس خالص تجاری به وسیله‌ی فرآیند اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار (ECAP) طی هشت مرحله در دمای محیط تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفت. تاثیر تغییر شکل پلاستیک شدید بر ریز ساختار، خواص مکانیکی، هدایت الکتریکی و سایش الکتریکی مس خالص بررسی شد. بعلاوه، تاثیر کرنش اعمالی بر خواص مکانیکی مس اکسترود شده در هر مرحله نیز مطالعه گردید. نتایج حاصل از بررسی ریز ساختار ماده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دادند که ساختار کریستالی ماده به‌طور قابل ملاحظه‌ای تغییر شکل یافته و پس از 4 تا 8 مرحله فرآیند ECAP طیف گسترده‌ای از دانه‌های بسیار ریز در محدوده‌ی نانو و چند صد نانومتر دیده می‌شوند. خواص مکانیکی پس از هر مرحله انجام فرآیند ECAP توسط آزمون سختی و فشار در دمای محیط اندازه گیری و تغییرات آنها گزارش شده است. با شکل گیری دانه‌های بسیار ریز (در حدود چند صد نانومتر) درون ساختار کریستالی مس خالص استحکام آن به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته در حالی که هدایت الکتریکی آن به واسطه ایجاد مرزدانه‌های بسیار زیاد اندکی کاهش می‌یابد. از این رو، با استفاده از فرآیند ECAP می‌توان به مس خالص بسیار ریز دانه با قابلیت استحکام و هدایت الکتریکی بالا دست یافت. علاوه براین نیز با کاهش کرنش اعمالی به میزان 25 درصد در هر مرحله از فرآیند ECAP می‌توان به استحکام‌های بالاتر در مس خالص تجاری دست یافت. مقاومت در برابر سایش الکتریکی مس خالص تجاری توسط فرآیند الکتریکی- حرارتی تخلیه‌ی الکتریکی تعیین شد.

# Microstructure, Mechanical and Electrical Properties of Commercially Pure Copper Deformed Severely by Equal Channel Angular Pressing

Mohammad Amin Ranaei[1], Ahmad Afsari[2], Seyed Yousef Ahmadi Brooghani[3], Mohammad Mohsen Moshksar[4*]

1- Department of Mechanical Engineering, Young Researchers and Elites Club, Islamic Azad University Birjand branch, Birjand, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University Shiraz branch, Shiraz, Iran
3- Department of Mechanical Engineering, Birjand University, Birjand, Iran
4- Department of Materials Science and Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran
*P.O.B. 7186885838 Shiraz,Iran, Moshksar@shirazu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 29 July 2014
Accepted 29 September 2014
Available Online 22 October 2014

*Keywords:*
Nano and ultra-fine grain structure
Severe plastic deformation
Mechanical properties
Electrical properties

ABSTRACT

In this study, commercially pure copper samples were severely deformed by equal channel angular pressing (ECAP) up to 8 passes in room temperature. The effect of sever plastic deformation on the microstructure, mechanical properties, electrical conductivity and electrical wear resistance of the cupper were investigated. In addition, the effect of induced strain on mechanical properties of the extruded cupper in each pass was studied. Field emission scanning electron microscope micrographs show the extreme evaluation of the microstructure after 4 to 8 ECAP passes, in which a large amount of nano and ultra-fine grains are observable. The mechanical properties of the pure cupper in each pass were estimated by compression testing and Brinell hardness method at room temperature. Yield strength and hardness increased by ~390 MPa and 75HB respectively after 5-pass ECAP due to finer boundary spacing. Increasing the strength of pure copper led to only a minor decrease of the electrical conductivity. Hence, by applying ECAP, the ultra-fine pure copper that can improve the mechanical properties without impairing the electrical conductivity is obtained. By reducing the applied strain in each pass (25%) of the ECAP process, the pure copper with higher strength can be obtained. The electrical wear behavior of the samples was investigated by electrical discharge machining (EDM). The results indicate that, electrical wear of the extruded samples is reduced compared to the original samples.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M.A. Ranaei, A. Afsari, S.Y. Ahmadi Brooghani, M.M. Moshksar, Microstructure, Mechanical and Electrical Properties of Commercially Pure Copper Deformed Severely by Equal Channel Angular Pressing, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 15, pp. 257-266, 2015 (In Persian)

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.36.3 ]

## 1- مقدمه

فلز مس با توجه به هدایت الکتریکی وگرمایی بسیار مطلوب به‌طور گسترده در ساخت تجهیزات الکتریکی مانند الکترودهای ماشین‌های تخلیه‌ی الکتریکی و نقطه جوش، اتصالات برقی[1]، چرخ‌های درز جوش[2]، و غیره استفاده می‌شود. با توجه به پیشرفت روزافزون صنایع الکترونیک و افزایش بازدهی تجهیزات الکتریکی، نیاز به بهبود خواص فلز مس از جمله دست‌یابی به استحکام‌های بالا همزمان با حفظ هدایت اکتریکی حس می‌شود. بسیاری از محققان کوشیدند تا از طریق آلیاژسازی مکانیکی با عناصری نظیر بریلیوم، نقره، تیتانیوم و نیوبیوم به استحکام‌های بالا در فلز مس دست یابند[1-3]. مشکل اساسی این روش استحکام بخشی، کاهش قابل ملاحظه‌ی هدایت الکتریکی بوده به طوری که رسانایی الکتریکی نسبی مواد بدست آمده کمتر از 50 درصد مس جهانی آنیل شده استاندارد[3](IACS) است[1-3]. روی هم رفته عوامل ذیل نقش اساسی و تعیین کننده در هدایت الکتریکی مس دارند[۴،5]. 1- ناخالصی‌ها، پراکندگی الکترون‌ها[4] را از طریق ارتعاشات حرارتی شبکه کریستالی افزایش می‌دهند. 2- وجود نواقص ساختاری شامل مرزدانه‌ها و نابجایی‌ها. باتوجه به توصیفات ارائه شده، نیاز به ارائه و توسعه روشی مناسب جهت بهبود خواص مکانیکی مس با حفظ هدایت الکتریکی آن است.

در دو دهه‌ی اخیر مواد پلی کریستال با دانه‌بندی بسیار ریز در حد نانو-متر و یا چند صد نانومتر (کمتر از میکرون) بدلیل برخورداری از خواص مکانیکی و فیزیکی ویژه[6-9]، شدیداً مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. خواص مکانیکی و فیزیکی مواد کریستالی تحت تاثیر فاکتورهای متعددی می‌باشند که اندازه متوسط دانه در تعیین این خواص تاثیر بسزایی دارد. به طورکلی مطابق رابطه‌ی 1 (رابطه‌ی هال- پچ[5]) استحکام ماده با عکس مجذور اندازه‌ی دانه‌ی آن ارتباط دارد. به عبارت دیگر با کوچک شدن اندازه‌ی دانه، استحکام ماده افزایش می‌یابد.

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

در این رابطه $\sigma_y$ تنش تسلیم، $\sigma_0$ مقاومت شبکه، d اندازه‌ی دانه و $k_y$ ثابتی است که به جنس ماده بستگی دارد (ضریب هال- پچ).

یکی از رویکردهای جدید برای تولید مواد نانو کریستال[6] (NC) و مواد با دانه‌های بسیار ریز[7] (UFG)، اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید[8] (SPD) بر روی نمونه‌ی اولیه با دانه‌های درشت می‌باشد. در این روش با اعمال کرنش‌های شدید به نمونه، طی چندین مرحله اندازه‌ی دانه‌های آن تا مقیاس نانومتری کاهش می‌یابد و این امر باعث بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی ماده می‌شود[6-9]. از آن‌جایی که تغییرات ابعادی ماده می‌تواند مانعی در مقابل میزان کرنش اعمالی باشد، لذا اکثر روش‌های SPD به نحوی طراحی شده‌اند که ابعاد نمونه در حین فرآیند ثابت مانده و تغییر نمی‌کند[6-9]. یکی از مهم‌ترین روش‌های SPD، اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار[9] (ECAP) است. فرآیند ECAP روشی موثر جهت تولید مواد با ساختار UFG بوده تا از این طریق خواص مکانیکی و فیزیکی آنها را به طور چشم‌گیری بهبود بخشد[9-11]. از دیگر مزایای این فرآیند می‌توان به دستیابی حجم بسیار قابل توجه از دانه‌های بسیار ریز درون مواد پلی‌کریستال برای مصارف صنعتی با قیمت مناسب اشاره نمود[10،11]. طی فرآیند ECAP، ماده درون قالبی با دو کانال متقاطع و هم‌مقطع فشرده می‌شود. این دو کانال تحت زاویه‌ی برخورد $\emptyset$ به هم متصل شده‌اند و ممکن است در گوشه‌ی خارجی تقاطع دو کانال نیز انحنایی با زاویه‌ی $\psi$ وجود داشته باشد. 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 مطابق رابطه‌ی 2 درون آن ذخیره می‌شود [11]. این مسئله موجب کوچک شدن شبکه‌ی کریستالی ماده می‌شود.

