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

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، hamidbohlooli@birjand.ac.ir استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، kh.khalili@birjand.ac.ir دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، seyedkashi@birjand.ac.ir

حمید بهلولی خلیل خلیلی^{*} سید محمد حسین سیدکاشی

چکیدہ

در این تحقیق مس خالص تجاری در معرض یک فرآیند شکل دهی ترکیبی قرار گرفته است. برای این منظور از یک قالب اکستروژن پیچشی با کانال خروجی تنگشونده استفاده شده است. سیسترهای لغزشی متفاوتی از نوع برشی به دلیل اعمال کرنش های شعاعی و طولی در نمونه فعال میشود و خواص مکانیکی و فیزیکی آن را تحت تأثیر قرار می دهد. نتایج بدست آمده نشان می دهد که ریز ساختار فلز مس با عبور از قالب اکستروژن پیچشی دگرگون شده و اندازه دانه به شدت کاهش می ابد. ساختار دانه بندی ماده با عبور از کانال خروجی و اعمال اکستروژن مستقیم روی آن همگن تر میشود و روند کاهش اندازه های دانه ادامه شدت کاهش می ابد. ساختار دانه بندی ماده با عبور از کانال خروجی و اعمال اکستروژن مستقیم روی آن همگن تر می شود و روند کاهش اندازههای دانه ادامه پیدا می کند. با اعمال فرآیند اکستروژن پیچشی بر روی فلز مس، استحکام تسلیم فشاری آن از ۱۱۵ به ۱۶۷ مگاپاسکال و مقدار ویکرز افزایش می یابد. این مقادیر با اعمال فرآیند اکستروژن مستقیم بر ۱۹۵ مگاپاسکال و مقدار میانگین سختی از ۸۰ به ۲ با اعمال فرآیند ترکیبی اعمال فرآیند اکستروژن مستقیم بر روی نمونه به ۱۹۲ مگاپاسکال و معدار می نگین می دور در فران می دهد با اعمال فرآیند ترکیبی است. همچنین نتایج نشان می دهر ای می ای ای مگاپاسکال و مقدار می شاید همچنین نتایج نشان می دهد ایکرز افزایش می یابد. این مقادیر با اعمال فرآیند اکستروژن مستقیم بر روی نمونه به ۱۹۲ مگاپاسکال و می است. همچنین نتایج نشان می دهد ایم در ایزیش می یابد. این مقادیر با اعمال فرآیند اکستروژن مستقیم بر روی نمونه به ۱۹۲ مگاپاسکال و موند و دود ۷ درصد افزایش یا می دهد 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	Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
Kh. Khalili	Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
S. H. Seyedkashi	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 gain 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.

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^{*} 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

۱– مقدمه

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 ارائهٔ 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

^{*} نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: kh.khalili@birjand.ac.ir تاریخ دریافت: ۹۸/۰۵/۰۶ تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۸/۲۷

