



بررسی تجربی اثر کانال واسط در فرایند اکستروژن با کانال‌های هم مقطع زاویه دار بر روی خواص مکانیکی مس

محمد رضا شافعی¹، مجید الیاسی^{2*}، مرتضی حسین زاده³، حامد آقاجانی درازکلا⁴

- 1- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری، ساری، ایران
 - 2- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
 - 3- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد آیت الله املی، آمل، ایران
 - 4- دانشجو دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران
- * بابل، صندوق پستی 484، elyasi@nit.ac.ir

چکیده

هدف از این مقاله، بررسی اثر اضافه شدن کانال میانی در فرایند اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه دار (ECAP) بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار مس خالص است. به این منظور، سه قالب با زوایای داخلی 65، 75 و 90 درجه طراحی و ساخته شد و نمونه‌های مسی درون تمامی این قالب‌ها طی 4 پاس اکستروژن مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل از بررسی ریز ساختار مس نشان داد که با افزایش تعداد پاس اکستروژن، ساختار فلز مس در تمامی قالب‌ها از ابعاد میکرومتری به ابعاد نانومتری تبدیل شد. بیشترین کاهش ریز ساختار فلز مس مربوط به قالب با زاویه 65 درجه بود و کمترین آن نیز به قالب 90 درجه تعلق داشت. بررسی سختی قطعه کار نشان داد که مقدار سختی در سطح خارجی قطعه کار به دلیل اعمال نیرو و کرنش برشی بیشتر توسط بدنه قالب بر روی قطعه کار، افزایش چشمگیری نسبت به نمونه اولیه داشت سختی نمونه مسی پس از پاس چهارم در قالب‌های 90، 75 و 65 درجه به ترتیب 131، 138 و 141 برینل اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از آزمون کشش نشان داد که با کاهش زاویه کانال قالب از 90، 75 و 65 درجه، استحکام کششی نهایی قطعات نهایی اکستروژن شده، به ترتیب 23، 29 و 31 درصد نسبت به ماده خام افزایش داشت. عمر خستگی نمونه ایکپ شده در قالب با زاویه 65 درجه بهبود 17 برابری داشت. همچنین قطعات ایکپ شده در قالب با زاویه 90 و 75 درجه بهبود عمر 14 و 15 برابری داشتند.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 16 تیر 1397
پذیرش: 8 آبان 1397
ارائه در سایت: اسفند 1397

کلیدواژگان:

اکستروژن با کانال‌های هم مقطع
زاویه دار
کانال واسط، مس
خواص مکانیکی
ریزساختار

Experimental Investigation of the Effect of Equal Channel Angular Pressing Intermediate Canal of on the Mechanical Properties of Copper

Mohammaad Reza Shafeie¹, Majid Elyasi^{2*}, Morteza Hosseinzadeh³, Hamed Aghajani Derazkola⁴

- 1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University of Sari Branch, Sari, Iran.
 - 2- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
 - 2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University of Ayatollah Amoli Branch, Amol, Iran
 - 2- Young Researchers and Elites Club, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
- *P.O.B. 484 Babol, Iran, elyasi@nit.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 30 July 2018
Accepted 30 October 2018
Available Online March 2019

Keywords:

Equal Channel Angular Pressing
Intermediate Canal
Copper
Mechanical Properties
Microstructure

Abstract

The aim of this article is to investigate the effect of Equal Channel Angular Pressing (ECAP) intermediate on the mechanical and microstructure properties of pure copper. For this purpose, three molds with internal angles of 65, 75 and 90 degree were designed and made and copper samples were examined for all these molds during 4 passes of extrusion. The results of the investigation of copper microstructure showed that by increasing the number of extrusion passes, the structure of copper in all molds was changed from micrometer to nanometer. The greatest reduction in the microstructure of the copper metal was related to the mold with a 65 degree internal channel angle and the lowest was 90°. The hardness changes of the workpiece showed that significant increase compared to the neat sample due to the more applied force and shear strain by the mold body. After the fourth pass extrusion measured hardness at 90, 75 and 65 degrees, where 141, 138 and 131 HB, respectively. The results of the tensile test showed that by decreasing the angle of the mold channel from 90, 75 and 65 degrees, the ultimate tensile strength of the final extruded parts increased by 23, 29 and 31 percent, respectively, relative to the raw material. The fatigue life of the ECAPed sample in the mold with an angle of 65 degrees had a 1700% improvement. ECAPed parts with a 90- and 75-degree angle improved lifetime by 1400 and 1500% times, respectively.

Please cite this article using:

M. R. Shafeie, M. Elyasi, M. Hosseinzadeh, H. Aghajani Derazkola, Experimental Investigation of the Effect of Equal Channel Angular Pressing Intermediate Canal of on the Mechanical Properties of Copper, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 32-41, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

جمله دستیابی به استحکام‌های بالا همزمان با حفظ هدایت الکتریکی حس می‌شود [13]. یکی از جدیدترین و کارآمدترین روش‌ها در این زمینه فرایند ECAP می‌باشد.

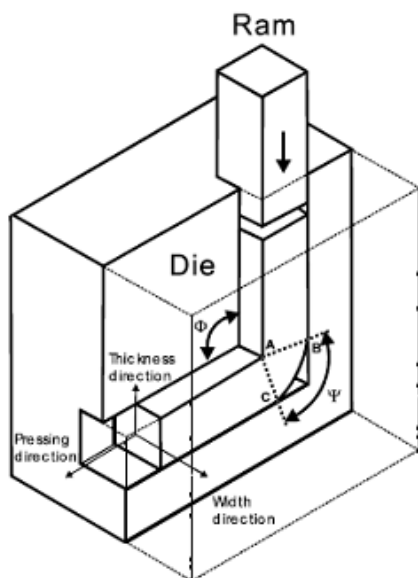


Fig. 1 Schematic view of Equal Channel Angular Pressing Extrusion
شکل 1 شماتیک قالب اکستروژن با کانال‌های هم مقطع زاویه دار

در زمینه تحقیقات انجام شده بر روی مس می‌توان به موارد متعددی اشاره کرد که بیشتر به بررسی تغییرات رفتار فلز مس و ساختار آن در حین این فرایند پرداختند. فوکودا و همکاران [15] به بررسی چرخش کرسنال‌های فلز مس در حین فرایند ECAP پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که در پاس اول، کرسنال‌های کشیده شده مس با مرز دانه‌های آن موازی می‌شوند. هیگوارا و همکاران [16] در یک پژوهش کاربردی اعلام کردند که به دلیل تغییر اندازه ساختار فلز مس از مقیاس میکرو به نانو، استحکام خستگی قطعات مسی ECAP شده از قطعات معمولی بسیار بیشتر می‌شود. ژو و همکاران [17] به بررسی رفتار و استحکام خستگی فلز مس بعد از فرایند ECAP پرداختند. آنها اعلام کردند که تحت عمر خستگی تنش-کنترل قطعات مسی بعد از ECAP بیشتر از خستگی کرنش-کنترل است. لاگو و همکاران [18] به بررسی ثبات حرارت در فرایند ECAP مس پرداختند. آنها با عملیات حرارتی فلز مس بعد از 8 پاس ECAP و کنترل فرایند موفق به تولید قطعه مسی با اندازه ریزساختار 250 نانو متر شدند که 510 مگاپاسکال بود. در تحقیقی دیگر که توسط کرال و همکارانش [19] انجام گرفت مشخص شد که فرایند آنیل طولانی مدت در دمای اتاق سبب افزایش استحکام قطعات ECAP مسی می‌شود. در پژوهشی

