ماەنامە علمى پژوھشى

مهندسی ساخت و تولید ایران www.smeir.org



# مطالعه تجربی و عددی قطعات مس خالص فوق ریزدانه با استحکام و رسانایی بالا توسط فرايند اكستروژن تركيبي تجمعي

احسان شالچی<sup>2,1</sup>، حسین جعفرزاده<sup>\*\*</sup>، غلامرضاهاشمه،<sup>2,1</sup>

1- كارشناسي ارشد، مهندسي مكانيك، پژوهشكده رانشگرهاي فضايي، پژوهشگاه فضايي ايران، تبريز 2- كارشناسي ارشد، دانشكده فني و مهندسي، مهندسي مكانيك- ساخت و توليد، دانشگاه آزاد اسلامي واحد تبريز، تبريز 3- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، مهندسی مکانیک- ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز

h.jafarzadeh@iaut.ac.ir ،5147965586 \*تبريز، صندوق يستى\*

اطلاعات مقاله	چکیدہ
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 16 اسفند 1397 پذیرش: 1 مهر 1398 ارائه در سایت: خرداد 1399	با پیشرفت سریع صنایع الکترونیک، تقاضا برای استفاده از قطعات با رسانایی الکتریکی و استحکام مکانیکی زیاد افزایش یافته است. در این تحقیق، از روش اکستروژن ترکیبی تجمعی به عنوان روشی مناسب در تولید قطعات مسی فوق ریز دانه ارائه شده است. بدین منظور، مس خالص به عنوان ماده اولیه در داخل مجموعه قالب قرار گرفت. در نیم سیکل اول فرایند، بیلت اولیه توسط سنبهای از بالا بروی یک ماندرل ثابت فشرده شد و موجب ایجاد سیلان شعاعی و مستقیم ماده در درون قالب گردید. در اندام در انمه در نیم سیکل وم
<b>کلیدواژگان:</b> اکستروژن ترکیبی تجمعی تغییرشکل پلاستیک شدید شبیهسازی اجزای محدود مس خالص تجارتی مواد فوق ریزدانه	سنبه پایینی، بیلت اولیه شکل هندسی خود را بازیابی نمود. مقدار کرنش پلاستیک تجمعی در هر سیکل فرایند با استفاده از روابط تحلیلی محاسبه گردید. مطالعات ریز ساختاری حاکی از تغییرات قابل توجه اندازه دانه میباشد، بطوریکه اندازه دانه از مقدار اولیه 39µm به 110-240nm در سیکل دوم کاهش یافت. نتایج حاصل از آزمون میکرو سختی ، حاکی از افزایش سختی نمونهها از 57HV به 98HV بوده و همچنین استحکام کششی تسلیم و حداکثر نمونهها به ترتیب 20/7 و 1/13 برابر در انتهای سیکل دوم افزایش یافته است. رفتار سیلان پلاستیک ماده در حین فرایند اکستروژن ترکیبی با روش اجزای محدود و نرمافزار DEFORM-2D شبیهسازی گردید و نتایج حاصله مطابقت خوبی با نتایج تحلیلی داشت. با بررسی قابلیت هدایت الکتریکی نمونههای مسی اولیه و اکسترود شده مس خالص فوق ریز دانه با استحکام بالا و هدایت الکتریکی قابل توجه، در مقایسه با مس آلیاژی حاصل گردید.

# Numerical and experimented study of UFG pure copper with high strength and conductivity processed by Accumulative compound extrusion (ACE)

# Ehsan Shalchi<sup>1</sup>, Hossein Jafarzadeh<sup>2\*</sup>, GholamReza Hashemi<sup>1</sup>

1- Space Thrusters research Institute, Iranian Space Research Center, Tabriz, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Tabriz Brach, Tabriz, Iran

\*P.O.B. 5147965586 Tabriz, Iran, h.jafarzadeh@iaut.ac.ir

**Article Information** Abstract Original Research Paper By the fast growing of electronic related industries all over the world, the demand for application of high Received 6 March 2019 strength with high conductivity materials are getting increased. In this paper, the accumulative compound Accepted 22 September 2019 extrusion is proposed as a severe plastic deformation method to produce UFG pure copper. An initial copper Available June 2020 billet is placed in the die. In the first half- cycle the billet is pressed against the fixed mandrel by an upper punch which results in radial and forward flow of material. In the second half-cycle the billet is regained it's Keywords: initial shape by pressing down punch. The accumulated plastic strain in each cycle of ACE processing is Accumulative compound extrusion computed by analytical method and the obtained results showed significant amount of imposed plastic strain. Severe plastic deformation FEM The microstructure evolution during ACE processing was significant grain refinement of 110-240 nm from Pure copper the initial grain size of 39µm at the end of second cycle. The microhardness examinations showed the increase Ultra fine-grain of ACE processed Hardness to 98HV from the initial value of 57 HV. Also, the results of tensile tests showed the increase of yield and ultimate tensile strength by the factor of 2.07 and 1.13, respectively at the end of ACE second cycle. The flow behavior of material was simulated using FEM in DEFORM 2D software and the model predictions were in good agreement with the analytical results. The electrical conductivity examinations of the ACE processed samples showed the UFG pure copper with high strength and good conductivity in contrast with the alloyed copper parts.

