



ارزیابی تأثیر فرآوری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب بر روی ریزساختار و خواص تریبولوژیکی مس و آلیاژ آن

علی معرف¹، امین ربیعی زاده^{2*}

1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز

2- استادیار، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز

* شیراز، کد پستی 71987-74731 rabieezadeh@iaushiraz.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

روش تولید ریزساختار آمورف/فوق ریزدانه به وسیله فرآوری اصطکاکی اغتشاشی زیر آب یک روش نوین می‌باشد که با استفاده از یک ابزار در حال چرخش، فلز زمینه غوطه ور در آب را به حالت خمیری در می‌آورد تا ساختار کریستالی در حین تبلور مجدد دینامیکی از حالت منظم خارج و بی‌شکل شود و یا پس از تبلور مجدد مانع از رشد دانه‌ها گردد. بدین منظور برای انجام فرآوری اصطکاکی اغتشاشی بر روی مس خالص تجاری و آلیاژ برنج در زیر آب از ابزاری از جنس کاربید تنگستن استفاده شد. بررسی‌های ریزساختار به کمک میکروسکپ نوری بر روی نمونه‌های مس خالص تجاری کاهش چشمگیر اندازه دانه را نشان داد. به همین ترتیب سختی سنجی مقطع عرضی و عمود بر راستای فرایند، افزایش سختی نمونه‌ها تا 45% بیشتر از فلز پایه را نشان داد. الگوی پراش اشعه ایکس ناحیه فرآوری شده تحت اعمال فرآوری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب در مقایسه با الگوی فلز پایه قله‌های کوتاه‌تر و پهن‌تری را نشان می‌دهد که در عین حال میزان زمینه الگو افزایش یافته است. مجموع این عوامل بیانگر تشکیل ساختاری آمورف/فوق ریزدانه است. همچنین رفتار سایشی نمونه‌ها با روش پین روی دیسک مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل، کاهش ضریب اصطکاک حداقل تا حدود 48% نسبت به فلز پایه را نشان می‌دهد. نتایج حاصله از آزمایش‌های سایش و سختی نشان می‌دهد که فرآوری اصطکاکی اغتشاشی می‌تواند مقاومت سایشی و سختی مس خالص تجاری و آلیاژ برنج را به نحو چشمگیری افزایش دهد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 15 بهمن 1397
پذیرش: 13 اردیبهشت 1398
ارائه در سایت: آذر 1398

کلیدواژه‌ها:

آلیاژ مس
فرآوری اصطکاکی اغتشاشی
زیر آب
سایش
پراش اشعه ایکس

Evaluation of the effect of underwater friction stir welding on microstructure and tribological properties of copper and its alloy

Ali Moaref¹, Amin Rabieezadeh^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

2- Young Researchers and Elite Club, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

* P.O.B. 71987-74731, Shiraz, Iran, rabieezadeh@iaushiraz.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 4 February 2019
Accepted 3 May 2019
Available November 2019

Keywords:

Copper alloy
Friction stir processing
Underwater
Wear
XRD

Abstract

The method for producing amorphous / ultrafine grain microstructure by underwater friction stir processing is a new method, which uses a rotating tool to severely deform the base metal which immersed in water. Due to the high temperature created as a result of friction, dynamic recrystallization wants to occur in severely deformed material but rapid quenching by water prevents nucleation or growth of new recrystallized grains. In the present study, the base metal was commercial pure copper and copper alloy. The applied tool was made from tungsten carbide. The microstructural evolution and tribological properties of the specimens were investigated before and after the application of the process. Microstructural evaluation by optical microscope showed a significant reduction in grain size by processing pass increment. Similarly, the hardness of the cross-sectional area showed an increase up to 45% higher than the base metal. The x-ray diffraction pattern of the underwater friction stirred processed samples in comparison to the base metal pattern exhibits shorter and wider peaks, while the background of the pattern has increased. The sum of these factors represents the formation of an amorphous / ultra-fine grained structure. Also, the wear behavior of the samples was investigated by means of pin on the disk method and the results showed that the friction coefficient of processed samples decreased by at least 48% compared to the base metal. The results of wear and hardness tests show that the underwater friction stir processing can significantly improve the wear resistance and hardness of commercial pure copper and brass alloys.