روش اکستروژن با کانال‌های هم مقطع زاویه دار¹ (ECAP) یکی از مهم‌ترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید² است که طی آن با اندازه‌های چند صد نانومتر ایجاد می‌شود [2,1]. این روش نخستین بار توسط سگال و همکاران در دهه 1970 معرفی گردید که طی آن موادی با اندازه دانه‌های چند صد نانومتر ایجاد گردید [3-5]. این روش بر پایه اعمال تنش برشی زیاد در زمان اندک سبب ایجاد دانه بندی‌های بسیار ریز در ماده خام می‌شود. تنش‌های برشی به وجود آمده در ماده اولیه در حین فرایند، سبب بالا رفتن چگالی نابجاییها در آن می‌شود. این نابجاییها مرزدانه‌های با زاویه کوچک را تشکیل می‌دهند که در نهایت با تبدیل شدن به مرزدانه‌های با زاویه بزرگ، ردیف‌هایی از دانه‌های ریز را به وجود می‌آورند [6]. از لحاظ مکانیکی، در این فرایند، شمش خام در اثر نیروی فشاری سنبه از راهگاه قالب به بیرون رانده می‌شود، بدون آن که سطح مقطع شمش تغییر کند [7]. بدلیل عبور شمش از محل تقاطع دو کانال قالب، به شمش عبوری کرنش برشی اعمال شده و سبب بهبود خواص مکانیکی محصول خروجی می‌شود. از مهم‌ترین خواص این روش قابلیت تکرار آن تا رسیدن به کرنش مورد نظر است و این قابلیت به دلیل ثابت ماندن ابعاد قطعه کار در طول فرایند است [8].

در این فرایند که شماتیک آن در شکل 1 نشان داده شده است، قالب از کانال‌هایی با مقاطع یکسان که با یکدیگر زاویه ϕ می‌سازند تشکیل شده است. زاویه ϕ در این فرایند به صورت متداول می‌تواند بین 60° تا 135° انتخاب شود [9]. زاویه قالب کمتر از 90° به علت ایجاد منطقه‌ی مرده در مکان برخورد کانال ورودی و خروجی و احتیاج به نیروی فشاری زیاد برای حرکت شمش، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد [10-12]. از پارامترهای موثر در انجام این فرایند می‌توان به زاویه ϕ ، شکل و ابعاد سطح مقطع شمش و قالب، اصطکاک بین شمش و قالب، جنس شمش و زاویه ψ ، اشاره نمود [13]. تحقیقات فراوانی در زمینه ECAP فلزات مختلف از جمله مس و آلیاژهای آلومینیوم انجام گرفته است [14]. فلز مس به دلیل هدایت الکتریکی و گرمایی مناسب به‌طور گسترده در ساخت تجهیزات الکتریکی، جوشکاری، اتصالات برقی و غیرهمورد استفاده قرار می‌گیرد. باتوجه به پیشرفت روزافزون صنایع مختلف و افزایش بازدهی تجهیزات الکتریکی، نیاز به بهبود خواص فلز مس از

¹ Equal Channel Angular Pressing

² Sever Plastic Deformation (SPD)

تصویر قالب و سنبه مورد استفاده در این فرایند در شکل 3 به نمایش در آمده است.

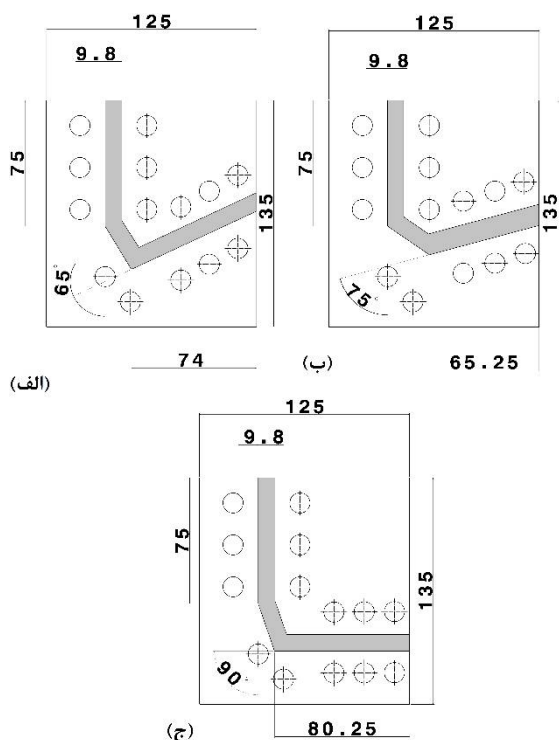


Fig. 2 Schematic view of ECAP die with (a) 65, (b) 75 and (c) 90 degree channel

شکل 2 تصویر شماتیک از قالب با زاویه داخلی کانال (الف) 65، (ب) 75 و (ج) 90 درجه

جدول 1 خواص مکانیکی فلزات پایه

| Table 1 Mechanical properties of base material | | | | | |
|--|------------|------------|---------------------|------------|-------|
| سختی (ویکرز) | ازدیاد طول | برشی (MPa) | استحکام تسلیم (MPa) | کششی (MPa) | آلیاژ |
| 104 | 12 | 235 | 236 | 392 | مس |



Fig. 3 Picture of die and punch in this study

شکل 3 تصویر قالب و سنبه مورد استفاده در این فرایند

دیگر که توسط وانگ و همکارانش [11] انجام شد، اعلام کردند که پس از 12 پاس ECAP فلز مس، عملیات حرارتی آنیل سبب افزایش استحکام و سختی قطعه کار میشود. دنگ و همکاران [12] به بررسی المان محدود فرایند ECAP مس پرداختند. آنها اعلام کردند که ضریب اصطکاک بین قالب و قطعه کار تأثیر فراوانی بر روی ناهمگن شدن بافت و ساختار فلز مس دارد.

در این مقاله تأثیر اضافه شدن کانال واسط و دو مرحله‌ای شدن زاویه قالب ECAP مس به عنوان یک پیشنهاد جدید جهت افزایش اعمال تنش برشی و کاهش مراحل ECAP بررسی می‌شود. در واقع در این طرح زاویه قالب (ϕ) شکسته شده و به دو زاویه کوچکتر تقسیم می‌شود. به صورتی که جمع این دو زاویه برابر مقدار ϕ می‌باشد. بر اساس این پیشنهاد و با استفاده از انجام فرایند به صورت تجربی، چگونگی تأثیر کانال واسط در خواص مکانیکی و میکرو ساختار در شمش خروجی در مقایسه با حالت قالب‌هایی با زوایای مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2- روش آزمایش

به منظور انجام فرایند، سه ماتریس دو تکه با زوایای کانال 65، 75 و 90 درجه از جنس فولاد گرم کار آلیاژی 1/2312 با ابعاد $12/5 \times 13/5$ سانتی‌متر ساخته شد.