استحكام مكانيكي زياد افزايش يافته است. بدين منظور، آلیاژهای مس به صورت گستردهای در این صنعت استفاده برای استفاده از مواد و قطعات با رسانایی الکتریکی بالا و میگردد. مهمترین نقطه ضعف آلیاژهای مس، کاهش رسانایی

1- مقدمه

با پیشرفت سریع صنایع برق و الکترونیک، تقاضای روزافزون

#### Please cite this article using:

#### برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

E. Shalchi, H. Jafarzadeh, Gh. Hashemi, Numerical and experimented study of UFG pure copper with high strength and conductivity processed by Accumulative compound extrusion (ACE), Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 42-51, 2020 (in Persian)

الکتریکی آنها نسبت به نمونههای خالص و غیر آلیاژی میباشد.از طرف دیگر مواد مسی خالص استحکام مکانیکی به مراتب کمتری نسبت به نمونههای آلیاژی دارند. برای این که بتوان همزمان استحكام بالا به همراه رسانایی الكتریكی مناسب در این گونه مواد را تأمین کرد، باید سراغ روشهای جدید ساخت و تولید رفت. برای توسعه فرایندهای تولید مواد فلزی فوق ریـز دانه/نانو ساختار تحقیقات زیادی در مقیاس آزمایشگاهی و حتبی صنعتی صورت گرفته است. یکی از این روشها استفاده از فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید میباشد. با استفاده از این روشها، میتوان محصولات فلزی فوق ریزدانه مختلف از آلیاژهای گوناگون از قبیل آلیاژهای آلومینیم، منیزیم، تیتانیم، مس و انواع فولادهای استراتژیک با قابلیت کاربری عالی فرآوری کرد. قطعات تولیدی توسط این تکنولوژی بدون آلیاژ سازی و از نوع خالص بوده و ریز ساختار با دانههای فوق ریز یا نانو ساختار میباشد که نتیجه آن دستیابی به مواد با استحکام مكانيكي و رسانايي بالا است[1، 2]. مواد فوق ريزدانه توليد شده توسط روشهای تغییر شکل پلاستیک شدید به دلیل داشتن خواصی همچون استحکام بالا، انعطافپذیری خوب، عمر خستگی بالا و خاصیت بالای سوپر پلاستیسیته میتواند در صنايع مختلفي همچون هوا فضا، الكترونيك، خودرو سازي و ... مورد توجه قرار گيرد[2].

روشهای مختلف تغییر شکل پلاستیک شدید برای تولید مواد نانو کریستال تا به حال توسط محققان مختلفی ارائه شده و مورد مطالعه قرار گرفته است. در سال 1997 الکساندرف و همکارانش بر اساس روش ECAP میلههای فوق ریزدانه مسی تولید نمود[3]. فرجی و همکارانش روش اکستروژن هیدرواستاتیکی انبساطی را بر اساس روش اکستروژن جهت تولید لولههای فوق ریزدانه ارائه کردند[4].

فرایند اکستروژن دراواخر سال 1700 میلادی، اولین بار برای فشردن و عبوردادن یک بیلت استوانه ای سربی از داخل یک محفظه و ایجاد لوله توخالی مطرح شد. در حالت کلی فرایند اکستروژن از لحاظ حرکت سنبه و سیلان مواد به سه گروه اصلی اکستروژن مستقیم، غیر مستقیم و هیدرواستاتیک تقسیم بندی می شود. در اکستروژن مستقیم<sup>۲</sup> بیلت استوانهای در جهت حرکت سنبه فشرده می شود و سیلان می یابد بر خلاف آن در اکستروزن غیر مستقیم<sup>۲</sup> جهت سیلان مواد موازی حرکت سنبه

ولی درست در خلاف جهت آن میباشد [5]. اکستروژن شعاعی<sup><sup>3</sup></sup> که با عناوین دیگری همچون اکستروژن جانبی نیز بیان میشود، ترکیبی از فرایندهای فورج و اکستروژن میباشد که در آن مواد استوانه ای توپر یا لوله ای شکل در داخل یک محفظه قرار گرفته و به وسیله یک یا دو سنبه به داخل یک قالب فشرده شده و در داخل قالب به صورت شعاعی جریان مییابد [6، 7]. برای تولید قطعات پیچیده و دقیق در یک مرحله شکل دهی مثل اتصالات یونیورسال، اتصالات لولهای شکل و قطعاتی شبیه آنها میتوان از ترکیب فرایندهای اکستروژن شعاعی با اکستروژن مستقیم یا غیر مستقیم استفاده نمود [8].

با توجه به اساس تولید مواد نانو کریستال که بر مبنای اعمال کرنشهای پلاستیکی شدید میباشد، مطالعات و شبیه سازی های اولیه نشان می دهد که فرایند اکستروژن ترکیبی بدلیل ایجاد کرنشهای پلاستیکی شدید در قطعه کار برای تولید مواد با ریز ساختار نانو کریستال از قابلیت بالایی برخوردار است. به دلایل مذکور و با آگاهی از افزایش روزافزون تقاضا برای استفاده از مواد با خصوصیات مذکور در زمینه های مختلف مانند صنایع هوا و فضا، نظامی، خودرو و ...، در این تحقیق یک روش جدید و ابتکاری برای تولید این گروه از مواد ریز ساختار و نانو کریستال فضا، نظامی، خودرو و ...، در این تحقیق یک روش جدید و عواهد بود. نتایج حاصله نشان می دهد که روش پیشنهادی خواهد بود. نتایج حاصله نشان می دهد که روش پیشنهادی مارئه شده است. روش جدید براساس فرایند اکستروژن ترکیبی ارائه شده است. روش جدید براساس فرایند اکستروژن رو با یر می مانید که روش پیشنهادی در نواهد بود. نتایج حاصله نشان می دود که روش پیشنهادی مار خواهد بود. نتایج ماصله نشان می دود نوای در تولید مواد با ریز

