



## Microstructure, Mechanical, and Electrical Properties of Cu-30Zn Alloys Produced by Multi-Directional Forging

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Zarei Z.<sup>1</sup> MSc,  
Talafi Noghani M.\*<sup>1</sup> PhD,  
Shaeri M.H.<sup>1</sup> PhD,  
Ansarian I.<sup>1</sup> MSc

#### How to cite this article

Zarei Z, Talafi Noghani M, Shaeri M. H, Ansarian I. Microstructure, Mechanical, and Electrical Properties of Cu-30Zn Alloys Produced by Multi-Directional Forging. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(8): 1943-1952.

### ABSTRACT

In this research, Cu-30Zn alloy was subjected to severe plastic deformation (SPD) by Multi-Directional Forging (MDF) process up to 6 passes at room temperature. After the samples fabrication, microstructure, mechanical, and electrical properties were investigated. Mechanical properties of the samples were measured by shear punch, tensile, and hardness tests at room temperature after each pass of MDF process. In addition, electrical properties of the samples were evaluated by Eddy Current method. The results of microstructure characterization by scanning electron microscopy equipped with EBSD attachment showed that the grain size of the initial annealed specimen reduced from about 230  $\mu\text{m}$  to less than 1  $\mu\text{m}$ , after 6 passes of MDF process. Furthermore, grain size reduction was accompanied by slip process, formation of twinning, and shear bonds in a specific direction. According to the results, mechanical properties were significantly improved after 6 passes of MDF. MDF process led to a 212% increase in hardness, enhancement of 105% and 73% in shear yield and ultimate shear strengths, and also improvement of 298% and 190% in tensile yield and ultimate tensile strengths, respectively. The results of the electrical conductivity showed that the electrical conductivity of the Cu-30Z alloy reduced slightly during the MDF process. Comparison of mechanical and electrical properties results demonstrated that high-strength alloys can be obtained in the MDF process without significantly reduction in the electrical conductivity.

**Keywords** Multi-directional Forging; Cu-30Zn Alloy; Mechanical Properties; Electrical Properties; Microstructure

### CITATION LINKS

[1] Enhancement of mechanical properties ... [2] Extreme grain refinement by severe ... [3] The influence of high temperature due ... [4] Twenty-five years of severe plastic ... [5] Effect of severe plastic deformation ... [6] Diffusional bonds in laminated ... [7] Effect of equal channel angular ... [8] Fatigue behavior of AA7075 aluminium ... [9] Effect of work-piece cross ... [10] The investigation of spring-back of UFG ... [11] Microstructures and tensile properties of ... [12] Influence of stacking fault energy on ... [13] Nano-grained 70/30 brass strip ... [14] Microstructure refinement of selected ... [15] Microstructure and properties of  $\alpha + \beta$  ... [16] Grain refinement of coarse grained gold ... [17] Microstructural stability of Cu processed ... [18] Structure uniformity and limits of grain ... [19] Microstructure evolution in a 316L stainless ... [20] Grain refinement in a Cu-Cr-Zr ... [21] Microstructures and mechanical ... [22] Grain size and texture changes of ... [23] Microstructure, texture, electrical ... [24] Microstructure evolution and mechanical ... [25] Enhanced grain refinement by ... [26] Recrystallization behavior of nano grained ... [27] Mechanical properties and fracture ... [28] The influences of extrusion and Multi ... [29] Utilization of multi directional forging ... [30] Microstructural homogeneity, texture, tensile ... [31] Effect of deformation conditions on texture ... [32] Promotion of ultrafine grain evolution ... [33] Study on the effect of production ... [34] Nanostructure formation during accumulative ... [35] Segmentation of copper alloys processed ... [36] Mechanical ... [37] Validation of the shear punch ... [38] Correlation between shear punch ... [39] Tensile-shear correlations obtained from ... [40] Evaluation of the relationship between ... [41] Evaluation of mechanical properties using ... [42] Hydrostatic pressure effect on mechanical ... [43] Nanotwinned microstructures from low ... [44] Microstructure, mechanical and electrical ... [45] Enhanced mechanical properties and electrical ... [46] Introduction to the principles of dislocations ...

<sup>1</sup>Materials Science & Engineering Department, Technical & Engineering Faculty, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran

#### \*Correspondence

Address: Imam Khomeini International University, Noruzian Boulevard, Qazvin, Iran. Postal code: 3414916818

Phone: +98 (28) 33901117

Fax: +98 (28) 33780073

noghani@eng.ikiu.ac.ir

#### Article History

Received: August 27, 2018

Accepted: January 26, 2019

ePublished: August 12, 2019

## بررسی ریزساختار، خواص مکانیکی و الکتریکی آلیاژ برنج Cu-30Zn تولیدشده به روش فورج چندگانه

زیبا زارعی MSc

گروه مهندسی و علوم مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(۱)</sup>، قزوین، ایران

محمد تلافی‌نوغانی \* PhD

گروه مهندسی و علوم مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(۲)</sup>، قزوین، ایران

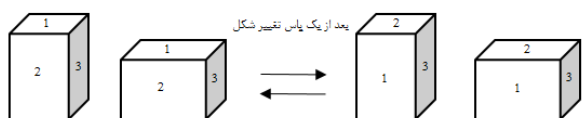
محمدحسین شاعری PhD

گروه مهندسی و علوم مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(۳)</sup>، قزوین، ایران

ایمان انصاریان MSc

گروه مهندسی و علوم مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(۴)</sup>، قزوین، ایران

فرآیند فورج چندگانه (MDF) از فرآیندهای رایج تغییر شکل پلاستیک شدید بوده که از نرخ کرنش کمتری نسبت به سایر روش‌ها همچون تغییر شکل در کانال‌های همسان زاویه‌دار (ECAP) و تغییر شکل پیچشی تحت فشار زیاد (HPT) برخوردار است. از مزیت‌های عمده این روش می‌توان به قابلیت تکرار فرآیند به دلیل عدم تغییر در ابعاد قطعه، در چندین پاس اشاره کرد. با توجه به این قابلیت می‌توان با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند، کرنش بیشتری را به نمونه اعمال کرد. همچنین قابلیت اجرا روی مواد ترد به دلیل نرخ کرنش کم و همچنین با توجه به طراحی قالب می‌توان در دماهای بسیار پایین یا بالا نیز مورد استفاده قرار داد. در این فرآیند بعد از هر پاس، محور اعمال نیرو تغییر می‌کند و ابعاد قطعه بعد از پاس تغییر شکل تقریباً ثابت باقی می‌ماند [10-2]. شکل ۱ نمای کلی فرآیند را نشان داده است [11].



شکل ۱) تصویر نمادین مراحل فرآیند فورج چندگانه [11]

تاکنون تأثیر برخی فرآیندهای SPD بر رفتار آلیاژ برنج آلفا مورد بررسی قرار گرفته است. ژائو و همکاران [12] با انجام فرآیند HPT در دمای محیط بر مس خالص، آلیاژ Cu-10Zn و آلیاژ Cu-30Zn موفق به کاهش اندازه دانه به زیر ۱۰۰ نانومتر شدند. همچنین نتیجه گرفتند که با افزایش عنصر آلیاژی Zn یا به عبارتی کاهش انرژی نقص در پیچیده شدن (SFE)، فرآیند HPT تأثیر بیشتری بر کاهش اندازه دانه دارد و به اندازه دانه کوچک‌تری می‌توان رسید. سانگ و همکاران [1] با انجام ۴ پاس فرآیند ECAP در قالب با زاویه ۹۰ درجه و در دمای ۲۵۰°C بر آلیاژ Cu-40Zn توانستند اندازه دانه را تا ۳۰۰ نانومتر کاهش دهند. در فرآیند مذکور، استحکام تسلیم کششی از حدود ۱۷۰ به ۵۳۰ و استحکام کششی نهایی از حدود ۴۱۰ به ۶۵۰ مگاپاسکال رسید. پاسبانی و طرقتی‌نژاد [13] موفق شدند پس از ۶ سیکل فرآیند نورد تجمعی (ARB) در دمای محیط بر آلیاژ Cu-30Zn، اندازه دانه را به حدود ۱۰۰ نانومتر کاهش دهند. این محققان دریافتند که با افزایش سیکل‌های فرآیند ARB، خواص مکانیکی نیز افزایش می‌یابد، به طوری که سختی حدوداً از ۸۵ به ۲۵۰ ویکرز و استحکام کششی از ۳۵۰ به ۷۸۰ مگاپاسکال افزایش یافته است. گوجوسکی و همکاران [14] با انجام ۸ سیکل کامل فرآیند دندانه‌دندان‌کردن و صاف‌کردن متوالی (RCS) بر آلیاژ Cu-30Zn، موفق به کاهش میانگین اندازه دانه به ۲/۳ میکرون شدند. دتکیویچ و همکاران [15] با انجام فرآیند ECAP با زاویه قالب ۹۰ درجه در دمای ۳۰۰°C بر آلیاژ Cu-37.3Zn به اندازه دانه‌های در محدوده ۰/۳ تا ۱/۵ میکرون رسیدند. همچنین با افزایش دمای فرآیند به ۴۰۰°C، محدوده اندازه دانه‌ها به یک تا ۳ میکرون افزایش یافت. فرآیند فورج چندگانه روی گسترده وسیعی از فلزات خالص مانند طلا، مس، آلومینیوم، فولاد و همچنین آلیاژهای مس، منیزیم، آلومینیوم و همچنین بسیاری دیگر با موفقیت انجام شده است [16-22]. دشتی و همکاران [23] با انجام ۳ پاس فرآیند MDF بر آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۳ در دمای محیط و ۱۷۷°C، موفق به کاهش اندازه دانه به ترتیب به یک و ۱/۵ میکرون شدند. به علاوه خواص مکانیکی نظیر سختی و استحکام‌های برشی نیز در اثر اعمال فرآیند MDF افزایش قابل توجهی یافتند. انصاریان و همکاران [24] با