1- مقدمه

فلزات در یکدیگر باعث شد که تولید آلیاژها محدود شود. برای رفع این محدودیت‌ها روش‌های نوین تولید فلزات با خواص مکانیکی بهینه اختراع گردید. در حالت کلی فلزات تمایل زیادی

امروزه نیاز به فلزاتی با خواص مکانیکی بهینه باعث گردید که آلیاژهای مختلفی تولید گردد، لیکن عدم انحلال بسیاری از

Please cite this article using:

A. Moaref, A. Rabieezadeh, Evaluation of the effect of underwater friction stir welding on microstructure and tribological properties of copper and its alloy, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 7, pp. 42-51, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

یکدیگر استفاده می‌شود [13-15]. یکی از راه‌های بهبود و اصلاح ریزساختار اجرای فرآوری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب می‌باشد. درخصوص اجرای جوشکاری/ فرآوری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب تا کنون بررسی‌های محدودی بر روی آلیاژهای عمدتاً بر پایه آلومینیم صورت گرفته است که در جدول 1 به صورت خلاصه ذکر شده‌اند.

در تحقیق حاضر ریزساختار و خواص مکانیکی لایه تولیدشده آمورف/فوق ریزدانه بر روی مس خالص تجاری و آلیاژ مس- روی (برنج) توسط فرآوری اصطکاکی اغتشاشی زیر آب، مورد مطالعه قرار گرفته است. دلیل انجام این فرایند در زیر آب، رسیدن به سرعت سرد کردن بالاتر نسبت به هوا و تولید لایه آمورف/ فوق ریزدانه و دستیابی به ریزساختار و خواص مکانیکی مورد نظر در مس و آلیاژ آن می‌باشد. این فرایند به دلیل خواص بسیار خوب ایجاد شده از قبیل تنش‌های پسماند بسیار کم، عدم نیاز به ابزار و تجهیزات پیچیده، عدم جذب گاز و عدم وجود تخلخل در ساختار جوش، در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به ویژگی‌های یادشده در خصوص فرآوری اصطکاکی اغتشاشی، تولید لایه آمورف/ فوق ریزدانه بر روی مس و آلیاژ آن با این روش نسبت به روش‌های دیگر، با کیفیت‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر می‌باشد. بهبود خواص مکانیکی از جمله استحکام و سختی سطحی، مقاومت به سایش و مقاومت به خوردگی، کاهش تلفات انرژی مغناطیسی، افزایش طول عمر قطعات در معرض سایش و در نتیجه افزایش دوره کاری قطعات و دوره تعمیر و نگهداری آنها افزایش یافته؛ بنابراین در هزینه تحمیل شده به کاربران تجهیزات صنعتی، صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای انجام می‌شود.

برای بلوری شدن دارند. برای جلوگیری از این کشش، باید آنها را با سرعت بالا سرد کرد، تا اجزای ماده فرصت قرار گرفتن در ساختاری منظم را نداشته باشند. البته دستیابی این میزان سرعت خنک‌کنندگی باعث محدود شدن تولید آنها به صورت نوار نازک می‌شود. برخی از دلایل به‌کارگیری خنک‌کاری سریع فلزات به منظور بهبود خواص مکانیکی، ریزکردن دانه‌ها و فازها، افزایش حد حلالیت، تولید ساختار شبه کریستالی، پایداری و توزیع یکنواخت رسوبات، افزایش مقاومت مغناطیسی، بهبود خواص مغناطیسی سخت و نرم، افزایش میزان مغناطیس اشباع و موارد دیگر می‌باشد [11، 12].