# 2- مطالعه تجربي فرايند

شماتیک فرایند اکستروژن ترکیبی تجمعی در شکل 1 بطور شماتیک نشان داده شده است. همان طور که در شکل 1 دیده میشود، این فرایند شامل دو نیم سیکل مختلف می باشد. ابتدا در نیم سیکل اول، یک بیلت اولیه مکعبی شکل در داخل محفظه قالب قرار گرفته و سپس این بیلت از بالا توسط سنبه ای بر روی یک ماندرل ثابت فشار داده می شود. با اعمال این فشار، ماده ابتدا بصورت شعاعی و سپس بصورت مستقیم داخل فاصله مابین محفظه و ماندرل اکسترود می گردد. در ادامه با رسیدن مابین محفظه و ماندرل اکسترود می گردد. در ادامه با رسیدن مابین معایی کورس، نیم سیکل اول اتمام می گردد (شکل 1-مابین می سیکل اول ماده ابتدا از گپهای شعاعی عبور کرده و سپس بصورت 90 درجه تغییر مسیر داده و بصورت مستقیم سیلان می نماید. در این تغییرمسیر 90 درجه، به ماده،

Severe Plastic Deformation (SPD)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Forward extrusion <sup>3</sup> Backward extrusion

مهندسی ساخت و تولید ایران، خرداد 1399، دوره 7 شماره 3

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Radial extrusion

کرنشهای برشی شدیدی همانند فرایند ECAP، وارد می گردد. همانطوریکه در شکل 1 نشان داده شده، شکل قطعه در انتهای نیم سیکل اول بصورت U شکل میباشد.

در نیم سیکل دوم ماده اکسترود شده حاصله از نیم سیکل اول، توسط سنبه پایینی در جهت بالا فشرده شده و دوباره به شکل اولیه خود برمی گردد. همزمان با حرکت سنبه پایینی، سنبه بالایی نیز سمت بالا حرکت کرده تا اجازه سیلان ماده در داخل محفظه قالب را بدهد (شکل 1- ح). در نیم سیکل دوم مقدار کرنشهای اعمال شده به ماده برابر نیم سیکل اول میباشد. برای اعمال کرنشهای پلاستیک دلخواه به ماده، می توان دو نیم سیکل مربوط به فرایند اکستروژن ترکیبی را به تعداد مورد نظر تکرار نمود.

در این تحقیق نمونههای مس خالص به منظور بررسی قابلیت فرایند اکستروژن ترکیبی تجمعی در تولید قطعات فوق ریزدانه و نانوساختار حجیم مورد استفاده قرار گرفته است. نمونههای مکعبی اولیه به ابعاد 25 میلیمتر از بیلتهای اولیه مسی ماشین کاری شدند (شکل 2).



Fig. 1 Schematic of Accumulative compound extrusion process شکل 1 شماتیک فرایند اکستروژن ترکیبی تجمعی



Fig. 2 Initial cubic shaped pure copper sample شکل 2 نمونه اولیه مکعبی مس خالص

به منظور دستیابی به ریزساختار همگن و حذف تنشهای

پس ماند ناشی از عملیات ماشین کاری، نمونههای مکعبی به مدت یک ساعت در دمای 600 درجه سانتیگراد تحت عملیات حرارتی آنیل قرار گرفتند. تمامی اجزای مجموعه قالب از فولاد ابزاری گرمکار H13 ساخته شده و به میزان 55HRC سخت کاری شدهاند. اندازه گـپهـای شـعاعی و مسـتقیم بـه میـزان 2 میلیمتر در نظر گرفته شدند. شعاع گوشههای ماندرل و محفظه نیز برابر 1 میلیمتر فرض شد. به منظور روانکاری سطوح تماس قطعه و قالب از روانکار دی سولفید مولیبدن ٔ استفاده شده است. برای مطالعه خواص مکانیکی نمونههای تولید شده توسط فرایند، از میکرو سختی ویکرز تحت بار 200 گرم به مدت 15 ثانیه استفاده شد. تمامی آزمایشات تجربی توسط پرس هیدرولیک با سرعت رم 5mm/min انجام شد. به منظور انجام مطالعات ریزساختاری، نمونههای تولید شده در جهت اکسترود شده برش داده شده و سیس عملیات آمادهسازی استاندارد برای متالوگرافی انجام گرفت. تغییرات اندازه دانه در مراحل مختلف تغییر شکل با استفاده از میکروسکوپ نوری اندازه گیری شد. علاوه بر تصاویرمیکروسکوپ نوری به منظور مطالعه دقیقتر و بهتر تغييرات اندازه دانه از ميكروسكوپ الكتروني روبشي نيز استفاده گردید. بدین ترتیب تمامی سطوح نمونهها قبل از تصویربرداری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، سنگ زنی و پولیش شده و با استفاده از محلول اچانت اسید نیتریک 50% اچ شدند.

خواص مکانیکی نمونههای تولید شده توسط تست کشش در دمای محیط و نرخ کرنش 5mm/min توسط دستگاه کشش مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور نمونههای استاندارد تست کشش مطابق ASTME8M به صورت شکل3 در راستای اکسترود شدن نمونهها تهیه شد.