برای افزایش سختی و چقرمگی، سنبه‌ها به مدت 1 ساعت در دمای 500 درجه سانتی‌گراد تحت عملیات حرارتی قرار داده شدند و سپس در دمای محیط خنک کاری شدند. به منظور هدایت کردن سنبه و ثابت نکه داشتن موقعیت سوراخ‌های رودر رو نسبت به هم، از 4 عدد میل راهنما با قطر 10 میلی‌متر استفاده شد و اتصال دو تکه قالب به همدیگر بوسیله 14 عدد پیچ 10 میلی‌متر صورت گرفت. به منظور حرکت دادن در کانال و برای جلوگیری از کماتش قطعه کار، از یک سنبه آبکاری شده با طول 20 سانتی‌متر و قطر 9/5 میلی‌متر از جنس فولاد SPK استفاده شد. شکل 2 تصویر شماتیک نیمه از قالب‌های مورد استفاده در این فرایند را نشان می‌دهد. انجام تأثیر زاویه قالب اکستروژن بر روی مس خالص مطالعه شد که خواص مکانیکی آن در جدول 1 آمده است.

تمامی نمونه‌ها دارای طول 10 سانتی‌متر و قطر 9/7 میلی‌متر بودند. در زمان انجام فرایند از گریس صنعتی معمولی به عنوان روانکار استفاده شد. برای اعمال تیرو بر روی سنبه، از یک پرس هیدرولیک با ظرفیت 300 تن، استفاده شد. در بخش نخست، نمونه‌ها پس از فرایند اکستروژن در پاس اول به اندازه 90 درجه در جهت عقربه‌های ساعت چرخانده شده و وارد قالب می‌گردید.

شکل 5 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده میشود، هیچگونه ترک و یا عیبی در سطح قطعه کارها به وجود نیامد. این پدیده به دلیل انتخاب پارامترهای مناسب فرایند و نیز انتخاب زوایای درست کانال قالب‌ها حاصل شد. به منظور بررسی تغییرات ریز ساختار قطعه کار، تصویر متالوگرافی ریزساختار فلز پایه قبل و بعد از فرایند اکستروژن مورد مقایسه قرار گرفت. تصویر متالوگرافی از مقطع برش خورده طولی و عرضی قطعه کار مسی قبل از فرایند اکستروژن، در شکل 6 نشان داده شده است. با توجه به اینکه دانه بندی‌های نمونه قطعه کار مسی، در ابعاد ماکروسکوپی بود، اندازه‌گیری روی تصویر تهیه شده با دوربین نوری صورت گرفت. همان‌طور که در شکل مشاهده میشود، قطعه کار مسی، دارای ریز ساختار طولی با مرز بندی‌های کاملا مشخص است. وجود تصاویر از مرز دانه‌ها و ریزساختار فلز اولیه سبب می‌شود تا اندازه‌گیری ابعاد دانه‌بندی‌ها راحت‌تر انجام شود. بر اساس نتایج بدست آمده میانگین ابعاد ریزساختار قطعه کار مسی قبل از انجام فرایند ECAP حدود 200 میکرومتر بود.

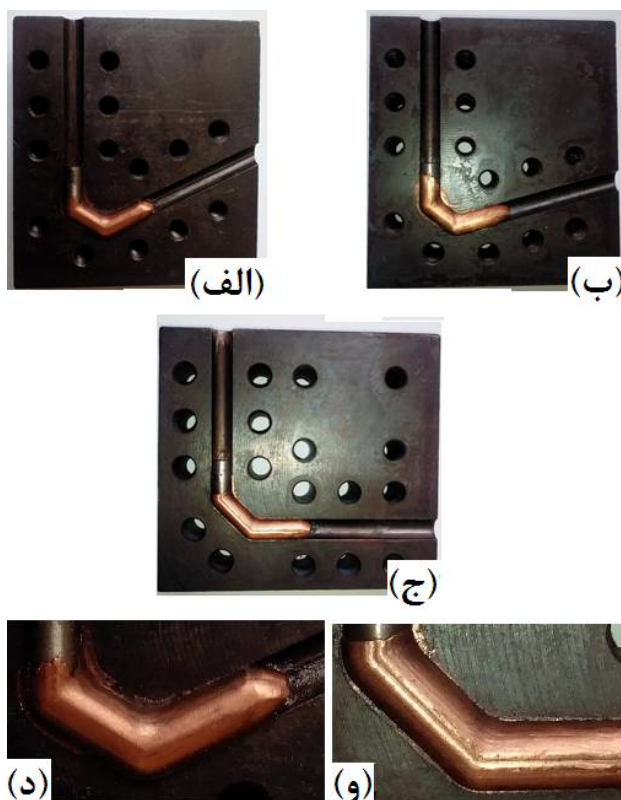


Fig. 5 (a) 65, (b) 75 and (c) 75 degree ECAP dies during process, ECAP sample in the die with (d) 65 and (e) 90 degree channel

شکل 5 تصویر قالب با زاویه کانال داخلی (الف) 65، (ب) 75 و (ج) 90 درجه و تصویر نمونه در حال اکستروژن در کانال (د) 65 و (و) 90 درجه

پس از هر پاس فشردن نمونه، قالب باز میشد و قطعه از درون آن بیرون کشیده میشد و پس از چرخاندن مجددا درون قالب قرار میگرفت. نمونه‌های مربوط به حالت پایه و پاس اول تا پاس چهارم، خروجی هر سه قالب با استاندارد ASTM E8M تحت آزمون کشش قرار گرفتند و تست سنجش سختی برینل بر روی نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM E10-04 انجام شد. نمونه‌های تست کشش استوانه ای شکل انتخاب شدند که در دوسر آنها رزوه شده بود تا به گیره دستگاه کشش متصل شود. نمونه‌های فوق دارای قطر 6/2 میلی‌متر و طول کلی 50 میلی‌متر بودند. دارای قطر برای بررسی مقاومت خستگی قطعات اکستروژن شده، نمونه‌هایی با قطر 4 میلی‌متر و مطابق استاندارد ASTM E466 آماده سازی شد و با استفاده از آزمون دورانی-خمشی به مقایسه نمونه اولیه و نمونه اکستروژن شده بعد از 4 پاس پرداخته شد. شکل 4 نمونه واقعی تست خستگی را نشان می‌دهد. در این آزمایشات نمونه‌های اکستروژن شده در ابتدا مانت گرم و سپس سمباده زده شدند و توسط آلومینا 1 میکرومتر پولیش نهایی شدند، برای مشاهده ریز ساختار در زیر میکروسکوپ الکترونی از محلول آشکارساز با ترکیب HNO_3 و H_2O با مقدار 50 میلی‌لیتر و بصورت مساوی استفاده شد و پس از آن با استفاده از دوربین الکترون روبشی (SEM) به بررسی اندازه دانه‌ها پرداخته شد.