منظور این است که توده ماده را از ابتدا به وسیله چینش اتمها یا اجزاى نانو اندازه توليد كرد [۴]. مشكلاتى چون مواد اوليهٔ نامرغوب، زمان و هزينهٔ بالای توليد، ورود آلودگی، بوجود آمدن تخلخل در ریزساختارهای تولید شده و مشکلات اساسی در ساخت قطعات بزرگ، از معایب عمدهٔ روشهای پایین به بالا هستند[۵]. در روش های بالا به پایین، در ابتدا از یک مادهٔ حجیم با دانهبندی درشت استفاده می-شود[۶] و سپس با انجام فرایندهای خاصی، اندازهٔ دانههای آن را تا حد کوچکتر از میکرون و یا نانومتر کاهش میدهند. این روشها عمدتاً بر پایهٔ ایجاد کرنشهای پلاستیک بسیار زیاد در ماده استوار است و به روشهای تغییر شکل پلاستیک شدید' (SPD) معروف میباشند[۸و۸]. امروزه با توجه به قابلیتهای منحصر به فردی که روشهای SPD در توليد مواد فوق ريزدانه و نانوساختار به علت خواص مكانيكي فوق-العادهای که دارند و کاربرد وسیعی که در صنایع هوا- فضا، صنایع حمل و نقل خصوصاً هوایی، تجهیزات پزشکی، تأسیسات انرژی، صنایع الكترونيك و مخابرات، صنايع تسليحات دفاعي متعارف و مصنوعات ورزشی میتوانند داشته باشند، توجهٔ زیادی به آنها شده است. روش های SPD را با توجه به هندسهٔ محصول این فرآیند، میتوان به سه دسته اصلى تقسيم بندى نمود. اين سه دسته شامل تغيير شكل پلاستیک شدید توده ماده، ورقها و لولهها میباشد. فرآیندهای تغییر شكل پلاستيك شديد روشي مطمئن و شناخته شده براي رسيدن 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 مکانیزم های متعددی پیروی میکند. در این خصوص مکانیزمهای متعددی مثل مکانیزم تکثیر و انتقال نابجاییها ((MMD) [۹]، مکانیزم تقاطع باندهای برشی ریز ^۳ (IMSB) [۱۰]، مکانیزم دو قلویی[†] [۱۱] و مكانيزم تبلور مجدد ديناميكي⁶ [١٢] 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 اندازهٔ دانه یکی از روش های مهم استحکام بخشی مواد است که نسبت به سایر روشهای استحکام بخشی از اهمیت ویژهای برخوردار میباشد. در این روش می-توان همزمان به ترکیب مناسبی از استحکام وشکلپذیری دست یافت. ماده همراه میباشد. به علاوه در این روش کنترل خواص مکانیکی راحت تر میباشد. به طور کلی ارتباط بین استحکام ماده با اندازهٔ دانه از طریق رابطهٔ معروف هال-یچ³ (رابطه ۱) و به صورت زیر بیان میشود[۱۴]:

 $\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1 \over 2}$ (۱) در این رابطه σ_y تنش تسلیم، σ_0 مقاومت شبکه، b اندازهٔ دانه و

ky ثابتی است که به جنس ماده بستگی دارد (ضریب هال- پچ). یکی از فرآیندهای SPD که بر روی توده ماده صورت میگیرد، اکستروژن پیچشی^۷ (TE) است که براساس اعمال برش ساده روی ماده

(٢)

پایه ریزی شده است و یکی از موثرترین راهها برای ایجاد ساختارهای UFG و NC درون ساختار کریستالی ماده میباشد [۱۵،۱۶] . روش اکستروژن پیچشی برای اولین بار توسط بیگلزیمر[^] 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 اکسترود 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. کانال های ورودی و خروجی قالب هم به ترتیب قبل و بعد از کانال پیچشی قرار دارند که طول آنها بستگی به اندازهٔ نمونه و طول سنبه مورد



شکل ۱- طرح واره فر آیند TE

جهت انجام یک گذر فرآیند اکستروژن پیچشی، رابطهٔ (۲) بین پارامترهای دخیل در فرآیند، برقرار میباشد [۱۹٬۱۸]: م

 $tg\beta = \frac{\alpha R}{H}$

در رابطه مذکور، β زاویهی پیچش قالب (زاویهای که لبهٔ پیچش یافته قالب با راستای محوری میسازد)، α مقدار چرخش نمونه درون قالب، H طول قالب و R شعاع دایرهٔ محدود کنندهٔ مقطع عرضی قالب می،اشد.

تغییر نکردن مقطع عرضی نمونه در حین انجام فرآیند و نیز تغییر نکردن شکل هندسی نمونه پس از انجام فرآیند، از خصوصیات بارز فرآیند اکستروژن پیچشی است که این خصوصیت امکان تکرار فرآیند 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. رابطهٔ (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

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 Beygelzimer

است [۲۰]:

$$\varepsilon = \frac{2r}{\sqrt{3}R} tan\beta_{max} \tag{7}$$

با توجه به رابطهٔ (۳) میتوان 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 گوشههای آن به حداکثر مقدار خود میرسد. کرنش حداکثر مطابق رابطهٔ (۴) بدست میآید [11]:

$$\varepsilon_{max} = \frac{2}{\sqrt{3}} \tan\beta_{max} \tag{(f)}$$

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

$$m_{min} = 0.4 + 0.1 tan \beta_{max} \tag{(\Delta)}$$

در این تحقیق از نمونه های مسی با سطح مقطع مستطیل استفاده گردید. ابتدا فرآیند اکستروژن پیچشی طی یک پاس بر روی نمونهٔ 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 مقایسهٔ آنها با هم از اهداف تحقیق می باشد. در فرایند ترکیبی مورد استفاده سیستمهای لغزشی متفاوتی از نوع برشی به دلیل اعمال کرنشهای شعاعی و طولی در نمونه فعال میشود و خواص مکانیکی قابل قبولی در مس ایجاد می کند.

