

بررسی رفتار الکتریکی و مکانیکی مس خالص تولید شده به روش فشار در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار

محمدامین رعنائی^{۱*} و محمد محسن مشکسار^۲

چکیده

از میان روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، فشار در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار (ECAP)، برای تولید موادی با ساختار بسیار ریز، قابلیت استحکام بالا و خواص فیزیکی مطلوب فرآیندی موثر است. در این پژوهش خواص مکانیکی، رسانایی الکتریکی و سایش الکتریکی مس خالص تولید شده به روش ECAP مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، ابتدا قالبی با دو کانال عمود بر هم و انحنای بیرونی ۳۷ درجه، همراه با یک سمبه طراحی و ساخته شد. مس خالص طی هشت مرحله (پاس) مورد فرآیند ECAP قرار گرفت. نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مکانیکی نشان دادند که با افزایش تعداد پاس‌ها تا مرحله‌ی پنجم تنش تسلیم به گونه پیوسته افزایش یافته و از این مرحله به بعد، تا مرحله‌ی هشتم به تدریج کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، روند تغییرات هدایت الکتریکی با تنش تسلیم ماده متفاوت بوده به گونه‌ای که این کمیت تا مرحله‌ی پنجم کاهش یافته و از این مرحله به بعد، با افزایش مراحل اکستروژن اندکی افزایش می‌یابد. هم‌چنین، برای نخستین بار رفتار سایشی مس خالص تولید شده به روش ECAP، طی فرآیند تخلیه الکتریکی بررسی گردید. نتایج بدست آمده مشخص کرد که با افزایش پاس‌ها و ریز شدن دانه‌بندی فلز مس، سایش الکتریکی آن نسبت به نمونه‌ی نخستین در شرایط آزمایشگاهی یکسان کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: فشار در کانال‌های هم مقطع زاویه دار، هدایت الکتریکی، تخلیه الکتریکی، سایش الکتریکی.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی شیراز.

۲- استاد بخش مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی مرودشت.

*- نویسنده‌ی مسئول مقاله: Amin.ranaei@gmail.com

پیشگفتار

با توجه به توسعه‌ی روز افزون صنایع الکتریکی، نیاز به موادی با استحکام و هدایت الکتریکی بالا احساس می‌شود. مس و آلیاژهای آن بیش‌ترین کاربرد را در این زمینه دارند. از سوی دیگر، هدایت الکتریکی فلز مس پس از آلیاژی شدن و افزایش استحکام آن، به شدت کاهش می‌یابد. بمنظور رفع این مشکل و افزایش هدایت الکتریکی مس خالص می‌توان از ذرات ریز یا نانو ساختار استفاده کرد [۱]. می‌توان این ذرات را به وسیله‌ی روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید^۱ (SPD) تولید نمود. این روش‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که ابعاد نمونه در حین فرآیند ثابت مانده و تغییر نمی‌کند. فشار در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار^۲ (ECAP) یکی از روش‌های SPD است. این فرآیند یک روش مؤثر جهت تولید مواد با دانه‌های بسیار ریز در حد چند صد نانومتر می‌باشد [۲]. تغییر شکل ایجاد شده درون ماده طی این فرآیند از نوع برش ساده می‌باشد. این امر به وسیله‌ی فشردن نمونه درون کانال‌های قالب صورت می‌گیرد. روی هم رفته، قالب ECAP دارای دو کانال با سطح مقطع یکسان است. این دو کانال با زاویه برخورد ϕ به هم متصل شده‌اند و ممکن است در گوشه خارجی تقاطع دو کانال نیز انحنایی با زاویه ψ وجود داشته باشد [۳]. هنگام عبور نمونه از تقاطع دو کانال تغییر شکل برشی در آن رخ می‌دهد. به واسطه‌ی تغییر شکل ایجاد شده، کرنشی به اندازه تقریبی یک در ماده ایجاد می‌شود. با ثابت بودن سطح مقطع نمونه در هر پاس کرنش‌ها در ماده ذخیره می‌شود. این امر موجب کوچک شدن شبکه دانه بندی و تغییر ساختار نمونه می‌شود [۴]. فرآیند ECAP افزون بر قابلیت تکرار پذیری باعث ایجاد مسیرهای کرنشی گوناگون از راه فعال شدن سامانه‌های لغزشی متفاوت نیز می‌گردد [۴]. این عمل با چرخش نمونه به روش‌های گوناگون بین مراحل اکستروژن صورت می‌گیرد. روی هم رفته، فرآیند ECAP بر اساس چرخش نمونه پس از هر مرحله‌ی اکستروژن به چهار روش A، B_A، B_C و C انجام می‌شود [۵]. در روش A نمونه پس از خارج شدن از قالب، بدون هیچ‌گونه چرخشی، دوباره درون

قالب قرار می‌گیرد. در روش B_A نمونه پس از هر مرحله اکستروژن به اندازه ۹۰ درجه، یکبار در جهت عقربه‌های ساعت و یکبار در خلاف جهت عقربه‌های ساعت چرخانده می‌شود. در روش B_C نمونه پس از هر مرحله به اندازه‌ی ۹۰ درجه و تنها در یک جهت چرخانده می‌شود. در روش C نمونه پس از خارج شدن از قالب به اندازه ۱۸۰ درجه می‌چرخد و سپس درون قالب قرار می‌گیرد. این روش‌ها باعث فعال شدن سامانه‌های لغزشی گوناگون شده و در نتیجه، ریزساختارهای متفاوتی در ماده ایجاد می‌شود. نتایج پژوهش‌ها نشان داده‌اند که روش B_C مؤثرترین روش جهت دستیابی به یک ساختار با دانه‌بندی هم محور و مرزهای بزرگ زاویه می‌باشد [۶].

در این پژوهش ویژگی‌های مکانیکی، رسانایی الکتریکی و سایش الکتریکی مس خالص تولید شده به روش ECAP بررسی گردید. بدین منظور، ابتدا یک قالب با دو کانال عمود بر هم و انحنای بیرونی ۳۷ درجه همراه با یک سمبه، طراحی و ساخته شد. مس خالص طی هشت مرحله مورد فرآیند ECAP قرار گرفت. تغییرات سختی و تنش تسلیم مس خالص بر حسب تعداد مراحل اکستروژن در فرآیند ECAP بررسی شد. افزون بر این، هدایت الکتریکی و هم‌چنین، برای نخستین بار سایش الکتریکی مس خالص تولید شده به روش ECAP، طی فرآیند تخلیه‌ی الکتریکی^۳ (EDM) بررسی گردید. نمونه‌های ECAP شده به عنوان الکترود، طی فرآیند EDM بکار گرفته شدند. هدف از این بررسی کارکرد عملی و رفتار این نوع مواد طی فرآیند الکتریکی- حرارتی EDM می‌باشد.

