

مطالعه تجربی فرآیند ترکیبی اکستروژن پیچشی و مستقیم بر خواص مکانیکی و الکتریکی مس خالص تجاری

حمید بهلولی

خلیل خلیلی*

سید محمد حسین سیدکاشی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

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

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

در این تحقیق مس خالص تجاری در معرض یک فرآیند شکل‌دهی ترکیبی قرار گرفته است. برای این منظور از یک قالب اکستروژن پیچشی با کانال خروجی تنگ‌شونده استفاده شده است. سیستم‌های لغزشی متفاوتی از نوع برشی به دلیل اعمال کرنش‌های شعاعی و طولی در نمونه فعال می‌شود و خواص مکانیکی و فیزیکی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که ریز ساختار فلز مس با عبور از قالب اکستروژن پیچشی دگرگون شده و اندازه دانه به شدت کاهش می‌یابد. ساختار دانه بندی ماده با عبور از کانال خروجی و اعمال اکستروژن مستقیم روی آن همگن‌تر می‌شود و روند کاهش اندازه‌های دانه ادامه پیدا می‌کند. با اعمال فرآیند اکستروژن پیچشی بر روی فلز مس، استحکام تسلیم فشاری آن از ۱۱۵ به ۱۶۷ مگاپاسکال و مقدار میانگین سختی از ۸۰ به ۱۲۷ ویکرز افزایش می‌یابد. این مقادیر با اعمال فرآیند اکستروژن مستقیم بر روی نمونه به ۱۹۲ مگاپاسکال و ۱۴۰ ویکرز رسیده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد با اعمال فرآیند ترکیبی اکستروژن پیچشی و مستقیم بر روی فلز مس، مقدار مقاومت الکتریکی سطحی آن نسبت به نمونه اولیه حدود ۷ درصد افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: تغییر شکل پلاستیک شدید، اکستروژن پیچشی، مواد فوق ریز دانه، خواص مکانیکی، رسانایی الکتریکی.

Experimental Study on Combined Twist and Direct Extrusion on the Mechanical and Electrical Properties of Commercial Pure Copper

H. Bohlooli

Kh. Khalili

S. H. Seyedkashi

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

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

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

Abstract

In this study, commercial pure copper was subjected to a combined forming process. For this purpose, a twist extrusion die with an outlet channel narrowed was used. In this technique, by applying radial and longitudinal strains, different shear sliding systems were activated which leads to a change in mechanical and physical properties of the sample. The results showed that the microstructure of the sample was changed via passing through the twist extrusion die and a very fine grain size was obtained. The grain size was further decreased by passing through the outlet channel and applying direct extrusion, and more homogeneous grains were achieved. The compressive yielding strength was increased from 115 to 167 MPa and the average hardness value was raised from 80 to 127 Vickers by applying the twist extrusion process to the copper. After applying the direct extrusion process to the sample, these values reached 192 MPa and 140 Vickers, respectively. The results also showed that by applying twist and direct extrusion to the copper, its surface electrical resistance increased about 7 %, compared with the reference sample.

Keywords: Severe Plastic Deformation, Twist Extrusion, Ultra fine Grained Materials, Mechanical Properties, Electrical Conductivity.

۱- مقدمه

مؤثر برای بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی فلزات است [۱-۳]. از این رو تولید مواد با ساختارهای بسیار ریز^۲ (UFG) (اندازه دانه کمتر از ۱ میکرون) و نانو ساختار^۳ (NC) (اندازه دانه کمتر از ۱۰۰ نانومتر) با توجه به خواص مکانیکی و فیزیکی فوق‌العاده و مطلوب آنها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. مواد NC و UFG با دو رویکرد اصلی بالا به پایین^۴ و پایین به بالا^۵ ساخته می‌شوند که در اولی منظور دست‌کاری ساختار درشت اندازه ماده و رساندن آن به ابعاد نانومتری است و در دومی منظور این است که توده ماده را از ابتدا به وسیله چینش اتم‌ها یا

یکی از نیازهای اساسی و مهم در صنایع پیشرفته و علوم مدرن دستیابی و تولید مواد جدیدی است که دارای قابلیت‌ها و ویژگی‌های منحصر به فردی همچون مقاومت بالا در برابر خوردگی، وزن سبک، خواص مکانیکی، الکتریکی و گرمایی مطلوب باشد. بنابراین محققان بسیاری کوشیدند تا با ارائه روش‌های نوین بتوانند مواد جدید و پیشرفته را تولید و یا خصوصیات مکانیکی و فیزیکی مواد را توسط فرآیندهای خاصی بهبود دهند. در حال حاضر به درستی ثابت شده است که پالایش دانه^۱ (ریز کردن ساختار کریستالی) یک روش بسیار

² Ultra fine grained

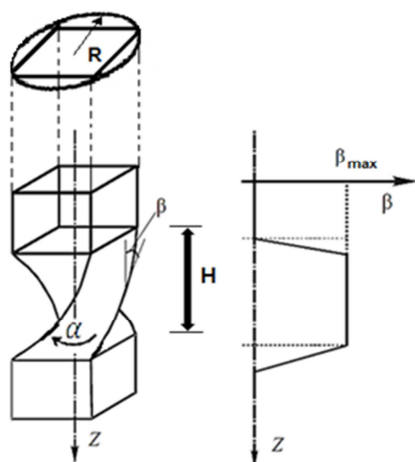
³ Nan crystalline Materials

⁴ Top-down

⁵ Bottom-Up

¹ Grain refining

UFG و NC درون ساختار کریستالی ماده می‌باشد [۱۵، ۱۶]. روش اکستروژن پیچشی برای اولین بار توسط بیگلزیمر^۸ و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۰۲ میلادی ارائه شده است. این روش قابلیت اعمال تنش برشی ساده را در دو صفحه مجزا (یکی عمود و دیگری موازی محور اکستروژن) به ماده در هر مرحله دارد. اساس کار این روش اکستروژن کردن ماده تحت فشار هیدرواستاتیک درون یک کانال پیچشی است که شکل و هندسه آن به پارامترهای طراحی قالب در این قسمت شامل طول قالب، زاویه پیچش قالب و مقدار چرخش نمونه درون قالب وابسته است. در ابتدا و انتهای این منطقه زاویه پیچش صفر می‌باشد. کانال‌های ورودی و خروجی قالب هم به ترتیب قبل و بعد از کانال پیچشی قرار دارند که طول آنها بستگی به اندازه نمونه و طول سنبه مورد استفاده دارد. شکل ۱ طرحواره فرایند TE را نشان می‌دهد.



شکل ۱- طرحواره فرایند TE

جهت انجام یک گذر فرایند اکستروژن پیچشی، رابطه (۲) بین پارامترهای دخیل در فرایند، برقرار می‌باشد [۱۹، ۱۸]:

$$tg\beta = \frac{\alpha R}{H} \quad (2)$$

در رابطه مذکور، β زاویه‌ی پیچش قالب (زاویه‌ای که لبه پیچش یافته قالب با راستای محوری می‌سازد)، α مقدار چرخش نمونه درون قالب، H طول قالب و R شعاع دایره محدود کننده مقطع عرضی قالب می‌باشد.