۲- مواد و روشها

۲-۱- مادهٔ مورد آزمایش

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

جدول۱- ترکیب شیمیایی مس مورد مطالعه

Cu	Sb	Sn	Ca	S	Cl	Mg	عنصر
99/44	•/••Y	•/••۶	•/•٢	۰/۰۲۵	•/• 78	•/۴٧	درصد وزنی

به منظور تهیه نمونههای متناسب با هدف تحقیق، در ابتدا میلگردهای مسی با قطر ۲۵ میلیمتر و طول تقریبی ۱ متر تهیه گردید. سپس به منظور تهیه نمونههایی 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 mm_0_14 × mm_0_18 تبدیل شد. در نهایت مادهٔ مسی ماشینکاری شده تحت عملیات برشکاری قرار گرفت و نمونههایی به طول تقریبی ۴ سانتیمتر از آن جدا گردید. پس از برشکاری، نمونههای مسی تهیه شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت تحت چرخه آنیلکاری 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





شکل ۲ - طرح واره کلی قالب طراحی شده، اجزای شماره گذاری شده: ۱- پشتبندهای قالب، ۲- پیچ های اتصالی، ۳- بلوکهای قالب اکستروژن پیچشی، ۴- بلوکهای 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 پیچهای اتصالی در آن ایجاد شده است.

■ پیچهای اتصالی: به منظور اتصال پشتبندها از ۲ عدد پیچ M16 و ۱۲ عدد پیچ M10 استفاده شده است.

■ بلوکهای قالب اکستروژن پیچشی: شامل دو عدد بلوک که کانالهای ورودی و خروجی به انضمام قسمت پیچشی قالب و شیاری به منظور قرارگیری بلوکهای قالب اکستروژن مستقیم درون آنها ماشینکاری شده است. با توجه به ابعاد سطح مقطع عرضی نمونه و چرخش ۹۰ درجهای آن داخل قالب، طول قالب و زاویهٔ پیچش قالب اکستروژن پیچشی به ترتیب برابر ۲۵ میلیمتر و ۳۶ درجه در نظر گرفته شده است.

بلوکهای قالب اکستروژن مستقیم: شامل دو عدد بلوک که به شکل شیپورهای درون آنها ماشین کاری شده است و در انتهای کانال خروجی قالب اکستروژن پیچشی تعبیه شده است.

■ پینهای 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 mm × 245 mm 20 × mm 97 استفاده شد. جنس به کار گرفته شده برای ساخت قالب، فولاد ابزار سرد کار 1.2510 میباشد. از مشخصات بارز این فولاد میتوان به مقاومت اصطکاکی بسیار بالای آن جهت ساخت قطعات کارسرد اشاره نمود. خواص مکانیکی فولاد مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است.

جدول۲- خواص مكانيكي فولاد AISI 1.2510

۱۳۸۰	مدول برشی(MPa)	۲	مدول الاستيسيته (GPa)
۸٦.	تنش تسليم (MPa)	٠/٣	نسبت پواسون

جنس مورد استفاده برای بلوکهای قالب اکستروژن مستقیم، فولاد سردکار 1.2080 میباشد. جهت ساخت قالب، بلوکهای فولادی

به وسیلهٔ ماشین CNC تحت عملیات فرزکاری قرار گرفته و قسمتهای مختلف قالب مطابق نقشهٔ ارائه شده در شکل ۳ ماشینکاری گردید.



شكل٣- نقشة نيم بلوك قالب اكستروژن مستقيم

جهت افزایش مقاومت سایشی و سختی، بلوکهای ماشینکاری شده در دمای ۹۵۰ درجهٔ سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه تحت عملیات آنیل انحلالی قرار گرفت و سپس در محیط روغن سرد شد. عملیات بازپخت در دمای ۱۸۰ درجهٔ 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 میلیمتر به منظور موقعیت دهی دقیق بلوکها استفاده گردید.

سنبهٔ طراحی شده به منظور انجام فرآیند از دو قسمت تشکیل شده است (شکل ۴). قسمت اول که درون نگهدارندهٔ 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 از جام شدن سنبه در قالب برابر 17.95 xmm 13.95 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.