روش پژوهش

ماده‌ی اولیه

برای انجام آزمایش‌ها از مس خالص به صورت میلگرد استفاده گردید که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ نشان داده شده است. بمنظور تهیه نمونه‌هایی متناسب با قطر کانال‌ها عملیات ماشین کاری در راستای محور اکستروژن روی میلگرد صورت گرفت. ابعاد نمونه‌های مورد استفاده دارای طول تقریبی ۶۵ و قطر ۰/۰۵ - ۱۶ میلی متر بوده

¹ - Severe Plastic Deformation

² - Equal Channel Angular Pressing

³ - Electrical Discharge Machining

ثانیه در درمای اتاق انجام گرفت. در هر آزمایش طول نمونه‌ها ۶۰ درصد کاهش یافت. به بیان دیگر، در هر نمونه، کرنشی به اندازه ۰/۹ ایجاد گردید. بمنظور کاهش اثر اصطکاک بین فک دستگاه و سطح نمونه از پلاستیک تفلون و فوم صابون استفاده شد.

آزمایش سختی سنجی

برای تهیه نمونه‌های آزمون سختی، قطعات ECAP شده در پاس‌های گوناگون از قسمت ابتدایی و انتهایی خود به وسیله‌ی دستگاه برش سیمی^۱ برش داده شدند. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، آزمایش روی دو قسمت ابتدایی و انتهایی قطعه در مقطع عمود بر محور طولی نمونه‌ها انجام گرفت. از دستگاه سختی سنج قابل حمل مدل HLN-11A جهت انجام آزمایش استفاده گردید. اندازه‌گیری سختی به روش برینل در هر نمونه حداقل ۱۱ مرتبه تکرار و سپس میانگین گرفته شد.

اندازه‌گیری هدایت الکتریکی

از دستگاه قابل حمل مدل SMP10 جهت اندازه‌گیری هدایت الکتریکی استفاده شد. این دستگاه هدایت الکتریکی را با استفاده از روش جریان گردابی^۲ با توجه به استاندارد ASTM E1004 اندازه‌گیری می‌کند. اساس کار این روش، ایجاد جریان گردابی در نمونه با استفاده از القای الکترومغناطیس است (شکل ۲). برای تولید جریان گردابی از یک کاوشگر^۳ استفاده می‌شود. کاوشگر از یک هسته‌ی رسانای الکتریکی و سیم پیچ تشکیل شده است. هنگام عبور جریان متناوب از داخل سیم پیچ یک میدان مغناطیسی متناوب با فرکانس بالا اطراف هسته‌ی رسانای الکتریکی تولید می‌گردد. هنگامی که کاوشگر نزدیک قطعه‌ی رسانای الکتریکی قرار می‌گیرد، در اثر القای میدان مغناطیسی جریانی گردابی درون قطعه ایجاد می‌شود. این جریان میدانی مغناطیسی در جهت عکس میدان مولد (میدان اطراف سیم پیچ) تولید می‌کند. تاثیر متقابل بین میدان‌ها باعث تشکیل

که از راه ماشین کاری تهیه گردیدند. این نمونه‌ها در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱ ساعت آنیل شدند.

تجهیزات فرآیند ECAP

در این پژوهش ساده‌ترین نوع قالب بکار برده شد که دارای یک بلوک و دو کانال است و با زاویه به هم متصل شده‌اند. قالب‌هایی با این گونه طراحی، بیش‌تر در آزمایشگاهها مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقطع کانال‌های ورودی و خروجی دایره‌ای بوده و قطر آن‌ها برابر با $16 + 0/05$ میلی‌متر می‌باشد. زاویه برخورد دو کانال برابر ۹۰ درجه و زاویه انحنای خارجی آن برابر ۳۷ درجه می‌باشد. جنس بکار گرفته شده برای ساخت قالب، فولاد ابزار سرد کار AISI 1.2510 می‌باشد. از مشخصه‌ی بارز این فولاد می‌توان به مقاومت اصطکاکی بسیار بالای آن جهت ساخت قطعات کار سرد اشاره نمود. سنبه از فولاد سرد کار AISI 1.2080 به وسیله‌ی عملیات ماشین کاری تهیه گردید. این فولاد دارای درصد بالایی از کربن و کروم بوده که قابلیت سخت شدن قطعه را تا مغز آن، پس از عملیات حرارتی فراهم می‌آورد. عملیات حرارتی بمنظور تنش‌گیری و افزایش سختی روی قالب و سنبه پس از ماشین کاری صورت گرفت.

انجام فرآیند ECAP

برای انجام فرآیند، از یک ماشین پرس با ظرفیت ۱۰۰ تن استفاده شد. فرآیند در دمای اتاق، با استفاده از روش BC در سرعت ثابت ۱ میلی‌متر بر ثانیه انجام گرفت. بمنظور کاهش اثر اصطکاک از یک نوع فوم صابون به عنوان روان‌ساز استفاده گردید.

آزمایش فشار

آزمون فشار روشی مناسب برای اندازه‌گیری تنش تسلیم و رفتار تغییر شکل ماده در نرخ‌های کرنشی بیش از ۰/۵ می‌باشد [۷]. از قطعات ECAP شده، به وسیله‌ی عملیات ماشین کاری نمونه‌هایی جهت انجام آزمایش، با توجه به استاندارد ASTM E9 تهیه گردید. برای انجام آزمایش از دستگاه Zwick 155944 با ظرفیت ۶۰۰ کیلو نیوتن بهره گرفته شد. آزمایش فشار با سرعت ۰/۲ میلی‌متر بر

¹ - Weir-Cut

² - Eddy Current

³ - Probe

ماده از سطح الکتروود و قطعه کار بر اساس شکل ۳ می‌باشد [۱۱].

سایش الکتریکی مس خالص تولید شده به روش ECAP، طی فرآیند EDM بررسی گردید. دو نمونه تولید شده در پاس‌های ۴ و ۸ به عنوان الکتروود ماشین تخلیه‌ی الکتریکی مورد استفاده قرار گرفتند. با انجام آزمایش‌هایی روی این دو نمونه و نمونه تغییر شکل نیافته (NON-ECAP)، سایش الکتریکی آن‌ها طی فرآیند EDM مشخص گردید. در این سری آزمایش‌ها نوع الکتروود، شدت جریان و زمان ماشین کاری به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. زمان ماشین کاری در سه سطح ۶، ۱۲، ۱۸ دقیقه تغییر یافته و در هر کدام از این سطوح، مقادیر شدت جریان نیز در سه سطح ۵، ۱۰، ۱۵ آمپر به ترتیب تغییر کرده است. این شرایط برای سه نوع الکتروود مسی تکرار شد و در نهایت، ۲۷ آزمایش برای بررسی رفتار سایشی الکتروودهای مسی طی فرآیند EDM انجام گردید (جدول ۲). از فولاد HARDOX به عنوان قطعه کار و از ماشین تخلیه‌ی الکتریکی پیش‌رانه مدل A 63-511 بمنظور بررسی سایش الکتریکی نمونه‌های مسی استفاده گردید.

نتایج و بحث

نتایج بدست آمده از سختی سنجی

شکل ۴ نتایج سختی سنجی را پس از فرآیند ECAP بر حسب تعداد مراحل اکستروژن نشان می‌دهد. سختی نمونه‌ی اولیه (بدون تغییر شکل) نیز برای مقایسه آورده شده است. روی هم رفته، همان گونه که مشاهده می‌شود، سختی نمونه‌ها پس از فرآیند ECAP افزایش می‌یابد. بنظر می‌رسد که سختی ماده در پاس‌های ۲، ۳ و ۴ تقریباً یکسان می‌ماند و پس از آن به گونه‌ی مشهودی کاهش یافته و دوباره در پاس‌های ۶، ۷ و ۸ تقریباً یکسان می‌ماند. این تغییرات به دلیل دگرگونی‌های متالورژیکی رخ می‌دهند که در بخش بعد به آن اشاره می‌شود.