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

در این رابطه $\emptyset$ و $\Psi$ به‌ترتیب زوایای برخورد کانال‌ها و انحنایی خارجی قالب ECAP، N تعداد دفعات عبور ماده از کانال‌های قالب و $\varepsilon_N$ کرنش معادل[10] به ازای هر مرحله انجام فرآیند ECAP می‌باشند. رابطه‌ی 2 بدون در نظر گرفتن ضریب اصطکاک بین سطح ماده با قالب و همچنین تاثیر ضریب کارسختی ماده بر روی رفتار سیلان آن محاسبه شده است. در این رابطه فقط تاثیر پارامترهای هندسی قالب در آن گنجانده شده است. یکنواختی ساختار و خواص مکانیکی ماده‌ی تولید شده به روش ECAP، به میزان و نحوه توزیع کرنش پلاستیک در حین سیلان ماده درون کانال‌های قالب بستگی دارد[11]. از مهم‌ترین عواملی که بر این کمیت‌ها تاثیر گذارند می‌توان به زاویه‌ی برخورد کانال‌ها $\emptyset$ و زاویه‌ی انحنای خارجی $\Psi$ قالب اشاره نمود.

در این پژوهش مس خالص تجاری، به منظور دست‌یابی به ترکیب هم زمان استحکام و رسانایی الکتریکی بالا طی هشت مرحله تحت فرآیند ECAP قرار گرفت. سپس، ارتباط میان عوامل میکروساختاری، خواص مکانیکی و رسانایی الکتریکی مورد بحث قرار گرفت. کارکرد عملی و رفتار سایش الکتریکی مس بسیار ریز دانه طی فرآیند الکتریکی- حرارتی ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی[11] (EDM) نیز بررسی گردید. بعلاوه، تلاش شده که با تغییر در عوامل هندسی قالب و به تبع آن کاهش کرنش اعمالی در هر مرحله از فرآیند ECAP، به خواص مکانیکی مطلوب‌تری دست یافت. لذا کرنش اعمالی در هر مرحله از فرآیند ECAP به میزان 25 درصد کاهش و خواص مکانیکی و ریز ساختار مس خالص تجاری مجدداً مطالعه گردید.

## 2- روش های آزمایش

در این تحقیق از مس خالص تجاری با خلوص 99/44 به عنوان ماده‌ی مورد مطالعه استفاده شد. جهت انجام فرآیند ECAP نمونه‌هایی با مقطع گرد به قطر 16 میلی‌متر و طول تقریبی 65 میلی‌متر از ماده‌ی خام اولیه توسط عملیات ماشین‌کاری تهیه شدند. فرآیند ECAP با استفاده از دستگاه پرس گاتک[12] مدل GT-7001-LS100 در دمای اتاق، با سرعت ثابت 1 میلی‌متر بر ثانیه انجام شد. مس خالص تجاری حداکثر تا 8 مرحله درون یک قالب یکپارچه ساخته شده از فولاد ابزار سرد کار AISI 1.2510 که دارای دو کانال هم‌مقطع با زوایای برخورد °90 و انحنای خارجی °37~ تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفت. پس از هر مرحله انجام فرآیند ECAP، نمونه به اندازه 90 درجه و تنها در جهت عقربه‌های ساعت چرخانده شده و دوباره در کانال ورودی قرار گرفت (روش BC) [11]. به منظور کاهش اثر اصطکاک از یک نوع فوم صابون به عنوان روان‌کار استفاده گردید.

جهت بررسی ریز ساختار ماده قبل و پس از فرآیند ECAP از میکروسکوپ نوری متالوگرافی ساخت شرکت صاایران و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی[13] (FE-SEM) مدل هیتاچی-S4160 استفاده

1- Electrical connector
2- Seam welding wheels
3- International Annealed Copper Standard
4- Electron scattering
5- Hall-Petch equation
6- Nano crystalline
7- Ultra-fine Grained
8- Sever Plastic Deformation
9- Equal Channel Angular Pressing

10- Total strain
11- Electrical Discharge Machining
12- Gotech
13- Field Emission Scanning Electron Microscope



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.36.3 ]

شد. برای این منظور یک مقطع در راستای عمود بر محور اکستروژن (صفحه‌ی عرضی) از وسط نمونه‌ها تهیه و بوسیله‌ی پولیش‌کاری مکانیکی با توجه به روش‌های استاندارد متالوگرافی صیقل‌کاری گردیدند. سپس نمونه‌های صیقل‌کاری شده در محلول محتوی 2 گرم دی کرومات پتاسیم، 4 میلی‌لیتر محلول اشباع کلرید سدیم و 8 میلی‌لیتر اسید سولفوریک حکاکی[1] شدند. اندازه دانه‌ی متوسط به روش برخورد خطی[2] محاسبه گردید.

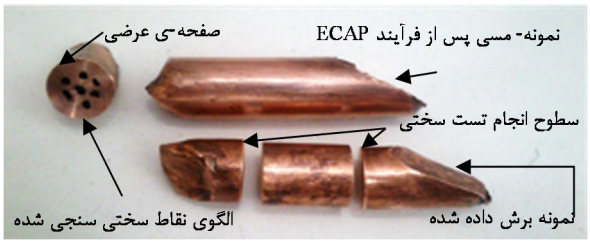
به‌منظور انجام آزمایش فشار، از قطعات ECAP شده در هر مرحله نمونه‌هایی با توجه به استاندارد ASTM E9 [12] توسط عملیات ماشین‌کاری تهیه گردید. برای انجام آزمایش از دستگاه زویک[3] مدل 155944 با ظرفیت 600 کیلونیوتن بهره گرفته شد. آزمایش فشار با سرعت 0/2 میلی‌متر بر ثانیه در درمای محیط انجام گرفت. در هر آزمایش طول نمونه‌ها 60 درصد کاهش یافت. به عبارت دیگر در هر نمونه، کرنشی به اندازه‌ی 0/9 ایجاد گردید. به منظورکاهش اثر اصطکاک بین فک دستگاه و سطح نمونه از پلاستیک تفلون و فوم صابون استفاده شد.

آزمایش سختی به وسیله‌ی دستگاه سختی سنج قابل حمل مدل HLN-11A انجام شد. برای انجام آزمایش سختی، نمونه‌های ECAP شده مطابق شکل 1 به وسیله‌ی دستگاه برش سیمی[4] برش داده شده و سختی سنجی به روش برینل بر روی نقاط نشان داده شده انجام گرفت. برای هر نمونه میانگین بدست آمده از اندازه گیری 12 نقطه به عنوان مقدار سختی لحاظ شد.

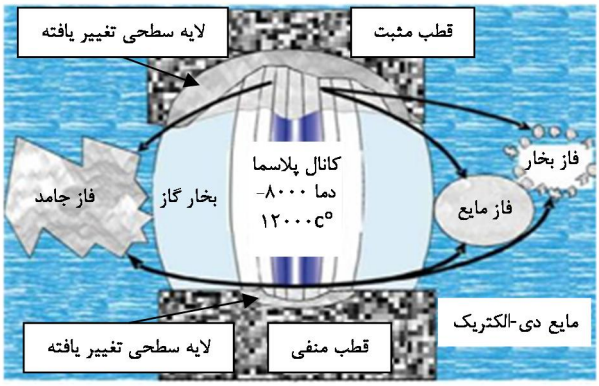
از دستگاه قابل حمل مدل SMP10 جهت اندازه گیری هدایت الکتریکی استفاده شد. این دستگاه هدایت الکتریکی را با استفاده از روش جریان گردابی[5] با توجه به استاندارد ASTM E1004-02 اندازه گیری می‌کند. اساس کار این روش، ایجاد جریان گردابی در نمونه با استفاده از القای الکترومغناطیس است. این کمیت دو مرتبه در هر نمونه اندازه‌گیری شده و میانگین بدست آمده در قالب IACS% گزارش شد.

به منظور تعیین مقاومت مس خالص تجاری در برابر سایش الکتریکی از فرآیند الکتریکی- حرارتی EDM استفاده گردید. اساس کار EDM تبدیل انرژی الکتریکی به حرارتی برای تامین منبع حرارت لازم جهت شکل‌گیری کانال پلاسما می‌باشد[13]. تخلیه‌ی الکتریکی مابین الکترودها (قطب مثبت و منفی) که به یک منبع تغذیه‌ی جریان مستقیم متصل‌اند صورت می‌گیرد. به‌منظور جلوگیری از اتصال کوتاه و فراهم نمودن شرایط مناسب برای تخلیه‌ی الکتریکی الکترودها درون مایع نارسانای الکتریکی (دی‌الکتریک) شناور می‌باشند. یک جرقه منفرد مابین الکترودها باعث ذوب و تبخیر ماده از سطح آنها شده و حفره‌ای به شکل نعلبکی ایجاد می‌کند. شماتیک و شرایط تخلیه‌ی الکتریکی طی فرآیند EDM در شکل 2 نشان داده شده است[14]. به‌منظور انجام آزمایش سایش الکتریکی از ماشین تخلیه‌ی الکتریکی پیشرانه مدل A63-511 استفاده گردید.

سایش الکتریکی نمونه‌ی اولیه (NON-ECAP)، نمونه‌های ریزدانه‌ی تولید شده در پاس‌های 4 و 8 با انجام 27 آزمایش تعیین گردید. در آزمایش‌های سایش الکتریکی، شدت جریان در سه سطح 5، 10 و 15 آمپر تغییر یافته و بعد از 6، 12 و 18 دقیقه قرارگیری نمونه‌ها در شرایط تخلیه‌ی الکتریکی سایش الکتریکی آن‌ها اندازه‌گیری شد. رایج‌ترین روش برای محاسبه‌ی سایش الکتریکی ماده، اندازه‌گیری وزن و تعیین کل حجم برداشته شده از آن می‌باشد[15].