فرآوری اصطکاکی اغتشاشی، یک تکنولوژی جدید مهندسی سطح است که به‌وسیله آن می‌توان ریزساختار فلز را بهبود بخشید، در نتیجه سختی و داکتیلیته فلز بهبود می‌یابد و مقاومت خستگی و مقاومت خوردگی فلز افزایش داده می‌شود و باعث افزایش قابلیت شکل‌پذیری و بهبود دیگر خواص فلز می‌شود. فرایند اصطکاکی اغتشاشی می‌تواند دانه‌های بسیار ریزی در ساختار قطعات ایجاد کند. فرایند اصطکاکی اغتشاشی را می‌توان به عنوان نوعی کار گرم در نظر گرفت که در خلال آن مقدار زیادی تغییر شکل از طریق گردش پین ابزار و شانه آن برآمده تحت فرآوری وارد می‌شود. این تغییر شکل با خارج شدن از منطقه اغتشاش به سمت منطقه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی و منطقه متأثر از حرارت کاهش می‌یابد. علاوه بر این، از این روش برای همگن‌سازی ساختار فلزی، تصحیح ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی نیز استفاده می‌شود. در فرآوری اصطکاکی اغتشاشی از یک روش مشابه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی استفاده شده، ولی فرآوری اصطکاکی اغتشاشی به‌منظور اصلاح موضعی ریزساختار، نه به‌عنوان اتصال مواد به

جدول 1 پژوهش‌های به عمل آمده در خصوص جوشکاری/ فرآوری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب

Table 1 Research done about underwater friction stir welding/processing

مرجع	سال توضیحات	محققان
[1]	2012 جوشکاری آلیاژ آلومینیم 2017 در زیر آب و بدست آوردن ساختار فوق ریزدانه	وانگ و همکاران
[2]	2013 مدل سازی توزیع حرارت در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی زیر آب آلیاژهای آلومینیم فوق مستحکم (T6-2219)	ژانگ و همکاران
[3]	2013 جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مس خالص به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در محیط‌های مختلف	فرخی و همکاران
[4]	2014 جوشکاری غیرهمجنس آلیاژ آلومینیم T6-6061 به مس خالص به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی زیر آب	ژانگ و همکاران
[5]	2016 جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیم 5083 در زیر آب	ایکرام و همکاران
[6]	2018 جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیم 5083 در زیر آب و هوا	وحید و همکارانش
[7]	2018 آنالیز تأثیر پارامترهای فرایند بر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیم T6-6061 در زیر آب	وحید و همکاران
[8]	2018 آنالیز تأثیر محیط خنک‌کننده بر ریزساختار و خواص مکانیکی در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیم T6-6061	وحید و همکاران
[9]	2018 مروری بر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب: پتانسیل بالای روش در خصوص بهبود خواص اتصال	وحید و همکاران
[10]	2018 ارزیابی تولید کامپوزیت سطحی بر روی آلیاژ آلومینیم T6-6082 به روش فرآوری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب	سریوستاوا و همکاران

2- روش تحقیق

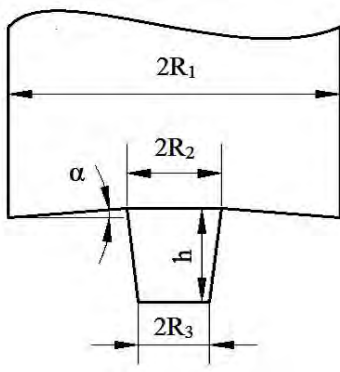
در این پژوهش خواص مکانیکی و تریبولوژیکی مس خالص تجاری و آلیاژ مس- روی (برنج) که به روش فرآوری اصطکاکی اغتشاشی زیر آب¹ تولید شده‌اند مورد بررسی قرار گرفت. ماده اولیه استفاده شده در این تحقیق مس خالص تجاری با خلوص 99/8% و برنج آلیاژی C28000 می‌باشد. هر دو ماده اولیه جهت تعیین ترکیب شیمیایی مورد نمونه برداری قرار گرفت و آزمون تعیین ترکیب شیمیایی آن‌ها به روش اسپکترومتری نشری مطابق الزامات استاندارد ASTM E414 صورت گرفت (جدول 2).