نتایج بدست آمده از آزمایش فشار

شکل‌های ۵ و ۶ منحنی‌های تنش- کرنش حقیقی حاصل از آزمایش فشار تک محوری را برای نمونه‌ی اولیه

نیروی ضد محرکه‌ی الکتریکی^۱ در سیم پیچ شده که به وسیله‌ی یک سیگنال حساس اندازه‌گیری می‌شود. با ارزیابی و اندازه‌گیری این سیگنال به وسیله‌ی پردازشگر، هدایت الکتریکی قطعه مشخص می‌گردد. از ویژگی‌های برجسته این روش نسبت به روش چهار کاوشگر^۲ می‌توان به دقت بالا و کاهش تاثیر زبری سطح بر مقدار اندازه‌گیری هدایت الکتریکی اشاره نمود [۸]. هدایت الکتریکی دو مرتبه در هر نمونه به وسیله‌ی دستگاه اندازه‌گیری و سپس میانگین گرفته شد.

آزمایش سایش مس ریز دانه طی فرآیند تخلیه الکتریکی

تخلیه‌ی الکتریکی، فرآیندی الکتریکی- حرارتی برای برداشت مواد از سطح قطعه کار است. این عمل به وسیله‌ی الکتروود با تبدیل انرژی الکتریکی به حرارتی صورت می‌گیرد [۹]. در این فرآیند، الکتروود و قطعه کار در محدوده ۰/۱ تا ۰/۵ میلی متر از یکدیگر در یک سیال نارسانای الکتریکی غوطه‌ور هستند و از یک منبع جریان مستقیم تغذیه می‌کنند. فاصله‌ی موجود بین الکتروود و قطعه کار به وسیله‌ی دستگاه خود تنظیم ثابت نگه داشته می‌شود. زمانی که یک سری ولتاژ به صورت پالس با دامنه‌ی ۲۰ تا ۱۲۰ ولت و فرکانس با محدوده ۵ کیلوهرتز در حد فاصل میان الکتروود و قطعه کار ایجاد گردد، سبب فروریختن مقاومت سیال دی الکتریک می‌شود. این امر باعث شده تا در عرض چند میکرو ثانیه جرقه‌هایی در این فاصله ایجاد گردد. در زمان خیلی کوتاه (۱/۰ تا ۲۰۰۰ میکروثانیه)، درجه حرارت به صورت موضعی به بالاتر از نقطه جوش ماده (۸۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ درجه سلسیوس) می‌رسد. به دلیل تبخیر دی الکتریک، فشار در کانال پلاسما به سرعت افزایش یافته و حدوداً به ۲۸۰ مگاپاسکال می‌رسد. این فشار زیاد مانع از تبخیر فلز با دمای فرا اشباع می‌گردد. در انتهای پالس جرقه، فشار در کانال پلاسما ناگهان افت کرده و فلز فرا اشباع به صورت انفجاری تبخیر می‌شود [۱۰]. نتیجه‌ی این عمل برداشت

¹ - Counter Electromotive Force

² - Four-point-probe

می‌توان ثابت نمود که در حال حاضر امکان انجام آن نمی‌باشد.

نتایج بدست آمده‌ی اندازه‌گیری هدایت الکتریکی

شکل ۸ هدایت الکتریکی نمونه‌های مسی را به ازای تعداد مراحل اکستروژن نشان می‌دهد. روی هم رفته، پس از فرآیند ECAP با افزایش استحکام نمونه‌ها، هدایت الکتریکی آن‌ها کاهش می‌یابد. همان گونه که مشاهده می‌شود، این مسئله تا مرحله‌ی پنجم صادق بوده و از این مرحله به بعد مقدار اندکی هدایت الکتریکی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. شکل ۹ رابطه‌ی میان استحکام تسلیم و هدایت الکتریکی نمونه‌های مسی ECAP شده را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش استحکام نمونه‌ها تا پاس پنجم به گونه‌ی پیوسته هدایت الکتریکی آنها کاهش یافته، اما از این مرحله به بعد با افزایش مراحل اکستروژن، نمونه‌ها رفتاری متفاوت را از خود نشان می‌دهند. این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های ECAP شده پیشین از استحکامی کم‌تر برخوردار بوده، اما هدایت الکتریکی آن در مقایسه با نمونه‌ی ECAP5 اندکی افزایش یافته است. بنظر می‌رسد که تغییرات بوجود آمده در دانسیته نابی‌هایی‌ها و مرزهای مشترک موجود در ساختار کریستالی ماده به دلیل کوتاه کردن حرکت آزاد الکترون‌ها از عوامل تاثیر گذار بر مقاومت الکتریکی می‌باشند. با افزایش مراحل ECAP، دانسیته نابه‌جایی‌ها افزایش یافته و موجب افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود. از آنجایی که هدایت الکتریکی نسبت معکوس با مقاومت الکتریکی دارد لذا، این کمیت در نمونه‌های ECAP شده کاهش می‌یابد.

روی هم رفته، فرآیند ECAP باعث افزایش استحکام فلز مس شده و هدایت الکتریکی آن را کاهش می‌دهد. نتایج تقریباً مشابهی برای آلیاژهای گوناگون Cu-Zn بدست آمده است. نتایج آورده شده در شکل ۱۰ از مرجع [۱۳] نشان می‌دهد که در آلیاژ Cu-Zn با افزایش درصد فلز Zn استحکام مکانیکی آلیاژ افزایش یافته، اما هدایت الکتریکی آن به شدت کاهش می‌یابد. نتایج ECAP نمونه‌های مسی نیز حاکی از آن است که با افزایش شمار مراحل اکستروژن استحکام مکانیکی

و نمونه‌های تولید شده به روش ECAP از مرحله نخست تا هشتم نشان می‌دهد. به کمک این منحنی‌ها، تغییرات تنش تسلیم مس برحسب تعداد مراحل اکستروژن تعیین و نتایج بدست آمده در شکل ۷ ارایه گردیده است. نتایج نشان می‌دهند که پیش از انجام فرآیند ECAP، تنش تسلیم مس ۲۵۰ مگاپاسکال می‌باشد. پس از مرحله نخست تنش تسلیم تا ۳۰۰ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد مراحل اکستروژن، تنش تسلیم به تدریج تا مرحله‌ی پنجم افزایش یافته و از این مرحله به بعد، به تدریج تا مرحله‌ی هشتم کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزایش استحکام ماده پس از فرآیند ECAP، قابلیت کار سختی آن به شدت کاهش می‌یابد. برای توجیه این رفتارها لازم به یادآوری است که در فرآیند ECAP دو عامل به گونه‌ی هم زمان موجب افزایش استحکام ماده می‌شوند [۱۲]. عامل نخست استحکام بخشی از راه مرزدانه هاست که در حین فرآیند ECAP، مرزدانه‌های زاویه بزرگ با اندازه‌ی کوچک ایجاد شده و از راه رابطه معروف هال-پچ^۱ باعث استحکام بخشی می‌شوند. عامل دوم استحکام بخشی از راه افزایش دانسیته نابه جایی هاست که در حین فرآیند ECAP به دلیل کرنش‌های پلاستیک بسیار زیاد در ماده ایجاد می‌شود و از راه رابطه معروف کارسختی (افزایش استحکام با مجذور دانسیته نابی‌جایی‌ها) باعث استحکام بخشی می‌شود. بنابراین، همان‌گونه که انتظار می‌رود، در مراحل اولیه اکستروژن به دلیل افزایش شدید دانسیته نابه جایی‌ها و ایجاد مرزدانه‌های زاویه بزرگ با اندازه‌ی کوچک‌تر، استحکام ماده افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد مراحل اکستروژن، به دلیل اشباع دانسیته نابه‌جایی‌ها، استحکام ماده از مرحله‌ی دوم تا چهارم با نرخ کم‌تری افزایش می‌یابد. از پاس پنجم به بعد، به دلیل افزایش انرژی کرنشی ذخیره شده در ماده و حرارت ناشی از تغییر شکل پلاستیک در این مراحل، شرایط برای تبلور دوباره در ماده آماده شده و به دلیل رخداد این پدیده، تنش سیلان کاهش می‌یابد. البته، درستی این ادعا را با بررسی میکروسکوپ الکترونی عبوری^۲ (TEM)