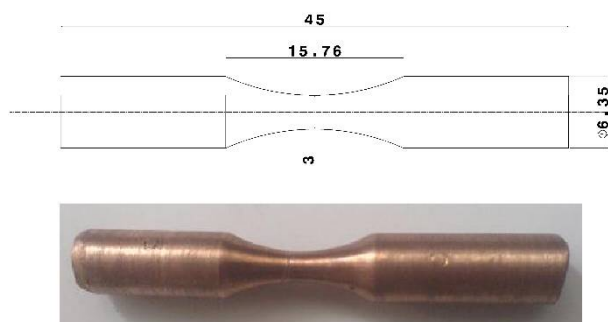


Fig. 4 Fatigue test sample of copper

شکل 4 نمونه مسی تست خستگی

3- بحث و نتایج

3-1- تغییرات ریز ساختاری

در حین فرایند تمامی نمونه‌ها از پاس اول تا پاس چهارم بدون هیچگونه عیب و یا ترک سطحی اکستروژن شدند. این رفتار مواد در تمامی قالب‌ها صادق بود که نشان از خاصیت کارپذیری مناسب فلز مس در نرخ‌های کرنش بالا داشت. تصویر باز شده قالب‌های 65، 75 و 90 درجه در حین انجام فرایند به همراه تصویر بزرگنمایی قطعه مسی درون قالب 65 و 90 درجه در

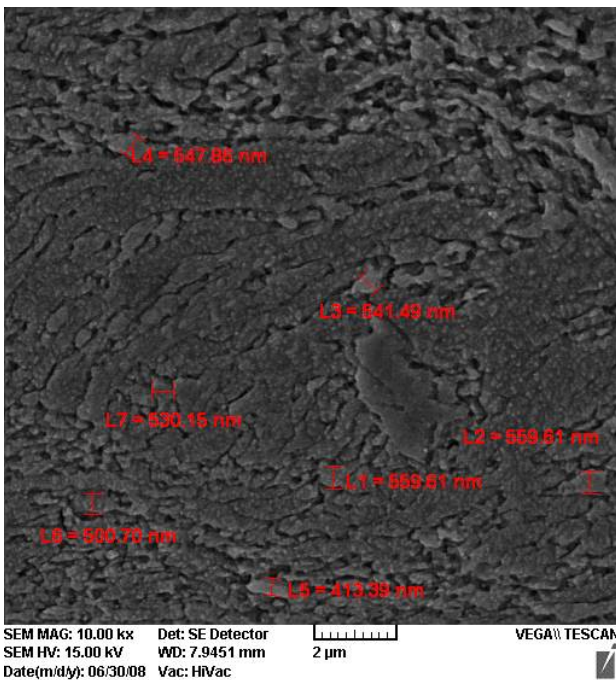


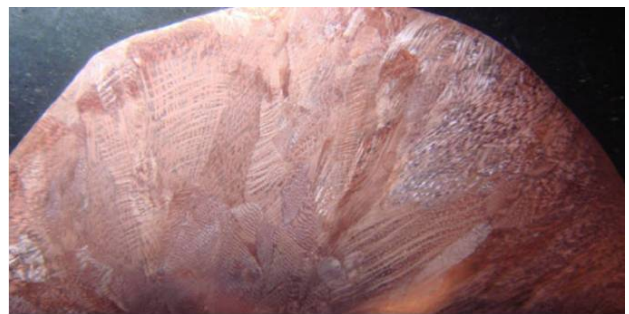
Fig. 7 SEM image from microstructure of ECAPed copper after 4th pass extrusion in 90° internal die channel

شکل 7 تصویر ریز ساختار مس با استفاده از میکروسکوپ الکترون روبشی پس از چهارمین پاس اکستروژن در قالب با زاویه کانال 90 درجه

با کاهش زاویه قالب ECAP و افزایش تنش برشی، اندازه ریزساختار قطعه کار نهایی پس از پاس چهارم کاهش می‌یابد. این پدیده به سبب اعمال نرخ کرنش برشی بیشتر در زوایای کمتر رخ می‌دهد. وجود کانال واسط نیز این پدیده را تشدید می‌کند. شکل 8 تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) از ریزساختار قطعه کار نهایی مسی را در پاس چهارم نشان می‌دهد که در قالب‌های 75 و 65 درجه ECAP شده بود. نتایج بررسی ریزساختار قطعه کارها نشان داد که میانگین اندازه ریزساختار قطعه ای که در قالب با کانال داخلی 75 درجه ECAP شده بود، به حدود 290 نانو متر پس از پاس چهارم اکستروژن رسید. این روند در قطعه کاری که با کانال داخلی قالب 65 درجه ECAP شده بود نیز با شدت بیشتری تکرار شد. در بررسی تغییرات ریزساختار این قطعه کار، توسط میکروسکوپ الکترون روبشی مشخص شد که میانگین اندازه ریزساختار قطعه کار مسی در این قالب پس از پاس چهارم به 250 نانومتر رسید.

3-2- تغییرات سختی قطعات

به منظور بررسی تغییرات سختی قطعات ECAP شده، آزمون سختی سنجی برینل بر روی تمامی نمونه‌ها در نقاط مختلف (قسمت بالا، وسط و پایین) و به ترتیب حروف علامتگذاری شده در شکل 9، انجام شده است.



(الف)



(ب)

Fig. 6 Optical microscope image from copper workpiece at (a) cross section and (b) longitudinal section view

شکل 6 تصویر ریز ساختار مس با استفاده از میکروسکوپ نوری در مقطع برش خورده (الف) عرضی و (ب) طولی قطعه کار

تغییرات کرنش برشی ناشی از فرایند ECAP سبب شد تا اندازه ریزساختار مس، کوچک شود و از طرف دیگر با وجود تنش‌های برشی اعمال شده توسط کانال واسط در حین فرایند، ساختار فلز مس دارای کشیدگی طولی شد که هم‌راستا با جهت جریان فلز در داخل قالب ECAP بود. براساس نتایج حاصل از تصویربرداری میکروسکوپ نوری، ابعاد ریزساختار فلز مس پس از اولین پاس اکستروژن به مقدار تقریبی 20 درصد در تمامی قالب‌ها کوچک شده بودند. به دلیل کرنش برشی زیاد و سریع در حین فرایند ECAP، ابعاد ریز ساختار قطعه کار خام مسی به اندازه ای ریز شده است که امکان تصویر برداری از آن با میکروسکوپ نوری وجود ندارد. بر همین اساس اندازه‌گیری دانه بندی‌ها با میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) انجام شد.

نتایج حاصل از بررسی ریز ساختار قطعه کار در قالب 90 درجه نشان داد که در پاس چهارم فرایند ECAP، میانگین اندازه ریزساختار قطعه کار مسی به حدود 526 نانومتر رسید. شکل 7 تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) از ریزساختار قطعه کار مسی را پس از پاس چهارم در قالب با زاویه داخلی کانال 90 درجه نشان می‌دهد.