### چکیده

در این پژوهش آلیاژ برنج Cu-30Zn به وسیله فرآیند فورج چندگانه (MDF) تا ۶ پاس در دمای محیط تغییر شکل پلاستیک شدید یافت. پس از تولید نمونه‌ها ریزساختار، خواص مکانیکی و الکتریکی بررسی شد. خواص مکانیکی نمونه‌ها پس از هر مرحله فرآیند MDF با استفاده از آزمون‌های سختی و پانچ برشی و کشش در دمای محیط اندازه‌گیری شد. همچنین خواص الکتریکی نمونه‌ها به روش جریان گردابی اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از بررسی ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با آنالیز EBSD نشان داد که پس از ۶ پاس فرآیند MDF، اندازه دانه نمونه اولیه آنیل شده از حدود ۲۳۰ میکرون به کمتر از یک میکرون کاهش یافت. به علاوه کاهش اندازه دانه همراه با فرآیند لغزش، شکل‌گیری دوقلوبی‌ها و باندهای برشی در جهت مشخص بود. طبق نتایج به دست آمده بعد از ۶ پاس MDF، خواص مکانیکی بهبود قابل توجهی داشت. فرآیند MDF منجر به افزایش ۲۱۲ درصدی در سختی، افزایش به ترتیب ۱۰۵ و ۷۳ درصدی در استحکام‌های تسلیم و نهایی برشی و افزایش به ترتیب ۲۹۸ و ۱۹۰ درصدی استحکام‌های تسلیم و نهایی کششی شد. نتایج بررسی هدایت الکتریکی نشان داد در اثر فرآیند MDF، هدایت الکتریکی آلیاژ Cu-30Zn، به مقدار اندکی کاهش یافت. لذا با مقایسه نتایج خواص مکانیکی و الکتریکی می‌توان گفت در فرآیند MDF می‌توان به آلیاژی با استحکام بسیار بالا بدون کاهش قابل توجه در هدایت الکتریکی دست یافت. کلیدواژه‌ها: فورج چندگانه، آلیاژ برنج Cu-30Zn، خواص مکانیکی، خواص الکتریکی، ریزساختار

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۶

\* نویسنده مسئول: noghani@eng.ikiu.ac.ir

### ۱- مقدمه

آلیاژهای برنج مرتبط با درصد مس و روی آن، کاربرد بسیار گسترده‌ای در صنعت، پزشکی، خوردگی تجهیزات نفتی، بست و اتصالات، پیچ و مهره و بسیاری موارد دیگر دارد. دلیل کاربرد عمده این آلیاژها خواص مکانیکی بسیار بالا شامل قابلیت شکل‌پذیری و استحکام بالا و مقاومت به خوردگی است [1]. تلاش برای افزایش خواص مکانیکی از طریق فرآیندهای آسان و مقرون‌به‌صرفه و بدون تأثیر منفی بر خواص این آلیاژها همواره مورد توجه صنعتگران و مهندسان بوده است. فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) از اواخر قرن گذشته تاکنون به‌عنوان روشی مناسب برای رسیدن به موادی با ساختار ریزدانه و در پی آن تقویت و گسترش خواص مکانیکی مورد توجه قرار گرفته است. این فرآیندها در اثر اعمال کرنش شدید، بدون ایجاد تغییرات مهم در ابعاد قطعه، باعث ایجاد مستقیم دانه‌های فوق‌العاده ریز (UFG) می‌شود.

هموار برای انجام آزمون هدایت الکتریکی آماده سازی شد. آزمون هدایت الکتریکی با استفاده از دستگاه هدایت سنج برای تمامی نمونه ها شامل نمونه آنیل و یک الی ۶ پاس MDF شده انجام شد. دستگاه هدایت یک آزمون غیرمخرب است که به روش جریان گردابی، جریان الکتریکی را مطابق با استاندارد E1004 اندازه گیری می کند. این دستگاه میزان رسانایی را براساس درصدی از هدایت الکتریکی مس آنیل شده استاندارد (%IACS) محاسبه می کند. آزمون برای هر نمونه در سه مرتبه به منظور حذف هر گونه خطا تکرار شد.



شکل ۲) تصویر قالب MDF و سنبه های تهیه شده برای پژوهش حاضر؛ ۱) قالب، ۲) سنبه بزرگ، ۳) سنبه کوچک، ۴) نمونه

به منظور بررسی آزمون پانچ برشی نمونه ها سه ورق نازک به ضخامت ۰/۸ میلی متر عمود بر جهت طولی نمونه ها از مرکز نمونه به وسیله دستگاه میکروکاتر برش داده شد. ورق های آماده شده در قالب پانچ برشی با قطر پانچ ۶/۲ میلی متر و قطر سوراخ ۶/۲۵ میلی متر قرار داده شد. سپس قالب در دستگاه یونیورسال زونیک- روئل قرار گرفت و نیرو با سرعت ۰/۳ میلی متر بر ثانیه به نمونه ها اعمال شد. از هیچ گونه روانکاری بین ورق و قالب استفاده نشد. میزان نیروی اعمالی برحسب جابه جایی پانچ، اندازه گیری و تنش برشی برحسب مگاپاسکال با استفاده از رابطه زیر اندازه گیری شد [30]:

$$\tau = \frac{P}{dt\pi} \quad (1)$$

که P نیروی پانچ برحسب نیوتن، t ضخامت نمونه برحسب میلی متر و d میانگین قطر پانچ و قالب برحسب میلی متر است. منحنی های آزمون پانچ برشی با رسم تنش برشی برحسب جابه جایی نرمال به دست آمدند. جابه جایی نرمال نیز از رابطه زیر به دست آمد [7]:

$$d = \frac{h}{t} \quad (2)$$

که d جابه جایی نرمال و h جابه جایی پانچ برحسب میلی متر است. برای اطمینان از نتایج این آزمون، آزمون برای هر نمونه سه بار تکرار شد. به طوری که نمونه های آزمون پانچ برشی از مرکز نمونه های MDF شده جدا شدند.

آزمون سختی سنجی ویکرز به وسیله دستگاه سختی سنج HVS-1000A تحت نیروی ۵۰۰ گرم و زمان ساکن شدن ۱۵ ثانیه طبق

انجام ۶ پاس فرآیند MDF بر تیتانیوم خالص در دمای محیط و ۲۲۰°C نتیجه گرفتند که اندازه دانه اولیه از ۶۴ میکرون به ترتیب به یک و ۱/۲ میکرون کاهش می یابد. همچنین استحکام های تسلیم کششی و برشی نسبت به نمونه اولیه آنیل شده، بیش از ۲ برابر افزایش یافتند. همچنین در تحقیق دیگری توسط میورا و همکاران [25] مشاهده شد که اعمال فرآیند MDF و افزایش کرنش (افزایش پاس های فرآیند) در دمای ۷۷ کلوین بر آلیاژ برنج Cu-30Zn، منجر به کاهش قابل توجه اندازه دانه این آلیاژ تا ۱۷ نانومتر شده است. نکته قابل توجه در پژوهش حاضر، اعمال فرآیند MDF در دمای محیط برخلاف سایر پژوهش هایی بوده که توسط میورا و همکاران [25]، ناکا/و و همکاران [26] و داشارات و مولا [27] در دمای زیر صفر همراه با محفظه نیتروژن مایع بر آلیاژهای پایه مس انجام شده است. همچنین از دیگر مزایای روش MDF می توان به پتانسیل بالای این روش در استفاده از نمونه هایی با ابعاد بزرگ و قابل استفاده در مقیاس های صنعتی اشاره نمود. به علاوه اکثر دیگر فرایندها مانند ECAP، HPT و غیره نسبت به فرآیند MDF زمان بر و هزینه بر هستند و امکان انجام برخی از این فرایندها برای آلیاژهای زیادی در دمای محیط وجود ندارد [28, 29]. در این پژوهش برای رسیدن به خواص مکانیکی و الکتریکی بالا، آلیاژ مورد نظر طی ۶ پاس در دمای محیط تحت فرآیند فورج چندگانه قرار گرفت. همچنین تمامی نمونه های سالم و بدون عیب، مورد بررسی خواص ریزساختاری، مکانیکی و الکتریکی قرار گرفتند.