تغییر نکردن مقطع عرضی نمونه در حین انجام فرایند و نیز تغییر نکردن شکل هندسی نمونه پس از انجام فرایند، از خصوصیات بارز فرایند اکستروژن پیچشی است که این خصوصیت امکان تکرار فرایند را برای نمونه به دفعات زیاد فراهم می‌آورد و از این طریق می‌توان کرنش‌های زیادی در نمونه ایجاد کرد که این موضوع می‌تواند شرایط را برای تغییر ساختار دانه و خواص مکانیکی در نمونه فراهم آورد. رابطه (۳) به منظور محاسبه کرنش انباشته شده در هر نقطه روی سطح مقطع مستطیلی نمونه که نسبت به مرکز آن فاصله r دارد، ارائه شده است [۲۰]:

اجزای نانو اندازه تولید کرد [۴]. مشکلاتی چون مواد اولیه نامرغوب، زمان و هزینه بالای تولید، ورود آلودگی، بوجود آمدن تخلخل در ریزساختارهای تولید شده و مشکلات اساسی در ساخت قطعات بزرگ، از معایب عمده روش‌های پایین به بالا هستند [۵]. در روش‌های بالا به پایین، در ابتدا از یک ماده حجیم با دانه‌بندی درشت استفاده می‌شود [۶] و سپس با انجام فرایندهای خاصی، اندازه دانه‌های آن را تا حد کوچکتر از میکرون و یا نانومتر کاهش می‌دهند. این روش‌ها عمدتاً بر پایه ایجاد کرنش‌های پلاستیک بسیار زیاد در ماده استوار است و به روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید^۱ (SPD) معروف می‌باشند [۷ و ۸]. امروزه با توجه به قابلیت‌های منحصر به فردی که روش‌های SPD در تولید مواد فوق ریزدانه و نانو ساختار به علت خواص مکانیکی فوق العاده‌ای که دارند و کاربرد وسیعی که در صنایع هوا- فضا، صنایع حمل و نقل خصوصاً هوایی، تجهیزات پزشکی، تأسیسات انرژی، صنایع الکترونیک و مخابرات، صنایع تسلیحات دفاعی متعارف و مصنوعات ورزشی می‌توانند داشته باشند، توجه زیادی به آنها شده است. روش‌های SPD را با توجه به هندسه محصول این فرایند، می‌توان به سه دسته اصلی تقسیم بندی نمود. این سه دسته شامل تغییر شکل پلاستیک شدید توده ماده، ورق‌ها و لوله‌ها می‌باشد. فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید روشی مطمئن و شناخته شده برای رسیدن به ساختاری با دانه‌های بسیار ریز می‌باشد. بر اساس نوع روش بکار رفته و نوع ماده مورد استفاده، رسیدن به یک ساختار دانه بندی ریز در ماده، از مکانیزم‌های متعددی پیروی می‌کند. در این خصوص مکانیزم‌های متعددی مثل مکانیزم تکثیر و انتقال نابجایی‌ها^۲ (MMD) [۹]، مکانیزم تقاطع باندهای برشی ریز^۳ (IMSB) [۱۰]، مکانیزم دو قلوئی^۴ [۱۱] و مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی^۵ [۱۲] توسط محققان ارائه شده است.

به طور کلی چهار روش برای استحکام بخشی فلزات وجود دارد که عبارتند از: استحکام بخشی از طریق ریز شدن دانه، کار مکانیکی سرد، ساخت محلول جامد و پیر سختی [۱۳]. ریز شدن اندازه دانه یکی از روش‌های مهم استحکام بخشی مواد است که نسبت به سایر روش‌های استحکام بخشی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. در این روش می‌توان همزمان به ترکیب مناسبی از استحکام و شکل پذیری دست یافت. در حالیکه در روش‌های دیگر، افزایش استحکام با کاهش شکل پذیری ماده همراه می‌باشد. به علاوه در این روش کنترل خواص مکانیکی راحت تر می‌باشد. به طور کلی ارتباط بین استحکام ماده با اندازه دانه از طریق رابطه معروف هال-پچ^۶ (رابطه ۱) و به صورت زیر بیان می‌شود [۱۴]:

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

در این رابطه σ_y تنش تسلیم، σ_0 مقاومت شبکه، d اندازه دانه و k_y ثابتی است که به جنس ماده بستگی دارد (ضریب هال-پچ).

یکی از فرایندهای SPD که بر روی توده ماده صورت می‌گیرد، اکستروژن پیچشی^۷ (TE) است که براساس اعمال برش ساده روی ماده پایه ریزی شده است و یکی از موثرترین راهها برای ایجاد ساختارهای

¹ Sever Plastic Deformation

² Multiplication and Migration of Dislocations

³ Intersection of Micro Shear Bands

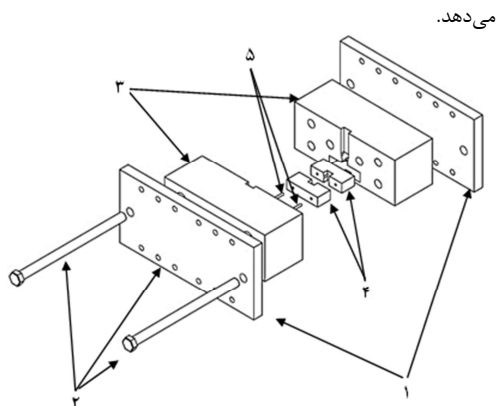
⁴ Twinning

⁵ Dynamic Recrystallization

⁶ Hall-Petch

⁷ Twist Extrusion

⁸ Beigelzimer



شکل ۲- طرح واره کلی قالب طراحی شده، اجزای شماره گذاری شده:
۱- پشتبندهای قالب، ۲- پیچ های اتصالی، ۳- بلوک های قالب اکستروژن پیچشی، ۴- بلوک های قالب اکستروژن مستقیم و ۵- میل راهنما

همانطور که مشاهده می شود قالب مورد استفاده جهت انجام فرآیند تغییر شکل از پنج قسمت به شرح زیر تشکیل شده است:
■ پشتبندهای قالب: که متشکل از دو صفحه فولادی که سوراخ هایی به منظور عبور پیچ های اتصالی در آن ایجاد شده است.
■ پیچ های اتصالی: به منظور اتصال پشتبندها از ۲ عدد پیچ M16 و ۱۲ عدد پیچ M10 استفاده شده است.

■ بلوک های قالب اکستروژن پیچشی: شامل دو عدد بلوک که کانال های ورودی و خروجی به انضمام قسمت پیچشی قالب و شیاری به منظور قرارگیری بلوک های قالب اکستروژن مستقیم درون آنها ماشین کاری شده است. با توجه به ابعاد سطح مقطع عرضی نمونه و چرخش ۹۰ درجه ای آن داخل قالب، طول قالب و زاویه پیچش قالب اکستروژن پیچشی به ترتیب برابر ۲۵ میلی متر و ۳۶ درجه در نظر گرفته شده است.

■ بلوک های قالب اکستروژن مستقیم: شامل دو عدد بلوک که به شکل شیپوره ای درون آنها ماشین کاری شده است و در انتهای کانال خروجی قالب اکستروژن پیچشی تعبیه شده است.
■ پین های راهنما: به منظور موقعیت دهی دقیق و اتصال بلوک های قالب در نظر گرفته شده است.

به منظور ساخت قالب اکستروژن پیچشی، از دو بلوک فولادی در ابعاد $97\text{ mm} \times 92\text{ mm} \times 245\text{ mm}$ استفاده شد. جنس به کار گرفته شده برای ساخت قالب، فولاد ابزار سرد کار 1.2510 می باشد. از مشخصات بارز این فولاد می توان به مقاومت اصطکاکی بسیار بالای آن جهت ساخت قطعات کارسرد اشاره نمود. خواص مکانیکی فولاد مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- خواص مکانیکی فولاد AISI 1.2510

مدول الاستیسیته (GPa)	۲۰۰	مدول برشی (MPa)	۱۳۸۰
نسبت پواسون	۰/۳	تنش تسلیم (MPa)	۸۶۰

جنس مورد استفاده برای بلوک های قالب اکستروژن مستقیم، فولاد سردکار 1.2080 می باشد. جهت ساخت قالب، بلوک های فولادی به وسیله ماشین CNC تحت عملیات فرزکاری قرار گرفته و قسمت های

$$\varepsilon = \frac{2r}{\sqrt{3}R} \tan \beta_{\max} \quad (۳)$$

با توجه به رابطه (۳) می توان دریافت که کرنش انباشته شده طی یک پاس اعمال فرآیند TE نسبت به محور نمونه متغیر بوده و در حالت نظری مقدار کرنش در مرکز نمونه برابر صفر و در گوشه های آن به حداکثر مقدار خود می رسد. کرنش حداکثر مطابق رابطه (۴) بدست می آید [۲۱]:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{2}{\sqrt{3}} \tan \beta_{\max} \quad (۴)$$