۲-۳- روش انجام آزمایش

فرآیند تغییر شکل با سرعت ۵/۰ میلیمتر بر ثانیه در دمای اتاق 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 نمونههای مسی به همراه سنبه و همچنین کانال ورودی قالب توسط فوم صابون روانکاری شد. در این تحقیق ابتدا فرآیند اکستروژن پیچشی طی یک پاس بر روی نمونهٔ مسی بدون اعمال فشار عقبی^۱ انجام گرفت (نمونهٔ TE). در گام بعدی قالب اکستروژن مستقیم^۲ (CE) در انتهای کانال خروجی قالب اکستروژن شکل پلاستیک روی نمونه صورت گرفت (نمونهٔ TE). شکل ۵ شکل پلاستیک روی نمونه صورت گرفت (نمونهٔ CE+D). شکل ۵



شکل ۵- نحوهٔ استقرار قالب زیر دستگاه پرس

شکلهای ۶- الف تا ج تصویر نمونههای تغییر شکل یافته را تحت انجام فرآیندهای فوق نشان می دهد. شکلهای ۶- الف و ب مربوط به نمونههای 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 (نمونههای TE). همانطور که مشاهده می شود شکل هندسی این نمونهها کمی متفاوت از نمونههای اولیه است و سطح مقطع نمونههای بدست آمده از شکل مستطیل خارج شده است. شکل ۶- ج مربوط به نمونههای تغییر شکل یافته قالبهای اکستروژن پیچشی است که کانال خروجی آن با تعبیه قالبهای اکستروژن مستقیم تنگ شده است (نمونههای TE+DE). بر درون قالب اکستروژن مستقیم تنگ شده است (نمونههای علی جندان خلاف نمونههای TE این نوع از نمونهها در اثر اعمال فشار عقبی به بواسطهٔ اکسترود شدن در کانال خروجی، شکل سطح مقطع آنها چندان تغییر نکرده است و به حالت مستطیل باقی مانده است. به عبارت دیگر بواسطهٔ اعمال فشار عقبی گوشههای خالی که در نمونههای TE

¹ Back Pressure

² Direct Extrusion

مکانیک دانشگاه تبریز، شماره پیاپی ۹۷، جلد ۵۱، شماره ۴، زمستان، ۱۴۰۰ صفحه ۶۹-۸۷ – حمید بهلولی و همکاراز

لشريه مهندسى







۔ شکل ۶− نمونههای مسی پس از اعمال فر آیند 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 نمونه های 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 اندازه-گیری تنش تسلیم و بررسی رفتار ماده در نرخهای کرنشی بالا میباشد. در این آزمایش بی ثباتی در اثر گلویی شدن نمونه (بر خلاف آزمون کشش) به وجود نمی آید[۲۲]. برای انجام آزمایش از دستگاه پرس GT-7001-LS100 مدل GOTECH بهره گرفته شد. آزمون فشار مطابق استاندارد ET-81-400 با سرعت ۲/۰ میلی متر 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^۲-۹۳۰۱ انجام شد. به منظور اندازه گیری سختی نمونه های 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 میلی متری در امتداد محور طولی

گذرنده از مرکز نمونهها مطابق شکل ۷ بدست آمده و نتایج بدست آمده به عنوان مقادیر میکرو سختی با توجه به استاندارد -ASTME384 11 گزارش گردید. برای اندازه گیری 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 نمونهٔ 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 کاری⁷ حکاکی شدند. در نهایت نمونهها در محلول محتوی ۲ گرم دی کرومات پتاسیم نهایت نمونهها در محلول اشباع کلرید سدیم (NaCl) و ۸ میلی-لیتر اسید سولفوریک (H₂SO₄) حکاکی گردیدند. ریز ساختار ماده توسط میکروسکوپ نوری متالوگرافی ساخت شرکت صاایران و میکروسکوپ Seto (Cold Field Emission) Hitachi S4160 (دولا.