¹ - Hall-Petch

² - Transmission electron microscope

الکتروود تاثیر گذارند، اما با افزایش زمان فرآیند تخلیه الکتریکی، پایداری و حفظ این خواص برای الکتروودهای ECAP شده مقدور نمی‌باشد. علت این مسئله را می‌توان چنین بیان نمود که با افزایش زمان، جرقه‌های تولید شده میان دو الکتروود (ابزار و قطعه کار) افزایش می‌یابد که باعث ذوب و تبخیر ماده از سطح آن‌ها می‌شود. این امر سبب تولید و افزایش چاله‌های مذاب در سطح الکتروود می‌شود. حرارت ناشی از چاله‌های مذاب به مناطق اطراف نفوذ کرده و موجب رشد دانه‌ها و افزایش اندازه‌ی آن‌ها می‌گردد. از سوی دیگر، با افزایش شدت جریان، حرارت ایجاد شده در اثر تخلیه الکتریکی افزایش می‌یابد که باعث سرعت بخشیدن به رشد دانه‌ها و افزایش اندازه آن‌ها می‌شود.

خلاصه‌ی نتایج

در این پژوهش مس خالص تحت فرآیند فشار در کانال‌های هم مقطع زاویه دار قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد:

روی هم رفته، فرآیند ECAP باعث افزایش سختی و تنش تسلیم ماده شده و قابلیت کار سختی آن را به شدت کاهش می‌دهد. پس از مرحله‌ی نخست ECAP تنش تسلیم مس خالص تا ۳۰۰ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. با افزایش شمار مراحل اکستروژن، تنش تسلیم به تدریج تا مرحله پنجم افزایش یافته و از این مرحله به بعد، به تدریج تا مرحله هشتم کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، روند تغییرات سختی با تنش تسلیم ماده کم و بیش همخوانی دارد.

پس از فرآیند ECAP با افزایش استحکام نمونه‌ها، هدایت الکتریکی آنها کاهش می‌یابد. این مسئله تا مرحله‌ی پنجم صادق بوده و پس از آن با افزایش مراحل اکستروژن، هدایت الکتریکی نمونه‌ها اندکی افزایش می‌یابد. همچنین، هدایت الکتریکی نمونه‌های ECAP شده نسبت به نمونه‌های مس آلیاژی (Cu-Zn) با استحکام معادل، بسیار بیش‌تر است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند ECAP روشی موثر برای تولید مس خالص با قابلیت استحکام و هدایت الکتریکی بالا می‌باشد.

نمونه‌ها به گونه‌ی مشهود افزایش یافته و کاهش هدایت الکتریکی آن‌ها در مقایسه با فرآیند آلیاژ سازی بسیار جزئی می‌باشد. شکل ۸ بخوبی این نتیجه را تایید می‌کند. لذا، می‌توان چنین نتیجه گرفت که فرآیند ECAP، بویژه تا پاس چهارم روشی مناسب برای استحکام بخشی فلز مس بدون کاهش قابل ملاحظه در قابلیت هدایت الکتریکی آن است. بنابراین، فرآیند ECAP روشی موثر برای تولید مس خالص با قابلیت استحکام و هدایت الکتریکی بالا می‌باشد.

نتایج بدست آمده از کارکرد عملی مس خالص تولید شده به روش ECAP طی فرآیند EDM

رایج ترین روش محاسبه‌ی سایش الکتریکی، تعیین مقدار حجم کاسته شده از الکتروود می‌باشد [۱۴]. معمولاً اختلاف وزن الکتروود پیش و پس از ماشین کاری اندازه‌گیری شده و به وسیله‌ی چگالی الکتروود به مقدار حجمی تبدیل می‌شود. برای تعیین و محاسبه‌ی این عامل چگالی مس ۸/۹ (گرم بر سانتیمتر مکعب) در نظر گرفته شده است [۱۳]. شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ نشان دهنده‌ی سایش حجمی الکتروودهای مسی در شرایط گوناگون کاری می‌باشند. همان گونه که مشاهده می‌شود، الکتروودهای ECAP شده در ابتدای زمان فرآیند در برابر سایش الکتریکی مقاومت بهتری را نسبت به الکتروود NON-ECAP از خود نشان می‌دهند. این مسئله در شدت جریان ۵ آمپر با ۶ دقیقه ماشین کاری برای الکتروود ECAP8 بسیار مشهود است، اما با افزایش زمان فرآیند مقدار سایش الکتروودهای ECAP شده به الکتروود NON-ECAP نزدیک می‌گردد. این مسئله بیانگر از دست دادن خواص منحصر به فرد الکتروودهای ECAP شده می‌باشد. از سوی دیگر، با افزایش شدت جریان مقدار سایش الکتریکی افزایش می‌یابد. این مسئله با نتایج جیا^۱ و همکارانش [۱۵] مطابقت دارد. دلیل این امر را می‌توان گرمایش ناشی از افزایش جریان الکتریکی بیان نمود. از این تغییرات می‌توان چنین نتیجه گرفت که بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی و اندازه دانه بر سایش

¹ - Jia

برتری محو شده و مقدار سایش الکتریکی الکترودهای ECAP شده به الکتروود NON-ECAP نزدیک می‌شود. همچنین، با افزایش شدت جریان مقدار سایش الکتریکی الکترودهای مسی افزایش می‌یابد.

بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی طی فرآیند تخلیه الکتریکی بر مقدار سایش الکتریکی مس خالص تاثیر گذارند. به گونه‌ای که الکترودهای ECAP شده در ابتدای زمان فرآیند مقاومت بهتری را نسبت به الکتروود NON-ECAP از خود نشان می‌دهند، ولی با گذشت زمان این

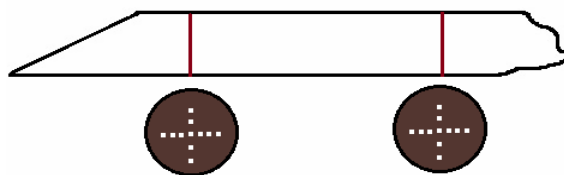
منابع

- 1- S.A. Hosseini, H. Daneshmanesh, "High strength, high conductivity ultra-fine grains commercial pure copper produced by ARB process", Mater Design, Vol. 30, pp. 2911–2918, 2009.
- 2- A.K. Parimi, P.S. Robi, S.K. Dwivedy, "Severe plastic deformation of copper and Al–Cu alloy using multiple channel-die compression", Materials and Design, vol.32, pp.1948–1956, 2011.
- 3- M. Reihanian, R. Ebrahimi, M.M. Moshksar, D. Terada, N. Tsuji, "Microstructure quantification and correlation with flow stress of ultrafine grained commercially pure Al fabricated by equal channel angular pressing (ECAP)", Materials Characterization, Vol. 59, pp.1312-1323, 2008.
- 4- Ruslan Z. Valiev, Terence G. Langdon, "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement", Progress in Materials Science, vol.51, pp.881–981, 2006.
- 5- Akhtar S. Khan, Christopher S. Meredith, "Thermo-mechanical response of Al 6061 with and without equal channel angular pressing (ECAP)", International Journal of Plasticity, vol. 26 pp.189–203, 2010.
- 6- K. Oh-Ishi, Z. Horita, M. Furukawa, M. Nemoto, T.G. Langdon, "Optimizing the Rotation Conditions for Grain Refinement in Equal-channel Angular Pressing", Metallurgical and Materials Transactions, vol. 29A, pp: 2011-2013, 1998.
- 7- ASM Handbook Mechanical Testing and Evaluation Volume8. 2000. ASM International.
- 8- N. Bowler, Y. Huang, "Electrical conductivity measurement of metal plates using broadband eddy-current and four-point methods", Measurement Science and Technology, Vol. 16, PP: 2193–2200, 2005.
- 9- Wang. Yuangang, Zhao. Fuling, Wang. Jin, "Wear-resist Electrodes for Micro-EDM", Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 22, pp: 339-342, 2009.
- 10- El-Hofi, 2005, Advanced Machining Processes, McGraw-Hill.
- 11- M.I. Dvornik. "Nanostructured WC–Co particles produced by carbonization of spark eroded powder: Synthesis and characterization", Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials, Vol. 28, pp: 523–528, 2010.
- 12- 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, pp. 189-194, 2008.
- 13- ASM Handbook Mechanical Testing and Evaluation Volume2. 2000. ASM International
- 14- Yao-Yang. Tsai, Takahisa. Masuzawa, "An index to evaluate the wear resistance of the electrode in micro-EDM". Journal of Materials Processing Technology, Vol. 149, pp: 304–309, 2004.
- 15- S.G. Jia, P. Liu, F.Z. Ren, B.H. Tian, G.S. Zheng, "Sliding Wear Behavior of Copper Alloy Contact Wire Against Copper-Based Strip for High-Speed Electrified Railways", Wear, Vol. 262, PP: 772-777, 2007.

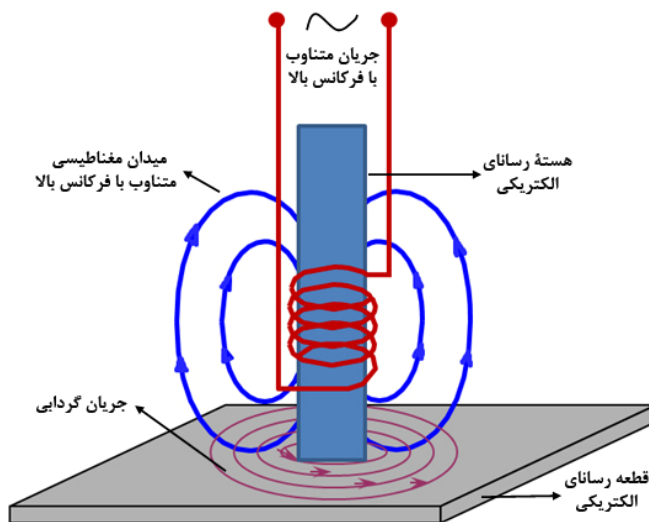
پیوست‌ها

جدول ۱- ترکیب شیمیایی مس.

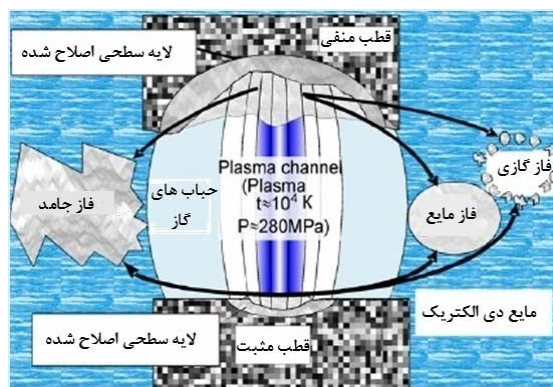
Cu	Sb	Sn	Ca	S	Cl	Mg	عنصر
۹۹/۴۴	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶	۰/۰۲	۰/۰۲۵	۰/۰۲۶	۰/۴۷	درصد وزنی



شکل ۱- نحوه برش نمونه و انجام آزمایش سختی سنجی.



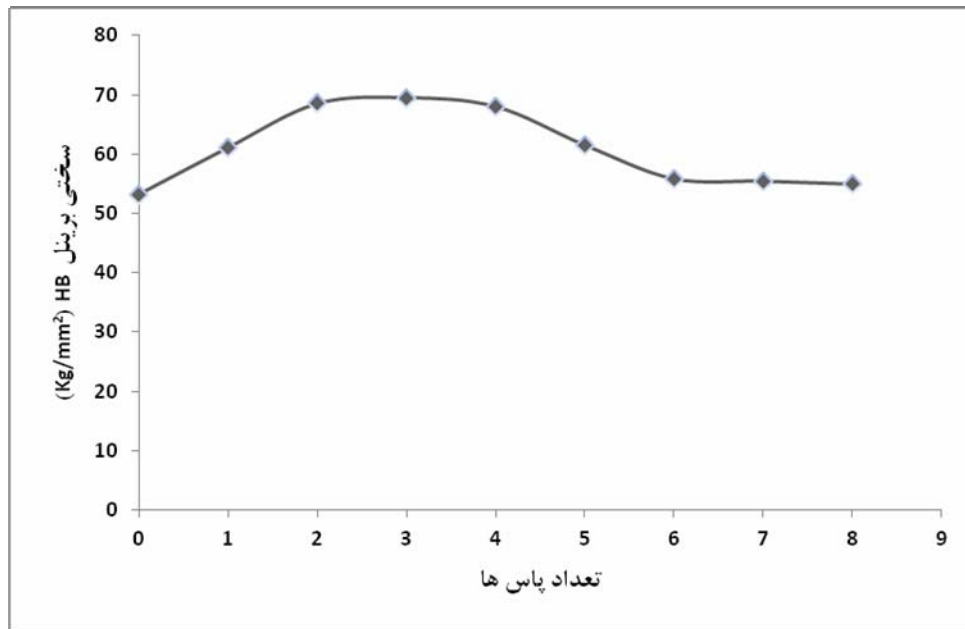
شکل ۲- شماتیک روش جریان گردابی.