## ۲- مواد و روش تحقیق

برای تهیه آلیاژ مورد نظر، ابتدا از آلیاژ برنج با درصد Cu-40Zn استفاده شد. سپس برای تهیه آلیاژ Cu-30Zn بعد از ذوب آلیاژ اولیه در دمای ۱۰۵۰°C و اضافه کردن درصد مناسب مس، تهیه آلیاژ مورد نظر صورت گرفت. در نهایت آزمون کوانتومتری، انجام و درصد عناصر موجود در آلیاژ مشخص شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد نظر در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی آلیاژهای مس- روی ریخته گری شده (درصد وزنی)

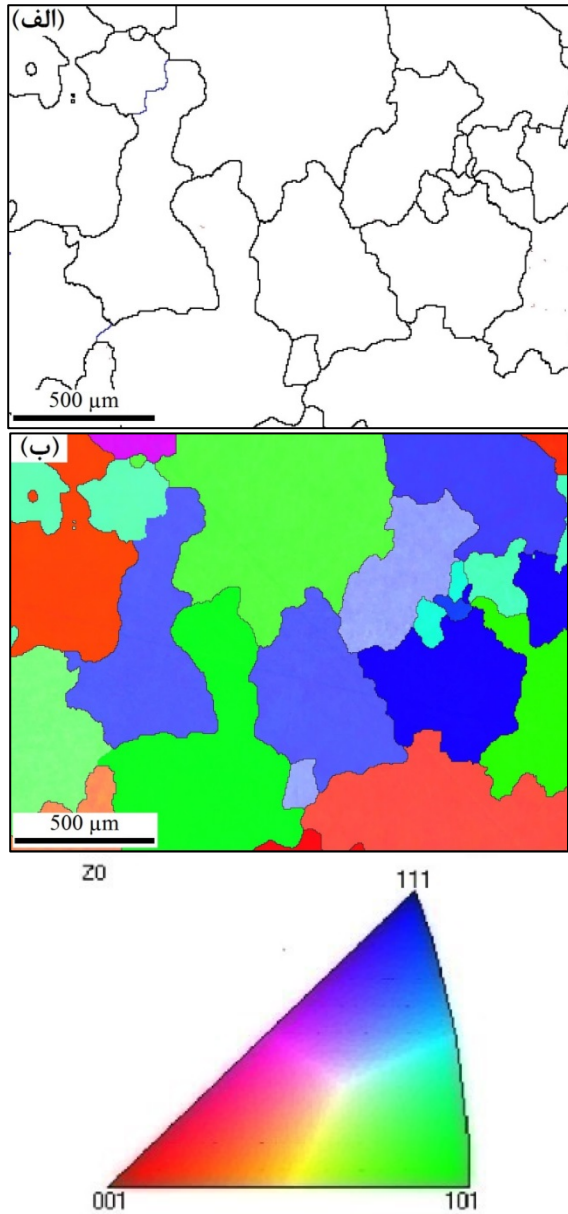
آلیاژ	Cu	Zn	سایر عناصر
Cu-30Zn	۶۸/۱	۳۰/۷۱	>۱

بعد از ذوب ریزی در قالب فلزی، نمونه ها در ابعاد ۱۵×۱۰×۱ میلی متر با دستگاه برش، برش داده شدند. سپس نمونه های آماده شده، در دمای ۰/۸ نقطه ذوب، در کوره عملیات حرارتی به مدت ۱ ساعت آنیل شده و در کوره تا رسیدن به دمای محیط سرد شدند. نمونه های آماده شده در قالب فورج چندگانه که مطابق شکل ۲ نشان داده شده است، به وسیله فشار پرس هیدرولیک تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفتند. در این عملیات از دستگاه پرس هیدرولیک با سرعت حرکت پیستون در حالت بارگذاری برابر با ۱/۵ میلی متر بر ثانیه و ظرفیت ۱۰۰ تن استفاده شد. عملیات تغییر شکل تا ۶ پاس روی نمونه ها اعمال شد. انتخاب پاس بهینه بعد از مشاهده عدم تغییرات قابل توجه در خواص مکانیکی به دست آمد. همچنین برای کاهش اصطکاک بین قالب و نمونه از روانکار مولی کت استفاده شد.

پس از تهیه نمونه ها، آماده سازی برای آزمون های هدایت الکتریکی، سختی سنجی، پانچ برشی و کشش انجام شد. در ابتدا سطح نمونه های تغییر شکل یافته از هر گونه آلودگی ناشی از روانکار پاک سازی شد. همچنین با استفاده از سنباده، سطحی صاف و



کوچک زاویه با اختلاف جهت بین ۲ تا ۵ درجه با رنگ قرمز، مرزهای کوچک زاویه اختلاف جهت بین پنج تا ۱۵ درجه با رنگ آبی و مرزهای بزرگ زاویه (اختلاف جهت بزرگتر از ۱۵ درجه) با رنگ سیاه مشخص شده است. در ریزساختار اولیه نمونه آنیل، بخش عمده مرزها بزرگ زاویه هستند و مرزهای کوچک زاویه تقریباً در ریزساختار مشاهده نمی‌شوند (شکل ۴).

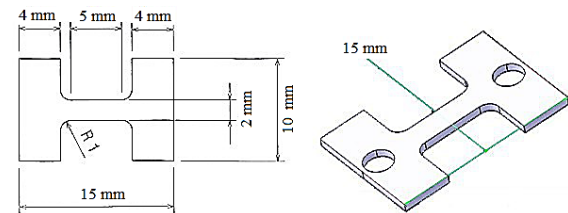


شکل ۴) آنالیز EBSD از آلیاژ Cu-30Zn اولیه: الف) نقشه مرزهای دانه، ب) نقشه رنگی IPF

تصاویر نقشه مرزهای دانه و نقشه رنگی اندازه دانه برای نمونه ۶ پاس MDF شده در دمای محیط در شکل ۴ ارائه شده است. اندازه دانه بعد از ۶ پاس MDF به کمتر از یک میکرون تخمین زده شده است. زیرا با توجه به تشکیل و شکسته شدن کسر بالایی از مرز دانه‌های جدید به وسیله باندهای برشی و دوقلوئی‌هایی که در اثر اعمال کرنش برشی در فرآیند MDF شکل گرفته است، امکان تعیین دقیق اندازه دانه میسر نیست. از طرفی به دلیل اینکه بعد از هر پاس، تغییر شکل روی نمونه چرخش ۹۰ درجه‌ای، فقط حول یک

استاندارد ASTM E-384 در دمای محیط استفاده شد. سطح نمونه‌ها ابتدا سنباده و سپس پولیش ابتدایی شد تا سطح صاف و صیقلی مناسب به دست آمد. سختی‌سنجی از مرکز سطح مقطع نمونه انجام شد. برای هر نمونه ۱۴ بار آزمون سختی‌سنجی تکرار و میانگین داده‌ها محاسبه شد.

آزمون کشش با استفاده از دستگاه ژوئیک- روئل ساخت کشور آلمان با ظرفیت ۱۰ تن با سرعت جابه‌جایی فک یک میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. با توجه به کوچک بودن ابعاد نمونه‌های فراوری شده برای انجام آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM، برای این کار از نمونه‌های کششی کوچک (مینیا توری) مطابق با شکل ۳ استفاده شد. طراحی این نمونه‌ها با توجه به ابعاد نمونه‌های MDF تولیدی انجام شد. برای طراحی نمونه برای آزمون کشش در این پژوهش از نمونه‌های به‌کاربرده شده در پژوهش‌های قبلی استفاده شد [5, 31-33]. آماده‌سازی نمونه‌های کششی نیز توسط وایبرکات از مرکز نمونه‌ها در راستای طولی صورت گرفت. هر آزمون نیز ۳ بار تکرار شد.



شکل ۳) شماتیک نمونه تهیه شده برای آزمون کشش طراحی شده در پژوهش حاضر

برای بررسی‌های متالوگرافی از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به سیستم آنالیز به وسیله پراش الکترون‌های برگشتی (EBSD) با گسیل میدانی جئول 7001F با وضوح بالای انجام گرفت. اندازه گام روبش تصویر برای نمونه آنیل ۵۰ میکرومتر و برای نمونه‌های تغییر شکل یافته، ۲/۰ میکرومتر در نظر گرفته شد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، پس از تقسیم آنها به دو نیم در راستای طولی، سطح مقطع مربعی داخل نمونه‌ها (مرکز نمونه‌ها) به وسیله سنباده با اندازه دانه ۱۲۰۰ پولیش مکانیکی شدند و سپس پولیش نهایی با خمیر الماسه ۰/۳ میکرون و محلول OP-S انجام شد. همچنین از نرم افزار EDAX OIM TSL7 برای آنالیز داده‌های EBSD استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی ریزساختار

نقشه مرزهای دانه و تصویر قطبی معکوس (IPF) اندازه دانه برای نمونه آنیل به وسیله پراش الکترون‌های برگشتی با میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به EBSD در شکل ۴ ارائه شده است. همچنین تصویر پولفیگر راهنمای آورده شده، رنگ‌های مختلف جهت‌گیری دانه‌ها را نشان می‌دهد. آلیاژ مورد نظر دارای ساختار تک فاز  $\alpha$  و ریزساختار بدون رسوب و فاز ثانویه است. دانه‌های اولیه که در اثر آنیل کاملاً درشت شده‌اند، در شکل ۴ قابل مشاهده است.