**شکل 1** نحوه‌ی برش عرضی نمونه‌های ECAP شده و الگوی نقاط سختی سنجی




**شکل 2** شرایط کاری تخلیه‌ی الکتریکی[14]

**جدول 1** جزئیات آزمایش سایش الکتریکی به همراه عوامل و سطوح تغییرات.

| | |
|---|---|
| نوع ژنراتور | ایزوپالس |
| قطبیت NON-ECAP, ECAP4, ECAP8 | مثبت |
| دی الکتریک | گازوئیل |
| نوع شستشو | شستشوی غوطه وری |
| زمان قرارگیری تحت تخلیه الکتریکی (دقیقه) | 6، 12، 18 |
| شدت جریان (آمپر) | 5، 10، 15 |
| زمان روشنی پالس (µs) | 50 |
| زمان خاموشی پالس (µs) | 25 |
| ولتاژ | متوسط |

معمولاً اختلاف وزن ماده قبل و بعد از قرارگیری در شرایط تخلیه‌ی الکتریکی محاسبه شده و به وسیله‌ی چگالی آن به مقدار حجمی تبدیل می‌شود[15]. برای محاسبه‌ی این عامل چگالی مس 8/9 (گرم برسانتی‌متر مکعب) در نظر گرفته شد[16]. جزئیات آزمایش سایش الکتریکی به همراه عوامل و سطوح تغییرات آنها در جدول 1 آورده شده است.

زاویه‌ی برخورد کانال‌های هم مقطع، عامل اساسی و تعیین کننده‌ی مقدار کرنش اعمالی است که در هر مرحله از فرآیند ECAP به وقوع می‌پیوندد. از طرفی مقدار کرنش اعمالی در هر مرحله از فرآیند ECAP تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر خواص مکانیکی ماده تولید شده با این روش دارد. کرنش اعمالی در هر مرحله از فرآیند ECAP به میزان 25 درصد کاهش یافته و خواص مکانیکی مجدداً بررسی گردید. برای این منظور قالب یکپارچه دیگری که دارای دو کانال هم‌مقطع با زوایای برخورد °110 و انحنای خارجی °32 ~نیز ساخته شده و ماده باتوجه شرایط ذکر شده در شرایط آزمایشگاهی یکسان تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفت.

## 3- نتایج و بحث

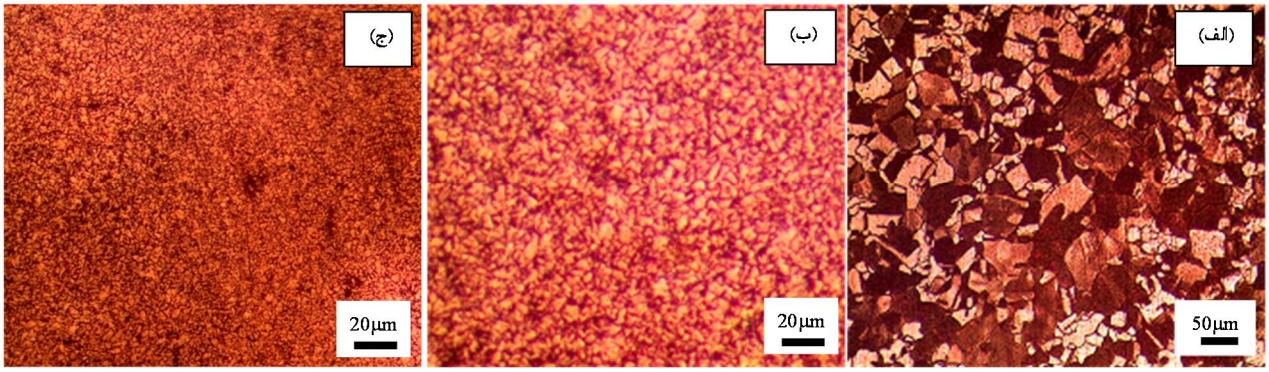
### 3-1- ریز ساختار

شکل 3 (الف) تا (ج) تصویر میکروسکوپ نوری از سطح عمود بر محور اکستروژن (صفحه‌ی عرضی) نمونه‌های اولیه، پاس‌های 3 و 4 را به ترتیب نشان می‌دهد.

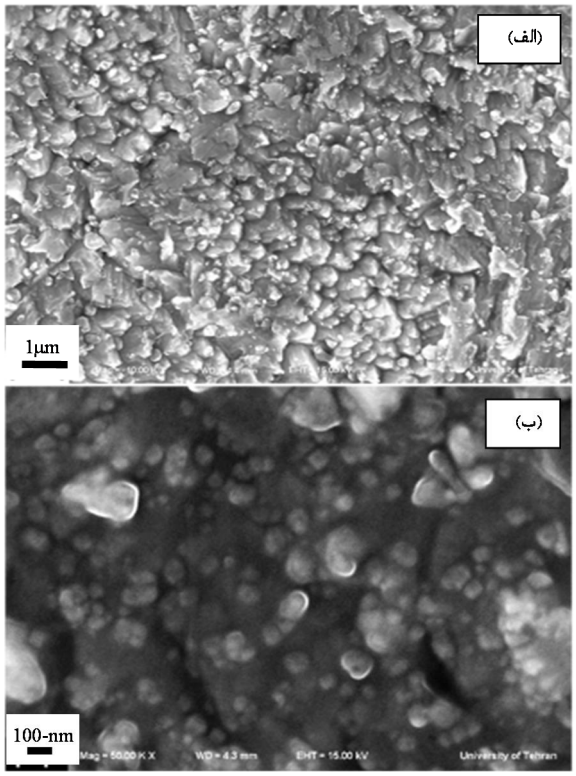
1- Etching
2- linear Intercept
3- Zwick
4- Wire cutting machine
5- Eddy current



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.36.3 ]




**شکل 3** تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌های مسی- الف) نمونه اولیه (ماده‌ی خام) ب) نمونه پاس 3 و ج) نمونه پاس 4 تولید شده به روش ECAP

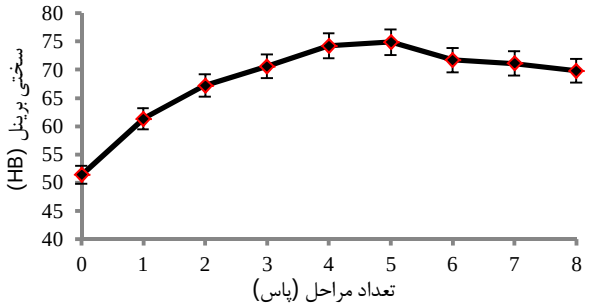



**شکل 4** تصویر FE-SEM از ریز ساختار مس تولید شده در الف) پاس 4 - ب) پاس 8

همان طور که مشاهده می‌شود ساختار نمونه‌ی اولیه دارای دانه‌های درشت متعارف[1] با اندازه‌ی متوسط 24 میکرون است. در چهار پاس اول تغییرات اندازه دانه بسیار چشم‌گیر بوده به طوری که اندازه‌ی دانه کاهش قابل ملاحظه‌ای، با توجه به تقسیم دانه‌های درشت اولیه و تشکیل مجموعه‌ای از دانه‌های ریز در اثر اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید یافته است. با افزایش کرنش پلاستیک، فاصله‌ی مرزهای نابجایی کوچکتر شده که منجر به ایجاد ساختاری با دانه بندی بسیار ریز درون ماده می‌شود. پس از 4 پاس ساختار کریستالی نمونه‌ها بسیار ریز شده و تخمین اندازه دانه بسیار مشکل می‌باشد.

شکل‌های 4 (الف) و (ب) به ترتیب تصویر FE-SEM گرفته شده از سطح عمود بر محور اکستروژن نمونه‌های تولید شده در پاس‌های 4 و 8 را نشان می‌دهند پس از 4 مرحله اعمال فرآیند ECAP، مس خالص با ساختار UFG با متوسط اندازه دانه‌ی 360 نانومتر بدست آمد. اندازه‌ی ساختار کریستالی نمونه‌ی تولید شده در پاس 8 فوق‌العاده ریز شده به طوری که مس نانو ساختار نسبتاً همگن با دانه‌هایی در محدوده 200 تا 50 ~ نانومتر حاصل شد.

1- Conventional coarse-grained




**شکل 5** تغییرات سختی نمونه‌های مسی بر حسب مراحل انجام فرآیند ECAP

## 3-2- خواص مکانیکی

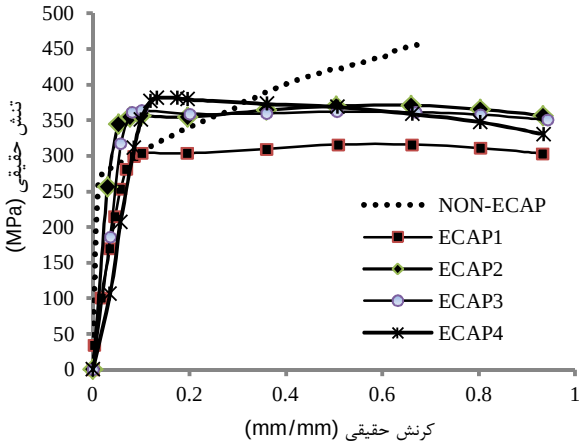
شکل 5 تغییرات سختی نمونه‌های تولید شده به روش ECAP را بر حسب تعداد مراحل اکستروژن نشان می‌دهد. سختی نمونه‌ی اولیه (ماده‌ی اولیه) نیز برای مقایسه آورده شده است. روی هم رفته همان‌طور که مشاهده می‌شود سختی نمونه‌ها پس از فرآیند ECAP افزایش می‌یابد. حداکثر سختی تقریبا برابر 75HB (حدود 68 درصد نمونه اولیه) پس از 5 پاس بدست آمده و بعد از آن با افزایش مراحل تا 8 پاس مقداری کاهش می‌یابد. این تغییرات به دلیل دگرگونی‌های متالورژیکی رخ داده که در ادامه به آن اشاره می‌شود.