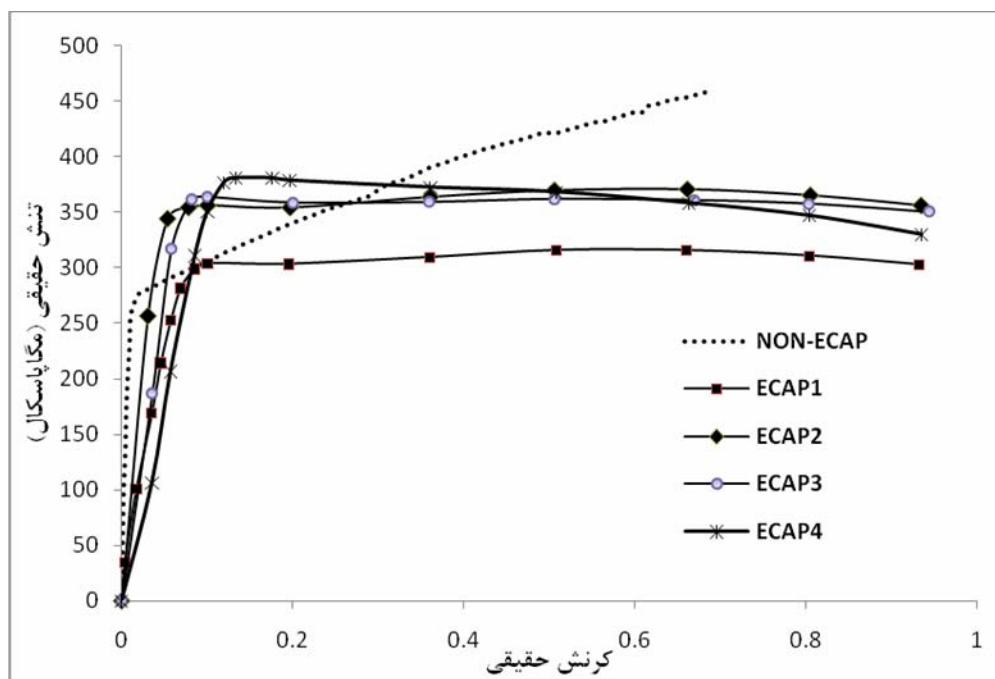
شکل ۳- شرایط کاری تخلیه الکتریکی [۱۰].

جدول ۲- طرح کلی آزمایش سایش الکتریکی.

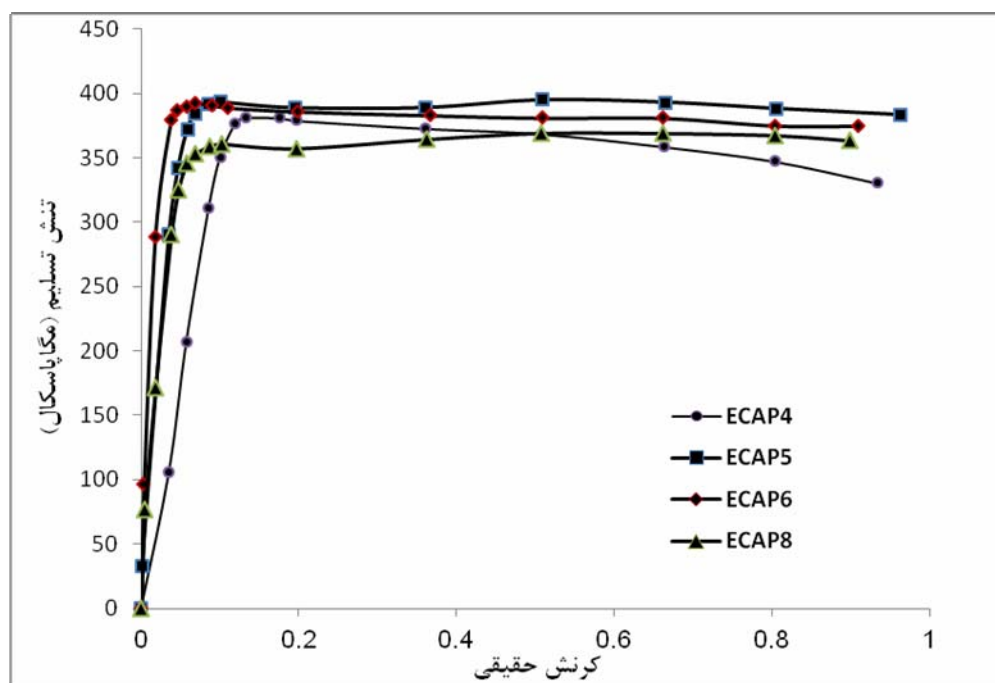
شماره‌ی آزمایش	انواع الکترود مسی	شدت جریان (A)	زمان (min)	شماره‌ی آزمایش	انواع الکترود مسی	شدت جریان (A)	زمان (min)
۱	NON-ECAP	۵	۶	۱۵	ECAP 4	۱۰	۱۸
۲	NON-ECAP	۵	۱۲	۱۶	ECAP 4	۱۵	۶
۳	NON-ECAP	۵	۱۸	۱۷	ECAP 4	۱۵	۱۲
۴	NON-ECAP	۱۰	۶	۱۸	ECAP 4	۱۵	۱۸
۵	NON-ECAP	۱۰	۱۲	۱۹	ECAP 8	۵	۶
۶	NON-ECAP	۱۰	۱۸	۲۰	ECAP 8	۵	۱۲
۷	NON-ECAP	۱۵	۶	۲۱	ECAP 8	۵	۱۸
۸	NON-ECAP	۱۵	۱۲	۲۲	ECAP 8	۱۰	۶
۹	NON-ECAP	۱۵	۱۸	۲۳	ECAP 8	۱۰	۱۲
۱۰	ECAP 4	۵	۶	۲۴	ECAP 8	۱۰	۱۸
۱۱	ECAP 4	۵	۱۲	۲۵	ECAP 8	۱۵	۶
۱۲	ECAP 4	۵	۱۸	۲۶	ECAP 8	۱۵	۱۲
۱۳	ECAP 4	۱۰	۶	۲۷	ECAP 8	۱۵	۱۸
۱۴	ECAP 4	۱۰	۱۲				



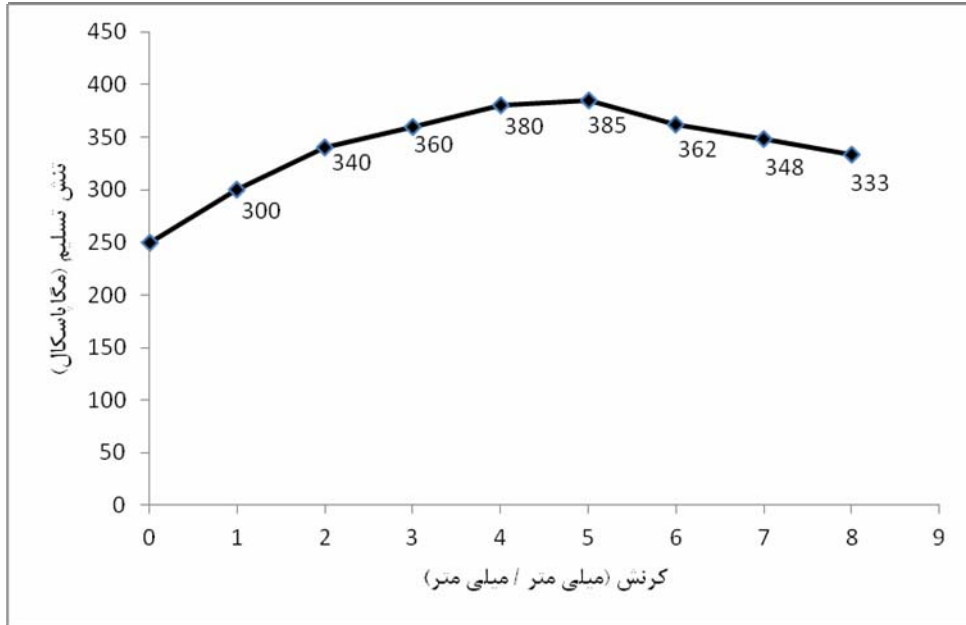
شکل ۴- تغییرات سختی نمونه‌ها بر حسب تعداد مراحل اکستروژن.