رسانایی الکتریکی به معنی اندازه گیری قابلیت هدایت جریان

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> MoS<sub>2</sub> <sup>2</sup> SEM

مهندسی ساخت و تولید ایران، خرداد 1399، دوره 7 شماره 3

الکتریکی در یک ماده میباشد و یکای آن در سیستم استاندارد بینالمللی واحدها زیمنس میباشد ولی معمولاً به صورت درصد IACS<sup>۲</sup> تعریف می گردد. طبق این تعریف، هدایت الکتریکی یک مفتول مس آنیل شده در دمای 20 درجه، 100 درصد و مقاومت آن<sup>6-10</sup>×1/7241 اهم متر و یا 10<sup>7</sup>×108/1 زیمنس بر متر بیان میشود.

برای تعیین مقدار درصد IACS از روش چهار نقطه استفاده گردیده است. مطابق این روش و مطابق با سیستم دستگاه مورد استفاده، جریان الکتریکی (I) به دو سرنمونه اعمال می گردد و مقدار اختلاف پتانسیل در دو نقطه P1 و P2 اندازه گیری می شود (شکل 4) [9، 10].

مقاومت ویژه ho از روابط (1 تا 3) قابل محاسبه میباشد.

$$R = \frac{V}{I} \tag{1}$$

$$R = \rho \frac{L}{A} = \int_{s}^{2s} \rho \frac{dx}{2\pi x^{2}}$$
(2)

$$IACS = \frac{\rho}{172.41 \times 10^{-6}}$$
(3)

#### 4- انجام تست هدايت الكتريكي

جهت انجام تستهای هدایت الکتریکی، دستگاه دیجیتالی شکل 5 برای اندازه گیری اختلاف پتانسیل مورد استفاده قرار گرفته است. جریان الکتریکی 400 میلی آمپر توسط منبع تغذیه دستگاه شکل 5- الف با پروبهای تنگستنی اعمال گردیده و مقدار اختلاف پتانسیل توسط دستگاه اندازه گیری اختلاف پتانسیل شکل 5- ب ثبت گردید.



**Fig. 4** Schematic illustration of the principle of electrical conductivity measurement by four-point-probe technique فشکل **4** نمای شماتیک از اندازه گیری هدایت الکتریکی به روش چهار نقطه



Fig. 5 Electrical digital measurement set-up (a) power unit (b) شکل 5 دستگاه اندازه گیری دیجیتالی –(الف) منبع تغذیه- (ب) ودستگاه اندازه گیری اختلاف پتانسیل

# 5- مراحل شبیهسازی عددی فرایند

رفتار تغییر شکل ماده در حین فرایند اکستروژن ترکیبی تجمعی با استفاده از نرمافزار DEFORM-2D، شبیهسازی شد. با توجه به شکل قطعه نهایی و به منظور کاهش حجم محاسبات و زمان تحلیل، مدلسازی در جالت دو بعدی و بدلیل وجود تقارن در فرایند، نصف فرایند مدل شد. با توجه به فرایند ، در حالت کلی شکل قالب و قطعه بصورت شکل 6 در نظر گرفته شده است.



Fig. 6 The FEM schematic of ACE processing with meshed billet شکل 6 مدل سازی فرایند و مش بندی قطعه کار برای شبیه سازی اجزای محدود

به دلیل تغییر شکل جزئی در مجموعه قالبها، هندسه آنها به صورت صلب<sup>۲</sup> فرض شد. همچنین از کرنشهای الاستیک ماده

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> International Annealed Copper Standard

مهندسی ساخت و تولید ایران، خرداد 1399، دوره 7 شماره 3

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Rigid

مسی به دلیل تغییر شکل زیاد آن صرفنظر کرده و رفتار ماده بصورت پلاستیک فرموله شده است.

در قسمت برهم کنش ، شرایط تماسی بین مجموعه قالب که بصورت صلب تعریف شدهاند و قطعه کار تعریف گردید و مقدار ضریب اصطکاک برای نمونه مسی با روانکار دیسولفید مولیبدن برابر 0/05 اعمال شد [11].

کلیه شرایط مرزی اعم از قیود موجود در روی اجزای قالب و قطعه کار تعریف شد. نوع پرس با توجه به آزمایشهای انجام شده از نوع هیدرولیکی می باشد که در نرمافزار مشخص شده و سرعت حرکت سنبه نیز مشابه با آزمایشات تجربی برابر (mm/min) تنظیم شدہ است. مقدار کرنش پلاستیک تجمعی کل واردہ به ماده در فرایند اکستروژن ترکیبی تجمعی شامل دو بخش میباشد: الف- سیلان شعاعی ماده (٤٦). ب- تغییر جهت 90  $c_{1}$ درجه ماده مشابه فرایند ECAP ( $\varepsilon_{2}$ ).

با فرض یکنواخت بودن تغییر شکل، کرنش اعمالی ناشی از سیلان شعاعی ماده برابر خواهد بود با:

$$\varepsilon_1 = Ln\left(\frac{A}{A}\right) = Ln\left(\frac{a}{2s}\right) \tag{4}$$

در فرمول فوق A<sub>0</sub> و A به ترتيب سطح مقطع اوليـه نمونـه و سطح مقطع نمونه در انتهای سیلان شعاعی ماده و قبل از تغییر جهت 90 درجه می باشد و سایر پارامترها در شکل 7 نشان داده شده است. با در نظر گرفتن عرض بیلت اولیه به اندازه 25 میلیمتر و اندازه گپ شعاعی 2 میلیمتر مقدار کرنش ناشی از سيلان شعاعي ماده برابر با 1/83 ميباشد.