شکل‌های 6 و 7 منحنی‌های تنش- کرنش حقیقی حاصل از آزمایش فشار تک محوری برای نمونه‌ی اولیه و نمونه‌های تولید شده توسط فرآیند ECAP از مرحله اول تا هشتم را نشان می‌دهند. به کمک این منحنی‌ها، تغییرات تنش تسلیم مس برحسب مراحل اکستروژن تعیین و نتایج حاصله در شکل 8 ارائه گردید. بررسی نتایج آزمون فشار نشان می‌دهند که قبل از انجام فرآیند ECAP، تنش تسلیم مس 260 مگاپاسکال می‌باشد. پس از مرحله‌ی اول، تنش تسلیم تا 300 مگاپاسکال افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد مراحل، تنش تسلیم به تدریج تا مرحله‌ی پنجم افزایش یافته و از این مرحله به بعد، به تدریج تا مرحله‌ی هشتم کاهش می‌یابد. اگرچه روند افزایشی استحکام تا پاس 5 ادامه داشته اما میزان افزایش آن کمتر از 4 پاس اول می‌باشد. از طرفی، همانطور که در شکل-های6 و 7 مشاهده می‌شود با افزایش استحکام ماده قابلیت کار سختی آن پس از فرآیند ECAP به شدت کاهش می‌یابد.

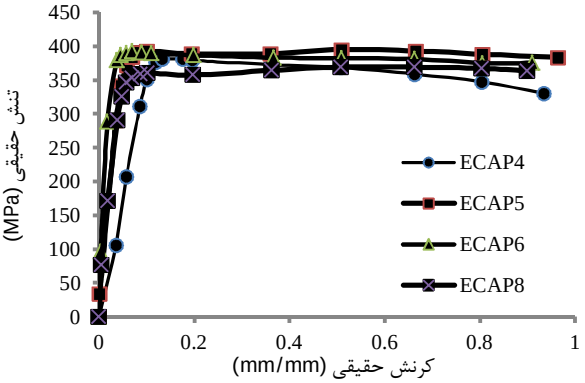
بطور کلی در فرآیند ECAP دو عامل بطور همزمان موجب افزایش استحکام و سختی ماده می‌شوند [18،17]. مطابق رابطه‌ی هال- پچ، استحکام مواد تابعی از اندازه دانه‌ی آن‌ها می‌باشد. هرگونه تغییرات در اندازه‌ی ساختار کریستالی ماده سبب تغییرات قابل توجهی در استحکام و سختی آن می‌شود. حین فرآیند ECAP، مرزدانه‌های زاویه بزرگ با اندازه‌ی کوچک ایجاد و از طریق رابطه‌ی هال- پچ باعث استحکام بخشی می شوند.



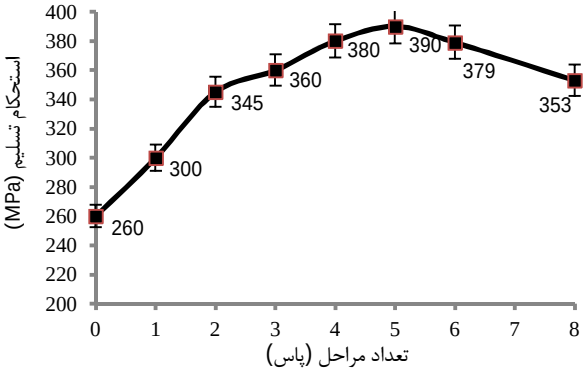
[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.36.3 ]



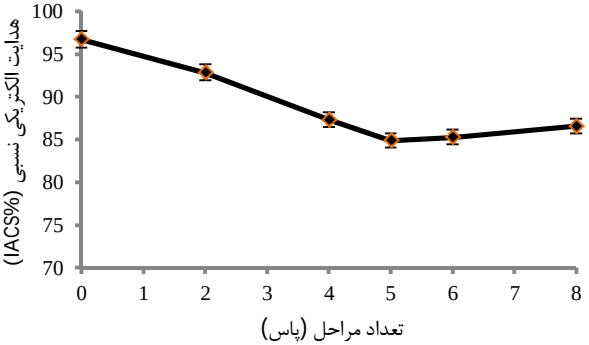

شکل 6 منحنی های تنش-کرنش فشاری مس پس از یک تا چهار مرحله اعمال فرآیند ECAP به همراه نمونه اولیه




**شکل 7** منحنی های تنش-کرنش فشاری مس پس از چهار تا هشت مرحله اعمال فرآیند ECAP




**شکل 8** تغییرات تنش تسلیم مس بر حسب مراحل اکستروژن




**شکل 9** تغییرات هدایت الکتریکی نسبی بر حسب مراحل اکستروژن

عامل دوم استحکام بخشی از طریق افزایش چگالی نابجایی‌ها[1] است که در حین فرآیند ECAP بدلیل کرنش‌های پلاستیک بسیار زیاد در ماده ایجاد و از طریق رابطه‌ی 3 (رابطه‌ی تیلور[2]) باعث استحکام بخشی می‌شود.

$$\sigma = \alpha G b \sqrt{\rho} \quad (3)$$

در این رابطه $\sigma$ تنش تسلیم، G مدول برشی[3]، b طول متوسط بردار برگرز[4]، و $\rho$ متوسط چگالی نابجایی‌ها و $\alpha$ ثابتی است که به جنس ماده بستگی دارد.

افزایش استحکام و سختی مس تولید شده به روش ECAP را می‌توان در مراحل اولیه به وسیله‌ی کرنش سختی[5] (افزایش نابجایی‌ها) با توجه به ایجاد کرنش‌های پلاستیک بسیار زیاد و کاهش فاصله‌ی مرزدانه‌ها در اثر ایجاد دانه-های جدید در ماده توجیه نمود. با اعمال فرآیند ECAP چگالی نابجایی‌ها به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. این مسئله توسط دله توره و همکاران طی بررسی‌های ریز ساختار مس خالص تغییر شکل یافته به‌وسیله فرآیند ECAP توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری[6] (TEM) گزارش شده است[19]. ایشان چگالی نابجایی‌ها را برای مس با ساختار درشت دانه پس از یک مرحله انجام فرآیند ECAP در حدود $1/6\times10^{14}$ $m^{-2}$ درون سلول‌ها[7] و $1/5\times10^{15}$ $m^{-2}$ در دیواره‌های سلول[8] گزارش کرده‌اند. زو و همکارانش [20] نیز چگالی نابجایی-های مس خالص تجاری با استحکام اولیه 260 مگاپاسکال را پس از اعمال فرآیند ECAP و افزایش استحکام آن به 377 مگاپاسکال در حدود $5\times10^{15}$ $m^{-2}$ تخمین زده اند.

از پاس چهارم و بعد از آن، با شکل گیری دانه‌های فوق‌العاده ریز در حد نانو و چند صد نانومتر نقش نابجایی‌ها در افزایش استحکام و سختی کاهش می‌یابد. تشکیل دانه‌های بسیار ریز با مرز دانه‌های زاویه بزرگ از حرکت نابجایی‌ها جلوگیری کرده و موجب قفل شدن آن‌ها در یکدیگر می‌شوند[21]. این عامل باعث کاهش سهم چگالی نابجایی‌ها در روند استحکام بخشی ماده می‌شود. در حالی که سهم مرزدانه‌ها با توجه به کاهش تدریجی اندازه دانه از پاس 4 تا 8 تقریباً ثابت می‌ماند. در نتیجه استحکام و سختی مس خالص از پاس 5 به بعد کاهش می‌یابد (وقوع پدیده‌ی نرم شوندگی[9]). علاوه براین نیز با افزایش دمای تغییر شکل پلاستیک در پاس‌های بالایی (با توجه به افزایش استحکام)، شرایط برای تبلور مجدد دینامیکی[10] و به طبع آن وقوع پیوستن پدیده‌ی نرم شوندگی مهیّا می‌شود[ 22] .