کمترین کرنش تجربی که درون ماده در هر پاس انجام فرآیند TE ذخیره می شود در مرکز نمونه رخ می دهد و از رابطه (۵) قابل محاسبه است [۲۱]:

$$\varepsilon_{\min} = 0.4 + 0.1 \tan \beta_{\max} \quad (۵)$$

در این تحقیق از نمونه های مسی با سطح مقطع مستطیل استفاده گردید. ابتدا فرآیند اکستروژن پیچشی طی یک پاس بر روی نمونه مسی انجام گرفت. در گام بعدی قالب اکستروژن مستقیم در انتهای کانال خروجی قالب اکستروژن پیچشی سوار شد و سپس فرآیند تغییر شکل پلاستیک روی نمونه صورت گرفت. بررسی خواص مکانیکی نمونه های بدست آمده در هر مرحله از انجام فرآیند مثل استحکام تسلیم، سختی و رسانایی الکتریکی و مقایسه آنها با هم از اهداف تحقیق می باشد. در فرآیند ترکیبی مورد استفاده سیستم های لغزشی متفاوتی از نوع برشی به دلیل اعمال کرنش های شعاعی و طولی در نمونه فعال می شود و خواص مکانیکی قابل قبولی در مس ایجاد می کند.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- ماده مورد آزمایش

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

جدول ۱- ترکیب شیمیایی مس مورد مطالعه

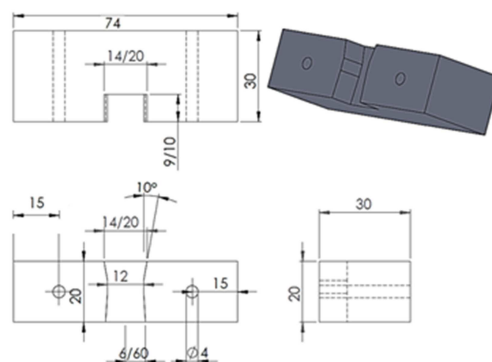
عنصر	Mg	Cl	S	Ca	Sn	Sb	Cu
درصد وزنی	۰/۴۷	۰/۰۲۶	۰/۰۲۵	۰/۰۲	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷	۹۹/۴۴

به منظور تهیه نمونه های متناسب با هدف تحقیق، در ابتدا میلگردهای مسی با قطر ۲۵ میلی متر و طول تقریبی ۱ متر تهیه گردید. سپس به منظور تهیه نمونه هایی متناسب با ابعاد و طول کانال قالب، میلگرد مسی تحت عملیات فرزکاری (رو تراشی و بغل تراشی) قرار گرفته و مقطع آن به مستطیلی با ابعاد $18_{-0.2}\text{ mm} \times 14_{-0.2}\text{ mm}$ تبدیل شد. در نهایت ماده مسی ماشین کاری شده تحت عملیات برشکاری قرار گرفت و نمونه هایی به طول تقریبی ۴ سانتی متر از آن جدا گردید. پس از برشکاری، نمونه های مسی تهیه شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت تحت چرخه آنیل کاری قرار گرفتند و در کوره سرد شدند.

۲-۲- طراحی و ساخت قالب و سنبه

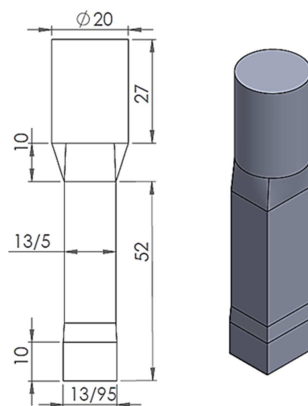
در پژوهش حاضر جهت انجام فرآیند از یک قالب چند قسمتی استفاده شده است. شکل ۲ طرح واره کلی قالب طراحی شده را نشان

مختلف قالب مطابق نقشه ارائه شده در شکل ۳ ماشین کاری گردید.



شکل ۳- نقشه نیم بلوک قالب اکستروژن مستقیم

جهت افزایش مقاومت سایشی و سختی، بلوکهای ماشین کاری شده در دمای ۹۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه تحت عملیات آنیل انحلالی قرار گرفت و سپس در محیط روغن سرد شد. عملیات بازپخت در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۵ دقیقه انجام گرفت. پس از انجام عملیات حرارتی سختی بلوکهای قالب اکستروژن مستقیم تقریباً برابر ۵۰ راکول C اندازه گیری شد. از دو پین راهنما با قطر ۴ میلی متر به منظور موقعیت دهی دقیق بلوکها استفاده گردید. سنبه طراحی شده به منظور انجام فرآیند از دو قسمت تشکیل شده است (شکل ۴). قسمت اول که درون نگهدارنده سنبه (دستگاه پرس) قرار می گیرد و توسط چهار پیچ در محل خود ثابت می شود. قسمت دوم که درون قالب قرار می گیرد و از طریق آن به نمونه نیرو وارد می شود. با توجه به ابعاد کانال ورودی قالب که برابر $14\text{ mm} \times 18\text{ mm}$ می باشد، ابعاد سطح مقطع سنبه جهت جلوگیری از جام شدن سنبه در قالب برابر $13.95\text{ mm} \times 17.95\text{ mm}$ در نظر گرفته شد. سنبه از فولاد سرد کار 1.2080 توسط عملیات ماشین کاری تهیه گردید و در نهایت تحت عملیات حرارتی قرار گرفت و سختی حدود ۵۰ راکول C در آن ایجاد گردید.



شکل ۴- نقشه سنبه قالب

انجام گرفت. برای انجام فرآیند فوق از دستگاه پرس GOTECH مدل GT-7001-LS100 با ظرفیت ۱۰۰ تن استفاده گردید. قبل از انجام آزمایش، سطوح نمونه های مسی به همراه سنبه و همچنین کانال ورودی قالب توسط فوم صابون روان کاری شد. در این تحقیق ابتدا فرآیند اکستروژن پیچشی طی یک پاس بر روی نمونه مسی بدون اعمال فشار عقبی^۱ انجام گرفت (نمونه TE). در گام بعدی قالب اکستروژن مستقیم^۲ (DE) در انتهای کانال خروجی قالب اکستروژن پیچشی جهت تأمین فشار عقبی سوار شده است و سپس فرآیند تغییر شکل پلاستیک روی نمونه صورت گرفت (نمونه TE+DE). شکل ۵ تصویر قالب را همراه با ماشین پرس نشان می دهد.



شکل ۵- نحوه استقرار قالب زیر دستگاه پرس

شکل های ۶- الف تا ج تصویر نمونه های تغییر شکل یافته را تحت انجام فرآیندهای فوق نشان می دهد. شکل های ۶- الف و ب مربوط به نمونه های تولید شده در حالتی است که در حین انجام فرآیند، فشار عقبی وجود ندارد و کانال تنگ شونده در قسمت خروجی قالب اکستروژن پیچشی تعبیه نشده است (نمونه های TE). همانطور که مشاهده می شود شکل هندسی این نمونه ها کمی متفاوت از نمونه های اولیه است و سطح مقطع نمونه های بدست آمده از شکل مستطیل خارج شده است. شکل ۶- ج مربوط به نمونه های تغییر شکل یافته درون قالب اکستروژن پیچشی است که کانال خروجی آن با تعبیه قالب های اکستروژن مستقیم تنگ شده است (نمونه های TE+DE). بر خلاف نمونه های TE این نوع از نمونه ها در اثر اعمال فشار عقبی به واسطه اکستروژن شدن در کانال خروجی، شکل سطح مقطع آنها چندان تغییر نکرده است و به حالت مستطیل باقی مانده است. به عبارت دیگر بواسطه اعمال فشار عقبی گوشه های خالی که در نمونه های TE مشاهده می شود در نمونه های TE+DE دیده نمی شود.