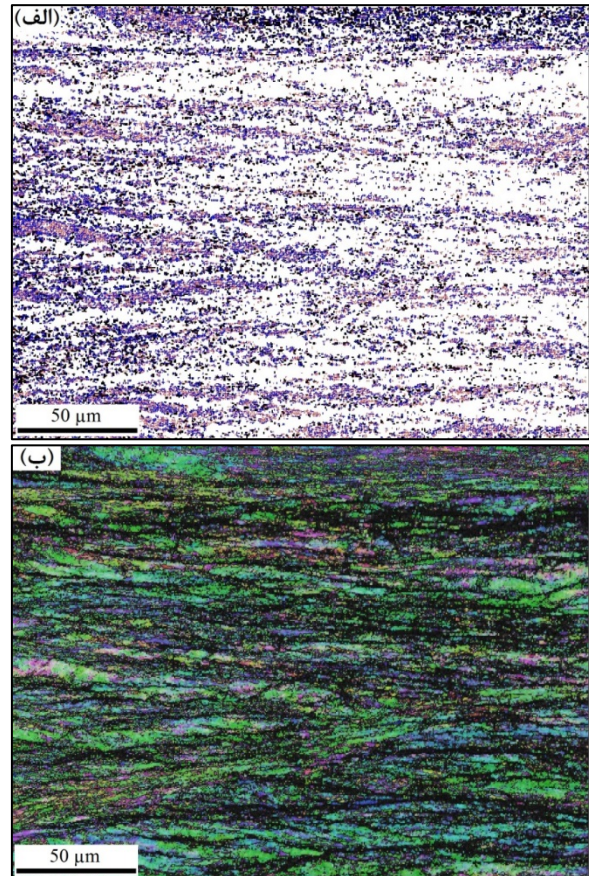
اندازه دانه اولیه ۲۳۳ میکرون اندازه‌گیری شده است. برای محاسبه اندازه متوسط دانه‌ها در تمامی نمونه‌ها از روش کسر سطحی استفاده شده و مرزهای دانه با زاویه اختلاف جهت بیش از ۱۵ درجه به عنوان مرز دانه در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۴، مرزهای

کافی برای فرآیند تبلور مجدد پیوسته در دمای محیط، ذخیره شده و ریزساختار با دانه‌های ریز تبلور مجدد شده احاطه می‌شود [13, 34]. به‌علاوه با کاهش دما، تغییر شکل ریزدانه‌نگی روند سریع‌تری را در پیش می‌گیرد [5, 33]. همان‌طور که در بخش مقدمه نیز اشاره شد، کاهش اندازه دانه در فرآیند MDF به مراتب کمتر از برخی فرآیندهای دیگر SPD نظیر ECAP بوده [35]، زیرا میزان کرنش اعمالی در این فرآیند کمتر است. همچنین مکانیزم کاهش اندازه دانه براساس افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها و تشکیل باندهای برشی با افزایش کرنش در اثر افزایش تعداد پاس‌های فرآیند MDF است. زیرا با توجه به تفاوت جهت لغزش و جهت‌گیری دانه‌ها، با جهت تشکیل باندهای برشی، با افزایش تعداد پاس‌های تغییر شکل، روند قطع‌کردن و شکستن مرزهای دانه افزایش می‌یابد و منجر به تشکیل دانه‌هایی با اندازه کوچک‌تر و مرزخانه‌های باریک می‌شود. مکانیزم افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها نیز در نتیجه تشکیل مرزهای بزرگ‌زاویه با افزایش کرنش برشی است. بدین صورت که در اثر کار سرد، نابه‌جایی‌های زیادی تشکیل می‌شود. این نابه‌جایی‌ها تا زمانی که مانعی سبب جلوگیری از حرکتشان نباشد حرکت می‌کنند و در نهایت در مرزخانه یا موانع یا در اثر برخورد با یکدیگر تجمع می‌کنند که این مناطق چگالی بالایی از نابه‌جایی‌ها یا اصطلاحاً گره‌ها را تشکیل می‌دهند. در ادامه، فرآیند شکل‌دهی، تعداد نابه‌جایی‌ها در شبکه‌های گره‌دار و ساختارهای سلول فرعی افزایش می‌یابد. آرایش نابه‌جایی‌ها در حالتی که کمترین انرژی را داشته باشد، قرار می‌گیرد که منجر به تشکیل مرزهای کوچک‌زاویه می‌شود. با ادامه کار سرد، چگالی نابه‌جایی‌ها افزایش پیدا می‌کند، ضخامت مرزها کاهش و زاویه بین سلول‌های همسایه افزایش می‌یابد و در نتیجه، مرزهای کوچک‌زاویه به مرزهای بزرگ‌زاویه تبدیل می‌شوند. با افزایش این روند در اثر کار سرد مجدداً از محل تقاطع مرزها، نابه‌جایی‌های جدید، تولید و دانه را به بخش‌های دیگر تقسیم می‌کند که منجر به ایجاد ساختار ریزدانه می‌شود [36].

### ۳-۲- بررسی خواص مکانیکی

برای بررسی خواص مکانیکی آلیاژ Cu-30Zn، آزمون‌های پانچ برشی، کشش و سختی‌سنجی انجام شد. نتایج حاصل از آزمون پانچ برشی، تغییرات تنش برشی برحسب جابه‌جایی نرمال را ارائه می‌کند. در ضمن، استحکام برشی نهایی از روی ماکزیمم نقطه منحنی تنش برشی - جابه‌جایی نرمال مشخص می‌شود و استحکام تسلیم برشی از بخش اول نمودار و از روی نقطه‌ای که منحنی یادشده از حالت خطی انحراف می‌یابد، تعیین می‌شود. برای جلوگیری از گستردگی داده‌ها، نمودار پانچ برشی و آزمون کشش تنها برای نمونه‌های آنیل، یک پاس، ۳ پاس و ۶ پاس به‌ترتیب در نمودارهای ۱ و ۲ ارائه شده است. نتایج حاصل از آزمون کشش نیز شامل استحکام کششی نهایی و استحکام تسلیم کششی از نمودار تنش - کرنش مهندسی به‌ترتیب از نقطه ماکزیمم نمودار و نقطه‌ای است که نمودار از حالت خطی خارج می‌شود. همچنین نمودارهای استحکام کششی نهایی برحسب برشی نهایی و برشی نهایی خالص، استحکام تسلیم کششی برحسب تسلیم برشی و برشی خالص برای نمونه‌های آنیل، یک پاس، ۳ پاس و ۶ پاس در نمودار ۳ ارائه شده است. داده‌های به‌دست‌آمده از دو آزمون پانچ برشی و آزمون کشش، شامل استحکام کششی و برشی نهایی، استحکام تسلیم کششی و برشی و همچنین سختی در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد که استحکام تسلیم برشی و استحکام برشی نهایی نمونه ۶ پاس آلیاژ برنج Cu-30Zn نسبت به نمونه آنیل به‌ترتیب رشد ۱۰۵ و ۷۳ درصدی را تجربه کرده است. همچنین استحکام

محور انجام گرفته، تمامی باندهای برشی در یک جهت قرار گرفته و جهت تغییر شکل تنها در یک جهت قابل مشاهده است. مطابق نمونه آنیل مرزهای بزرگ‌زاویه به رنگ سیاه و مرزهای کوچک‌زاویه به رنگ قرمز که در اثر اعمال کرنش کاملاً شکسته شده، به‌صورت همگن و همسانگرد در نمونه توزیع شده که در شکل ۵ قابل مشاهده است. در ضمن کسر مرزهای کوچک و بزرگ‌زاویه پس از فرآیند MDF به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است، به‌طوری که خطوط آبی و قرمز رنگ که مربوط به مرزهای کوچک زاویه هستند، در تصویر نقشه مرزهای دانه به‌خوبی از یکدیگر قابل تفکیک نیستند.



شکل ۵) آنالیز EBSD از نمونه ۶ پاس فورج شده آلیاژ Cu-30Zn: (الف) نقشه مرزهای دانه، (ب) نقشه رنگی IPF

مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد فرآیند MDF با اصلاح قابل ملاحظه ریزساختار موجب کاهش اندازه دانه قابل توجهی شده است. همچنین با بررسی نقشه مرزهای دانه می‌توان نتیجه گرفت شکل‌گیری مرزهای بزرگ‌زاویه در نمونه ۶ پاس بسیار بیشتر از نمونه آنیل است. در واقع تجمع تعداد زیادی از نابه‌جایی‌ها در طول فرآیند MDF بر مرزهای فرعی و مرزهای دانه، منجر به افزایش تدریجی زاویه عدم انطباق شده است که سرانجام منجر به تکامل ساختار فوق ریزدانه می‌شود که با مرزخانه‌های بزرگ‌زاویه در رژیم کرنش بالا احاطه شده است [32]. همچنین انرژی نقص در چیده شدن بسیار پایین در آلیاژ Cu-30Zn می‌تواند منجر به تجمع کرنش (نابه‌جایی) و مانع از بازیابی دینامیکی شود. زیرا SFE پایین منجر به دشواری برای جداسدن و ترکیب مجدد نابه‌جایی‌ها و لغزش متقاطع شده که مکانیزم اصلی دخیل در بازیابی دینامیکی، لغزش متقاطع فعال شده گرمایی است. در نتیجه انرژی



**جدول ۲)** اطلاعات به دست آمده از آزمون کشش و پانچ برشی شامل استحکام تسلیم برشی (SYS), استحکام برشی نهایی (USS), استحکام کششی نهایی (UTS) و استحکام تسلیم کششی (TYS) و نسبت  $\sigma/\sigma_{TYS}$  و  $\sigma/\sigma_{UTS}$  نمونه‌های آنیل و فورج شده