۲-۶- اندازه گیری مقاومت الکتریکی سطحی نمونه های تولید شده

از دستگاه پروب چهار نقطهای ساخت شرکت صنعت نما جوان مدل FPP-SN-555 برای تعیین مقاومت الکتریکی سطحی نمونهها استفاده شده است. با قرار دادن پروبهای دستگاه روی نمونه و گذر دادن جریان الکتریکی از پروبهای خارجی دستگاه و اندازه گیری اختلاف پتانسیل الکتریکی بین پروبهای داخلی، امکان اندازه گیری مقاومت الکتریکی سطحی در نمونه فراهم می شود. با توجه به قابلیت دستگاه، جریان الکتریکی در یک بازه مشخص از ۰ تا ۲۰۱۴ میلی آمپر با فاصله زمانی ۲۵/۵ ثانیه توسط پروبهای داخلی متصل به ولت متر با اختلاف پتانسیل الکتریکی توسط پروبهای داخلی متصل به ولت متر با فاصله ۵ میلی متر انداره گیری می شود. سپس با استقاده از قانون اهم

¹ Vickers

² Wilson-wolpert

³ Polishing

(6)

(رابطه ۴) مقاومت الکتریکی سطحی نمونهها با دقت ۰/۰۰۱ اهم اندازهگیری می گردد.

$$R = \frac{V}{I}$$

1

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نمودار نیرو- جابجایی فر آیندهای 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 نمونهٔ تحت فرآیند اکستروژن پیچشی بدون اعمال فشار عقبی (فرآیند TE)، نیرو طی دو مرحله به صورت خطی افزایش میابد. در مرحله اول نیرو با یک شیب نسبتاً زیاد به ازای جابجایی سنبه به میزان ۵/۵ میلیمتر از صفر به ۲۳/۸ کیلو نیوتن رسیده و در مرحله بعدی نیرو با شیب خیلی بیشتر نسبت به مرحله اول تا مقدار ۱۲۳ کیلو نیوتن افزایش میابد. 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 شکل دهی (۳۱ میلیمتر) نیرو به دلیل کم شدن اصطکاک چسبنده با یک شیب کم کاهش میابد. حداکثر نیروی ثبت شده به منظور انجام فرآیند در این حالت در حدود ۱۳۲/۵ کیلو نیوتن است.

در خصوص نمونهٔ 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 می-یابد. این افزایش شدید به ازای جابجایی سنبه از حدود ۱۸ میلیمتر تا مابد. این افزایش شدید به ازای جابجایی سنبه از حدود ۱۸ میلیمتر تا دمونه درون قسمت شیپوره مانند کانال خروجی نسبت داد. حداکثر نیروی لازم جهت شکل دهی نمونههای مسی در این حالت حدود ۲۲/۸ کیلو نیوتن به ثبت رسیده است که نسبت به حالت قبل در حدود ۶۸ درصد افزایش یافته است.



شکل۸-تغییرات نیرو بر حسب جابجایی سنبه در حین انجام TE +DE فرآیند TE و فرآیند

۲-۳- 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 می اید. نکته قابل توجه در خصوص نمودارهای تنش - کرنش نمونههای مسی اولیه، کارسختی بسیار زیاد آنها میباشد.



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 می شود.

بر اساس نمودارهای حاصل از آزمون فشار، استحکام تسلیم نمونه های مسی اولیه ۱۱۵ مگاپاسکال اندازه گیری 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 اندازه گیری 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

نمونههای TE+DE در مقایسه با نمونههای اولیه بسیار کمتر است. علت این مسئله را می توان 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 نابجایی-های جدید، نمونههای تولید شده رفتار کارسختی چندانی از خود نشان نمی دهند. لذا با هر چه بیشتر شدن ذخیره کرنش پلاستیک درون مواد ، رفتار کارسختی ماده کاهش می یابد. کاهش کارسختی موادی که تحت فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفتهاند در نتایچ کار تحقیقی بعضی از محققان در این حوزه گزارش شده است [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 می-دهد. 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 اندازه گیری 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 نمونههای TE+DE TE+DE ویکرز بدست آمد که افزایشی حدود ۱۴۰/۲ ویکر در حدود ۲۰/۱۴ ویکرز بدست آمد که افزایشی حدود ۱۰ درصد نسبت در مدونه ۲۰ یا ۲۰ ویکرز بدست آمد که افزایشی حدود ۱۴۰/۲ ویکر



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

TE+DE و E منوبه 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 می-دهد و هرچه نقاط به سطح نمونه نزدیک میشوند کرنش اعمالی به آنها با توجه به ماهیت فرآیند افزایش مییابد.