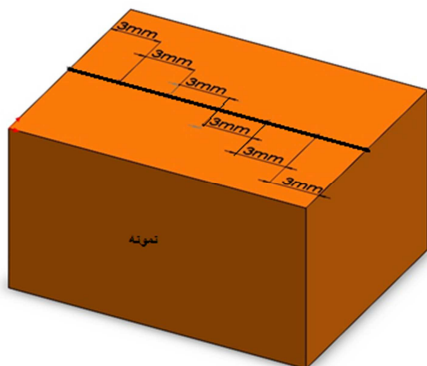
۳-۲- روش انجام آزمایش

فرآیند تغییر شکل با سرعت ۰/۵ میلی متر بر ثانیه در دمای اتاق

¹ Back Pressure

² Direct Extrusion

گذرنده از مرکز نمونه‌ها مطابق شکل ۷ بدست آمده و نتایج بدست آمده به عنوان مقادیر میکرو سختی با توجه به استاندارد ASTM E384-11 گزارش گردید. برای اندازه‌گیری سختی نقاط شروع و انتهای الگوی نشان داده از سطوح مجاور نمونه استفاده گردید. آزمایش تحت بار ۱ کیلوگرم به مدت ۱۰ ثانیه برای هر یک از نقاط، در سه نمونه مشابه صورت گرفت و میانگین مقادیر سختی برای نقاط مشابه به عنوان مقدار سختی آن نقطه گزارش گردید.



شکل ۷- طرح واره الگوی نقاط مربوط به انجام آزمون سختی سنجی

۲-۵- بررسی ریز ساختار نمونه‌های تولید شده

به منظور بررسی میکروسکوپی ریز ساختار نمونه‌های مسی تغییر شکل یافته توسط میکروسکوپ نوری، یک مقطع عرضی (مقطعی که عمود بر محور اکستروژن می‌باشد) از هر نمونه تهیه شد و مانت گردید. نمونه‌ها پس از عملیات سنباده زنی و صیقل کاری^۳ حکاکی شدند. در نهایت نمونه‌ها در محلول محتوی ۲ گرم دی کرومات پتاسیم ($K_2Cr_2O_7$)، ۴ میلی‌لیتر محلول اشباع کلرید سدیم (NaCl) و ۸ میلی‌لیتر اسید سولفوریک (H_2SO_4) حکاکی گردیدند. ریز ساختار ماده توسط میکروسکوپ نوری متالوگرافی ساخت شرکت صایران و میکروسکوپ FE-SEM مدل Hitachi S4160 (Cold Field Emission) بررسی گردید.

۲-۶- اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سطحی نمونه‌های

تولید شده

از دستگاه پروپ چهار نقطه‌ای ساخت شرکت صنعت نما جوان مدل FPP-SN-555 برای تعیین مقاومت الکتریکی سطحی نمونه‌ها استفاده شده است. با قرار دادن پروپ‌های دستگاه روی نمونه و گذر دادن جریان الکتریکی از پروپ‌های خارجی دستگاه و اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل الکتریکی بین پروپ‌های داخلی، امکان اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سطحی در نمونه فراهم می‌شود. با توجه به قابلیت دستگاه، جریان الکتریکی در یک بازه مشخص از ۰ تا ۰/۱۴ میلی‌آمپر با فاصله زمانی ۰/۵ ثانیه توسط پروپ‌های خارجی اعمال می‌شود و اختلاف پتانسیل الکتریکی توسط پروپ‌های داخلی متصل به ولت‌متر با فاصله ۵ میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شود. سپس با استفاده از قانون اهم



الف



ب



ج

شکل ۶- نمونه‌های مسی پس از اعمال فرآیند تغییر شکل (الف و ب) نمونه‌های TE (ج) نمونه‌های TE+DE

۲-۴- بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های تولید شده

در این تحقیق خواص مکانیکی شامل استحکام و سختی نمونه‌های تحت فرآیند اکستروژن پیچشی (TE) و نمونه‌های تحت فرآیند ترکیبی اکستروژن پیچشی و مستقیم (TE+DE) مورد سنجش قرار گرفتند و با نمونه‌های اولیه مقایسه شدند.

به منظور بررسی استحکام مواد تولید شده، از آزمون فشار در دمای محیط استفاده گردید. آزمون فشار یک روش مناسب برای اندازه‌گیری تنش تسلیم و بررسی رفتار ماده در نرخ‌های کرنشی بالا می‌باشد. در این آزمایش بی‌ثباتی در اثر گلوئی شدن نمونه (بر خلاف آزمون کشش) به وجود نمی‌آید [۲۲]. برای انجام آزمایش از دستگاه پرس GOTECH مدل GT-7001-LS100 بهره گرفته شد. آزمون فشار مطابق استاندارد ASTM-E9 با سرعت ۰/۳ میلی‌متر بر ثانیه در دمای اتاق انجام گرفت. در هر آزمایش طول نمونه‌ها حداکثر ۶۰ درصد کاهش یافت. به منظور کاهش اثر اصطکاک بین فک دستگاه و سطح نمونه از پلاستیک تفلون و فوم صابون استفاده شد.

آزمایش سختی به روش ویکرز^۱ توسط دستگاه سختی سنج ویلسون-ولپرت^۲ ۹۳۰N انجام شد. به منظور اندازه‌گیری سختی نمونه‌های تولید شده، ابتدا یک مقطع عرضی (عمود بر محور اکستروژن) از نمونه‌های تولید شده تهیه گردید. مقادیر مربوط به سختی در سطح عمود بر محور اکستروژن در فواصل ۳ میلی‌متری در امتداد محور طولی

^۱ Vickers

^۲ Wilson-wolpert

^۳ Polishing

(رابطه ۶) مقاومت الکتریکی سطحی نمونه‌ها با دقت ۰/۰۱ اهم اندازه‌گیری می‌گردد.

$$R = \frac{V}{I} \quad (۶)$$

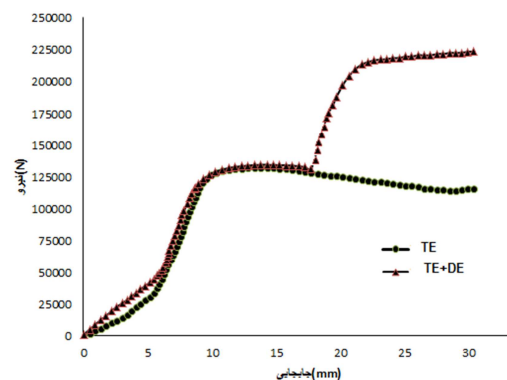
۳- نتایج و بحث

۳-۱- نمودار نیرو- جابجایی فرایندهای انجام شده

شکل ۸ نمودار تغییرات نیرو بر حسب جابه‌جایی سنبه را در حین انجام فرآیند اکستروژن پیچشی در دو حالت مختلف (بدون اعمال فشار عقبی و با اعمال فشار عقبی به واسطهٔ تنگ شدن کانال خروجی) نمایش می‌دهد.

در خصوص نمونه تحت فرآیند اکستروژن پیچشی بدون اعمال فشار عقبی (فرآیند TE)، نیرو طی دو مرحله به صورت خطی افزایش می‌یابد. در مرحله اول نیرو با یک شیب نسبتاً زیاد به ازای جابجایی سنبه به میزان ۵/۵ میلی‌متر از صفر به ۳۳/۸ کیلو نیوتن رسیده و در مرحله بعدی نیرو با شیب خیلی بیشتر نسبت به مرحله اول تا مقدار ۱۲۳ کیلو نیوتن افزایش می‌یابد. با ادامهٔ انجام فرآیند به ازای جابجایی سنبه به میزان ۱۶ میلی‌متر، مقدار نیرو با شیب خیلی کم افزایش یافته و ثابت باقی می‌ماند. در نهایت با پیشروی سنبه از ۱۶ میلی‌متر تا انتهای فرآیند شکل‌دهی (۳۱ میلی‌متر) نیرو به دلیل کم شدن اصطکاک چسبیده با یک شیب کم کاهش می‌یابد. حداکثر نیروی ثبت شده به منظور انجام فرآیند در این حالت در حدود ۱۳۲/۵ کیلو نیوتن است.

در خصوص نمونه تحت فرآیند اکستروژن پیچشی و مستقیم (فرآیند TE+DE)، روند تغییرات نیرو به ازای جابجایی سنبه تا حدود تقریبی ۱۸ میلی‌متر، تقریباً مشابه فرآیند قبلی می‌باشد. با پیشروی بیشتر سنبه از ۱۸ میلی‌متر، نیرو شدیداً به صورت خطی افزایش می‌یابد. این افزایش شدید به ازای جابجایی سنبه از حدود ۱۸ میلی‌متر تا ۲۱ میلی‌متر است. افزایش نسبتاً زیاد نیرو را می‌توان به قرارگیری نمونه درون قسمت شیب‌پوره مانند کانال خروجی نسبت داد. حداکثر نیروی لازم جهت شکل‌دهی نمونه‌های مسی در این حالت حدود ۲۲۳/۸ کیلو نیوتن به ثبت رسیده است که نسبت به حالت قبل در حدود ۶۸ درصد افزایش یافته است.