نمونه	$\sigma_{SYS}$ (مگاپاسکال)	$\sigma_{USS}$ (مگاپاسکال)	$\sigma_{UTS}$ (مگاپاسکال)	$\sigma_{TYS}$ (مگاپاسکال)	سختی (HV)	$\sigma_{UTS}/\sigma_{TYS}$
آنیل	۲۱۵	۲۶۵	۲۴۷	۱۷۴	۷۸	۱/۴۲
آنیل ۱	۲۸۱	۳۳۶	۵۶۱	۵۲۰	۱۶۹	۱/۰۷
آنیل ۳	۳۸۷	۴۱۵	۵۸۹	۵۶۲	۲۲۷	۱/۰۴
آنیل ۳	۴۴۰	۴۵۹	۷۱۷	۶۹۴	۲۴۴	۱/۰۳

رابطه بین استحکام کششی و برشی آلیاژ، قبل و بعد از فرآیند MDF تا ۶ پاس در دمای محیط در نمودار ۳ نشان داده شده است. رابطه کلی بین استحکام‌های تسلیم کششی و کششی نهایی برحسب استحکام‌های تسلیم برشی و برشی نهایی به صورت زیر بیان می‌شود [37]:

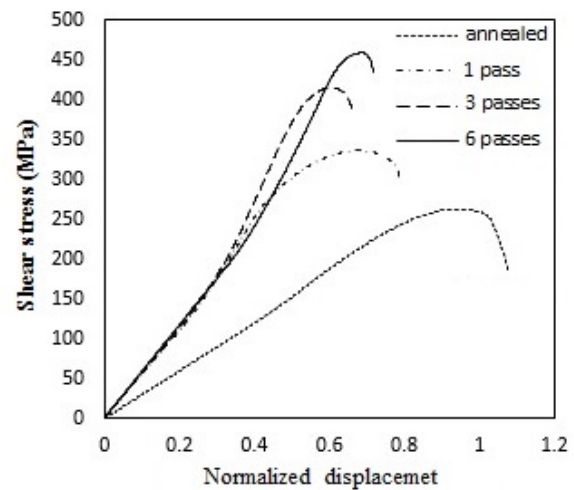
$$TYS, UTS = m(SYS, USS - \tau_0) \quad (3)$$

که در آن  $m$  ضریب رابطه است.  $\tau_0$  به پارامتر آفست اشاره می‌کند و از تقسیم طول از مبدأ بر شیب خط در نمودار ۳ به دست می‌آید که به آزمون پانچ برشی مربوط می‌شود. در واقع به اصطکاک بین پانچ- قالب- نمونه و حالت قالب- پانچ (اصطکاک، خمش) در این آزمون مربوط می‌شود. همچنین سطح این تنش‌های آفستی وابسته به مواد بوده، از طرفی مقدار این پارامتر برای استحکام برشی نهایی معمولاً بیشتر از استحکام تسلیم برشی است. در این تحقیق نیز مقدار تنش‌های آفست برای رابطه بین استحکام‌های نهایی برابر ۱۱۷/۷ و در رابطه بین استحکام‌های تسلیم برابر ۶۶/۱۶ به دست آمد.  $TYS$  و  $UTS$  به ترتیب استحکام‌های تسلیم کششی و کششی نهایی و همچنین  $SYS$  و  $USS$  نیز به ترتیب استحکام‌های تسلیم برشی و برشی نهایی هستند [38].

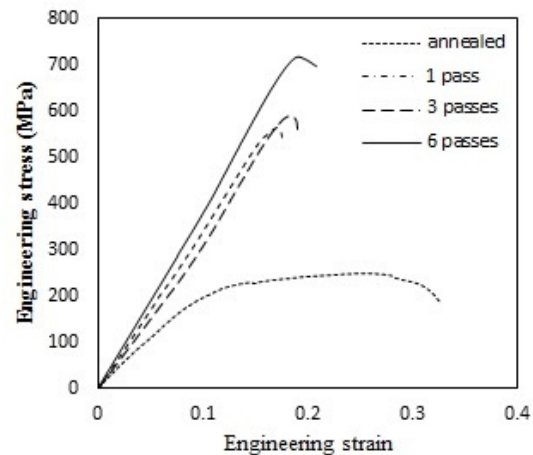
برای حذف اثرات اصطکاک، داده‌ها در نمودار ۳- ج و د، نسبت به تنش برشی شبکه رسم شده‌اند. زیرا در معیار تسلیم ون میز (  $\sigma_y/\tau_y = \sqrt{3}$  ) با ضریب ۱/۷۳ معیار تسلیم ترسکا که ساده‌تر و محافظه‌کارانه‌تر از معیار ون میز با ضریب دو بوده، برش خالص برای آزمون پانچ برشی فرض شده است. در نمودار ۳- ج و د به ترتیب رابطه بین  $TYS$  و استحکام تسلیم برشی خالص ( $SYS - SYS_0$ ) و  $UTS$  و استحکام برشی نهایی خالص ( $USS - USS_0$ ) محاسبه شده است [37, 38].

در نمودار ۳، شیب خط ( $m$ ) که نشان‌دهنده رابطه بین استحکام‌های تسلیم کششی و برشی و همچنین استحکام‌های کششی و برشی نهایی است، به ترتیب ۱/۸۳ و ۲/۰۵ به دست آمد. با توجه به اینکه در معیار فون میز، نسبت استحکام کششی به برشی برابر ۱/۷۳ پیشنهاد شده است، نتایج به دست آمده انطباق مناسبی با معیار فون میز دارد. اختلاف اندک ضرایب به دست آمده در پژوهش حاضر با معیار فون میز به فاکتورهایی مانند تنش‌های اضافی که به علت کشش و خمش در ناحیه آزاد بین پانچ و قالب به وجود می‌آید، نسبت داده می‌شود. در تحقیقات پیشین برای بسیاری از آلیاژهای مختلف شامل آلیاژ برنج که توسط بسیاری از محققان صورت گرفته، ضرایب رابطه بین استحکام‌های تسلیم کششی و برشی و همچنین استحکام‌های نهایی کششی و برشی در محدوده ۱/۳۸ تا ۲/۷۶ گزارش شده است [30, 37-41]. در نتیجه ضرایب به دست آمده در پژوهش حاضر نیز قابل پذیرش و صحت

تسلیم کششی و استحکام کششی نهایی در نمونه ۶ پاس نسبت به حالت آنیل به ترتیب ۲۹۸ و ۱۹۰٪ افزایش داشته است. این افزایش خواص مکانیکی در مقایسه با سایر فرآیندهای SPD در پژوهش‌های پیشین که در بخش مقدمه نیز گزارش شد، نظیر تحقیقات پاسبانی و طرفی‌نژاد [13] و همچنین سانگ و همکاران [1] قابل قبول و در محدوده پژوهش‌های پیشین قرار گرفته است. مطابق نمودارهای ۱ و ۲، بیشترین افزایش خواص مکانیکی از جمله استحکام تسلیم، استحکام کششی و برشی نهایی در پاس‌های اول رخ داده و با افزایش تعداد پاس، نرخ افزایش خواص مکانیکی مذکور تقریباً کاهش یافته است، به طوری که استحکام در نمونه‌های MDF شده در پاس‌های نهایی تفاوت چندانی با هم ندارند. علت این مساله، اشباع فرآیند کارسختی و ریزدانه‌سازی در کرنش اعمالی در دمای محیط بوده است. همچنین تأثیر فرآیند فورج چندگانه در افزایش استحکام تسلیم به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از تأثیر آن در افزایش استحکام نهایی است. کاهش قابلیت کارسختی در جدول ۲ نیز اثبات شده، زیرا نسبت استحکام کششی نهایی به استحکام تسلیم کششی برای نمونه آنیل برابر ۱/۴۲ است، در حالی که این نسبت پس از اعمال یک پاس فرآیند MDF به ۱/۰۷ رسیده و تا پاس ششم کاهش ناچیزی داشته است. یعنی استحکام تسلیم کششی به استحکام کششی نهایی نزدیک شده یا به عبارتی، قابلیت کارسخت شدن جسم کاهش یافته است [29].

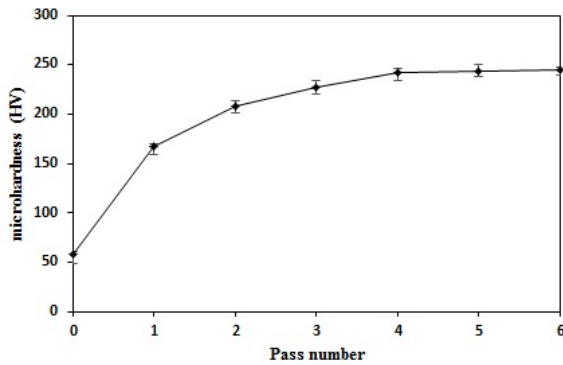


نمودار ۱) منحنی‌های آزمون پانچ برشی نمونه‌های آنیل قبل و بعد از فورج چندگانه



نمودار ۲) منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی نمونه‌های آنیل قبل و بعد از فورج چندگانه

نمودار تغییرات سختی با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند در دمای محیط در نمودار ۴ ارائه شده است. مطابق نتایج به دست آمده با افزایش تعداد پاس، سختی افزایش می‌یابد، اما نرخ افزایش سختی روند کاهشی دارد. به همین دلیل بیشترین نرخ افزایش سختی در پاس اول مشاهده شده است. سپس به دلیل کاهش اندازه دانه و احتمالاً اشباع ریزدانه‌سازی در اثر افزایش تعداد پاس، میزان افزایش سختی تقریباً ثابت می‌شود. طبق نتایج به دست آمده، سختی در نمونه ۶ پاس MDF شده آلیاژ Cu-30Zn حدود ۲۱۲٪ نسبت به حالت آنیل افزایش داشته است.