در این پژوهش، فرآوری اصطکاکی اغتشاشی بر روی یک ورق به ضخامت 5 میلی‌متر انجام شد. برای انجام فرایند مورد نظر، ابتدا یک نمونه ورق با ابعاد 150×70 میلی‌متر تهیه گردید. ابزار مورد استفاده از جنس کاربید تنگستن بوده که در شکل 1 تصویر و در جدول 3 مشخصات آن مشاهده می‌شود. طراحی پین به صورت مخروطی بر اساس نتایج حاصل از پژوهش‌های پیشین و امکان ساخت آن صورت پذیرفت. برای انجام فرایند، به محور چرخنده (کلگی) ماشین فرز مورد استفاده، 5 درجه انحراف داده شد. این زاویه سبب می‌شود که عمل فورجینگ مواد پشت ابزار در پرکردن حفره ایجاد شده به صورت موثر عمل کند و لذا قطعات فرآوری شده عاری از هرگونه عیبی باشند. در این حالت شانه ابزار در حدود 0/1 تا 0/15 میلی‌متر در ورق نفوذ خواهد کرد. با توجه به پژوهش‌های پیشین، سرعت چرخش و سرعت پیشروی ابزار در کلیه قطعات فرآوری شده به ترتیب 1800 rpm و 4 mm/min است. به منظور خنک کاری قطعه کار و جلوگیری از تشکیل ساختاری منظم و تشکیل لایه‌ی آمورف/ فوق ریزدانه، حوضچه آبی به همراه ورودی و خروجی جهت پمپاژ آب با استفاده از ورق فولاد ST37 به ضخامت 20 میلی‌متر طراحی و ساخته شد (شکل 2).

به منظور بررسی‌های ریزساختاری آماده‌سازی نمونه‌ها با استفاده از سمباده‌های 400 تا 2000 انجام شد. حکاکی نمونه‌های متالوگرافی از جنس مس و برنج توسط محلول الکلی- کلرید آهن (5 گرم $FeCl_3$ ، 2 میلی‌لیتر HCl و 95 میلی‌لیتر C_2H_5OH) به مدت 10 ثانیه انجام شد. پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها به منظور بررسی ریزساختاری، با استفاده از میکروسکپ نوری مورد تصویربرداری قرار گرفتند. سختی نمونه‌ها از طریق آزمون ریزسختی ویکرز و با استفاده از دستگاه سختی‌سنج مدل DHV-1000 تعیین گردید.

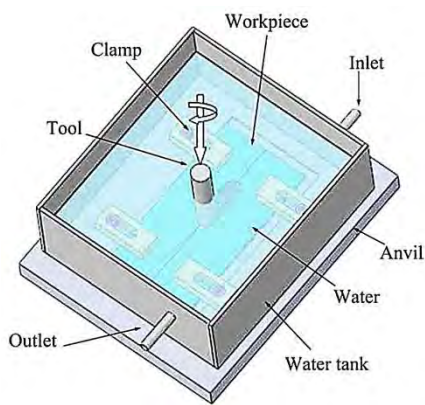


(الف)



(ب)

Fig. 1 Used tool for friction stir processing; a. tool image, b. tool map.
 شکل 1 ابزار مورد استفاده در فرآوری اصطکاکی اغتشاشی؛ الف) تصویر ابزار، ب) نقشه ابزار



(الف)



(ب)

Fig. 2 Laver fixture; a. schematic image, b. used laver.

شکل 2 فیکسچر حوضچه آب؛ الف) تصویر شماتیک، ب) تصویر واقعی.

¹ Underwater Friction Stir Processing (UWFSP)

جدول 2 ترکیب شیمیایی مس خالص و مس آلیاژی استفاده شده در این پژوهش

Table 2 Chemical composition of pure and alloyed copper used in this research

Si	Ni	Fe	Mn	P	Sn	Pb	Zn	Cu	
<0/005	<0/005	0/097	0/002	<0/003	<0/005	0/019	<0/005	99/8	Cu-Pure
<0/005	<0/005	0/028	0/006	<0/003	<0/005	0/008	37/4	62/4	Cu- Alloy

جدول 3 ابعاد ابزار در شکل 1- ب

Table 3 Tool dimensions in Fig. 1- b

2R ₁	2R ₂	2R ₃	H	α /2	ابعاد
20mm	5mm	3mm	4/5	5°	اندازه

کیفیت سطح کمتری نسبت به قطعات تهیه شده در زیر آب می‌باشند که این امر حاکی از آن است که انجام فرایند در آب باعث کاهش دمای کاری و عدم اکسیداسیون فلز، حین عملیات شده که کیفیت سطح بهتر و اعوجاج کمتری به دنبال داشته است (شکل 3).