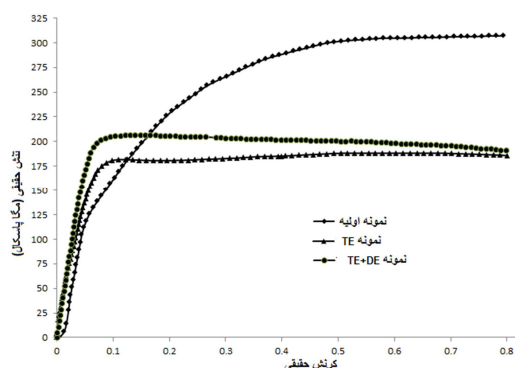


شکل ۸- تغییرات نیرو بر حسب جابجایی سنبه در حین انجام

فرآیند TE و فرآیند TE+DE

۳-۲- استحکام تسلیم و سختی نمونه‌های اولیه و تولید شده

شکل ۹ نمودارهای تنش- کرنش حقیقی حاصل از آزمون فشار را برای نمونه‌های مسی اولیه و نمونه‌های تولید شده از فرآیند TE و فرآیند ترکیبی TE+DE نشان می‌دهد. بررسی نمودار حاصل از آزمون فشار برای نمونه‌های مسی اولیه نشان می‌دهد که نقطهٔ تسلیم برای این نمونه‌ها در سطح پایین‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها اتفاق می‌افتد، سپس حالت کارسختی در ماده بوجود می‌آید به این معنی که ماده وارد مرحلهٔ تغییر شکل پلاستیک می‌گردد، ساختار درونی فلز شروع به مقاومت در برابر این نوع تغییر شکل می‌کند؛ در نتیجه برای ادامه تغییر شکل، باید مقدار تنش بیشتری اعمال نمود و استحکام تدریجاً افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه در خصوص نمودارهای تنش- کرنش نمونه‌های مسی اولیه، کارسختی بسیار زیاد آنها می‌باشد.



شکل ۹- منحنی‌های تنش- کرنش حقیقی برای نمونه‌های مسی اولیه، نمونه‌های TE و نمونه‌های TE+DE

بررسی نمودارهای حاصل از آزمون فشار روی نمونه‌های مسی که تحت فرآیند اکستروژن پیچشی بدون اعمال فشار عقبی قرار گرفته‌اند (نمونه‌های TE)، نشان می‌دهد که استحکام تسلیم آنها در مقایسه با نمونه‌های مسی اولیه به شدت افزایش یافته است، در حالی که کارسختی آنها به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

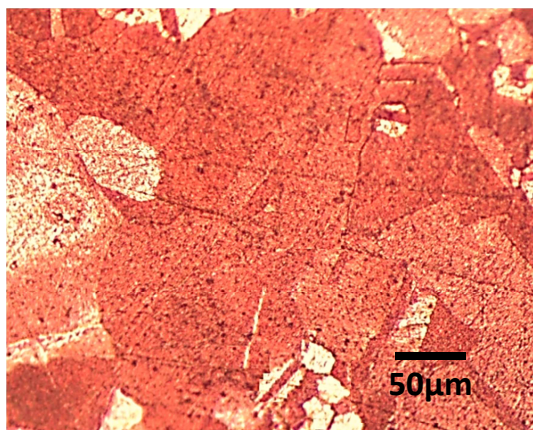
نتایج حاصل از آزمون فشار روی نمونه‌های مسی که تحت فرآیند اکستروژن پیچشی و مستقیم (نمونه‌های TE+DE) قرار گرفته‌اند نیز نشان می‌دهد که با اعمال اکستروژن مستقیم روی نمونه‌های مسی پس از فرآیند اکستروژن پیچشی، استحکام تسلیم آنها باز هم افزایش یافته است و همچنان کاهش قابل ملاحظهٔ کارسختی نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های اولیه مشاهده می‌شود.

بر اساس نمودارهای حاصل از آزمون فشار، استحکام تسلیم نمونه‌های مسی اولیه ۱۱۵ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. با انجام یک پاس فرآیند اکستروژن پیچشی که حداکثر منجر به اعمال کرنشی معادل ۱/۳۸ درون نمونه می‌شود، استحکام تسلیم فشاری آن در حدود ۱۶۷ مگاپاسکال اندازه‌گیری گردید. با اعمال کرنش ثانویه به واسطهٔ انجام اکستروژن مستقیم پس از فرآیند اکستروژن پیچشی و به تبع آن تغییر صفحات برش، استحکام تسلیم ماده در این حالت هم افزایش نشان داده و مقدار آن ۱۹۲ مگاپاسکال تعیین گردیده است.

نتایج آزمون فشار نشان می‌دهد که کارسختی نمونه‌های TE و

۳-۳- ریز ساختار نمونه‌های اولیه و تولید شده

شکل ۱۱ تصویر میکروسکوپ نوری از سطح عمود بر راستای طولی نمونه‌های اولیه را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود ساختار کریستالی نمونه مسی اولیه را دانه‌های درشت متعارف^۱ تشکیل می‌دهد. با استفاده از روش برخورد خطی^۲ و توسط نرم افزار ImageJ متوسط اندازه دانه در این حالت اندازه گیری گردید. برای نمونه‌های مسی اولیه، متوسط اندازه دانه در حدود ۹۰ میکرومتر تعیین شد.



شکل ۱۱- میکروساختار نوری گرفته شده از نمونه‌های مسی اولیه

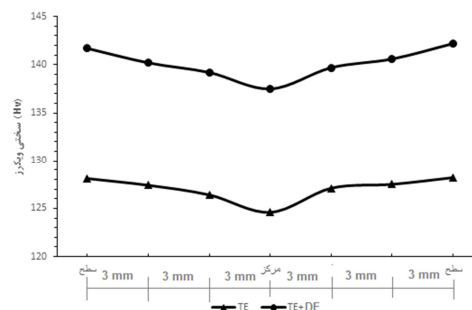
شکل‌های ۱۲- الف و ب به ترتیب تصویر FE-SEM از سطح عمود بر محور اکستروژن نمونه‌های TE و TE+DE را نشان می‌دهد. با اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید روی ماده اولیه، نوع ساختار و اندازه دانه تغییر می‌کند. با اعمال فرآیند اکستروژن پیچشی روی ماده، یک ساختار کریستالی از نوع لایه‌ای کشیده^۳ (ELS) درون نمونه‌های TE بوجود آمده است و اندازه دانه که متأثر از اعمال کرنش برشی ساده هنگام عبور ماده از درون قالب می‌باشد، به شدت کاهش یافته است. متوسط اندازه دانه در این حالت حدود ۱ میکرومتر اندازه‌گیری شده است، هر چند که در ساختار کریستالی به وجود آمده دانه‌های کمتر از ۱ میکرومتر و بیشتر از آن نیز قابل مشاهده می‌باشد. این موضوع یک ساختار کریستالی غیرهمگن را در نمونه‌های TE تأیید می‌کند.

در خصوص نمونه‌های TE+DE، با اعمال کرنش‌های شعاعی به ماده در کانال خروجی، ساختار لایه‌ای کشیده در نمونه تحت اکستروژن پیچشی، تغییر حالت داده و یک ساختار کریستالی ریز دانه و نسبتاً همگن حاصل شده است. متوسط اندازه دانه در این حالت حدود ۹۰۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید.