نمودار ۴) اثر تعداد پاس‌های فورج چندگانه بر میکروسختی آلیاژ Cu-30Zn

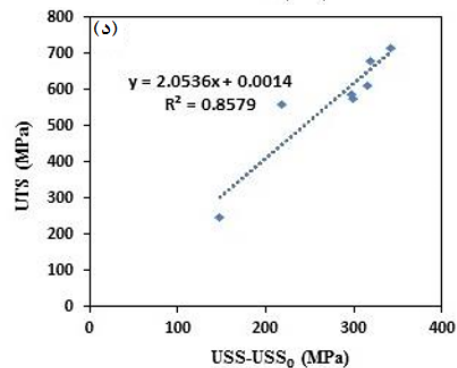
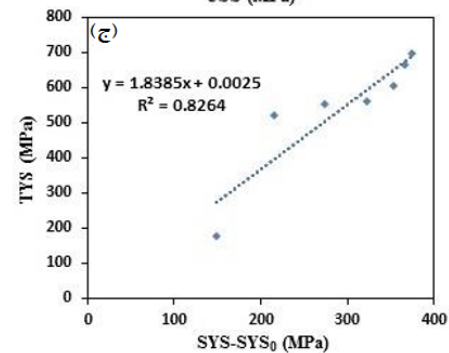
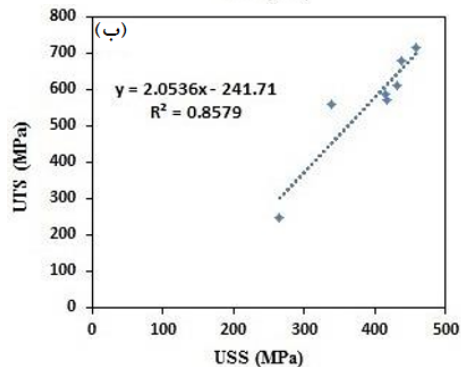
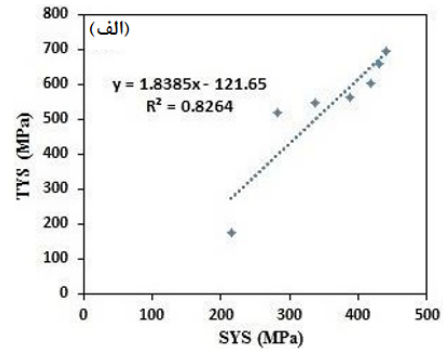
فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید از جمله فرآیند MDF بر آلیاژهای مس-روی از طریق سه مکانیزم موجب افزایش چشمگیر خواص مکانیکی از جمله سختی و استحکام می‌شود. مکانیزم اول فرآیند کارسختی، به صورت برهم‌کنش بین نابه‌جایی‌ها در داخل دانه‌های زمینه، مکانیزم دوم استحکام‌دهی ناشی از مرز دانه، به صورت برهم‌کنش بین نابه‌جایی‌ها و مرزهای دانه و مکانیزم سوم، استحکام‌دهی محلول جامد است [33]. در این پژوهش دو مکانیزم شامل کارسختی و کاهش اندازه دانه، عامل اصلی افزایش خواص و استحکام بخشی هستند. در ضمن علاوه بر مکانیزم‌های فوق استحکام بخشی ناشی از بافت هم می‌تواند بر افزایش استحکام نمونه‌ها تأثیرگذار باشد. ولی با توجه به تأثیر کمتر آن در مقایسه با سایر مکانیزم‌ها از اثر آن صرف نظر شده است. به طور کلی می‌توان گفت محدود کردن و جلوگیری از حرکت نابه‌جایی‌ها در یک ماده منجر به افزایش سختی و استحکام آن می‌شود [36]. افزایش خواص مکانیکی در اثر ریزدانه‌گی ناشی از فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید براساس رابطه هال-پیچ بررسی می‌شود [5، 42].

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (4)$$

طبق این رابطه،  $\sigma_y$  استحکام تسلیم،  $k$  ثابت ماده،  $\sigma_0$  تنش اصطکاکی یا همان مقاومت کلی شبکه در برابر حرکت نابه‌جایی‌ها و  $d$  اندازه دانه است. در این رابطه  $k$  وابسته به ساختار کریستالی ماده است و برای فلزات با ساختار مکعبی با سطوح مرکزدار (FCC)، مقدار کمتری از فلزات با ساختار شش‌وجهی متراکم (HCP) را شامل می‌شود.

در آلیاژهای مس-روی، تغییر شکل براساس صفحات لغزش قفل شده و گسترش دوقلوبی‌های فعال است، به همین دلیل شکل‌پذیری در آلیاژهای برنج بسیار بالاست [36، 42]. علاوه بر مکانیزم‌های نام‌برده شده، تأثیر انرژی نقص چیدن نیز بر تغییرات خواص مکانیکی این آلیاژ قابل بررسی است. انرژی نقص چیدن در مس خالص ۵۵ میلی‌ژول بر متر مربع است. با افزایش میزان روی،

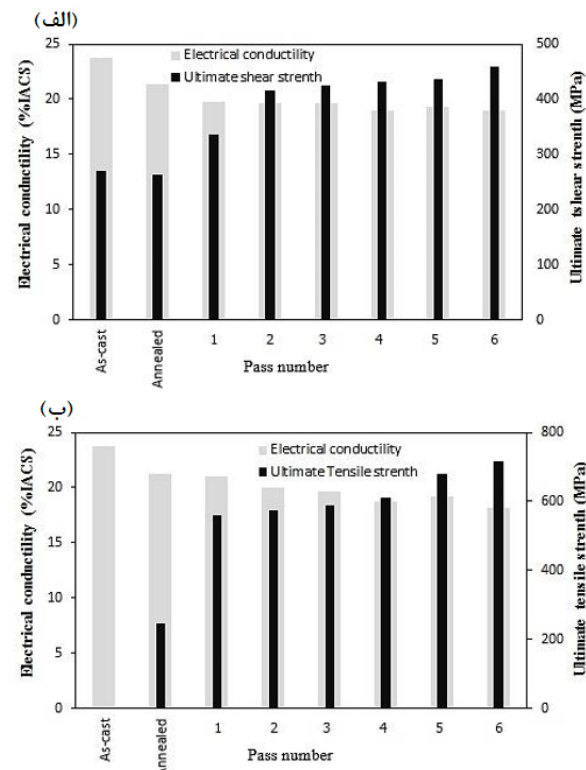
روابط به دست آمده در مقایسه با معیار فون میزز قابل قبول است. مطابق انتظار، رابطه بین استحکام‌های تسلیم کششی و برشی در مقایسه با استحکام‌های کششی و برشی نهایی، علاوه بر پارامتر آفست کمتر، ضریب رابطه نزدیک‌تری به ضریب رابطه معیار تسلیم فون میزز نشان دادند. زیرا اصطکاک بین پانچ- قالب- نمونه و تنش‌های اضافی که به علت کشش و خمش در ناحیه آزاد بین پانچ و قالب به وجود می‌آیند، در استحکام برشی نهایی اثر بیشتری نسبت به استحکام تسلیم برشی نشان دهند.



نمودار ۳) رابطه بین استحکام‌های کششی و برشی برای نمونه‌های آنیل و MDF شده آلیاژ Cu-30Zn: الف) نمودار استحکام تسلیم کششی بر حسب برشی، ب) نمودار استحکام کششی نهایی بر حسب برشی، ج) نمودار استحکام تسلیم کششی بر حسب برشی خالص، د) نمودار استحکام کششی نهایی بر حسب برشی خالص

کوچک‌زاویه به مرزهای بزرگ‌زاویه، مکانیزم غالب، افزایش استحکام است. در واقع با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند MDF، ناهنجاری‌ها به مرزهای کوچک‌زاویه، ملحق و مرزهای کوچک‌زاویه به مرزهای بزرگ‌زاویه تبدیل می‌شوند که در نتیجه منجر به کاهش چگالی ناهنجاری‌ها و در نتیجه موفق‌شدن روند کاهش هدایت الکتریکی می‌شود [23, 29].

نمودار ۶، ترکیب هم‌زمان استحکام برشی نهایی و استحکام کششی نهایی با هدایت الکتریکی نمونه‌های تغییرشکل‌یافته در مقایسه با نمونه ریختگی قبل از آنیل و تغییر شکل را نشان می‌دهد. استحکام برشی نهایی و هدایت الکتریکی برای نمونه ریختگی نیز برای آلیاژ مورد نظر برای مقایسه ارائه شده است. نمودار ۶ بیانگر این است که با کارسختی و ریزدانه‌سازی ایجادشده حین ۶ پاس فرآیند MDF، باعث افزایش حدود ۷۳ و ۱۹۰ درصدی به ترتیب در استحکام برشی و کششی نهایی و کاهش ۱۹ درصدی در هدایت الکتریکی می‌شود. لذا می‌توان گفت فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید برخلاف سایر روش‌های استحکام‌بخشی در فلزات مانند رسوب سختی که باعث کاهش هدایت الکتریکی در اثر پخش الکترون‌ها می‌شود، یک روش بسیار مناسب برای رسیدن به خواص مکانیکی عالی، بدون تأثیر قابل توجه در هدایت الکتریکی ماده است.