### 3-3- هدایت الکتریکی

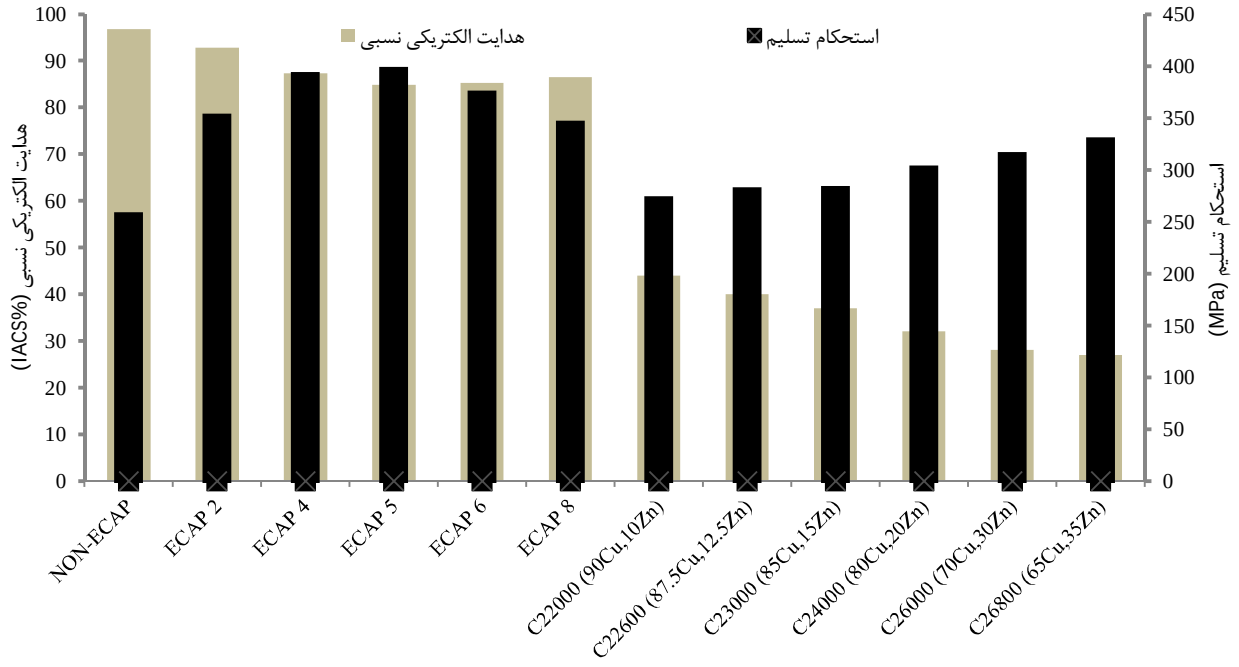
شکل 9 مقادیر هدایت الکتریکی نسبی نمونه اولیه و نمونه‌های مسی تولید شده به روش ECAP را به ازای مراحل مختلف اکستروژن نشان می‌دهد.

به طور کلی پس از فرآیند ECAP با ریز شدن ساختار کریستالی نمونه‌ها، هدایت الکتریکی آن‌ها اندکی کاهش می‌یابد (حداکثر حدود 8% نمونه اولیه). همان طور که مشاهده می‌شود روند کاهش هدایت الکتریکی به طور پیوسته تا پاس پنجم ادامه یافته و از این مرحله به بعد مقدار اندکی هدایت الکتریکی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. کاهش هدایت الکتریکی نمونه‌های مسی پس از فرآیند ECAP را می‌توان به ایجاد تعداد بی‌شماری از مرزدانه‌ها در اثر شکست دانه‌های اولیه و تشکیل دانه‌هایی در محدوده‌ی نانو و چند صد نانومتر نسبت داد.

1- Dislocation density
2- Taylor equation
3- Shear modulus
4- Burgers vector
5- Strain hardening
6- Transmission Electron Microscopy
7- Within cells
8- Cell walls
9- Softening
10- Dynamic recrystallization



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.36.3 ]




**شکل** 10 ترکیب هم‌زمان استحکام و هدایت الکتریکی نمونه‌های تولیدشده در پاس‌هاس 2، 4، 6، 8 و نمونه‌های آلیاژی Cu-Zn

مزدانه‌های متعدد ایجاد شده در ساختارهای UFG و NC به دلیل کوتاه کردن حرکت آزاد الکترون‌ها موجب کاهش هدایت الکتریکی مس خالص تا پاس 5 می‌شوند. از این مرحله به بعد با توجه به وقوع پدیده نرم شوندگی و انحلال عیوب نقطه‌ای[1] بر اثر افزایش دمای شکلدهی، هدایت الکتریکی اندکی افزایش می‌یابد. نکته قابل تامل این است که پس از اعمال فرآیند ECAP بر روی مس خالص تجاری با افزایش چشم گیر سختی و استحکام هدایت الکتریکی آن اندکی کاهش می‌یابد. این مقدار بدست آمده از هدایت الکتریکی در بسیاری از کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این رو مقایسه‌ای میان ترکیب هم زمان استحکام و هدایت الکتریکی مس خالص تولید شده به روش ECAP با مس آلیاژی (که استحکام آن تقریباً معادل استحکام ماده‌ی تولید شده است) صورت گرفت. شکل 10 ترکیب هم زمان استحکام و هدایت الکتریکی نمونه‌های مسی تولید شده در پاس‌های 2، 4، 6، 8 و نمونه‌های آلپاژ Cu(65-90%) -Zn(10-35%) از مرجع [16] را نشان می‌دهد. ترکیب استحکام و هدایت الکتریکی نمونه‌ی اولیه نیز جهت مقایسه آورده شده‌است. همان گونه که مشاهده می‌شود در نمونه‌های آلیاژ Cu-Zn هدایت الکتریکی قابل دسترس به ازای استحکام 317 مگاپاسکال برابرIACS% 27 می‌باشد. درحالی که هدایت الکتریکی قابل دسترس برای مس UFG تولید شده به روش ECAP به ازای استحکام 385 مگاپاسکال تقریباً برابر IACS% 85 است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان اذعان داشت که با افزایش تعداد مراحل ECAP استحکام مکانیکی مس خالص به طور قابل ملاحظه افزایش یافته و کاهش هدایت الکتریکی آن در مقایسه با مس آلیاژی بسیار جزئی است. بنابراین فرآیند ECAP یک روش موثر برای تولید مس خالص با قابلیت استحکام و هدایت الکتریکی بالا می‌باشد. اگرچه روند افزایش استحکام تا مرحله‌ی پنجم صعودی بوده، اما میزان افزایش تا مرحله‌ی چهارم چشم‌گیر می‌باشد. از طرفی مقدار هدایت الکتریکی نمونه‌ی پاس چهارم در مقایسه با پاس پنجم بیشتر است. لذا می‌توان چنین نتیجه گرفت که فرآیند ECAP، به خصوص تا پاس چهارم روش مناسبی برای استحکام بخشی فلز مس بدون کاهش قابل ملاحظه در قابلیت هدایت الکتریکی آن می‌باشد.

### 3-4- سایش الکتریکی

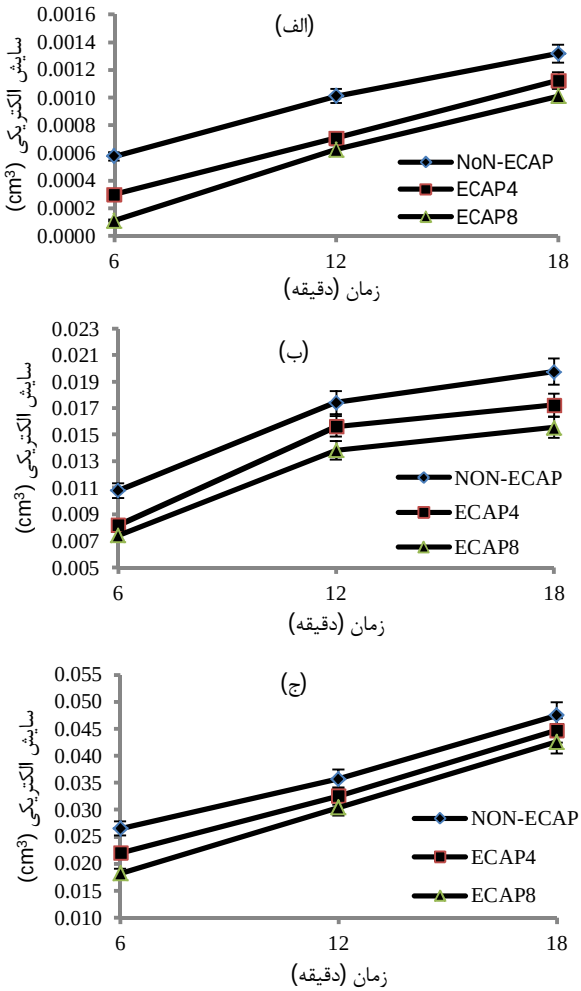
شکل‌های 11 (الف) تا (ج) سایش الکتریکی نمونه‌ی اولیه (NON-ECAP)، نمونه‌های UFG و NC تولید شده در مراحل 4 و 8 به ترتیب در شدت جریان‌های 5، 10 و 15 آمپر را نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در ابتدای زمان قرار گیری نمونه‌های تولید شده در پاس‌های 4 و 8 تحت فرآیند EDM، مقاومت قابل ملاحظه‌ای را در برابر سایش الکتریکی از خود بروز می‌دهند. این مسئله برای نمونه‌ی NC پاس 8 بسیار مشهود تر است. علت این مسئله خواص منحصر بفرد حاصل شده در اثر دگرگونی ساختاری می‌باشد. اگر چه اعتقاد براین است که خواص فیزیکی از جمله نقطه ذوب ماده عامل تعیین کننده‌ی مقاومت در برابر سایش الکتریکی است اما برخی از محققان بر این باورند که خواص مکانیکی و الکتریکی نیز همانند خواص فیزیکی بر این کمیت تاثیر بسزایی دارند [23-25]. با افزایش هم زمان شدت جریان و زمان قرارگیری تحت تخلیه‌ی الکتریکی، مقاومت در برابر سایش الکتریکی نمونه‌های تولید شده به روش ECAP رفته رفته به مس متعارف دانه درشت نزدیکتر می‌شود. چنین به نظر می‌رسد که حرارت تولید شده طی تخلیه‌ی الکتریکی عامل موثر بر مقاومت در برابر سایش الکتریکی نمونه‌های مسی NC و UFG است.