مکانیزم ریز شدن دانه‌ها طی فرآیند را می‌توان به مکانیزم تکثیر و انتقال نابجایی‌ها که یکی از متداول ترین مکانیزم‌های ارائه شده برای موادی مثل مس و آلومینیوم که فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک

نمونه‌های TE+DE در مقایسه با نمونه‌های اولیه بسیار کمتر است. علت این مسئله را می‌توان به حجم بالای نابجایی‌ها که در اثر اعمال کرنش های پلاستیک شدید درون ساختار کریستالی آنها ایجاد شده مرتبط دانست. با قرار گیری نمونه‌های TE و TE+DE تحت آزمون فشار و اعمال کار سرد مکانیکی، با توجه به انباشته شدن حجم بالایی از نابجایی‌ها درون ساختار کریستالی ماده طی فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید و عدم توانایی فرآیند (آزمون فشار) در تولید نابجایی‌های جدید، نمونه‌های تولید شده رفتار کارسختی چندانی از خود نشان نمی‌دهند. لذا با هر چه بیشتر شدن ذخیره کرنش پلاستیک درون مواد، رفتار کارسختی ماده کاهش می‌یابد. کاهش کارسختی موادی که تحت فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفته‌اند در نتایج کار تحقیقی بعضی از محققان در این حوزه گزارش شده است [۲۸-۲۶].

سختی نمونه‌های مسی اولیه در تمامی نقاط الگو تقریباً یکسان و میانگین آنها برابر ۸۰/۱ ویکرز بدست آمده است. شکل ۱۰ مقادیر سختی نمونه‌های TE و TE+DE را در فواصل ۳ میلی‌متری از سطح نمونه را مطابق الگوی سختی سنجی ارائه شده در شکل ۷ نشان می‌دهد. همانطور که در شکل هم مشاهده می‌شود، پس از اعمال فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید اکستروژن پیچشی بر روی نمونه‌های اولیه، مقادیر سختی به شدت افزایش یافته به طوری که روند متوسط افزایش سختی نسبت به نمونه‌های اولیه در حدود ۶۰ درصد اندازه‌گیری گردید. میانگین مقادیر سختی برای نمونه‌های TE در حدود ۱۲۷/۱ ویکرز بدست آمد. با اعمال کرنش‌های پلاستیک بیشتر طی اعمال فرآیند تغییر شکل ثانویه (اکستروژن مستقیم بعد از اعمال فرآیند اکستروژن پیچشی) و تغییر نوع کرنش اعمالی، مقادیر سختی نمونه‌ها در نقاط الگو باز هم افزایش یافت. بطوریکه میانگین آن برای نمونه‌های TE+DE در حدود ۱۴۰/۲ ویکرز بدست آمد که افزایشی حدود ۱۰ درصد نسبت به نمونه‌های TE نشان می‌دهد.



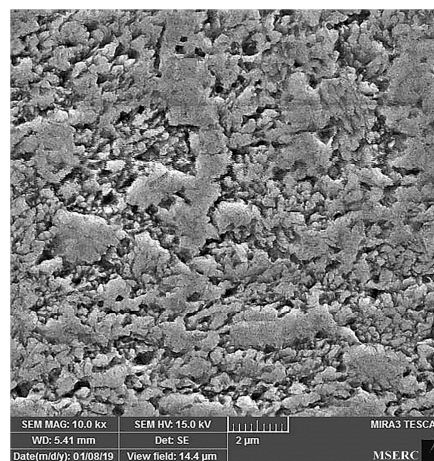
شکل ۱۰- مقادیر سختی نمونه‌های TE و TE+DE به ازای فواصل ۳ میلی‌متری روی سطح نمونه مطابق الگوی ارائه شده در شکل ۷

نکته قابل توجه در نمودارهای سختی نمونه‌های TE و TE+DE این است که مقادیر سختی از مرکز تا سطح قطعه افزایش می‌یابد. دلیل این اختلاف مربوط به مقادیر کرنش ذخیره شده در ماده است به طوری که کمترین کرنش انباشته شده در نقاط واقع در مرکز نمونه رخ می‌دهد و هرچه نقاط به سطح نمونه نزدیک می‌شوند کرنش اعمالی به آنها با توجه به ماهیت فرآیند افزایش می‌یابد.

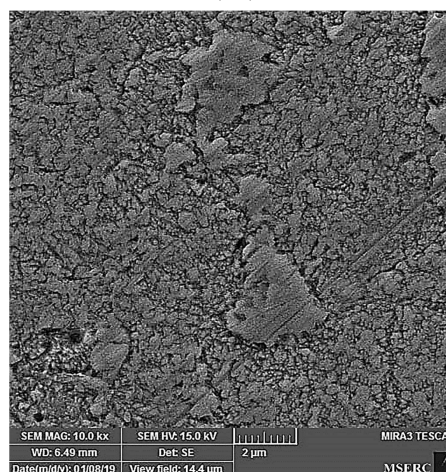
¹ Conventional coarse-grains

² linear Intercept

³ Elongated laminar substructures



(الف)



(ب)

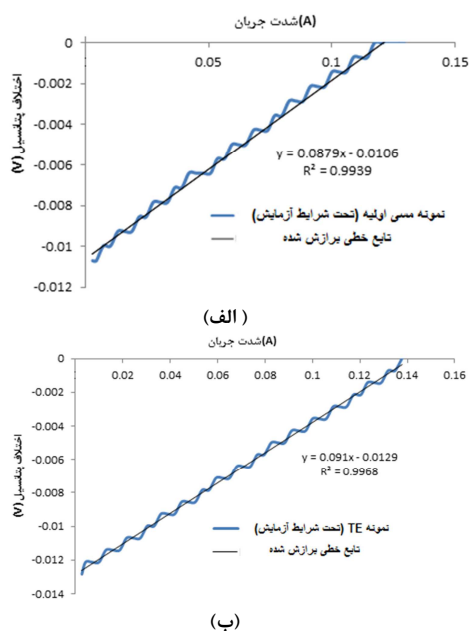
شکل ۱۲- تصویر FE-SEM از ریز ساختار مس تولید شده پس از فرآیند الف (TE) ب (TE+DE)

شدید روی آنها صورت می گیرد، مرتبط دانست. بر اساس این مکانیزم با توجه به حضور و توزیع تصادفی نایجایی‌ها در ماده اولیه، با اعمال تغییر شکل پلاستیک به ماده، ابتدا باندهای تغییر شکل که شامل چگالی بالایی از نایجایی‌ها می‌باشند، تشکیل می‌شود. نایجایی‌های تولید شده کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و دانه‌های فرعی با مرز دانه‌هایی با زاویه کوچک^۱ (LAGBs) را تشکیل می‌دهند. افزایش شدید نایجایی‌ها به واسطه اعمال فرآیند اکستروژن پیچشی روی فلز مس در تحقیق رنجیر بهادری و همکاران [۲۴] گزارش شده است. ایشان مقدار چگالی نایجایی‌ها به ازای اعمال یک پاس فرآیند اکستروژن پیچشی به فلز مس را در حدود $14 \times 10^{14} m^{-2}$ تعیین کردند. افزایش چگالی نایجایی‌ها موجب افزایش انرژی سیستم می‌گردد. از طرفی هنگامی که دانه‌ها تحت اعمال کرنش برشی قرار می‌گیرند، مرز دانه‌ها در جهت صفحه‌های لغزشی کشیده می‌شوند و باعث تشکیل دانه‌های کشیده در شبکه کریستالی ماده می‌شوند. نایجایی‌های تولید شده به منظور کاهش انرژی سیستم، آرایش خود را تغییر داده (دچار چرخش و لغزش

خواهند شد) و با تداوم تغییر شکل، دانه‌های کشیده از بین رفته و زیردانه‌ها^۲ تشکیل می‌گردند. عوامل مذکور شرایط را برای تولید ساختار فوق ریزدانه با مرز دانه‌هایی با زاویه بزرگ^۳ (HAGBs) فراهم می‌آورد. بهبود خواص مکانیکی طی فرآیندهای SPD را می‌توان متأثر از دگرگونی ساختاری و کاهش اندازه دانه دانست. بر اساس مطالعات اولیه انجام شده بر روی تغییرات استحکام و سختی فلز مس [۲۳-۲۵] که تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفته‌اند مشخص شده که دو عامل به صورت همزمان و مشترک باعث بهبود خواص مکانیکی آنها می‌شوند. عامل اول، استحکام بخشی از طریق افزایش چگالی نایجایی‌ها است که در حین فرآیندهای SPD بدلیل کرنش‌های پلاستیک بسیار زیاد در ماده ایجاد شده و عامل دوم تغییرات اندازه دانه و شکل‌گیری مرز دانه‌های بی‌شمار است به طوری که با کوچک شدن اندازه دانه، استحکام ماده افزایش می‌یابد.