**نمودار ۶** تأثیر تعداد پاس‌های فرآیند فورج چندگانه بر هدایت الکتریکی و استحکام برشی نهایی و همچنین هدایت الکتریکی و استحکام کششی نهایی آلیاژ Cu-30Zn: (الف) هدایت الکتریکی و استحکام کششی نهایی، (ب) هدایت الکتریکی و استحکام کششی نهایی آلیاژ Cu-30Zn

#### ۴- خلاصه نتایج

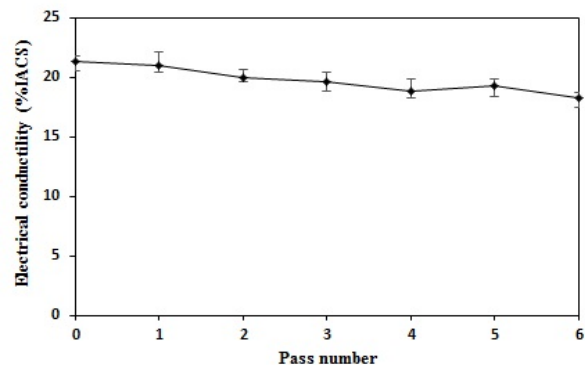
نتایج به‌دست‌آمده از بررسی اثر فرآیند فورج چندگانه MDF بر آلیاژ Cu-30Zn در دمای محیط را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

۱- در اثر ۶ پاس فرآیند فورج چندگانه در دمای محیط اندازه دانه‌ها کاهش چشمگیری داشته است. همچنین بررسی‌های انجام‌شده با

علاوه بر تأثیر محلول جامد، انرژی نقص چیدن کمتر می‌شود، به طوری که در آلیاژ Cu-30Zn، مقدار آن ۱۴ میلی‌ژول بر متر مربع گزارش شده است. لغزش متقاطع در انرژی نقص چیدن زیاد به راحتی رخ می‌دهد و در هنگام تغییر شکل، لغزش‌های ظریف به وجود می‌آید. اما در انرژی نقص چیدن کم، لغزش تقاطعی مشکل‌تر می‌شود و ناهنجاری‌ها فقط می‌توانند در سطوح لغزش خود به صورت تجمع ناهنجاری‌ها یا نوارهای کوتاه نقص چیدن باقی بمانند. از طرفی با افزایش روی و کاهش انرژی نقص چیدن، ساختار به راحتی دوقلو شده و سرعت کارسختی بیشتر می‌شود که این توسعه دوقلویی‌ها در پاس‌های اولیه فرآیند MDF نسبت به پاس‌های نهایی بیشتر است [13, 36, 43].

#### ۳-۳- بررسی هدایت الکتریکی

نمودار تغییرات هدایت الکتریکی با افزایش تعداد پاس‌های فرآیند MDF در نمودار ۵ ارائه شده است. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، هدایت الکتریکی بعد از تغییر شکل به خصوص در پاس اول، ابتدا کمی کاهش یافته است. اما با افزایش تعداد پاس‌های تغییر شکل، هدایت الکتریکی تقریباً ثابت می‌شود. کاهش هدایت الکتریکی در پاس‌های اول به دلیل کوتاه‌شدن مسیر الکترون‌ها در اثر تشکیل مرزهای کوچک‌زاویه ناشی از شکسته‌شدن دانه‌های اولیه و تشکیل دانه‌های ریز و همچنین افزایش چگالی ناهنجاری‌ها در اثر کرنش برشی اعمالی است. اما با افزایش تعداد پاس در اثر ترکیب ناهنجاری‌ها و مرزهای کوچک‌زاویه، مرزهای بزرگ‌زاویه تشکیل شده که با طولانی‌تر کردن مسیر حرکت الکترون‌ها منجر به متوقف‌شدن روند کاهش هدایت الکتریکی شده است [44].



**نمودار ۵** تأثیر تعداد پاس‌های فرآیند فورج چندگانه بر هدایت الکتریکی آلیاژ Cu-30Zn

در واقع، هدایت الکتریکی بسیار حساس به ریزساختار ماده فلزی است. زیرا از طریق پراکندگی الکترون‌ها به علت اختلالات در ساختار بلوری مانند ناخالصی‌ها، جاهای خالی، ناهنجاری‌ها و غیره که باعث پخش الکترون‌ها می‌شوند، تعیین می‌شود [23, 45]. تغییر شکل یا به عبارتی ایجاد کارسرد در ماده فلزی، به دلیل افزایش عیوب کریستالی از جمله ناهنجاری‌ها، جاهای خالی و مرزهای کوچک‌زاویه، منجر به کاهش هدایت الکتریکی می‌شود. زیرا اعوجاج ایجادشده در اطراف تقایص، سرعت حرکت الکترون‌ها را کاهش می‌دهد و منجر به پخش الکترون‌ها یا به عبارتی کوتاه‌تر شدن مسیر حرکت آنها می‌شود. این مساله منجر به کاهش هدایت الکتریکی و افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود [46]. این موارد به خصوص در پاس‌های اولیه اعمال فرآیند که نرخ کارسختی زیادی به نمونه آنیل شده اعمال می‌شود، محسوس است. با افزایش تعداد پاس‌ها کارسختی تقریباً اشباع شده و تبدیل مرزهای



- 4- Kawasaki M, Figueiredo RB, Langdon TG. Twenty-five years of severe plastic deformation: Recent developments in evaluating the degree of homogeneity through the thickness of disks processed by high-pressure torsion. *Journal of Materials Science*. 2012;47(22):7719-7725.
- 5- Talafi Noghani M, Shaeri MH, Esmaeili A, Razaghian A. Effect of severe plastic deformation by equal channel angular pressing on fracture toughness of Al-7075 alloy. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;17(12):11-20. [Persian]
- 6- Ansarian I, Shaeri MH. Diffusional bonds in laminated composites produced by ECAP. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017;27(9):1928-1938.
- 7- Chegini M, Shaeri MH. Effect of equal channel angular pressing on the mechanical and tribological behavior of Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Materials Characterization*. 2018;140:147-161.
- 8- Esmaeili A, Shaeri MH, Talafi Noghani M, Razaghian A. Fatigue behavior of AA7075 aluminium alloy severely deformed by equal channel angular pressing. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;757:324-332.
- 9- Naseri R, Shariati M, Kадkhodayan M. Effect of work-piece cross section on the mechanical properties of commercially pure titanium produced by Equal Channel Angular Pressing. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(6):157-166. [Persian]
- 10- Naseri R, Kадkhodayan M, Shariati M, The investigation of spring-back of UFG commercially pure titanium in three-point bending test. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;16(11):266-276. [Persian]
- 11- Tang L, Liu C, Chen Z, Ji D, Xiao H. Microstructures and tensile properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy during multidirectional forging at 773 K. *Materials and Design*. 2013;50:587-596.
- 12- Zhao YH, Liao XZ, Zhu YT, Horita Z, Langdon TG. Influence of stacking fault energy on nanostructure formation under high pressure torsion. *Materials Science and Engineering A*. 2005;410-411:188-193.
- 13- Pasebani S, Toroghinejad MR. Nano-grained 70/30 brass strip produced by Accumulative Roll-Bonding (ARB) process. *Materials Science and Engineering A*. 2010;527(3):491-497.
- 14- Głuchowski W, Stobrawa JP, Rdzawski ZM. Microstructure refinement of selected copper alloys strips processed by SPD method. *Archives of Materials Science and engineering*. 2011;47(2):103-109.
- 15- Dutkiewicz J, Masdeu F, Malczewski P, Kukuła A. Microstructure and properties of  $\alpha + \beta$  brass after ECAP processing. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2009;39(2):80-83.
- 16- Miura H, Itabashi I, Yu G, Sakai T. Grain refinement of coarse grained gold by combined thermo-mechanical process of severe plastic deformation and low temperature annealing. *Journal of Physics Conference Series*. 2010;240(1):012116.
- 17- Gubicza J, Dobatkin SV, Khosravi E, Kuznetsov AA, Lábár JL. Microstructural stability of Cu processed by different routes of severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering A*. 2011;528(3):1828-1832.
- 18- Zhu QF, Li L, Ban CY, Zhao ZH, Zuo YB, Cui JZ. Structure uniformity and limits of grain refinement of high purity aluminum during multi-directional forging process at room temperature. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014;24(5):1301-1306.

آنالیز EBSD نشان داد، مرزهای بزرگ زاویه و کوچک زاویه که در نمونه‌های اولیه به صورت غیرمنظم و پراکنده وجود داشت، بعد از ۶ پاس تغییر شکل به صورت منظم در آمده و با توجه به جهت تغییر شکل اکثر دانه‌ها در راستای اعمال کرنش قرار گرفته است.

۲- فرآیند فورج چندگانه باعث افزایش چشمگیر خواص مکانیکی شده، این افزایش به خصوص در پاس اول به دلیل کارسختی و افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها، بیشتر رخ داده است. همچنین خواص مکانیکی شامل سختی، استحکام‌های تسلیم کششی و برشی، استحکام‌های نهایی کششی و برشی پس از ۶ پاس فرآیند MDF به ترتیب ۲۱۲، ۲۹۸، ۱۰۵، ۱۹۰ و ۷۳٪ افزایش داشته است.