شکل 12 حفره‌های مذاب منجمد شده (شبیه به قله‌های آتشفشانی) بر روی سطح خارجی نمونه‌های مسی که در اثر ذوب موضعی طی هر تخلیه‌ی الکتریکی حاصل شده‌اند را نشان می‌دهد. با شکل‌گیری حفره‌های مذاب علاوه بر ایجاد تغییرات قابل ملاحظه در سطح نمونه‌ها، زیر لایه‌های سطحی آن‌ها نیز در اثر انتقال حرارت دچار دگرگونی ساختاری می‌شوند. به‌منظور بررسی دگرگونی ساختاری زیر لایه‌های سطحی ابتدا برش طولی (در راستای محور اکستروژن) از نمونه‌ی مسی پاس 8 که به مدت 6 دقیقه در شدت جریان 10 آمپر در معرض تخلیه‌ی الکتریکی قرار گرفته، تهیه شد.

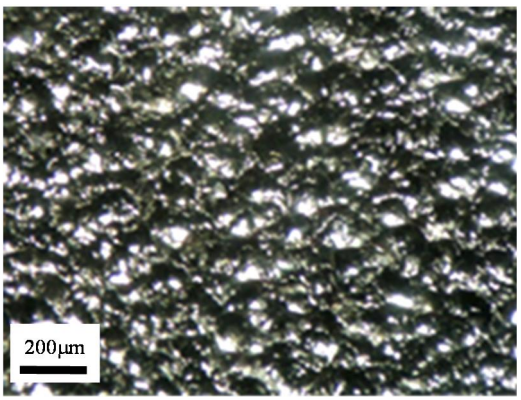
1- Point defects



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.36.3 ]




**شکل 11** سایش الکتریکی نمونه‌های مسی ECAP4، ECAP8 و نمونه‌ی اولیه برحسب زمان به ترتیب در شدت جریان‌های- الف) 5 ب) 10 و ج) 15 آمپر




**شکل 12** بافت سطحی نمونه‌های مسی پس از قرار گیری تحت تخلیه‌ی الکتریکی

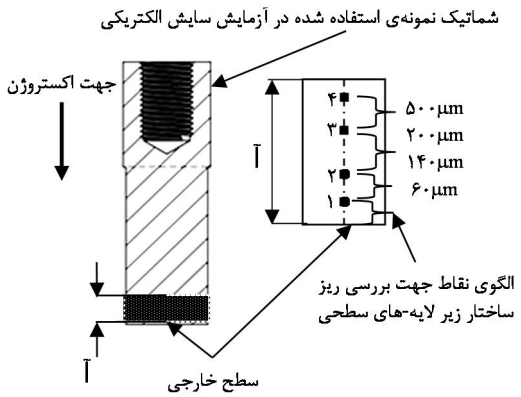
سپس ریز ساختار توسط FE-SEM مطابق الگوی نشان داده شده در شکل 13 تا عمق 0/9 میلی‌متر از سطح خارجی بررسی و نتایج حاصله در شکل 14 (الف) تا (د) ارائه گردید. شکل 14 (الف) تصویر FE-SEM از ریز ساختار زیر لایه تا عمق 60µm را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود حرارت ناشی از پیدایش چاله‌های مذاب و انتقال آن به درون ماده، زیر لایه‌های سطحی آن را به شدت تحت تاثیر قرار داده است. بر اثر سرد شدن بسیار سریع و غیره تعادلی حفره‌های مذاب درون مایع دی‌الکتریک، لایه‌ای نازک و بی‌شکل به‌وجود آمده است.

علاوه براین امکان گسترش عمق منطقه‌ی مذاب در اثر تمرکز انرژی تخلیه‌ی الکتریکی و افزایش شدید حرارت به صورت موضعی است. در زیر لایه‌ی بی-شکل، منطقه‌ی متاثر از حرارت می‌باشد. شکل 14 (ب) منطقه‌ی گسترده‌ای که تحت تاثیر حرارت قرار گرفته است را نشان می‌دهد. حرارت انتقال یافته باعث دگرگونی ساختاری قابل ملاحظه‌ای (تشکیل ساختار کاملاً دانه درشت) در قسمت نزدیک به سطح خارجی شده است. با فاصله گرفتن از سطح خارجی اثر حرارت بر دگرگونی ساختاری کاهش می‌یابد. شکل 14(ج) ریز ساختار عمق 400µm از سطح خارجی را نشان می‌دهد. حرارت انتقال یافته به درون ماده باعث شکل گیری ساختار تقریباً دانه درشت با محدوده‌ی اندازه دانه 0/4- 4~ میکرون شده است. شکل 14(د) ریز ساختار عمق 900µm از سطح خارجی را نشان می‌دهد. محدوده‌ی اندازه دانه در این منطقه حدوداً برابر 150- 750~ نانومتر است. بر اساس نتایج بدست آمده می‌توان چنین نتیجه گرفت که تغییرات ساختاری و خواص ایجاد شده در نمونه‌های مسی به واسطه فرآیند ECAP، بر مقاومت آن‌ها در برابر سایش الکتریکی تاثیر به سزایی دارد. شاهد این ادعا مقاومت بسیار بالای نمونه‌های مسی ریز دانه در 6 دقیقه اول قرارگیری تحت فرآیند تخلیه‌ی الکتریکی در شدت جریان 5 آمپر بوده اما با افزایش زمان حفظ تغییرات ساختاری و خواص ایجاد شده برای نمونه‌های ریز دانه‌ی تولید شده به روش ECAP مقدور نمی‌باشد. علت این امر را می‌توان حرارت بالای تولید شده در اثر تخلیه‌ی الکتریکی و روند انتقال آن به درون نمونه‌ها بیان نمود. این مسئله سبب دگرگونی ساختاری شده به طوری که ساختار بسیار ریز ایجاد شده به ساختار دانه درشت تبدیل می‌شود. از طرفی با افزایش شدت جریان، از مقاومت نمونه‌های پاس 4 و 8 در برابر سایش الکتریکی کاسته شده و نقش مواد ریز دانه در افزایش کمیت مقاومت در برابر سایش الکتریکی کم رنگ تر می‌شود. علت این پدیده افزایش انرژی تخلیه‌ی الکتریکی و حرارت به واسطه افزایش شدت جریان می‌باشد. این مسئله سبب تسریع رشد دانه‌ها می‌شود.

## 3-5- کرنش اعمالی

شکل 15 سختی نمونه‌های مسی تولید شده توسط قالب Ø = 110° را به ازای هر مرحله اکستروژن نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود روند تغییرات سختی نمونه‌های تولید شده کاملاً متفاوت از نمونه‌های تولید شده توسط قالب Ø = 90° بوده به طوری که سختی نمونه‌ها تا پاس 8 به طور پیوسته افزایش می‌یابد.

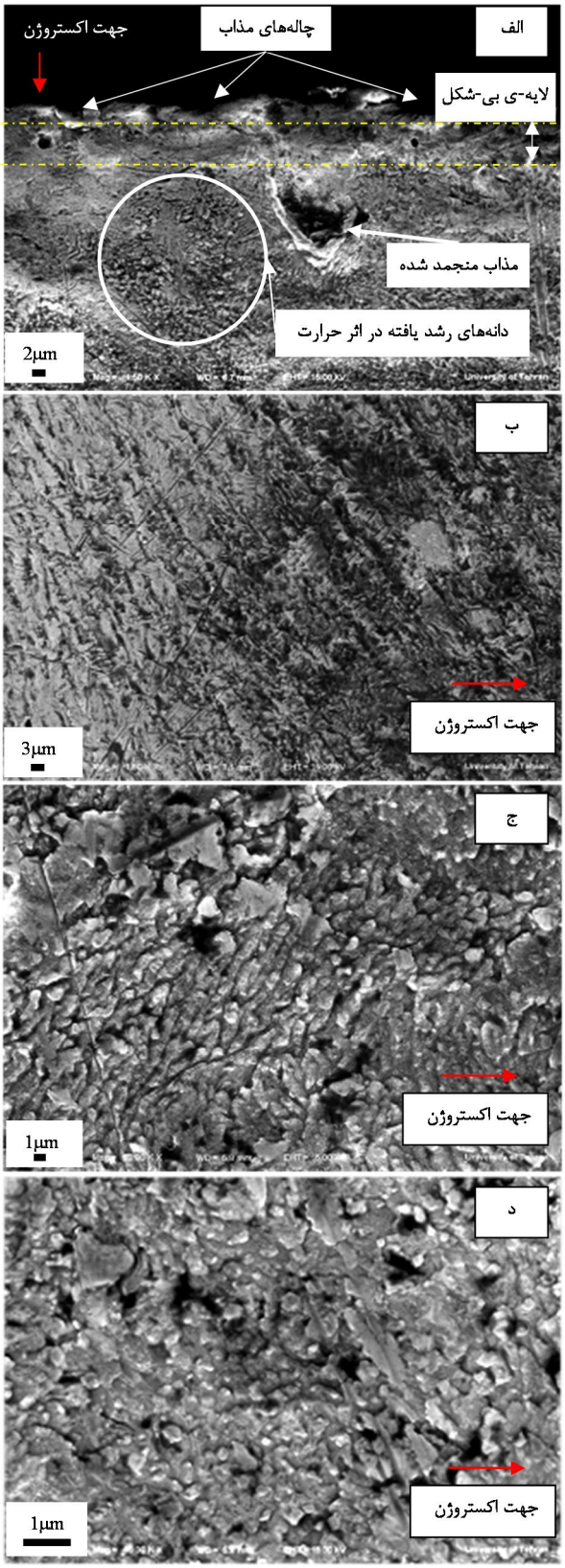
شکل 16 منحنی‌های تنش-کرنش حقیقی حاصل از آزمایش فشار تک محوری برای نمونه‌های تولید شده توسط قالب Ø = 110° از مرحله اول تا هشتم را نشان می‌دهد.