Fig. 7 The effect parameters in ACE processing شکل 7 پارمترهای مؤثر در فرایند اکستروژن ترکیبی تجمعی

<sup>1</sup>Interaction

برای محاسبه کرنش تغییر جهت 90 درجه ماده مشابه فرایند ε<sub>2</sub>) ECAP (ε<sub>2</sub>)، از رابطه (5) می توان استفاده نمود:

$$\varepsilon_{2} = \left| \frac{2 \cot\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\vartheta}{2}\right) + \varnothing \csc\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\vartheta}{2}\right)}{\sqrt{3}} \right|$$
(5)

بنابراین کل میزان کرنش پلاستیک اعمالی در پایان نیم سيكل اول برابر خواهد بود با: (6)

 $\varepsilon_{t1} = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ 

در نيم سيكل دوم اكسترود ماده به شكل اوليه خود موجب اعمال كرنش پلاستيك به همان ميزان نيم سيكل اول خواهد بود. بنابراین کل کرنش اعمالی به ماده در پایان یک پاس از این فرایند از رابطه (7) قابل محاسبه می باشد:

(7)  $\varepsilon_t = 2\varepsilon_{t1} = 2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ 

اگر فرایند اکستروژن ترکیبی تجمعی به تعداد N بار تکرار شود می توان مقدار کرنش پلاستیک اعمالی را از رابطه (8) محاسبه کرد:

$$\varepsilon_{tN} = 2N\varepsilon_t = 2N \left[ Ln\left(\frac{a}{2s}\right) + \frac{2\cot\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\phi}{2}\right) + \phi \csc\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\phi}{2}\right)}{\sqrt{3}} \right]$$
(8)

با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی در این تحقیق، مقدار کرنش پلاستیک تجمعی در انتهای نیم سیکل اول از فرایند برابر 2/95 و در انتهای یک سیکل کامل از فرایند برابر 5/96 خواهـد بود. این مقدار کرنش اعمالی در یک سیکل در مقایسه با سایر فرایندهای تغییر شکل شدید مثل فرایند ECAP که در هر سیکل حداکثر کرنش 1/15 را به ریزساختار ماده اعمال می کند میزان قابل توجهی میباشد. به عبارت دیگر میتوان گفت که برای دستیابی به ریزساختار فوق ریزدانه در این فرایند، نیاز به اعمال سیکلهای با تعداد کمتری در مقایسه با سایر فرایندها است.

### 6- نتايج و بحث

# 1-6- نتایج آزمایشات تجربی فرایند اکستروژن ترکیبی تجمعي

در فرایندهای تغییرشکل پلاستیکی شدید کرنش برشی اعمالی به ماده نقش اساسی را در ریز دانه شدن دارد. مکانیزم غالب ریزدانه شدن در این فرایندها خرد شدن دانههای اولیه تحت کرنشهای برشی است.

در فرایند اکستروژن ترکیبی تجمعی نیز مکانیزم مشابهی صورت می پذیرد. گپهای باریک شعاعی و مستقیم قالب در این فرایند موجب اعمال کرنشهای برشی زیاد و در نتیجه تغییر شکل پلاستیکی شدید ماده می شود. این روش در مقایسه با

مهندسی ساخت و تولید ایران، خرداد 1399، دوره 7 شماره 3

سایر روشهای تغییر شکل پلاستیک شدید میزان کرنش نسبتاً بالایی را در یک پاس به ماده اعمال میکند. بنابراین تعداد پاس های مورد نیاز جهت دستیابی به ریزساختار فوق ریزدانه و نانوساختار به میزان قابل ملاحظهای کاهش مییابد.

در شکل 8- الف تصویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار اولیه مس خالص آنیل شده را نشان میدهد که دارای اندازه دانه متوسط و تقریب\_ی39µm است. همانطوریکه از تصویر میکروسکوپی اندازه دانه اولیه در مس آنیل شده مشخص است، دانههای با اندازه بزرگ و بصورت غیر همگن در ریزساختار اولیه حضور دارند. نمونه مسی خالص در اثر اعمال فشار توسط سنبه از درون محفظه مربوط به مجموعه قالب طراحي شده عبور نموده و کرنشهای پلاستیک را تجربه میکند. همان طوریکه از شکلهای 8 (ب-ح) دیده می شود ریز ساختار اولیه مس در اثر اعمال این کرنشهای پلاستیک تغییرات قابل توجهی پیدا کرده است. تصاویر میکروسکوپ نوری به منظور مطالعه تغییرات ریزساختاری در نقاط P1, P2, P3 در مناطق مختلف نمونه که در شکل 7 محل این نقاط نشان داده شده است، انجام شد. با اعمال کرنش پلاستیک به ریزساختار ماده در نقطه P2 در مرکز نمونه و در انتهای سیکل اول بطور کامل متفاوت از ریزساختار اوليه است. بطورىكه اندازه دانه اوليه بصورت قابل توجهي تغيير پیدا کرده و کوچکتر شده است. همچنین توزیع اندازه دانه نیز نسبت به حالت اولیه کمی همگن تر شده است (شکل 8- ب). با ادامه حرکت سنبه رو به پایین و گذر نمونه از مناطق مختلف قالب میزان کرنش پلاستیک اعمالی به ریزساختار ماده نیز افزایش می یابد. همان طور که در شکل 8- ج مشاهده می شود تصاویر میکروسکوپی در نقطه P3 در انتهای نیم سیکل اول از فرایند داده شده است. مطابق این شکل با اعمال کرنش پلاستیک بیشتر در مناطق مختلف قالب اندازه دانه نیز کاهش یافته است و توزیع یکنواختتری از دانهها بدست آمده است. در ادامه مطالعات ريزساختاري سنبه پاييني شروع به حركت نموده و نمونه به حالت اولیه خودبر گشت (انتهای سیکل اول فرایند). در اثر این بارگذاری کرنشهای پلاستیک با اندازه برابر در نیم سیکل اول در داخل نمونه بصورت تجمعی انباشت می گردد. جهت بررسی تغییرات ریزساختاری و تأثیر افزایش تعداد نیم سیکلها بر روی میزان انباشت کرنش پلاستیک و همچنین تغییرات اندازه و توزیع دانه در نقطه P1 و در انتهای سیکل اول و دوم از فرایند تغییرات اندازه و توزیع دانه با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت. همان طور که از شکلهای 8 (د و ح) مشاهده میشود با افزایش تعداد نیم