الگوی پراش برخی از نمونه‌های فرآوری شده در شکل 4 نشان داده شده است. بررسی الگوهای پراش شکل 4 با مقایسه با الگوی مرجع ماده مس با شماره 04-0836 از فهرست اطلاعات جامع پراش¹ صورت می‌پذیرد. بر اساس مقایسه به عمل آمده، با انجام فرآوری اصطکاکی اغتشاشی به دلیل تغییر فرم پلاستیک شدید اعمال شده و انجام فرایند در زیر آب که مانع از رشد دانه‌ها و تبلور مجدد کامل ریزساختار می‌شود؛ به دلیل تنش پسماند و کاهش اندازه دانه، از شدت قله‌های موجود در الگوی تفرق کاسته شده و بر پهنای این قله‌ها افزوده می‌شود. از موارد دیگر تغییرات الگوی پراش نمونه‌های فرآوری شده، افزایش میزان زمینه² الگوهای پراش است. دلیل اصلی کاهش شدت قله‌ها، افزایش پهنای آن‌ها و افزایش میزان زمینه در الگوی پراش اشعه ایکس، وجود فاز آمورف/ دانه‌های فوق ریزدانه³ است. با اینحال این روند با افزایش تعداد پاس‌ها همچنان ادامه خواهد داشت. از طرفی در برخی الگوها فاز اکسید مس نیز مشاهده می‌شود که دلیل آن دمای بالای قطعه در نتیجه اجرای فرایند و مجاورت آن با هوا است.

در خصوص نمونه‌های برنجی، تحلیل الگوها با مقایسه آن‌ها با الگوی مرجع آلیاژ مس با شماره 50-1333 از فهرست اطلاعات جامع پراش صورت پذیرفت. به دلیل وجود عناصر آلیاژی در نمونه‌های برنجی قله‌های موجود در الگو اندکی جابجایی دارد. مشابه با ارزیابی الگوی پراش نمونه‌های مسی، بررسی‌ها کاهش شدت قله‌ها، افزایش پهنای قله‌ها و افزایش زمینه الگوی پراش آن‌ها را به دلیل تشکیل ساختار آمورف/ فوق ریزدانه نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که بررسی الگوی پراش نمونه مسی در هوا، علاوه بر قله‌های مربوط به الگوی مس، قله‌های جدیدی مشاهده می‌شود که مربوط به اکسید مس می‌باشد.

در این آزمون از نمونه‌های تهیه شده در مرحله متالوگرافی که دارای صافی سطح مناسبی بودند استفاده شده است. سنجش سختی نواحی مختلف حاصل از فرایند FSP در نمونه‌ها، در مقطع عرضی قطعات انجام گردیده است.

میزان نیروی وارده و مدت زمان اعمال نیرو توسط دستگاه به ترتیب 1 کیلوگرم و 15 ثانیه انتخاب شد. به منظور ارزیابی میزان تبلور/ آمورف شدگی ریزساختار، از الگوی پراش اشعه ایکس استفاده شد. این آزمون توسط دستگاه پراش سنج اشعه ایکس مدل Bruker D8 استفاده شد.

به‌منظور سنجش مقاومت به سایش و تعیین ضریب اصطکاک نمونه‌ها، روش پین روی دیسک بکار گرفته شده است؛ بدین صورت که ابتدا یک پین استوانه‌ای شکل به قطر 5 میلی‌متر و به ارتفاع ضخامت قطعه کار با استفاده از ماشین برش سیمی با تخلیه الکتریکی از ناحیه فرآوری شده نمونه‌ها جدا گردید. شرایط و متغیرهای لازم برای آزمون سایش بر اساس استاندارد ASTM G99 در نظر گرفته شده است. این شرایط عبارت از نیروی 10 نیوتن، سرعت 0/5 متر در ثانیه مسافت لغزش 1000 متر و شعاع مسیر 15 میلی‌متر می‌باشد. لازم به ذکر است که پین‌های آماده‌سازی شده بر روی یک صفحه از جنس فولاد 52100 با سختی حدود 800 ویکرز مورد آزمایش قرار گرفت.