۳-۴- مقاومت الکتریکی نمونه‌های اولیه و تولید شده

شکل‌های ۱۳- الف، ب و ج به ترتیب نمودارهای V-I حاصل از آزمایش پروب چهار نقطه‌ای روی نمونه‌های مسی اولیه، TE+DE و TE را نشان می‌دهد. در این آزمایش با قرار دادن پروب‌های دستگاه روی سطح نمونه و گذر دادن جریان الکتریکی از پروب‌های خارجی دستگاه و اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل الکتریکی بین پروب‌های داخلی، نمودارهای V-I مربوط به هر نمونه بدست آمده است. به منظور تعیین مقاومت الکتریکی سطحی نمونه‌ها، تابعی بر اساس رگرسیون خطی، از نمودارهای V-I بدست آمده، حاصل شده است. با توجه به رابطه (۶)، ضریب زاویه تابع خطی بدست آمده، به عنوان مقدار مقاومت سطحی نمونه‌ها ثبت گردیده است.



² Subgrains

³ High angle grain boundaries

¹ low angle grain boundaries

مکانیکی مطلوب‌تر در نمونه‌های مسی دست یافت. برای این منظور نمونه‌های اولیه از جنس مس متناسب با قالب مورد نظر تهیه شد و پس از طی مراحل آنیل‌کاری، جهت انجام فرآیند شکل‌دهی آماده گردید. نمونه‌ها تحت فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید از نوع اکستروژن پیچشی در دو حالت بدون اعمال فشار عقبی و با اعمال فشار عقبی، قرار گرفتند. جهت اعمال فشار عقبی از یک فرآیند اکستروژن مستقیم با نسبت اکستروژن ۱/۱۶۶ بعد از فرآیند اکستروژن پیچشی بهره گرفته شد. نتایج ذیل در خصوص نمونه‌های بدست آمده حاصل گردید:

■ بر خلاف نمونه‌های TE، نمونه‌های TE+DE در اثر اعمال فشار عقبی به واسطه اکستروژن شدن در کانال خروجی، شکل سطح مقطع آنها چندان تغییر نمی‌کند و به حالت مستطیل باقی می‌ماند. به عبارت دیگر بواسطه اعمال فشار عقبی گوشه‌های خالی که در نمونه‌های TE مشاهده می‌شود در نمونه‌های TE+DE دیده نمی‌شود.

■ در حین انجام فرآیند اکستروژن پیچشی بدون اعمال فشار عقبی، روند تغییرات نیرو به ازای جابجایی سنبه طی دو مرحله به صورت تقریباً خطی افزایشی است و پس از رسیدن به مقدار بیشینه ۱۳۲/۵ کیلو نیوتن، با شیب خیلی ملایم کاهش می‌یابد.

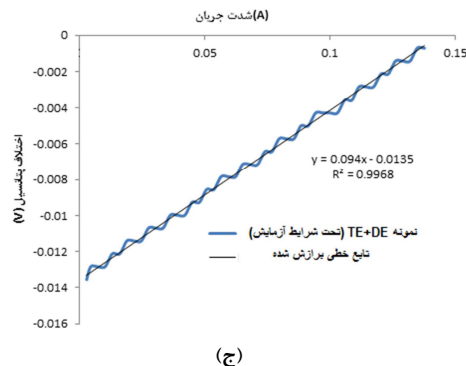
■ در حین انجام فرآیند اکستروژن پیچشی با اعمال فشار عقبی، روند تغییرات نیرو به ازای جابجایی سنبه به میزان تقریبی ۶۰ درصد دامنه حرکتی سنبه تقریباً مشابه فرآیند قبلی است. با پیشروی بیشتر سنبه از این حد، نیرو شدیداً به صورت خطی افزایش می‌یابد. افزایش نسبتاً زیاد نیرو را می‌توان به قرارگیری نمونه درون قسمت شیپوره مانند کانال خروجی نسبت داد. حداکثر نیروی لازم جهت شکل‌دهی نمونه‌های مسی در این حالت، در حدود ۲۲۳/۸ کیلو نیوتن است که نسبت به حالت قبلی در حدود ۶۸ درصد افزایش نشان می‌دهد.

■ بر اساس نمودارهای تنش- کرنش حاصل از آزمایش فشار بر روی نمونه‌های مسی اولیه، نمونه‌های TE و نمونه‌های TE+DE استحکام تسلیم فشاری بدست آمده به ترتیب برابر ۱۶۷، ۱۹۲ و ۱۹۲ مگاپاسکال تعیین گردید.

■ میانگین مقادیر سختی برای نمونه‌های مسی اولیه، نمونه‌های TE و نمونه‌های TE+DE بر اساس الگوی سختی سنجی ارائه شده در شکل ۷ به ترتیب برابر ۸۰/۱، ۱۲۷/۱ و ۱۴۰/۲ ویکرز تعیین شد.

■ با قرارگیری نمونه‌های مسی تحت فرآیند اکستروژن پیچشی و اعمال کرنش‌های کمینه معادل ۰/۵۲ به نقاط واقع در مرکز نمونه تا کرنش‌های ماکزیمم معادل ۱/۳۸ به نقاط پیرامونی نمونه، ساختار کریستالی آن به شدت دگرگون شده و متوسط اندازه دانه تحت تأثیر کرنش‌های اعمالی از ۹۰ میکرومتر (در نمونه‌های اولیه) به ۱ میکرومتر کاهش یافته است. با اعمال کرنش‌های پلاستیک ثانویه به واسطه قرارگیری نمونه درون کانال تنگ شونده خروجی و رسیدن مقادیر کرنش کمینه و بیشینه به ۰/۸۳ و ۱/۶۹، ساختار لایه‌ای کشیده در نمونه TE تغییر حالت داده و یک ساختار کریستالی نسبتاً همگن همراه با طیف گسترده‌ای از دانه‌های بسیار ریز در محدوده چند صد نانومتر حاصل شد. متوسط اندازه دانه در این حالت ۹۰۰ نانومتر تعیین گردید.

■ با اعمال فرآیند ترکیبی اکستروژن پیچشی و مستقیم بر روی فلز مس، مقدار مقاومت الکتریکی سطحی آن نسبت به نمونه اولیه ۷



شکل ۱۳- نمودارهای V-I نمونه‌های الف) مسی اولیه، ب) TE و ج) TE+DE

همان طور که مشاهده می‌شود مقاومت الکتریکی سطحی برای نمونه‌های مسی اولیه، نمونه‌های TE و TE+DE به ترتیب برابر ۰/۰۸۷۹، ۰/۰۹۱ و ۰/۰۹۴ اندازه‌گیری شده است. با توجه به مقادیر بدست آمده، کمترین مقاومت الکتریکی سطحی مربوط به نمونه مسی اولیه و بیشترین مقدار مربوط به نمونه TE+DE است. به بیان دیگر نمونه مسی اولیه در مقایسه با دیگر نمونه‌ها مقاومت کمتری را نسبت به عبور جریان از خود نشان می‌دهد. به همین ترتیب نمونه TE در مقایسه با نمونه TE+DE مقاومت کمتری را نسبت به عبور جریان از خود نشان می‌دهد. چنین به نظر می‌رسد که با اعمال هر چه بیشتر کرنش‌های پلاستیک به فلز مس مقدار مقاومت الکتریکی سطحی آن افزایش می‌یابد. از آنجایی که مقاومت الکتریکی با رسانایی الکتریکی نسبت عکس دارد تلویحاً می‌توان نتیجه گرفت که رسانایی الکتریکی فلز مس با مقدار کرنش پلاستیک ذخیره شده طی فرآیند، نسبت عکس داشته به طوری که با اعمال هر چه بیشتر کرنش پلاستیک طی فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید و اکستروژن مستقیم به نمونه مسی رسانایی الکتریکی آن نیز کاهش می‌یابد. این عامل را می‌توان به ساختار کریستالی حاصله پس از اعمال فرآیندهای تغییر شکل اکستروژن پیچشی و مستقیم روی ماده نسبت داد. به طور کلی با اعمال کرنش‌های پلاستیک شدید، ساختار کریستالی ماده ریز شده و تعداد بی‌شماری مرزدانه به زاویه بزرگ حاصل می‌شود. مرزدانه‌های متعدد ایجاد شده به دلیل کوتاه کردن مسیر حرکت آزاد الکترون‌ها موجب افزایش مقاومت الکتریکی می‌شوند. با توجه به اعمال کرنش‌های پلاستیک بیشتر به نمونه TE+DE در مقایسه با نمونه‌های دیگر و ریزتر شدن دانه‌ها در ساختار کریستالی ماده، مقاومت الکتریکی سطحی آن نیز در مقایسه با دو نمونه دیگر از مقدار بیشتری برخوردار بوده و به تبع آن رسانایی الکتریکی آن نیز کمتر می‌باشد. نتایج تقریباً مشابهی در بررسی‌های صورت گرفته بر رسانایی الکتریکی مس خالص تجاری با دانه‌های بسیار ریز، توسط محققان دیگر گزارش شده است [۳۰، ۲۹، ۲۶].