**شکل 13** شماتیک برش طولی نمونه‌ی مورد استفاده برای آزمایش سایش الکتریکی به همراه الگوی نقاط بررسی زیر لایه‌های سطحی

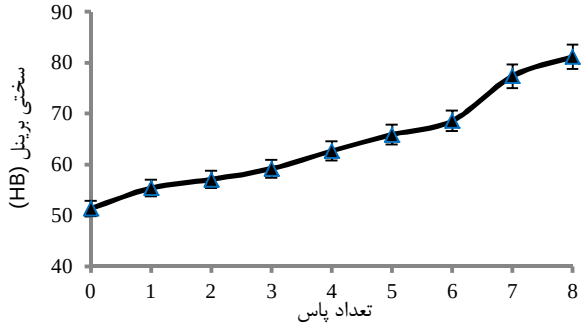


[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.36.3 ]

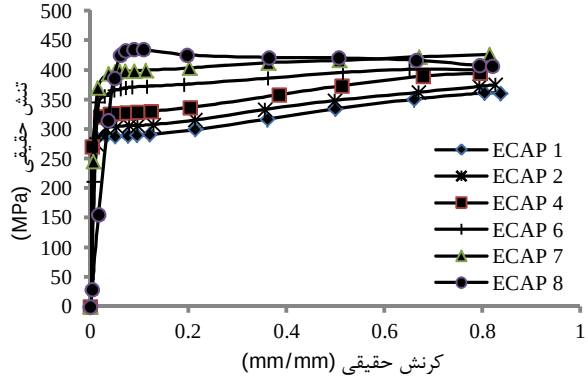



**شکل 14** تصویر FE-SEM از ریز ساختار زیر لایه‌ی عمق- الف) 60μm ب) 200μm ج) 400μm د) 900μm

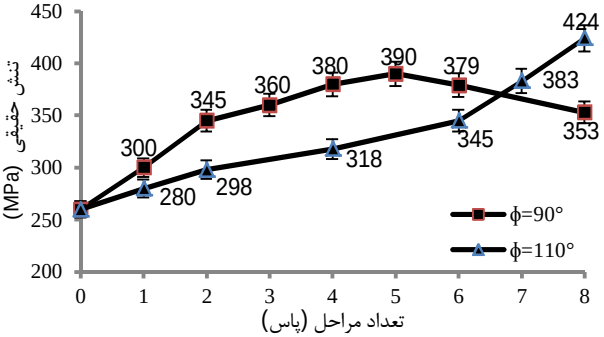
با توجه به منحنی‌های بدست آمده، تغییرات تنش تسلیم مس برحسب مراحل اکستروژن در شکل 17 ارائه گردید. تغییرات تنش تسلیم مس تولید شده توسط قالب $\phi = 90°$ نیز به‌منظور مقایسه آورده شده است.




**شکل 15** تغییرات سختی نمونه‌های مسی تولید شده در قالب $\phi = 110°$ به ازای هر مرحله اکستروژن




**شکل 16** منحنی های تنش-کرنش فشاری مس تولید شده در پاس‌های 1، 2، 4، 6، 7 و 8 توسط قالب $\phi = 110°$




**شکل 17** تغییرات تنش تسلیم مس تولید شده توسط دو قالب $\phi = 110°$ و $\phi = 90°$ بر حسب مراحل اکستروژن

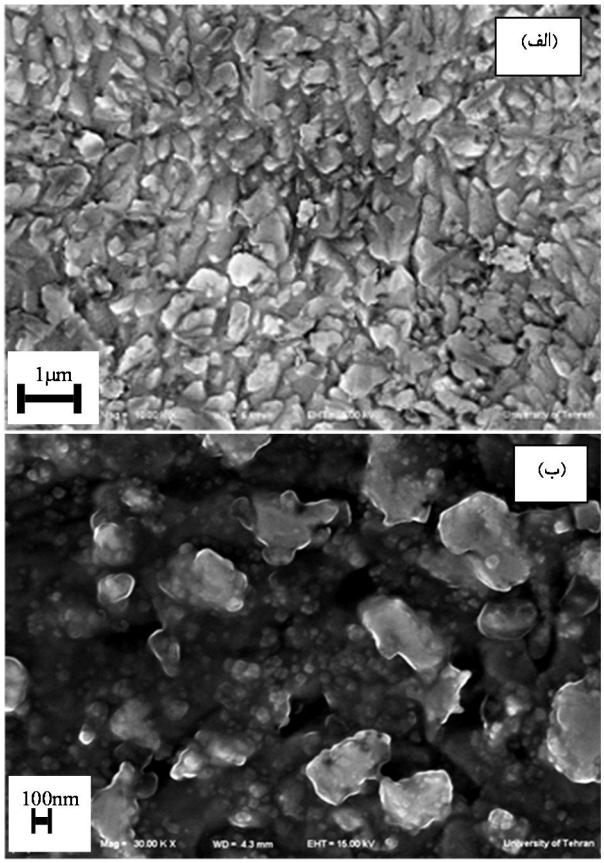
همانگونه که مشاهده می‌شود استحکام نمونه‌های تولید شده توسط قالب $\phi = 110°$ به صورت پیوسته تا پاس 8 افزایش یافته و به حداکثر مقدار خود یعنی 424 مگاپاسکال می‌رسد. بر اساس رابطه‌ی 2 کرنش معادل ایجاد شده در نمونه‌ها، بر حسب تعداد مراحل اکستروژن محاسبه و مقادیر بدست آمده در جدول 2 ارائه گردید. با انجام فرآیند ECAP، در هر مرحله کرنش 0/99 و 0/74 به ترتیب در نمونه‌های تولید شده توسط قالب $\phi = 90°$ و $\phi = 110°$ ایجاد می‌شود. با توجه به این مسئله که استحکام نمونه‌های تولید شده توسط قالب $\phi = 90°$ تا پاس 5 افزایش یافته و پس از آن تا پاس 8 کاهش می‌یابد می‌توان نتیجه گرفت که با ذخیره‌ی کرنش معادل به میزان 5/95 درون مس خالص پدیده‌ی نرم شوندگی آغاز شده و با افزایش آن تا 7/94 ادامه می‌یابد. علت بروز این پدیده را می‌توان اشباع کرنش ذخیره شده در ماده دانست که موجب افزایش حرارت طی تغییر شکل پلاستیک شدید می‌شود. با افزایش درجه حرارت بستری مناسب جهت تبلور مجدد دینامیکی فراهم می‌گردد.



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.36.3 ]

**جدول 2** مقادیر کرنش معادل بر حسب تعداد مراحل فرآیند ECAP

| تعداد پاس | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| کرنش معادل ایجاد شده در نمونه ها توسط قالب $\emptyset = 90°$ | 0/99 | 1/98 | 2/98 | 3/97 | 4/96 | 5/95 | 6/95 | 7/94 |
| کرنش معادل ایجاد شده در نمونه ها توسط قالب $\emptyset = 110°$ | 0/74 | 1/46 | 2/19 | 2/92 | 3/65 | 4/39 | 5/11 | 5/84 |




**شکل 18** تصویر FE-SEM از ریز ساختار مس تولید شده توسط قالب $\emptyset = 110°$ در الف) پاس 4 ب) پاس 8

از طرفی با مقایسه‌ی کرنش‌های معادل در پاس 6 (مرحله‌ای که پدیده نرم شوندگی آغاز شده) برای قالب $\emptyset = 90°$ و پاس 8 برای قالب $\emptyset = 110°$ می‌توان اذعان داشت که کرنش ذخیره شده در مس تولید شده توسط قالب$\emptyset = 110°$ کمتر از مقداری است که سبب ایجاد پدیده‌ی نرم شوندگی گردد. روی هم رفته، با کاهش کرنش اعمالی در هر مرحله از فرآیند ECAP به میزان 25 درصد، سختی و استحکام حاصل شده درون مس خالص پس از هشت پاس حدود 9 درصد افزایش می‌یابد. بنابراین برای تولید مس خالص با استحکام بالاتر توسط فرآیند ECAP می‌توان کرنش اعمالی در هر مرحله را کاهش و تعداد مراحل ECAP را افزایش داد.

از آنجایی که استحکام مس تولید شده توسط فرآیند ECAP تابعی از اندازه دانه می‌باشد، ریز ساختار دو نمونه‌ی تولید شده توسط قالب $\emptyset = 110°$ در پاس‌های 4 و 8 مورد مطالعه قرار گرفت. شکل‌های 18 (الف) و (ب) به ترتیب تصویر FE-SEM گرفته شده از مقطع عرضی نمونه‌های تولید شده توسط قالب $\emptyset = 110°$ در پاس‌های 4 و 8 را نشان می‌دهند. همان گونه که مشاهده می‌شود ساختاری شامل دانه‌های کشیده‌ی بسیار ریز با متوسط اندازه دانه‌ی 400~ نانومتر پس از 4 پاس درون مس خالص ایجاد شد. با افزایش مراحل ECAP تا 8 پاس دانه‌هایی در مقیاس نانو بدست آمد. محدوده‌ی تغییرات اندازه‌ی ساختار کریستالی ماده تولید شده در پاس 8 حدود 60-540 نانومتر می‌باشد. با توجه به تصاویر ریز ساختار مس تولید شده توسط دو قالب $\emptyset = 90°$ و $\emptyset = 110°$ می‌توان اذعان نمود که دستیابی به ساختارهای NC و UFG درون مس خالص توسط هر دو قالب امکان پذیر می‌باشد. از طرفی لزوماً کاهش اندازه دانه طی فرآیند ECAP باعث افزایش استحکام ماده نمی‌شود. عواملی مانند چگالی نابجایی‌ها و غیره که طی دگرگونی ساختاری تغییر می‌کنند نیز بر افزایش استحکام تاثیر گذار می‌باشد. تغییرات سختی و استحکام مس تولید شده توسط قالب $\emptyset = 110°$ را با توجه به مطالب بحث شده در قسمت 3-2 می‌توان توجیه نمود.