در هر نمونه سطح C قسمت کف نمونه است که در آخرین پاس (پاس چهارم) و پس چرخش نسبت به محور B، از کانال عبور نموده است و سطح A، وجه بالایی نمونه بوده و هنگام عبور از کانال، تماس نزدیک با گوشه کانال دارد. نقاط اندازه‌گیری شده در آزمون سختی سنجی نیز به ترتیب از A تا نقطه C بود. نتایج حاصل از بررسی سختی، در نقاط مشخص شده نشان داد که مقدار سختی در سطح A از سختی سطوح دیگر بالاتر بوده و با افزایش تعداد پاس ECAP برای تمام نمونه‌ها، سختی این منطقه افزایش می‌یابد. این روند در تمامی نمونه‌ها صادق بود. به دلیل زیاد بودن کرنش برشی بیشتر اعمال شده به بیلت در این سطح، سختی منطقه A از دیگر نقاط قطعه‌کار بیشتر است. هر چه به قسمت‌های پایینی قطعه‌کار نزدیک می‌شویم، سختی قطعه‌کار مسی نیز کمتر می‌شود. به دلیل چرخش نمونه‌ها در طول فرایند و اعمال کار سختی کمتر، توزیع کرنش در نواحی B و C کمتر می‌شود و در نتیجه سختی این قسمت‌ها به نسبت نقطه A کمتر می‌شود. از طرف دیگر، با افزایش تعداد پاس ECAP سختی این نقاط نیز بیشتر می‌شود. شکل 10 نتایج آزمون سختی برینل را در نمونه مسی پس از پاس چهارم در قالب‌های 90، 75 و 65 درجه نشان می‌دهد. نتایج حاصل نشان می‌دهد سختی نقطه A در قالب‌های 90، 75 و 65 درجه به ترتیب 141، 138 و 131 برینل اندازه‌گیری شد و سختی نقطه C در همان قالب‌ها به ترتیب 129، 135 و 121 برینل اندازه‌گیری شد.

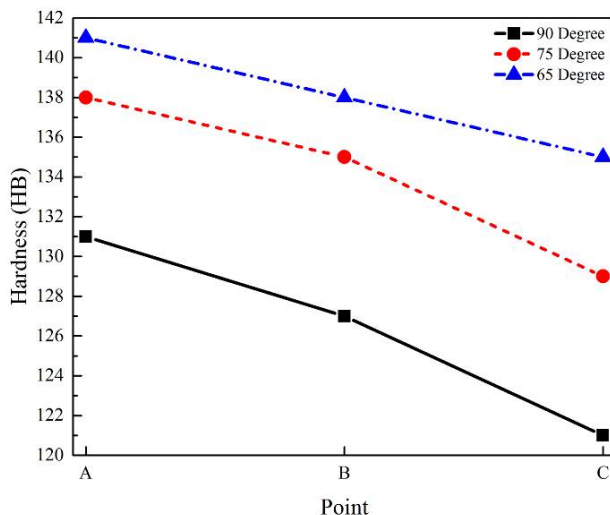


Fig. 10 Hardness change results of copper workpiece after 4th pass at different die channel angle

شکل 10 نتایج حاصل از تغییرات سختی نمونه قطعه‌کار مسی پس از پاس چهارم در قالب با زاویه کانال‌های مختلف

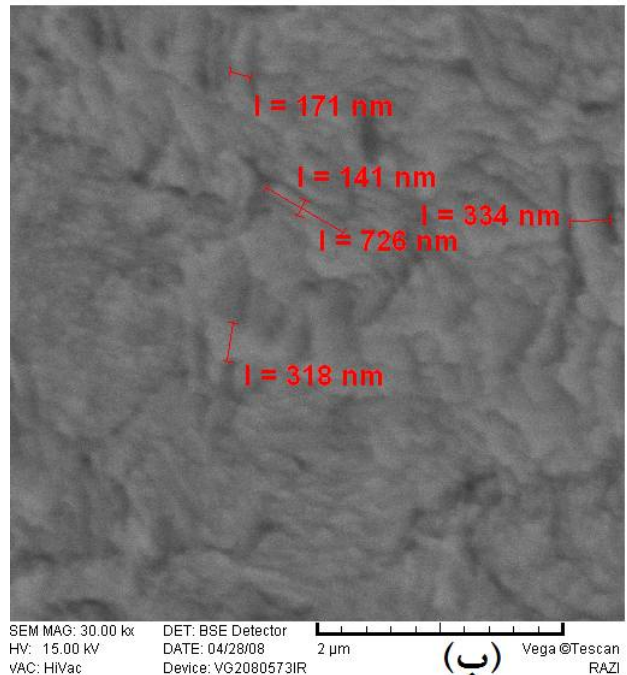
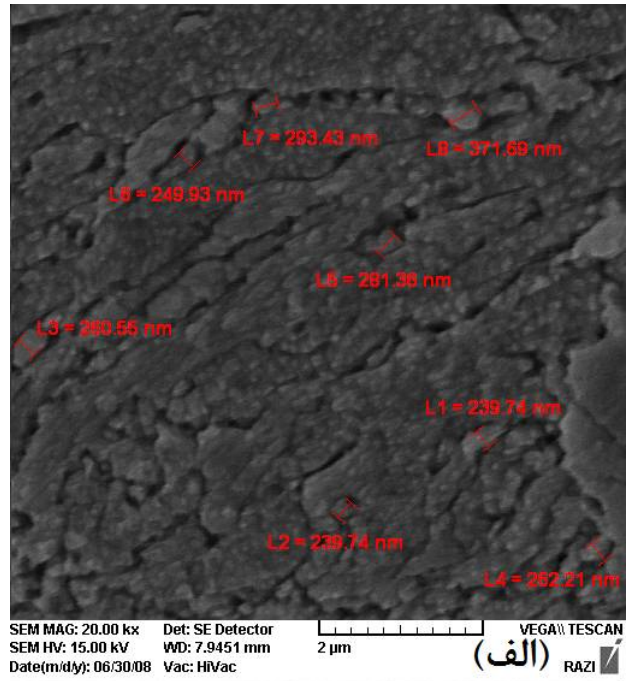


Fig. 8 SEM image from microstructure of ECAPed copper after 4th pass extrusion in (a) 65° and (b) 75° internal die channel

شکل 8 تصویر ریز ساختار مس با استفاده از میکروسکوپ الکترون روبشی پس از چهارمین پاس اکستروژن در قالب با زاویه کانال (الف) 65 و (ب) 75 درجه

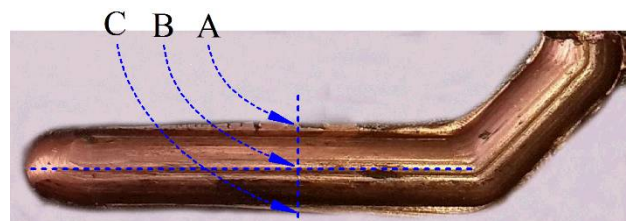


Fig. 9 Picture of a copper sample for measurement of hardness changes after 4th pass

شکل 9 تصویر نمونه قطعه مسی جهت آزمون سختی پس از پاس چهارم

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، وجود کانال واسط و زاویه داخلی تأثیر فراوانی در تغییرات سختی دارد. همان‌طور که نتایج حاصل نشان داد تغییرات سختی قسمت‌های بالایی و پایینی قطعه کار مسی در قالب با زاویه کانال قالب 65 و 75 درجه زیاد نبود ولی تغییرات سختی قسمت‌های بالایی و پایینی قالب با کانال داخلی 90 درجه نسبت به حالت‌های قبل بیشتر بود. این پدیده حاکی از توزیع متقارن‌تر کرنش برشی در قسمت‌های بالا و پایین قطعه کار با زاویه داخلی کمتر از 90 درجه دارد.