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر سعی شد با بهره‌گیری از فعال‌سازی مسیرهای مختلف کرنشی بواسطه فرآیندهایی که بر روی مس خالص تجاری صورت گرفت، به ساختارهای کریستالی مناسب و به تبع آن خواص

درصد افزایش یافته است. این مقدار افزایش در مقاومت الکتریکی ماده که بالطبع به همین مقدار کاهش رسانایی الکتریکی ماده را به دنبال دارد، در مقایسه با افزایش سایر خواص مکانیکی مثل استحکام و سختی چندان قابل ملاحظه نیست.

۵- مراجع

- [17] Beygelzimer Y., Orlov D. and Varyukhin V., A New Severe Plastic Deformation Method: Twist Extrusion. *The Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 23, pp. 297-304, 2002.
- [18] Kulagin R., Latypov M. I., Kim H. S., Varyukhin V., and Beygelzimer Y., Cross Flow During Twist Extrusion: Theory, Experiment, and Application. *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A*, Vol. 44A, pp. 3211-3220, 2013.
- [19] Reshetov A., Kulagin R., Korshunov A. and Beygelzimer Y., The Occurrence of Ideal Plastic State in CP Titanium Processed by Twist Extrusion. *Adv. Eng. Mater.*, Vol. 17, pp. 890-899, 2017.
- [20] Latypov I. M., Yoon E. Y., Lee D. J., Kulagin R., Beygelzimer Y., Salehi M. S. and Kim H. S., Microstructure and Mechanical Properties of Copper Processed By Twist Extrusion With a Reduced Twist-Line Slope. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014.
- [21] Orlov D., Todaka Y., Umemoto M., Beygelzimer Y., Horita Z. and Tsuji N., Plastic Flow and Grain Refinement Under Simple Shear-Based Severe Plastic Deformation Processing. *Materials Science Forum*, Vols. 604-605, pp. 171-178, 2009.
- [22] Zendehehd H., Hassani A., Influence of Twist Extrusion Process on Microstructure and Mechanical Properties of 6063 Aluminum Alloy. *Materials and Design*, Vol. 37, pp. 13-18, 2012.
- [23] Beygelzimer Y., Varyukhin V., Orlov D. and Synkov S., Twist Extrusion - A Process for Strain Accumulation, pp. 37-50, TEAN, 2003.
- [24] Ranjbar Bahadori Sh., Dehghani K. and Akbari Mousavi S. A. A., Comparison of Microstructure and Mechanical Properties of Pure Copper Processed by Twist Extrusion and Equal Channel Angular Pressing. *Materials Letters*, Vol. 152, pp. 48-52, 2015.
- [25] Beygelzimer Y., Varyukhin V., Synkov S. and Orlov D., Useful properties of twist extrusion. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 503, pp. 14-17, 2009.
- [26] Habibi A., Ketabchi M. and Eskandarzadeh M., Nano-grained pure copper with high-strength and high-conductivity produced by equal channel angular rolling process. *Journal of Materials Processing Tech.*, Vol. 211, pp. 1085-1090, 2011.
- [27] Sulkowski B., Panigrahi A., Ozaltin K., Lewandowska M., Mikulowski B. and Zehetbauer M., Evolution of strength and structure during SPD processing of Ti-45Nb alloys: experiments and simulations. *Journal of Materials Science*, Vol. 49, pp. 6648-6655, 2014.
- [28] Hailong J., Ruben B., Knut M., Yanjun Li., The deformation and work hardening behaviour of a SPD processed Al-5Cu alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 697, pp. 239-248, 2017.
- [29] Hosseini S. A. and Daneshmanesh H., High strength, high conductivity ultra- fine grains commercial pure copper produced by ARB process. *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 2911-2918, 2009.
- [30] رعنائی م. ا، افسری ا. ا، احمدی بروغنی س. ی. و مشکسار م. م، بررسی عملکرد مس خالص ریزدانه به عنوان الکترود ابزار فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی. *مجله مهندسی مکانیک مدرس*. دوره ۱۴، شماره ۱، صفحه ۹۷-۱۰۵، ۱۳۹۳.
- [1] Bagherpour E., Pardis N., Reihanian M. and Ebrahimi R., An Overview on Severe Plastic Deformation: Research Status, Techniques Classification, Microstructure Evolution, and Applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 100, pp. 1647-1694, 2018.
- [2] رعنائی م. ا، بهلولی ح. و خلیلی خ.، 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. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، دوره ۴۷، شماره ۲ - شماره پیاپی ۷۹، صفحه ۳۳۳-۳۴۲، ۱۳۹۵.
- [3] Shamsborhan M. and Ebrahimi M., Production of Nanostructure Copper by Planar Twist Channel Angular Extrusion Process. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 682, pp. 552-556, 2016.
- [4] Ajayan P. M., Schadler L. S. and Braun P. V., Nanocomposite Science and Technology. *WILEY-VCH Verlag*, 2006.
- [5] Schmidt O. G., Deneke Ch., Nakamura Y., Zapf-Gottwick R., Müller C. and Jin-Phillipp N. Y., Nanotechnology- Bottom-up Meets Top-down, Part of the *Advances in Solid State Physics*, Vol. 42, pp. 231-240, 2002.
- [6] Yuwei Xun, Farghalli A. Mohamed, Refining efficiency and capability of top-down synthesis of nanocrystalline materials, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, pp: 5446-5452, 2011.
- [7] Valiev R., Islamgaliev R. K. and Tumentsev A.N., The Disclination Approach to Nanostructured SPD Materials. *Solid State Phenomena*, Vol. 87, pp. 255-264, 2002.
- [8] Yuntian T. Zhu, Terry C. Lowe, Terence G. Langdon, Performance and applications of nanostructured materials produced by severe plastic deformation, *Scripta Materialia*, Vol. 51, pp. 825-830, 2004.
- [9] Mishra A., Kad B., Gregori F. and Meyers M., Microstructural evolution in copper subjected to severe plastic deformation: Experiments and analysis. *Acta Materialia*, Vol. 55, pp. 13-28, 2007.
- [10] Saki T., Belyakof A., Kaibyshev R., Miura H. and Jonas J., Dynamic and post- dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions. *Progress in Materials Science*. Vol. 60, pp. 130-207, 2014.
- [11] Kim I., Jeong W. S., Kim J., Park K. T. and Shin D., Deformation structures of pure Ti produced by equal channel angular pressing. *Scripta Materialia*. Vol. 45, pp. 575-580, 2001.
- [12] Figueiredo R. and Langdon T., Principles of grain refinement in magnesium alloys processed by equal channel angular pressing. *Journal of Materials Science*. Vol. 44, pp. 4758-4762, 2009.
- [13] Kuhlmann-Wilsdorf D., Theory of Plastic Deformation. *Materials Science and Engineering A*, vol. 113, pp. 1-44, 1989.
- [14] Zehetbauer M. and Valiev R. Z., Nanomaterials by Severe Plastic Deformation. *WILEY-VCH*, 2002.
- [15] Weertman J. R., Hall-Petch Strengthening in Nanocrystalline Metals. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 166, pp. 161-167, 1993.
- [16] Afsari M., 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.