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 نمونهٔ مسی اولیه را دانههای درشت متعارف^۱ تشکیل میدهد. با استفادهٔ از روش برخورد خطی^۲ و توسط نرم افزار ImageJ متوسط اندازهٔ دانه در این حالت اندازه گیری گردید. برای نمونههای مسی اولیه، متوسط اندازهٔ 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 می دهد. با اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید روی مادهٔ اولیه، نوع ساختار و اندازه دانه تغییر می کنند. با اعمال فرآیند اکستروژن پیچشی روی ماده، یک ساختار کریستالی از نوع لایهای کشیده^۲ (ELS) درون نمونههای TE بوجود آمده است و اندازهٔ دانه که متأثر از اعمال کرنش برشی ساده هنگام عبور ماده از درون قالب می باشد، به شدت کاهش یافته است. متوسط اندازهٔ دانه در این حالت حدود ۱ میکرومتر اندازه گیری شده است، هر چند که در ساختار کریستالی به وجود آمده دانههای کمتر از ۱ میکرومتر و بیشتر از آن نیز قابل مشاهده می باشد. این موضوع یک

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

¹ Conventional coarse-grains

² linear Intercept

³ Elongated laminar substructures





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

شدید روی آنها صورت می گیرد، مرتبط دانست. بر اساس این مکانیزم با توجه به حضور و توزیع تصادفی نابجاییها در ماده اولیه، با اعمال تغییر شکل پلاستیک به ماده، ابتدا باندهای تغییر شکل که شامل چگالی بالایی از نابجاییها میباشند، تشکیل میشود. نابجایی-های تولید شده کنار یکدیگر قرار می گیرند و دانههای فرعی با مرزدانه-های با زاویه کوچک⁽ (LAGBs) را تشکیل میدهند. افزایش شدید نابجاییها به واسطه اعمال فرآیند اکستروژن پیچشی روی فلز مس در تحقیق رنجبر بهادری و همکاران [۲۴] گزارش شده است. ایشان مقدار چگالی نابجاییها به ازای اعمال یک پاس فرآیند اکستروژن پیچشی به فلز مس را در حدود $^{2-m10} t > 10$ تعیین کردند. افزایش چگالی نابجاییها موجب افزایش انرژی سیستم میگردد. از طرفی هنگامی که دانهها تحت اعمال کرنش برشی قرار میگیرند، مرز دانهها در جهت نابجاییها موجب افزایش انرژی سیستم میگردد. از طرفی هنگامی که موحههای لغزشی کشیده میشوند و باعث تشکیل دانههای کشیده در شبکۀ کریستالی ماده میشوند. نابجاییهای تولید شده به منظور شبکۀ کریستالی ماده میشوند. نابجاییهای تولید شده به منظور

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 مرزدانههایی با زاویه بزرگ^۲ (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 [۲۵–۲۳] که تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفتهاند مشخص شده که دو عامل به صورت همزمان و مشترک باعث بهبود خواص مکانیکی آنها می شوند. عامل اول، استحکام بخشی از طریق افزایش چگالی نابجاییها است که در حین فرآیندهای SPD بدلیل کرنشهای پلاستیک بسیار زیاد در ماده ایجاد شده و عامل دوم تغییرات اندازه دانه و شکل گیری مرزدانههای بیشمار است به طوری که با کوچک شدن اندازهٔ دانه، استحکام ماده افزایش مییابد.

۳-۴- مقاومت الکتریکی نمونه های اولیه و تولید شده

شکلهای ۱۳ – الف، ب و ج به ترتیب نمودارهای I-V حاصل از آزمایش پروب چهار نقطهای روی نمونههای مسی اولیه، TE و TE+DE 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 I-V مربوط به هر نمونه بدست آمده است. به منظور تعیین مقاومت الکتریکی سطحی نمونهها، تابعی بر اساس رگرسیون خطی، از نمودارهای I-V بدست آمده، حاصل شده است. با توجه به رابطهٔ (۶)، ضریب زاویهٔ تابع خطی بدست آمده، به عنوان مقدار مقاومت سطحی نمونهها ثبت گردیده است.