## 4- خلاصه نتایج

نتایج بدست آمده به اختصار به شرح ذیل می‌باشد.

با قرار گیری مس خالص تحت فرآیند ECAP طی چهار مرحله ساختار UFG با متوسط اندازه دانه‌ی 360 نانومتر بدست آمد. با افزایش مراحل تا 8 مرحله دانه‌هایی در مقیاس نانو درون ماده ایجاد شده به طوری که محدوده‌ی اندازه‌ی دانه‌ها در حدود 200-50~ نانومتر کاهش یافت.

با قرارگیری مس خالص تحت فرآیند ECAP طی پنج مرحله استحکام آن از 260 مگاپاسکال به 390 مگاپاسکال (حدود 67 درصد نمونه اولیه) و سختی آن نیز از 51HB به 75HB (حدود 68 درصد نمونه اولیه) افزایش می‌یابد. از این مرحله به بعد با افزایش مراحل تغییر شکل تا هشت مرحله تنش تسلیم و سختی مقداری کاهش می‌یابد.

پس از قرارگیری مس خالص تحت فرآیند ECAP، با شکل گیری مزدانه‌های متعدد در اثر شکسته شدن دانه‌های بزرگ اولیه حرکت آزاد الکترون‌ها کاهش یافته و رسانایی الکتریکی ماده اندکی کاهش می‌یابد (حداکثر در حدود 8% نمونه‌ی اولیه). میزان کاهش هدایت الکتریکی مس تولید شده به روش ECAP در مقایسه با مس آلیاژی با استحکام معادل بسیار ناچیز می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند ECAP (خصوصاً تا پاس چهارم) یک روش موثر جهت تولید مس با استحکام و هدایت الکتریکی بالا می‌باشد.

در شرایط آزمایشگاهی یکسان مس ریز دانه‌ی تولید شده به روش ECAP در مقایسه با مس متداول دانه درشت مقاومت بیشتری در برابر سایش الکتریکی دارد. از طرفی با کاهش اندازه دانه در مقیاس نانو مقاومت در برابر سایش الکتریکی مس افزایش قابل توجهی می‌یابد. اما حرارت بالای تولید شده در اثر تخلیه‌ی الکتریکی و روند انتقال آن به درون مس ریز دانه سبب کاهش این برتری می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان اذعان داشت که، فرآیند ECAP خصوصاً تا پاس هشتم روشی موثر برای افزایش سایش الکتریکی مس خالص می‌باشد.

با کاهش کرنش اعمالی در هر مرحله از فرآیند ECAP در حدود 25 درصد، تغییرات سختی و تنش تسلیم مس خالص تا مرحله‌ی هشتم کاملاً روند صعودی به خود می‌گیرد. به‌نظر می‌رسد که کرنش اعمالی در هر مرحله و روند ذخیره‌سازی آن عاملی موثر در وقوع پدیده‌ی نرم شوندگی است. بنابراین برای تولید مس خالص با استحکام بالاتر توسط فرآیند ECAP می‌توان کرنش اعمالی در هر مرحله را کاهش و تعداد مراحل ECAP را افزایش داد.



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.36.3 ]

از طرفی با کاهش کرنش اعمالی در هر مرحله از فرآیند ECAP در حدود 25 درصد، می‌توان به ساختارهای NC و UFG نیز دست یافت.

## 5- تشکر و قدردانی

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

## 6- مراجع

[1] R. Lei, Sh. Xu, M. Wang, H. Wang, Microstructure and properties of nanocrystalline copper–niobium alloy with high strength and high conductivity, *Materials Science and Engineering: A,* Vol. 586, No.1 , pp 367-3731, 2013.

[2] R.S. Lei, M.P. Wanga, Z. Lia, H.G. Weia, W.C. Yanga, Y.L. Jia, S. Gong, Structure evolution and solid solubility extension of copper–niobium powders during mechanical alloying, *Materials Science and Engineering A,* Vol. 528, No. 13-14 , pp. 4475–4481, 2011.

[3] W.A. Soffaa, D.E. Laughlin, High-strength age hardening copper–titanium alloys: redivivus, *Progress in Materials Science,* Vol. 49, No. 3-4 , pp 347–366, 2004.

[4] J.S. Galsin, *Impurity Scattering in Metallic Alloys,* pp. 109, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2002.

[5] R.E. Hummel, *Electronic Properties of Materials,* Second Edittion, Verlag, USA, Springer, 1993.

[6] L. Ghalandari, M.M. Moshksar, High-strength and high-conductive Cu/Ag multilayer produced by ARB, *Alloys and Compounds,* Vol. 506, No. 1 , pp. 172-178, 2010.

[7] M. Dehghan, F. Qods, M. Gerdooei, Investigation of microstructure and anisotropy of mechanical properties of ARB-processed commercial purity Aluminium with interpassing heat treatment, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 123-132, 2013. (In Persian)

[8] N. Takata, S. H. Lee, N. Tsuji, Ultrafine grained copper alloy sheets having both high strength and high electric conductivity, *Material Letter,* Vol. 63, No. 21 , pp. 1757–1760, 2009.

[9] K. Xia Wei, W. Wei, F. Wang, Q.B. Du, I. V. Alexandrov, J. Hu, Microstructure, mechanical properties and electrical conductivity of industrial Cu–0.5%Cr alloy processed by severe plastic deformation, *Materials Science and Engineering A,* Vol. 528, No. 3, pp. 1478–1484, 2011.

[10] Z. Horita, T. Fujinami, T. G. Langdon, The Potential for Scaling ECAP: Effect of Sample Size on Grain Refinement and Mechanical Properties, *Materials Science and Engineering A,* Vol. 318 , No. 1-2 , pp. 34-41, 2001.

[11] Z. Ruslan, G. Langdon, 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.

[12] ASTM E9*, Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature, American Society for Testing and Materials,* Philadelphia, PA, reapproved 2000.

[13] Y.C. Lin, L.R. Hwang, C.H Cheng, P.L. Su, Effects of electrical discharge energy on machining performance and bending strength of cemented tungsten carbides, *materials processing technology,* Vol. 206, No. 1-3, pp.491–499, 2008.

[14] M.I. Dvornik, Nanostructured WC–Co particles produced by carbonization of spark eroded powder: Synthesis and characterization, *Refractory Metals & Hard Materials,* Vol. 28, No. 4, pp. 523–528, 2010.

[15] Y. Tsai, T. Masuzawa, An index to evaluate the wear resistance of the electrode in micro-EDM, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 149, No. 1-3, pp. 304–309, 2004.

[16] ASM Handbook*, Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials,* 10 editions, ASM International Handbook Committee, pp. 265–346, 2000.

[17] M. Reihanian, R. Ebrahimi, N. Tsuji, M.M. Moshksar, Analysis of the mechanical properties and deformation behavior of nanostructured commercially pure Al processed by equal channel angular pressing (ECAP), *Materials Science and Engineering A,* Vol. 473, No. 1-2 , pp. 189–194, 2008.

[18] B. Tolaminejad, K. Dehghani, Microstructural characterization and mechanical properties of nanostructured AA1070 aluminum after equal channel angular extrusion, *Materials and Design,* Vol. 34, No. 1, pp. 285–292, 2012.

[19] F.H. Dalla Torre, E.V. Pereloma, C.H.J. Davies, Strain hardening behaviour and deformation kinetics of Cu deformed by equal channel angular extrusion from 1 to 16 passes, *Acta Materialia,* Vol. 54, No. 4, pp. 1135–1146, 2006.

[20] C.F. Zhu, F.P. Du, Q.Y. Jiao, X.M. Wang, A.Y. Chen, F. Liu, D. Pan, Microstructure and strength of pure Cu with large grains processed by equal channel angular pressing, Materials and Design, Vol. 52, No. 10, pp. 23–29, 2013.

[21] R.Z. Valiev, I.V. Alexandrov, Y.T. Zhu, T.C. Lowe, Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation, Journal of Materials Research, Vol. 17, No. 1, pp. 5-8, 2002.

[22] T. Sakai, A. Belyakov, R. Kaibyshev, H. Miura, J. J. Jonas, Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions, *Progress in Materials Science,* Vol. 60, No. 1, pp. 130-207, 2014.

[23] M. A. Ranaei, A. Afsari, S. Y. Ahmadi Brooghani, M. M. Moshksar, Investigation on performance of ultra fine grained pure copper as electrode during electrical discharge machining, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 1, pp. 97-105, 2014. (In Persian)

[24] V. Srivastava, P. M. Pandey, Study of ultrasonic assisted cryogenically cooled EDM process using sintered (Cu–TiC) tooltip, *Journal of Manufacturing Processes,* Vol. 15, No. 1, pp. 158–166, 2013.

[25] M.P. Samuel, P.K. Philip, Power metallurgy tool electrodes for electrical discharge machining, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 37, No. 11, pp. 1625–1633, 1997.

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.15.36.3 ]