3- نتایج و بحث

ابتدایی‌ترین روش ارزیابی نمونه‌های فرآوری شده، بازرسی چشمی است که از طریق آن می‌توان به بسیاری از عیوب ظاهری نمونه‌ها پی برد. لذا قبل از نمونه‌برداری جهت آزمایش‌های مکانیکی و تریبولوژیکی، نمونه‌های فرآوری شده مورد بازرسی چشمی قرار گرفتند. مشخص گردید که نمونه‌هایی که در هوا تهیه شده بودند دارای اعوجاج، عیوب ظاهری بیشتر و

¹. International Committee of Diffraction Data (ICDD)

². Background

³. Ultrafine Grain

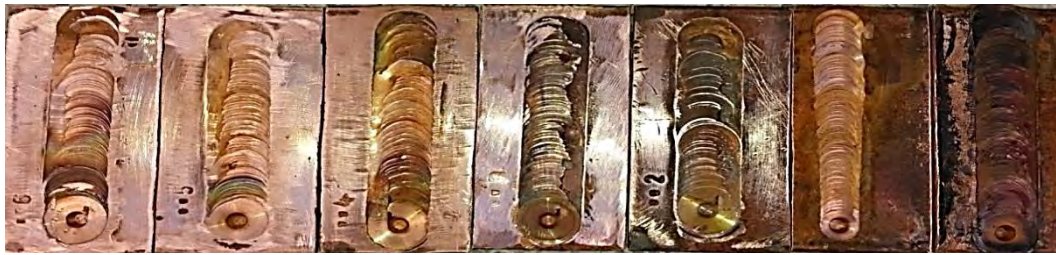
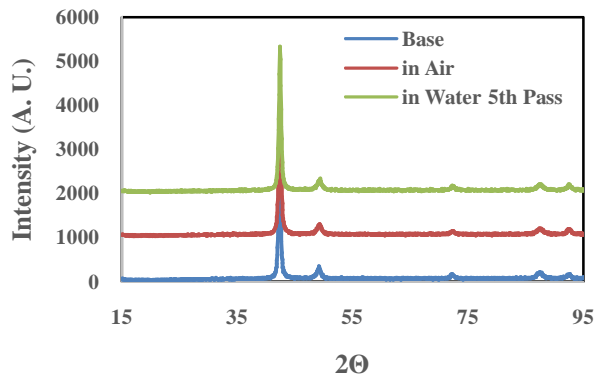
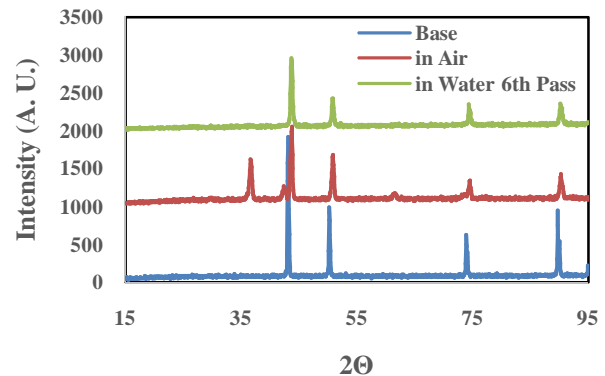


Fig. 3 Image of some processed samples.

شکل 3 تصویر برخی نمونه‌های فرآوری شده.



ب



الف

Fig. 4 X-ray diffraction pattern of copper: a. raw material, b. after 6 passes underwater FSP; x-ray diffraction pattern of brass: c. raw material, and d. after 5 passes underwater FSP.

شکل 4 الگوی پراش فلز مس: الف. نمونه اولیه و پس از 6 پاس فرایند زیر آب؛ الگوی پراش برنج؛ ب. نمونه اولیه و پس از 5 پاس فرایند زیر آب.