² Subgrains

¹ low angle grain boundaries

³ High angle grain boundaries



همان طور که مشاهده می شود مقاومت الکتریکی سطحی برای نمونههای مسی اولیه، نمونههای TE و TE+DE به ترتیب برابر ۰/۰۸۷۹، ۰/۰۹۴ و ۰/۰۹۴ اندازه گیری شده است. با توجه به مقادیر بدست آمده، كمترين مقاومت الكتريكي سطحي مربوط به نمونهٔ مسى اوليه و بيشترين مقدار مربوط به نمونهٔ TE+DE است. به بيان ديگر نمونهٔ مسی اولیه در مقایسه با دیگر نمونهها مقاومت کمتری را نسبت به عبور جریان از خود نشان میدهد. به همین ترتیب نمونهٔ TE در مقایسه با نمونهٔ TE+DE مقاومت کمتری را نسبت به عبور جریان از خود نشان میدهد. چنین به نظر میرسد که با اعمال هر چه بیشتر كرنشهاى پلاستيك به فلز مس مقدار مقاومت الكتريكى سطحى آن افزایش می یابد. از آنجایی که مقاومت الکتریکی با رسانایی الکتریکی نسبت عكس دارد تلويحاً ميتوان نتيجه گرفت كه رسانايي الكتريكي فلز مس با مقدار كرنش پلاستيك ذخيره شده طى فرآيند، نسبت عکس داشته به طوری که با اعمال هر چه بیشتر کرنش پلاستیک طی فرآيند تغيير شكل پلاستيك شديد و اكستروژن مستقيم به نمونه مسى 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 کرستالی ماده ریز شده و تعداد بیشماری مرزدانه با زاویهٔ بزرگ حاصل میشود. مرزدانههای متعدد ایجاد شده به دلیل کوتاه کردن مسیر حرکت آزاد الکترونها موجب افزایش مقاومت الکتریکی می شوند. با توجه به اعمال کرنش های پلاستیک بیشتر به نمونهٔ 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 بواسطهٔ فرآیندهایی که بر روی مس خالص تجاری صورت گرفت، به ساختارهای کریستالی مناسب و به تبع آن خواص

مکانیکی مطلوب تر 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 شکل دهی 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+DE در اثر اعمال فشار عقبی به واسطه اکسترود شدن در کانال خروجی، شکل سطح مقطع آنها چندان تغییر نمیکند و به حالت مستطیل باقی میماند. به عبارت دیگر بواسطهٔ 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 می بابد. افزایش نسبتاً زیاد نیرو را می توان به قرارگیری نمونه درون قسمت شیپوره مانند کانال خروجی نسبت داد. حداکثر نیروی لازم جهت شکل دهی نمونه های مسی در این حالت، در حدود ۲۲۳/۸ کیلو نیوتن است که نسبت به حالت قبلی در حدود ۶۸ درصد افزایش نشان می دهد.

 بر اساس نمودارهای تنش- کرنش حاصل از آزمایش فشار بر روی نمونههای مسی اولیه، نمونههای TE و نمونههای TE+DE و نمونههای ۱۹۲
استحکام تسلیم فشاری بدست آمده به ترتیب برابر ۱۱۵، ۱۶۷ 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 ۲۰/۱۱ ، ۲۷/۱۱ و ۲۴۰/۲ ویکرز تعیین شد.

■ با قرارگیری نمونههای مسی تحت فرآیند اکستروزن پیچشی و اعمال کرنشهای کمینه معادل ۵۲/۰ 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 اندازهٔ دانه تحت تأثیر 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 ۱/۳۰ و ۱/۶۹، ساختار لایهای کشیده در نمونهٔ TE تغییر حالت داده و یک ساختار کریستالی نسبتا همگن همراه با طیف گستردهای از دانههای بسیار ریز در محدوده چند صد نانومتر حاصل شد. متوسط اندازهٔ دانه در این حالت ۱۰۶۰ نانومتر تعیین گردید.

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

مكانيك

- [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] Zendehdel 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., Nanograined 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., Mikułowski 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.

[۳۰] رعنایی م. ا، افسری ا،، احمدی بروغنی س. ی. و مشکسار م. م،، بررسی عملکرد مس خالص ریزدانه به عنوان الکترود ابزار فرآیند ماشینکاری

تخلیهٔ الکتریکی. *مجلهٔ مهندسی مکانیک مدرس*، دوره ۱۴، شماره ۱، صفحه ۹۷–۱۰۵، ۱۳۹۲. 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

[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.

[۲] 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. م*جلهٔ مهندسی مکانیک* د*انشگاه تبریز*، دورهٔ ۴۷، شمارهٔ ۲ - شماره پیاپی ۷۹، صفحه ۳۳۳-۲۳۴.

۹۸

- [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- Bottomup 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.