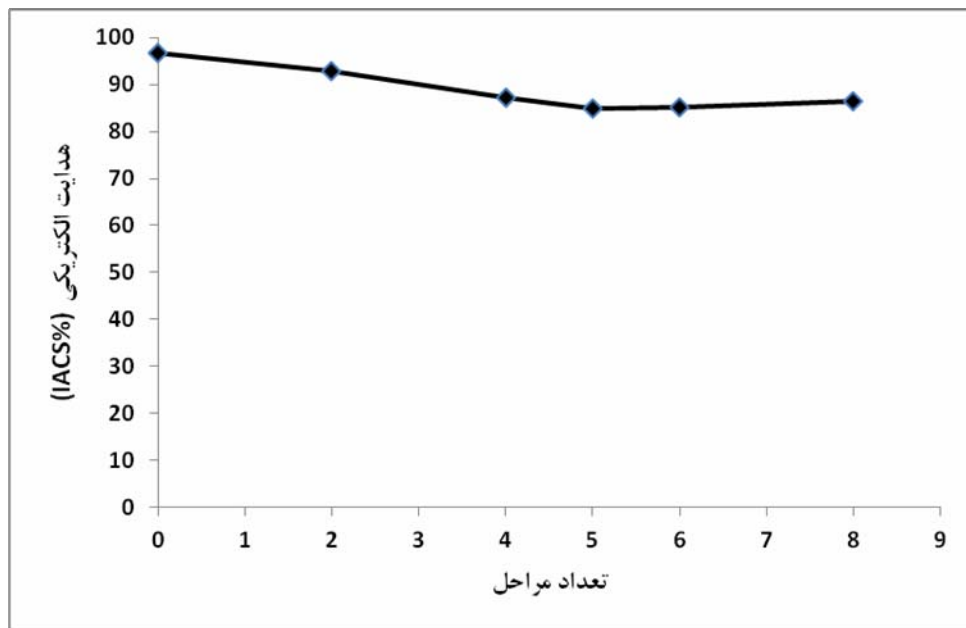
شکل ۵- منحنی های تنش-کرنش فشاری مس پس از یک تا چهار مرحله اکستروژن به همراه نمونه اولیه.



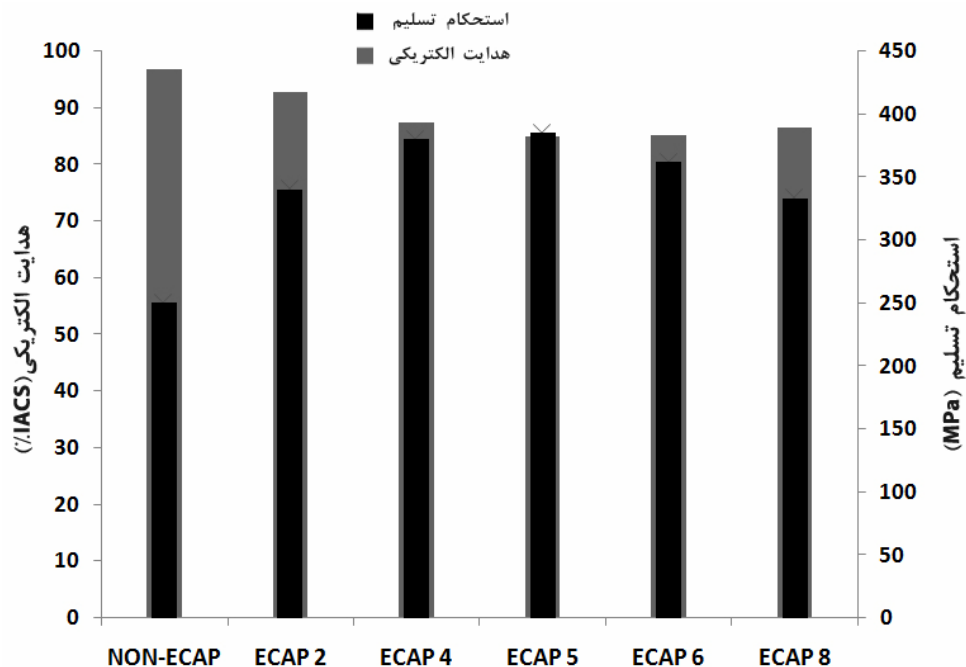
شکل ۶- منحنی های تنش-کرنش فشاری مس پس از چهار تا هشت مرحله اکستروژن.



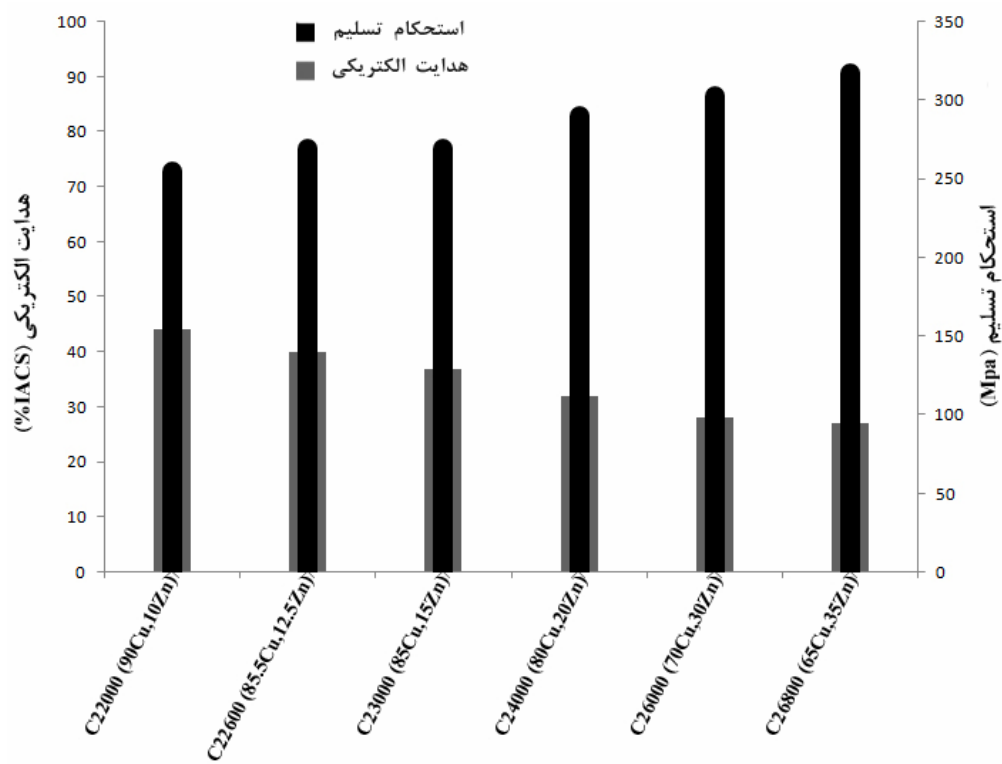
شکل ۷- تغییرات تشنش تسلیم مس بر حسب مراحل اکستروژن.