سیکل های شکل دهی اندازه و توزیع دانه بصورت قابل توجهی تغییر پیدا کرده است بطوریکه اندازه دانهها کوچکتر شده و ریزساختار توزیع یکنواختتری پیدا کرده است. از آنجایی که یافتن اندازه متوسط دانه در نیم سیکلهای بالاتر فرایند با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نوری دشوار میباشد، نمونه های حاصل با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مـورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل در شکلهای 9 (الف و ب) داده شده است. نتايج تصاوير ميكروسكوپ الكتروني روبشي اندازه دانه متوسط 450nm-460 در انتهای سیکل اول و در نقطه P1 را نشان میدهد و در ادامه و انتهای سیکل دوم فرایند اندازه دانه بصورت قابل توجهی ریزتر شده و به اندازه متوسط 110-240nm مىرسد. مى توان نتيجه گرفت كه افزایش تعداد سیکلهای فرایند موجب کاهش قابل توجهی در اندازه دانه اولیه خواهد شد، بطوری که در انتهای سیکل دوم فرایند یک ریزساختار فوق ریز و با توزیع یکنواخت دانه بندی حاصل شده است؛ که بیانگر قابلیت این فرایند در ریز دانه کردن میکروساختار و تولید مواد فوق ریزدانه و نانوساختار است.





**Fig. 8** The optical microscopy of microstructure in (a) annealed initial pure copper, (b) at point P2, (c) at point P3 at the end of first half-cycle, (d) at point P1 and the end of first cycle and (e) at point P1 and the end of second cycle.

**شکل 8** تصاویر میکروسکوپ نوری ریز ساختار حاصل از الف) نمونه اولیه مس خالص آنیل شده ب) در نقطه P2 و پس از اعمال کرنش شعاعی در وسط ضخامت ج) در نقطه P3 و در انتهای نیم سیکل اول د) در نقطه P1 و در انتهای سیکل اول فرایند و ح) در نقطه P1 و در انتهای سیکل دوم فرایند



Fig. 9 The SEM microstructure at point P1 and the end of (a) first cycle and (b) second cycle (الف) عبوری در نقطه P1 و در انتهای (الف) سیکل اول فرایند و (ب) سیکل دوم فرایند

شکل 10 نتایج حاصل از تست کشش تک محوری نمونههای اولیه و تولید شده در سیکلهای مختلف توسط اکستروژن ترکیبی تجمعی در دو سیکل اول و دوم در دمای محیط را نشان میدهد. همان طور که از نتایج تنش - کرنش بدست آمده مشخص است، نمونههای تولید شده استحکام بالاتر و انعطاف پذیری کمتری از خود نشان میدهند. افزایش استحکام کششی تسلیم و حداکثر استحکام کششی را در نمونهها با اعمال کرنش پلاستیک در سیکلهای مختلف میتوان به دو دلیل کرنش سختی در دمای اتاق که موجب افزایش استحکام میشود و همچنین کاهش اندازه دانه در مراحل مختلف و افزایش استحکام مرتبط با دامه اندازه دانه در مراحل مختلف و افزایش استحکام مرتبط با دانه در مواد فوق ریزدانه فلزی میزان استحکام نیز افزایش خواهد یافت.

مقادیر استحکام تسلیم، استحکام نهایی، انعطاف پذیری تا نقطه شکست و انعطاف پذیری یکنواخت بدست آمده از نمودار تنش-کرنش در دیاگرامهای شکل 11 خلاصه شده است. همان طوریکه از شکل 11- الف مشخص است، استحکام تسلیم نمونه 2/07 برابر و استحکام کششی نهایی 1/13 برابر نسبت به حالت اولیه افزایش یافته است.



Fig. 10 Enginnering stress-strain curves recorded for the annealed billet and the samples processed via ACE operation.

شکل 10 نمودار تنش-کرنش بدست آمده از تست کشش

1 Hall-Petch

بطور عمومی پذیرفته شده است که افزایش استحکامها به دلیل ریز شدن دانه و افزایش مرزدانهها میباشد. مطابق شکل 11- ب مقادیر هر دو داکتیلیته تا نقطه شکست و یکنواخت بطور چشم گیری کاهش یافته است. نتایج حاصل از آزمایشهای میکروسختی سنجی ماده اولیه و نمونههای تولید شده توسط فرایند اکستروژن ترکیبی تجمعی در شکل 12 نشان داده شده است. مطابق شکل میزان سختی نمونه تولید شده پس از دو سیکل از فرایند بطور قابل ملاحظهای افزایش یافته است. به گونهای که از مقدار اولیه 57Hv به 98Hv رسیده است.