3-3- نتایج حاصل از تست کشش

یکی از مهم‌ترین آزمون‌ها در بررسی استحکام شمش خروجی از فرایند ایکپ، آزمون کشش می‌باشد. از این رو، از شمش‌های خروجی با پس از هر مرحله اکستروژن، نمونه‌هایی برای آزمون کشش آماده گردید که یک نمونه از نتایج بدست آمده از این آزمون در شکل 11 نشان داده شده است. نمونه انتخاب شده در قالب با زاویه داخلی 65 درجه انتخاب شد.



(الف)

شکل 11 نمونه تست کشش و نتایج مربوط به استحکام شکل 11 نمونه تست کشش و نتایج مربوط به استحکام تسلیم نمونه‌های آزمون کشش را نشان می‌دهد که در قالب‌های 90، 75 و 65 درجه پس از چهار پاس ECAP شده بودند. نتایج حاصل از آزمون کشش نشان داد که با کاهش زاویه کانال قالب از 90 تا 65 درجه، استحکام تسلیم قطعات نهایی افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج حاصل از تست کشش، استحکام تسلیم قطعات نهایی ECAP شده پس از مرحله چهارم، به ترتیب به 485، 506 و 517 مگاپاسکال در قالب با زاویه کانال 90، 75 و 65 درجه رسید. مهم‌ترین دلیل افزایش استحکام قطعات با کاهش زاویه قالب را می‌توان به افزایش نرخ کرنش، کاهش اندازه ریزساختار و افزایش سختی نسبت داد که همزمان با کاهش زاویه داخلی در کانال واسط هم رخ می‌دهد.

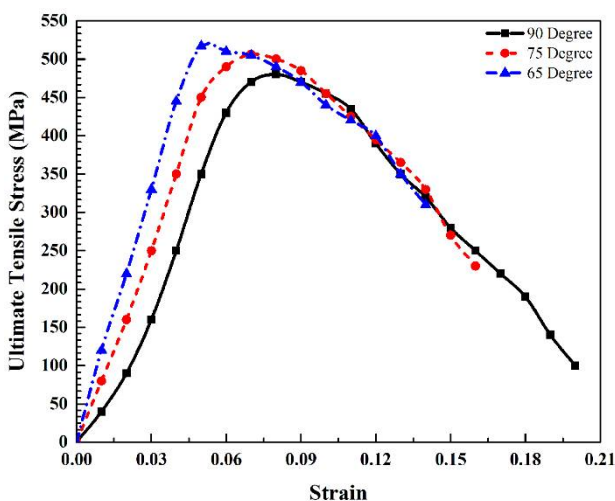
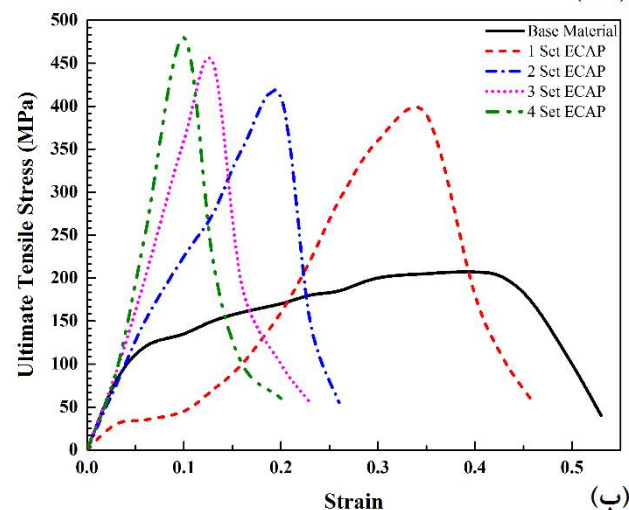


Fig. 12 Tensile test results of sample in mold with various internal channel

شکل 12 نتایج حاصل از تست کشش در قالب با زوایای داخلی مختلف

این روند در مورد ازدیاد طول نمونه‌ها روندی معکوس دارد. با افزایش زاویه داخلی کانال اکستروژن، ازدیاد طول قطعه‌کار



(ب)

Fig. 11 (a) tensile test sample and (b) results of tensile test in die with 90 degree internal channel

شکل 11 (الف) نمونه تست کشش و (ب) نتایج حاصل از تست کشش در قالب با زاویه کانال داخلی 90 درجه

نتایج حاصل نشان داد که با افزایش تعداد پاس‌های اکستروژن

3-4- آزمون خستگی

به منظور بررسی تغییرات استحکام خستگی نمونه‌های اولیه و ایکپ شده، نمونه شاهد و نمونه ایکپ پس از پاس چهارم را در تنش یکسان 184 مگاپاسکال (با اعمال نیروی مربوط به وزنه 600 گرمی) تحت آزمون دورانی خمشی قرار گرفتند. نتایج حاصل از آزمون خستگی دورانی که در شکل 14 به نمایش گذاشته شده است، نشان داد که نمونه شاهد بعد از گذراندن 204224 سیکل و نمونه ایکپ پاس 4 در قالب با زاویه کانال 65 درجه بعد از 3615504 سیکل گسیخته شد. براساس نتایج حاصل میتوان دریافت که عمر خستگی نمونه ایکپ شده در قالب با زاویه 65 درجه بهبود 17 برابری داشت. همچنین قطعات ایکپ شده در قالب با زاویه 75 و 90 درجه بهبود عمر 15 و 14 برابری داشتند.