در آب، و انتقال حرارت بسیار بالای مس، حرارت ناشی از اصطکاک از فلز خارج می‌شود. با کاهش دمای قطعه و انجام تغییر فرم پلاستیک شدید، تبلور مجدد دینامیکی به صورت کامل صورت نگرفته و لذا مانع از تشکیل دانه‌های بسیار ریز و یا رشد آن‌ها می‌شود.

نتایج میکروسختی سنجی در شکل 7 مشاهده می‌شود. با میانگین‌گیری از سختی در نمونه مس تک پاسه سختی به میزان 65 ویکرز و در دو پاسه 90 ویکرز و در سه پاسه 100 ویکرز می‌باشد.

همچنین در نمونه برنج 103 ویکرز در سه پاسه و 125 ویکرز در پنج پاسه می‌باشد و با توجه به نمودار، همان‌گونه که مشاهده می‌شود با هر بار انجام فرآوری اصطکاکی اغتشاشی و افزایش تعداد پاس‌های انجام شده، نمونه سخت‌تر گردیده است. بررسی نمودار سختی می‌تواند تغییرات خواص مکانیکی در منطقه اغتشاش را نمایان کند. با اندازه‌گیری سختی می‌توان برآوردی از چگونگی توزیع کریستالی و اندازه دانه‌ها را به دست آورد. سختی نمونه خام مس (HV) 60 و نمونه برنج (HV) 80 که ناشی از کار سختی صورت گرفته در حین عملیات نورد اولیه ماده می‌باشد.

می‌توان نتیجه گرفت که اجرای فرآوری اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب، با قطع ارتباط نمونه با محیط، مانع اکسیداسیون قطعه نیز می‌شود. در خصوص نمونه‌های برنجی اثری از اکسیداسیون در الگوی پراش نمونه فرآوری شده در هوا مشاهده نشد.

به منظور بررسی ریزساختار و اندازه دانه، از تصاویر متالوگرافی استفاده شد. در شکل 5-الف که مربوط به نمونه تک پاسه در هوا در نمونه مس می‌باشد، تنش حرارتی و کرنش بوجود آمده که در اثر فرآوری اصطکاکی اغتشاشی بوجود آمده باعث تغییر فرم کریستالهای نمونه گردیده ولی تغییر محسوسی در ابعاد آنها بوجود نیآورده است. در نمونه یک پاسه و سه پاسه در آب (شکل‌های 5-ب و ج) سرعت خنک‌کنندگی آب و عدم تشکیل جوانه‌زنی کامل دینامیکی باعث کاهش اندازه دانه‌های فلزی و یکنواختی در پراکندگی ذرات را بوجود آورده است. همچنین شرایط مشابهی برای نمونه‌های فرآوری شده برنجی نیز در شکل 6 مشاهده می‌شود.

کاهش اندازه دانه مشاهده شده با افزایش تعداد پاس‌های فرایند موید نتایج الگوهای پراش اشعه ایکس می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود در نتیجه انجام فرآوری اصطکاکی اغتشاشی