۳- رابطه بین استحکام کششی و برشی آلیاژ Cu-30Zn قبل و بعد از فرآیند MDF تا ۶ پاس با استفاده از داده‌های استحکام‌های کششی و برشی محاسبه شد، به طوری که ضریب رابطه بین این استحکام‌ها نزدیک به ۲ به دست آمد که انحراف آن از ضریب رابطه ون‌میزز (حالت برش خالص) به تنش‌های اضافی که به علت کشش و خمش در ناحیه آزاد بین پانچ و قالب به وجود می‌آید، نسبت داده می‌شود. مقدار تنش‌های آفست نیز برای رابطه بین استحکام‌های نهایی برابر ۱۱۷/۷ و در رابطه بین استحکام‌های تسلیم برابر ۶۶/۱۶ به دست آمد.

۴- پس از ۶ پاس فورج چندگانه، هدایت الکتریکی به دلیل ریزش دانه‌ها و افزایش مرزهای کوچک زاویه و در نتیجه کاهش مسیر الکترون‌ها به مقدار ۱۹٪ کاهش یافت. میزان کاهش هدایت الکتریکی در مقایسه با اثر فرآیند MDF بر افزایش خواص مکانیکی، کاملاً قابل چشم‌پوشی است. لذا می‌توان فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید را یک روش موثر برای تولید ماده‌ای با خواص مکانیکی و هدایت الکتریکی بالا دانست.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان این مقاله از دکتر جی‌هانگ‌چو از دانشگاه انیستیتو علوم مواد کره به علت آنالیز نمونه‌ها به وسیله EBSD تقدیر و تشکر می‌نمایند.

**تأییدیه اخلاقی:** این مقاله تاکنون در هیچ نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. همچنین محتویات علمی و ادبی این مقاله نیز مستخرج از فعالیت علمی نویسندگان است.

**تعارض منافع:** نویسندگان این مقاله اعلام می‌کنند که در اثر، هیچ‌گونه تعارض منافی با نهاد یا سازمانی وجود ندارد.

**سهم نویسندگان:** زیبا زارعی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۴۰٪)، محمد تلافی نوغانی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/نگارنده بحث (۲۰٪)، محمد حسین شاعری (نویسنده سوم)، روش‌شناس‌نگارنده بحث (۲۰٪)، ایمان انصاریان (نویسنده چهارم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی (۲۰٪)

**منابع مالی:** در انجام این پژوهش از منبع مالی خاصی استفاده نشده است.

## منابع

- 1- Song KH, Kim HS, Kim WY. Enhancement of mechanical properties and grain refinement in ecap 6/4 brass. *Reviews on Advanced Materials Science*. 2011;28(2):158-161.
- 2- Estrin Y, Vinogradov A. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science. *Acta Materialia*. 2013;61(3):782-817.
- 3- Vo KD, Tieu AK, Zhu HT, Kosasih PB. The influence of high temperature due to high adhesion condition on rail damage. *Wear*. 2015;330-331:571-580.

- alloy. Metallurgical and Materials Transactions A. 2009;40(9):2137-2144.
- 33- Fadhil AA, Enab TA, Samuel M, Iskander BA, Ajeel SA. Study on the effect of production parameters and raw materials used on the mechanical properties of leaded brass (CuZn40Pb2) alloy. World Journal of Engineering and Technology. 2017;5(2):340-349.
- 34- Karimi M, Toroghinejad MR, Dutkiewicz J. Nanostructure formation during accumulative roll bonding of commercial purity titanium. Materials Characterization. 2016;122:98-103.
- 35- Nejadseyfi O, Shokuhfar A, Moodi V. Segmentation of copper alloys processed by equal-channel angular pressing. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2015;25(8):2571-2580.
- 36- Dieter GE. Mechanical metallurgy. Tehran: Nashr Daneshgahi; 1990. pp. 283-284. [Persian]
- 37- Hankin GL, Toloczko MB, Hamilton ML, Faulkner RG. Validation of the shear punch-tensile correlation technique using irradiated materials. Journal of Nuclear Materials. 1998;258-263(Pt 2):1651-1656.
- 38- Mahmudi R, Sadeghi M. Correlation between shear punch and tensile strength for low-carbon steel and stainless steel sheets. Journal of Materials Engineering and Performance. 2013;22(2):433-438.
- 39- Karthik V, Visweswaran P, Vijayraghavan A, Kasiviswanathan KV, Raj B. Tensile-shear correlations obtained from shear punch test technique using a modified experimental approach. Journal of Nuclear Materials. 2009;393(3):425-432.
- 40- Ferrero JG, Sweet SS. Evaluation of the relationship between tensile and double shear strength for various titanium alloys. In: Venkatesh V, Pilchak AL, Allison JE, Ankem S, Boyer R, Christodoulou J, editors. Proceedings of the 13<sup>th</sup> world conference on titanium. Pittsburgh: The Minerals, Metals & Materials Society; 2016. pp. 965-970.
- 41- Guduru RK, Darling KA, Kishore R, Scattergood RO, Koch CC, Murty KL. Evaluation of mechanical properties using shear-punch testing. Materials Science and Engineering A. 2005;395(1-2):307-314.
- 42- Zhang J, Nash K, Arrigoni A, Escobedo JP, Florando JN, Field DP. Hydrostatic pressure effect on mechanical behavior and texture evolution of Al and Brass. Materials Science and Engineering A. 2017;679:155-161.
- 43- Cai J, Shekhar S, Wang J, Ravi Shankar M. Nanotwinned microstructures from low stacking fault energy brass by high-rate severe plastic deformation. Scripta Materialia. 2009;60(8):599-602.
- 44- Ranaei MA, Afsari A, Ahmadi Brooghani SY, Moshksar MM. Microstructure, mechanical and electrical properties of commercially pure copper deformed severely by equal channel angular pressing. Modares Mechanical Engineering. 2015;14(15):257-266. [Persian]
- 45- Murashkin MY, Sabirov I, Kazykhanov VU, Bobruk EV, Dubravina AA, Valiev RZ. Enhanced mechanical properties and electrical conductivity in ultrafine-grained Al alloy processed via ECAP-PC. Journal of Materials Science. 2013;48(13):4501-4509.
- 46- Razaghani A. Introduction to the principles of dislocations and strengthening mechanisms. Mohebbi MM, editor. Qazvin: Iranian Students Booking Agency; 2012. pp. 189-192. [Persian]
- 19- Odnobokova M, Kipelova A, Belyakov A, Kaibyshev R. Microstructure evolution in a 316L stainless steel subjected to multidirectional forging and unidirectional bar rolling. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2014;63(1):012060.
- 20- Shakhova I, Yanushkevich Z, Fedorova I, Belyakov A, Kaibyshev R. Grain refinement in a Cu-Cr-Zr alloy during multidirectional forging. Materials Science and Engineering A. 2014;606:380-389.
- 21- Nie KB, Wang XJ, Deng KK, Xu FJ, Wu K, Zheng MY. Microstructures and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy processed by multidirectional forging under decreasing temperature conditions. Journal of Alloys and Compounds. 2014;617:979-987.
- 22- Yang XY, Sun ZY, Xing J, Miura H, Sakai T. Grain size and texture changes of magnesium alloy AZ31 during multi-directional forging. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2008;18 Suppl 1:s200-s204.
- 23- Dashti AR, Shaeri MH, Taghiabadi R, Djevanroodi F, Vali Ghazvini F, Javadi H. Microstructure, texture, electrical and mechanical properties of AA-6063 processed by multi directional forging. Materials (Basel). 2018;11(12):2419.
- 24- Ansarian I, Shaeri MH, Ebrahimi M, Minárik P, Bartha K. Microstructure evolution and mechanical behaviour of severely deformed pure titanium through multi directional forging. Journal of Alloys and Compounds. 2019;776:83-95.
- 25- Miura H, Nakao Y, Sakai T. Enhanced grain refinement by mechanical twinning in a bulk Cu-30 mass%Zn during multi-directional forging. Materials Transactions. 2007;48(9):2539-2541.
- 26- Nakao Y, Miura H, Sakai T. Recrystallization behavior of nano grained Cu-Zn Alloy produced by multi-directional forging. Materials Science Forum. 2007;558-559:1329-1334.
- 27- Dasharath SM, Mula S. Mechanical properties and fracture mechanisms of ultrafine grained Cu-9.6% Zn alloy processed by multiaxial cryoforging. Materials Science and Engineering A. 2016;675:403-414.
- 28- Akbaripanah F, Salavati MA, Mahmudi R. The influences of extrusion and Multi-Directional Forging (MDF) processes on microstructure, shear strength and microhardness of AM60 magnesium alloy. Modares Mechanical Engineering. 2017;16(11):409-416. [Persian]
- 29- Ansarian I, Shaeri MH, Ebrahimi M. Utilization of multi directional forging for fabrication of ultrafine-grained pure titanium. Modares Mechanical Engineering. 2018;18(2):371-382. [Persian]
- 30- Akbaripanah F, Fereshteh Saniee F, Mahmudi R, Kim HK. Microstructural homogeneity, texture, tensile and shear behavior of AM60 magnesium alloy produced by extrusion and equal channel angular pressing. Materials & Design. 2013;43:31-39.
- 31- Fukutomi H, Takagi S, Aoki K, Nobuki M, Mecking H, Kamijo T. Effect of deformation conditions on texture formation during dynamic recrystallization of the intermetallic compound TiAl. Scripta Metallurgica et Materiala. 1991;25(7):1681-1684.
- 32- Miura H, Sakai T, Ueno T, Takebayashi Sh, Fujita N, Yoshinaga N. Promotion of ultrafine grain evolution by coarse particles during multidirectional forging of Ni-Fe