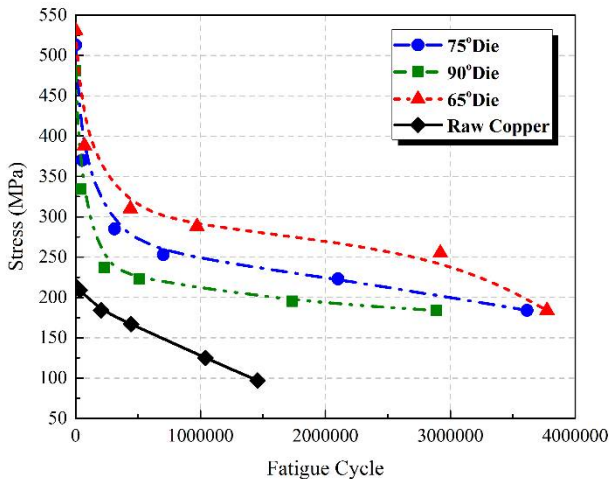


Fig. 14 Fatigue test results after 4th pass ECAP of samples

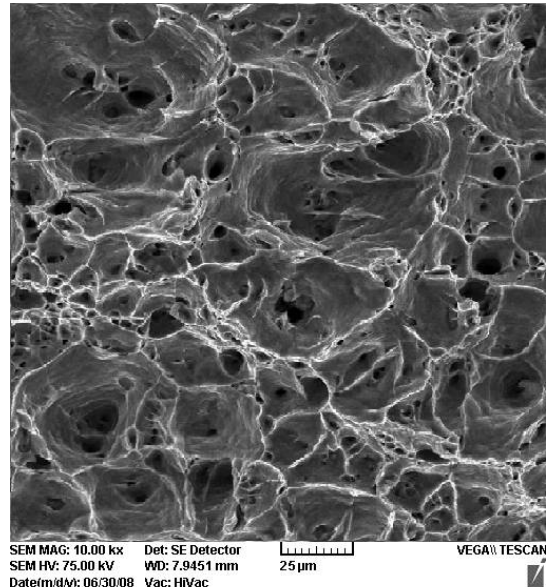
شکل 14 نتایج حاصل از آزمون خستگی نمونه‌های مختلف پس از چهارمین پاس ECAP

نتایج شکست نگاری پس از آزمون خستگی نمونه‌ها که در قالب با زاویه داخلی 90 و 65 درجه ECAP شدند در شکل 15 نشان داده شده است. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش زاویه داخلی و وجود کانال واسط سبب استحکام بیشتر و فشردگی مواد در اثر کرنش برشی بیشتر می‌شود.

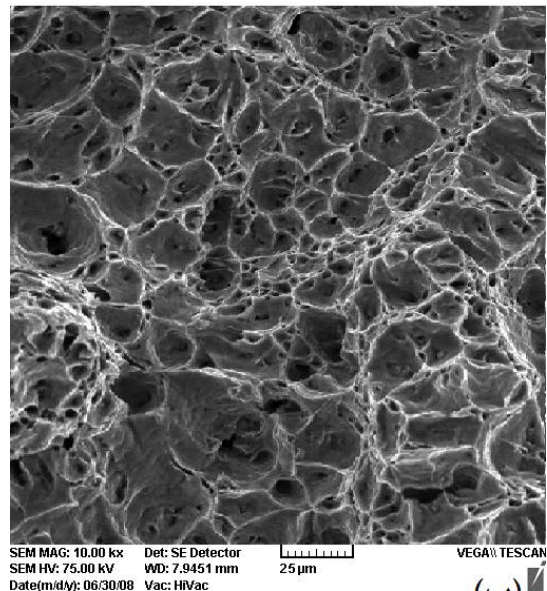
4- نتایج

در این تحقیق، اثر اضافه‌شدن کانال میانی و زاویه داخلی کانال در فرایند اکستروژن کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار بر روی مس خالص مورد مطالعه قرار گرفت. انجام فرایند روی این فلز با موفقیت انجام شد و نتایج حاصل بصورت زیر ارائه می‌شود:

نهایی در آزمون کشش کاهش می‌یابد. نتایج حاصل نشان داد که ازدیاد طول نمونه‌های کشش در پاس چهارم فرایند ECAP قالب 90، 75 و 65 درجه، برابر با 5/5، 7 و 8 میلی‌متر بود. نتایج حاصل از شکست نگاری سطح نمونه با زاویه داخلی 65 درجه در پاس اول و چهارم (شکل 13) نیز نشان داد با افزایش استحکام سطح شکست دارای قله‌های بیشتری می‌شود که به دلیل تجمع نایجایی‌ها در حین فرایند ECAP و افزایش سختی رخ می‌دهد.



(الف)



(ب)

Fig. 13 SEM image of fracture surface of sample which ECAPed in (a) 1st and (b) 4th pass in die with 65 degree internal channel

شکل 13 تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی از سطح شکست نمونه پس از (الف) پاس اول و (ب) پاس چهارم که در قالب با زاویه داخلی 65 درجه ECAP شده بود

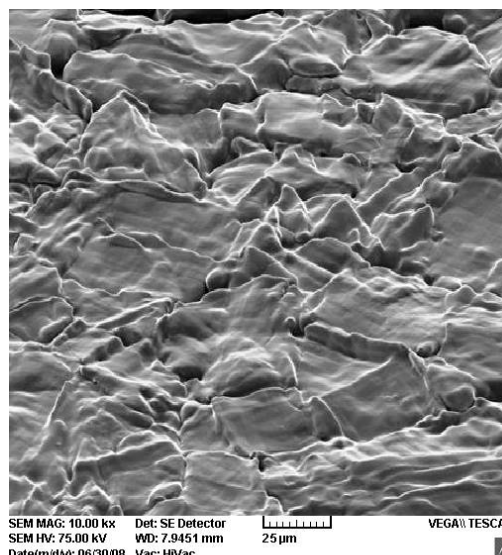
که توسط بدنه قالب بر روی قطعه کار اعمال می‌شود، بالاتر بود. نتایج آزمون سختی در نمونه مسی پس از پاس چهارم در قالب‌های 90، 75 و 65 درجه درجه به ترتیب 141، 138 و 131 برینل اندازه‌گیری شد و سختی نرم ترین نقطه در همان قالب‌ها به ترتیب 135، 129 و 121 برینل اندازه‌گیری شد.

- با افزایش تعداد پاس‌های ECAP، استحکام قطعه‌کار مسی در تمامی قالب‌ها افزایش و ازدیاد طول آن نیز کاهش یافت. نتایج حاصل از آزمون کشش نشان داد که با کاهش زاویه کانال قالب از 90 تا 65 درجه، استحکام تسلیم قطعات نهایی افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج حاصل از تست کشش، استحکام تسلیم قطعات نهایی ECAP شده پس از مرحله چهارم، به ترتیب به 506، 485 و 517 مگاپاسکال در قالب با زاویه کانال 90، 75 و 65 درجه رسید. مهمترین دلیل افزایش استحکام قطعات با کاهش زاویه قالب را می‌توان به افزایش نرخ کرنش، کاهش اندازه ریزساختار و افزایش سختی نسبت داد. نتایج آماری ازدیاد طول نمونه‌ها نشان داد که ازدیاد طول نمونه‌های کشش در پاس چهارم فرایند ECAP قالب 90، 75 و 65 درجه، برابر با 7، 5/5 و 8 میلی‌متر بود.