Fig. 11 The effect of cycle numbers on the (a) elongation, (b) yield and ultimate tensile strength of ACE processed samples (منكل 11 تأثير تعداد سيكلهاى شكلدهى بر روى تغييرات الف العطاف پذيرى و ب) استحكام تسليم و نهايى نمونههاى توليد شده



Number of cycles

Fig. 12 The effect of ACE processing cycle numbers on the microhardness شکل 12 توزیع تأثیر تعداد سیکلهای شکلدهی بر روی تغییرات میکروسختی نمونههای تولید شده

رفتار تغییر شکل قطعه حین فرایند و نیز نحوه توزیع مقدار کرنش پلاستیک مؤثر را در هر نقطه از قطعه را در انتهای هـر نیم سیکل از اکستروژن ترکیبی تجمعی نشان میدهد. با شروع فرایند و ادامه آن کرنش مؤثر در قطعه انباشته میشود. همان طور که از شکلها مشاهده می شود با فشار سنبه بالایی نمونه اولیه مسی تحت فشار قرار گرفته و در مرحله اول بصورت شعاعی سیلان می یابد. در این مرحله به دلیل اعمال اکسترود شدن نمونه مقداری کرنش پلاستیک به ماده اعمال خواهد شد در شکل نیز مشاهده می شود که ماده پس از گذر از این منطقه کرنش پلاستیک قابل توجهی را تجرب نموده است. با ادامه حرکت سنبه ماده در داخل کانال هم مقطع، به اندازه نود درجه تغيير مسير داده و سيلان مي كند. اين منطقه كه بيشـتر مشابه فرایند فشار در کانالهای هم مقطع (ECAP) میباشد موجب اعمال کرنش برشی شدیدی بر ریزساختار میشود. از نتایج حاصل از شبیهسازی و شکلهای نشان داده شده می توان باندهای کرنش برشی اعمالی را در راستای تغییر مسیر نود درجه به خوبی مشاهده نمود. در ادامه مسیر شکل دهی با حرکت سنبه ماده بصورت مستقیم و در جهت حرکت سنبه رو به پایین حرکت کرده و نیم سیکل اول فرایند به پایان می سد.



**Fig.14** The FEM deformation behaviour of material during first halfcycle of ACE processing.

**شکل14** مراحل تغییرشکل قطعه در نیم سیکل اول از فرایند اکستروژن ترکیبی تجمعی نتایج تست هدایت الکتریکی در جدول 1 آمده است. همانطور که مشاهده می گردد، هدایت الکتریکی نمونههای مورد آزمایش با افزایش تعداد پاسهای فرایند اکستروژن ترکیبی تجمعی و با ریز شدن اندازه دانهها، کاهش مییابد.

شکل 13 استحکام و هدایت الکتریکی مربوط به مس خالص طی نیم سیکلهای اول، دوم و سوم فرایند اکستروژن را نشان میدهد. همانطور که در بخشهای قبلی اشاره گردید، طی فرایند اکستروژن ترکیبی تجمعی و با ریز شدن دانهها و افزایش تعداد مرز دانهها و افزایش استحکام، هدایت الکتریکی مس خالص اندکی کاهش مییابد. با مقایسه میزان کاهش هدایت الکتریکی مس خالص طی فرایند اکستروژن ترکیبی تجمعی با مس آلیاژی، مشاهده میگردد که این مقدار کاهش هدایت الکتریکی به ازای افزایش میزان استحکام خیلی اندک میباشد.

**Table 1** Comparison of the recorded electrical conductivity for the pure copper at annealed condition and at the end of first, second and forth haly-cycle of ACE processing with Cu-Zn alloys at different chemical compositions

جدول 1 نتایج حاصل ازاندازه گیری هدایت الکتریکی بر حسب درصد IACS برای مس خالص در حالت آنیل شده و در انتهای نیم سیکل 1و 2 و 4 در مقایسه با مس آلیاژی با ترکیب شیمیایی مختلف[12].

C27000	C22000	نيم سيكل	نيم سيكل	نيم سيكل	مس آنيل	
	C27000	C22000	چهارم	دوم	اول	شده
%23	%42	%82	%86/5	%91/5	%100	% IAC



Fig.13 Comparison of ultimate tensile strength and electrical conductivity of pure copper during first and second half-cycle of ACE processing.

**شکل 13** مقایسه استحکام و هدایت الکتریکی مربوط به مس خالص طی نیم سیکلهای اول و دوم و سوم فرایند اکستروژن ترکیبی تجمعی ASM

**6-2-** نتایج حاصل ازشبیهسازی عددی فرایند کستروژن اکستروژن ترکیبی تجمعی در این بخش نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود فرایند اکستروژن ترکیبی تجمعی، ارائه شده است. شکل های 14 و 15

میزان کرنش پلاستیک تجمعی اعمالی در انتهای نیم سیکل اول که در وسط ضخامت نمونه از نتایج شبیهسازی المان محدود حاصل شده است تقریباً 3/15 است که در مقایسه با مقدار کرنش محاسبه شده از روش تحلیلی 2/98 بود، اختلاف خیلی کمی دارد. این نتیجه نشان میدهد که شبیهسازی المان محدود میتواند پیشبینی دقیقی را نسبت به توزیع و مقادیر کرنش اعمالی در فرایند داشته باشد.