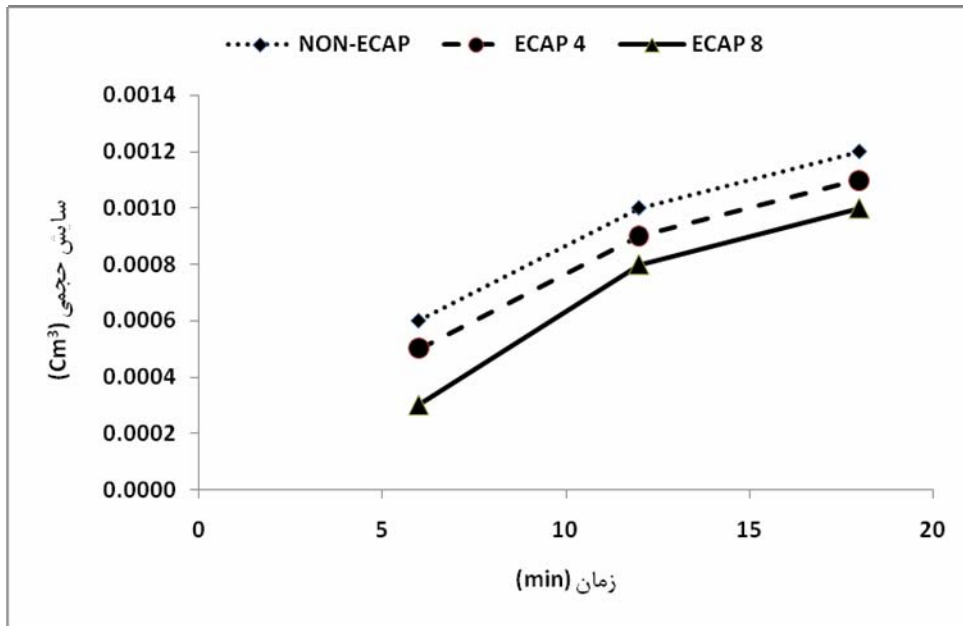
شکل ۸- تغییرات هدایت الکتریکی بر حسب مراحل اکستروژن.



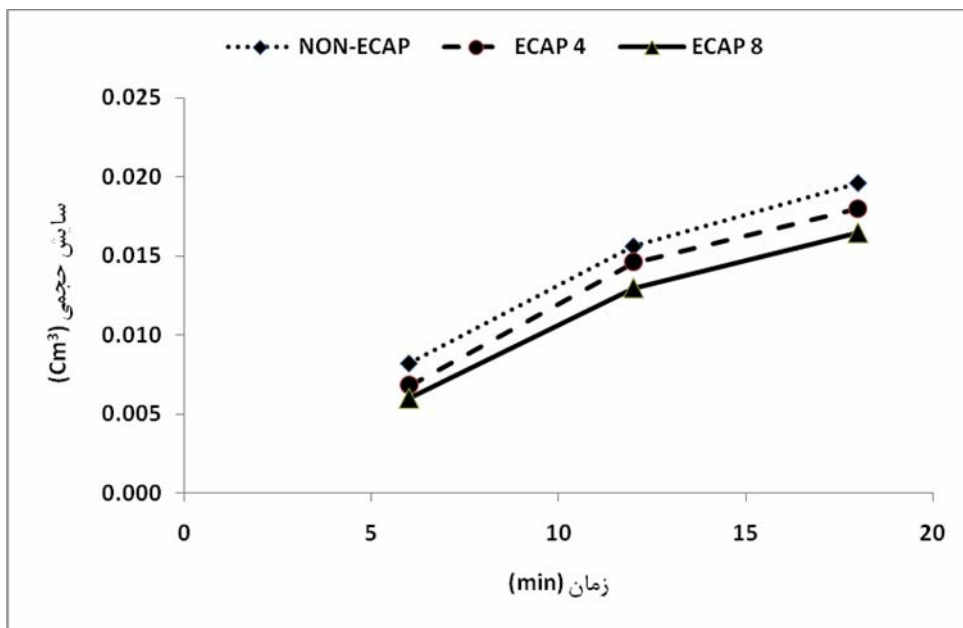
شکل ۹- تغییرات هدایت الکتریکی و استحکام تسلیم مس بر حسب مراحل اکستروژن.



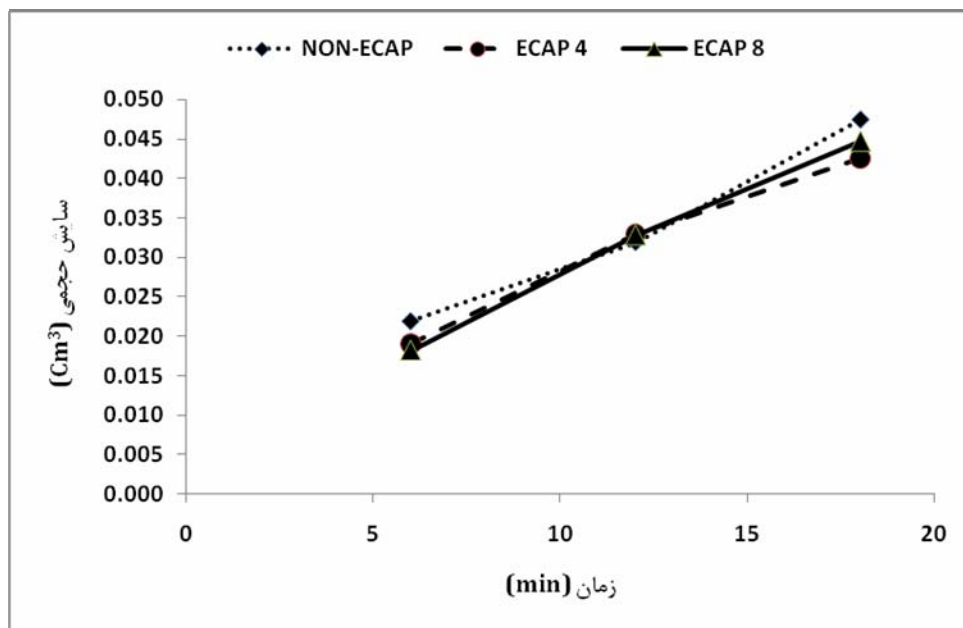
شکل ۱۰- تغییرات هدایت الکتریکی و استحکام تسلیم مس آلیاژی (Cu-Zn) [۱۲].



شکل ۱۱- سایش حجمی الکترودهای مسی در شدت جریان ۵ آمپر



شکل ۱۲- سایش حجمی الکترودهای مسی در شدت جریان ۱۰ آمپر



شکل ۱۳- سایش حجمی الکترودهای مسی در شدت جریان ۱۵ آمپر