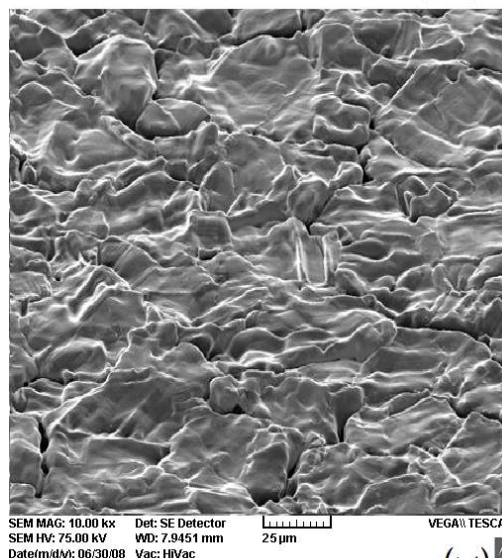
- بررسی آزمون خستگی دورانی قطعات مسی، نشان داد که نمونه شاهد بعد از گذراندن 204224 سیکل و نمونه ایکپ پاس 4 در قالب با زاویه کانال 65 درجه بعد از 3615504 سیکل گسیخته شد. براساس نتایج حاصل می‌توان دریافت که عمر خستگی نمونه ایکپ شده در قالب با زاویه 75 درجه بهبود 17 برابری داشت. همچنین قطعات ایکپ شده در قالب با زاویه 90 و 75 درجه بهبود عمر 14 و 15 برابری داشتند.

5- مراجع

- [1] M. Elyasi, H. Aghajani Derazkola, M. Hosseinzadeh, Investigations of tool tilt angle on properties friction stir welding of A441 AISI to AA1100 aluminium, *Proceeding of Mechanical Engineering Part B: Journal Engineering Manufacture*, Vol. 230, No. 7, pp. 1234–1241, 2016.
- [2] C.M. Chen, R. Kovacevic, Joining of Al 6061 alloy to AISI 1018 steel by combined effects of fusion and solid state welding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 1205–1214, 2004.
- [3] MA. Ranaei, A. Afsari, SY. Ahmadi Brooghani, MM. Moshkar, Microstructure, Mechanical and Electrical Properties of Commercially Pure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 257-266, 2015. (In Persian)
- [4] M. Talafi Noghani, MH. Shaeri, A. Esmaeili, A.



(الف)



(ب)

Fig. 15 Fracture surface of sample which ECAPed in die with (a) 90 and (b) 65 degree internal channel

شکل 15 تصویر شکست نگاری نمونه تست خستگی که در قالب با زاویه داخلی (الف) 90 و (ب) 65 درجه اکستروژن شده بود

- نتایج حاصل از بررسی ریز ساختار قطعه‌کار مسی نشان داد که با افزایش تعداد پاس فرایند ECAP ساختار فلز مس در تمامی قالب‌ها کوچک شده و از ابعاد میکرومتری به ابعاد نانومتری تبدیل شد. براساس نتایج حاصل در قالب 90 درجه اندازه ریزساختار قطعه‌کار مسی به حدود 526 نانومتر رسید. با کاهش زاویه قالب ECAP و افزایش نرخ کرنش، اندازه ریزساختار قطعه کار نهایی پس از پاس چهارم برای قالب با زاویه 75 و 65 درجه به ترتیب 290 و 260 نانو متر رسید.

- بررسی سختی قطعه کار نشان داد که مقدار سختی در سطح خارجی قطعه کار به دلیل وجود نیروی کرنش برشی بیشتر

- refinement, *Proceda Technology*, Vol. 117, 347-352, 2004.
- [13] VM. Segal, VI. Reznikov, AE. Drobyshevski, Nanostructuring of metals by severe plastic deformation, *Kopylov VI. Russian Metall*, pp. 1-99, 1981.
- [14] Y. Fukuda, K. Oh-ishi, M. Furukawa, Z. Horita, T. G. Langdon, Influence of crystal orientation on the processing of copper single crystals by ECAP, *Journal of Material Science*, Vol. 42, pp. 1501-1511, 2007.
- [15] O. Fabián Higuera, J. Antonio Berríos-Ortiz, J. María Cabrera, Texture and fatigue behavior of ultrafine grained copper produced by ECAP, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 609, No. 15, pp. 273-282, 2014.
- [16] C. Xua, Q. Wang, M. Zheng, J. Li, M. Huang, Q. Jia, J. Zhua, L. Kunz, M. Buksa, Fatigue behavior and damage characteristic of ultra-fine grain low-purity copper processed by equal-channel angular pressing (ECAP), *Materials Science and Engineering A*, Vol. 475, pp. 249-256, 2008.
- [17] N. Lugo, N. Llorca, J.J. Sun~ ol, J. M. Cabrera, Thermal stability of ultrafine grains size of pure copper obtained by equal-channel angular pressing, *Journal of Material Science*, Vol. 45, pp. 2264-2273, 2010.
- [18] P. Král, J. Dvořák, M. Kvapilová, W. Blum, V. Sklenička, The influence of long-term annealing at room temperature on creep behaviour of ECAP-processed copper, *Materials Letters*, Vol. 188, No.1, pp. 235-238, 2017.
- [19] Y. L. Wang, R. Lapovok, J.T. Wang, Y. Shen Qi, Y. Estrin, Thermal behavior of copper processed by ECAP with and without back pressure, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 628, pp. 21-29, 2015.
- [20] G.Y. Deng, C. Lu, L.H. Su, X.H. Liu, A.K. Tieu, Modeling texture evolution during ECAP of copper single crystal by crystal plasticity FEM, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 534 pp. 68- 74, 2012.
- Razaghian, Effect of severe plastic deformation by equal channel angular pressing on fracture toughness of Al-7075 alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 11-20, 2018. (In Persian فارسی)
- [5] S. Sundaresan, K.G.K. Murti, The formation of intermetallic phases in aluminum-austenitic stainless steel friction welds, *Material Forum*, Vol. 17, pp. 301-307, 1993.
- [6] M. Hansen, *Constitution of Binary Alloys*, pp. 365-382, New York, McGraw- Hill Book Company Inc, 1958.
- [7] H. Khademizadeh, S.A. Eftekhari, S.H. Abtahi Froushani, Parameter Analysis and optimization of equal channel angular pressing extrusion for titanium alloy using Taguchi design of experiments method, *Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering*, Vol. 7, No. 3, Page 45-56, 2014. (In Persian فارسی)
- A. Abdolazizi, A. Fallahi, Effect of ECAP and heat treatment on mechanical properties of 7075 Al alloy, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 1-10, 2016. (in Persian فارسی)
- [8] P. Mashhadi Keshtiban, M. Zadshakouyan, Gh. Faraji, Optimization of geometrical parameters of equal channel multi-angular pressing process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 275-282, 2016. (in Persian فارسی)
- [9] S. Erbel, Mechanical properties and structure of extremely strainhardened copper, *Material Technology*, Vol. 12, pp. 482-486, 1979.
- [10] S.L. Semiatin, A.A. Salem, and M.J. Saran, Models for severe plastic deformation by equal- channel angular extrusion, *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, Vol. 56, No. 10, pp. 69-77, 2004.
- [11] JT. Wang, The processing of ultrafine-grained materials through the ECAP, *Material Science Forum*, Vol. 503, pp. 504-363, 2006.
- [12] OD. Sherby, J. Wadsworth, Principles of equal-channel angular pressing as processing tool for grain