شکل 15 نتایج حاصل از شبیهسازی عددی فرایند و مراحل تغییرشکل قطعه در نیم سیکل دوم از فرایند اکستروژن ترکیبی تجمعی را نشان میدهد. همانطور که قبلاً نیز توضیح داده شد، در نیم سیکل دوم فرایند کرنشهای با مقادیر برابر با نیم سیکل اول در نمونه اعمال شده و بصورت تجمعی در ریزساختار انباشت میشود. بطوری که در انتهای نیم سیکل دوم از فرایند مقدار کرنش اندازه گیری شده از روش المان محدود در حدود 6/22 است که در مقایسه با مقدار محاسبه شده توسط رابط و تحلیلی 5/97 اختلاف ناچیزی دارد.



Fig.15 The FEM deformation behaviour of material during second halfcycle of ACE processing.

**شکل 15** مراحل تغییرشکل قطعه در نیم سیکل دوم از فرایند اکستروژن ترکیبی تجمعی

ماده توسط این فرایند مقدار بالا و قابل توجهی در مقایسه با سایر فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید میباشد. بطوریکه فرایند ECAP در یک سیکل کرنش پلاستیکی به اندازه 1/15 اعمال میکند. بزرگترین مزیت فرایند ارائه شده را میتوان این طور توضیح داد که نیاز به تعداد سیکلهای بیشتر جهت دستیابی به ریزساختار فوق ریزدانه نسبت به فرایندهای دیگر بصورت قابل توجهی کاهش خواهد یافت.

### 7- نتيجەگىرى

در این تحقیق فرایند اکستروژن ترکیبی تجمعی به عنوان یک فرایند مؤثر در تولید مس خالص فوق ریزدانه به طور موفقیت آمیز به کارگرفته شد. تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی نشان داد که اندازه دانه از مقدار اولیه ۳۹۵ در انتهای سیکل اول به ۵۵-450 و در انتهای سیکل دوم به 10-240nm کاهش یافته است. نتایج حاصل از آزمایشهای کشش نشان داد که استحکام کششی تسلیم و حداکثر نمونهها در انتهای سیکل اول و دوم به ترتیب 20/7 و 1/13 برابر افزایش یافت. نتایج حاصل از آزمون میکروسختی، حاکی از افزایش سختی نمونهها از مقدار اولیه ۲۶۲۷ به 98Hv پس از اعمال دو سیکل از فرایند میباشد. نتایج حاصله از شبیه سازی المان محدود در انتهای نیم ایمیاشد. نتایج حاصله از شبیه سازی المان محدود در انتهای نیم میباشد. نتایج حاصله از شبیه سازی المان محدود در انتهای نیم میباشد. نتایج حاصله از شبیه سازی المان محدود در انتهای نیم موده و مطابقت خوبی با نتایج تحلیلی داشت. مس خالص فوق بوده و مطابقت خوبی با نتایج تحلیلی داشت. مس خالص فوق مقایسه با مس آلیاژی حاصل گردید.

#### 8- مراجع

- Dalla Torre, F., Lapovok, R., Sandlin, J., Thomson, P.F., Davies, C.H.J., Pereloma, E.V., 2004. Microstructures and properties of copper processed by equal channel angular extrusion for 1–16 passes. *Acta Mater.* Vol. 52, pp. 4819–4832.
- [2] Han, B.Q., Langdon, T.G., 2005. Improving the high-temperature mechanical prop-erties of a magnesium alloy by equal-channel angular pressing. *Mater. Sci. Eng.A.* Vol. 410–411, pp. 435–438.
- [3] Alexandrov, I.V., Serebryany, V.N., Sarvarova, L.N., Alexandrova, M.V., Valiev, R.Z., 1997. Texture and Young's modulus anisotropy in nanostuctured copper. *Texture Microstruct*. Vol. 32, pp. 321–339.
- [4] F.Samadpour, G. Faraji, P. Babaei, S.R. Bewsher, Hydrostatic cyclic expansion extrusion (HCEE) as a novel severe plastic deformation process for producing long nanostructured metals, 2018, *Materials science and enginneirng A*. Vol. 01, pp. 116-127.

- [9] Hosseini, S.A., Daneshmanesh, H. High trength, high conductivity ultrafine grains commercial pure opper produced by ARB process., 2009. *Mater. Des.* Vol. 30 pp. 2911–2918.
- [10] A. Habibi, M. Ketabchi, M. Eskandarzadeh. Nanograined pure copper with high-strength and highconductivity produced by equal channel angular rolling process.2001. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211. pp. 1087-1089.
- [11] L. Toth, M. Arzaghi, J. Fundenberger, B. Beausir, O. Bouaziz, R. Arruffatmassion, Severe plastic deformation of metals by high-pressure tube twisting, 2009. *Scripta Materialia*, Vol. 60, pp. 175–177.
- [12] ASM Handbook, Vol. 2, 10th ed, pp. 265–346.

- [5] Cho, HY. Min, GS. Jo, CY. Kim, MH, Process design of the cold forging of a billet by forward and backward extrusion. 2003, *J. Mater Process Technol.*, Vol. 135, pp. 375–81.
- [6] Yang, DY. Kim, KJ., Design of processes and products through simulation of three-dimensional extrusion, 2007. J. Mater Process Technol., Vol191 pp. 2–6.
- [7] A. Farhoumand, R. Ebrahimi, Analysis of forwardbackward-radial extrusion process, 2009. *Mat. Des.*, Vol. 30, pp. 2152-2157.
- [8] S.M. Fatemi-Varzaneh, A. Zarei-Hanzaki, Accumulative back extrusion (ABE) processing as a novel bulk deformation method, 2009, *Mater. Sci. Eng. A.* Vol. 5 pp. 104-106.