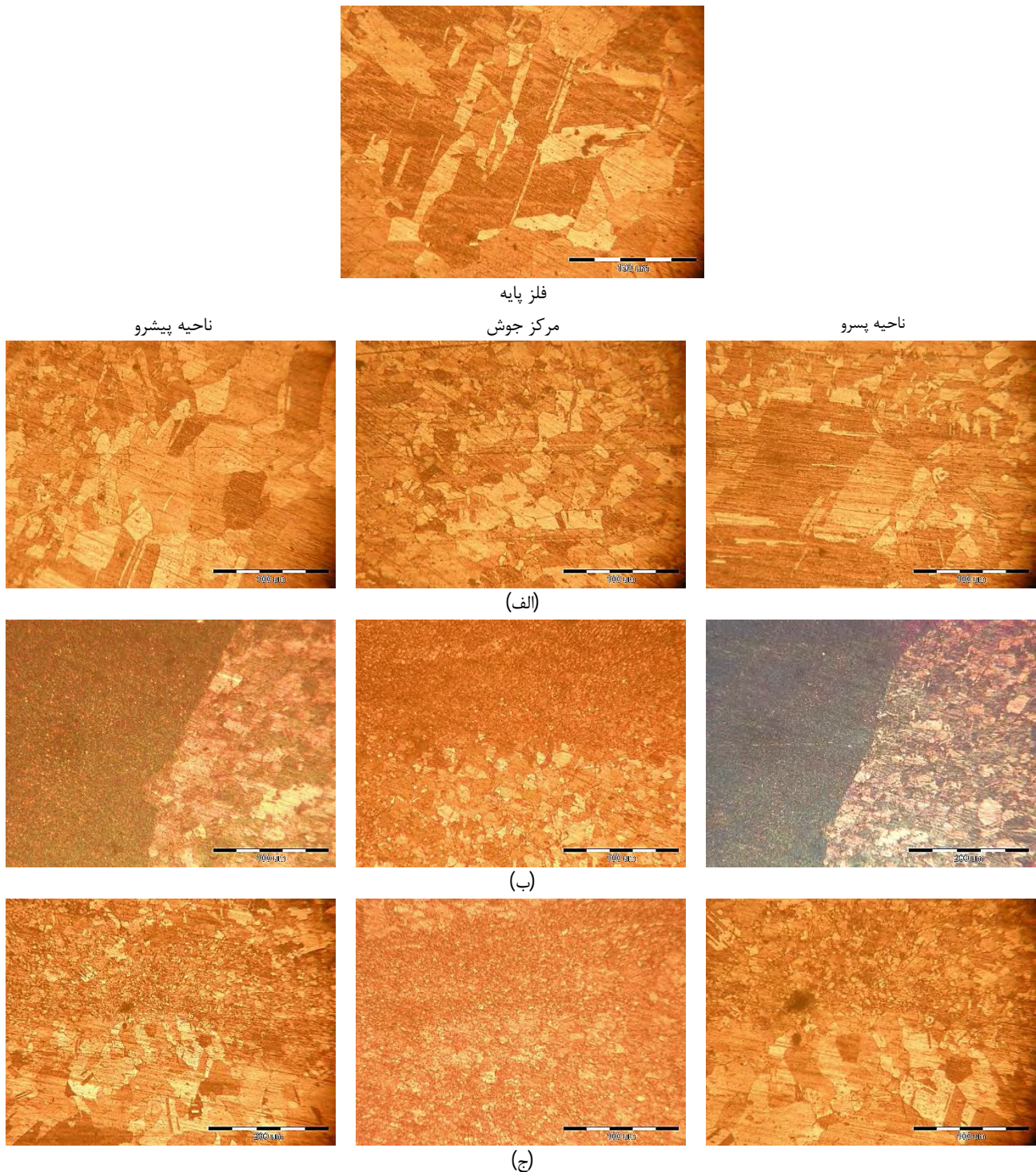


Fig. 5 Metallographic images of copper sample; a. 1 pass in the air, b. 1 pass in the water, and c. 3 passes in the water.

شکل 5 تصاویر متالوگرافی نمونه مس؛ الف) یک پاسه در هوا، ب) یک پاسه در آب، و ج) سه پاسه در آب.

مطابق معادله هال-پیچ با ریز شدن دانه در ناحیه اغتشاش یافته، سختی این ناحیه در مقایسه با ماده خام بیشتر می‌شود. نوسانات در منحنی سختی نمونه‌ها به دلیل این است که در مناطقی تغییرات دما در اثر بخارات آب ناشی از حرارت ایجاد شده موجب عدم تبادل حرارتی و اختلال در خنک‌کنندگی آب گردیده است.

عملیات نورد به طور عمده سبب افزایش چگالی نابجایی‌ها در ورق‌شده و باعث افزایش سختی آن می‌گردد. اما فرآوری اصطکاکی اغتشاشی باعث از بین رفتن نابجایی‌ها می‌شود و بیانگر این است که اثر کار سختی بعد از بروز پدیده تبلور مجدد از بین رفته است.

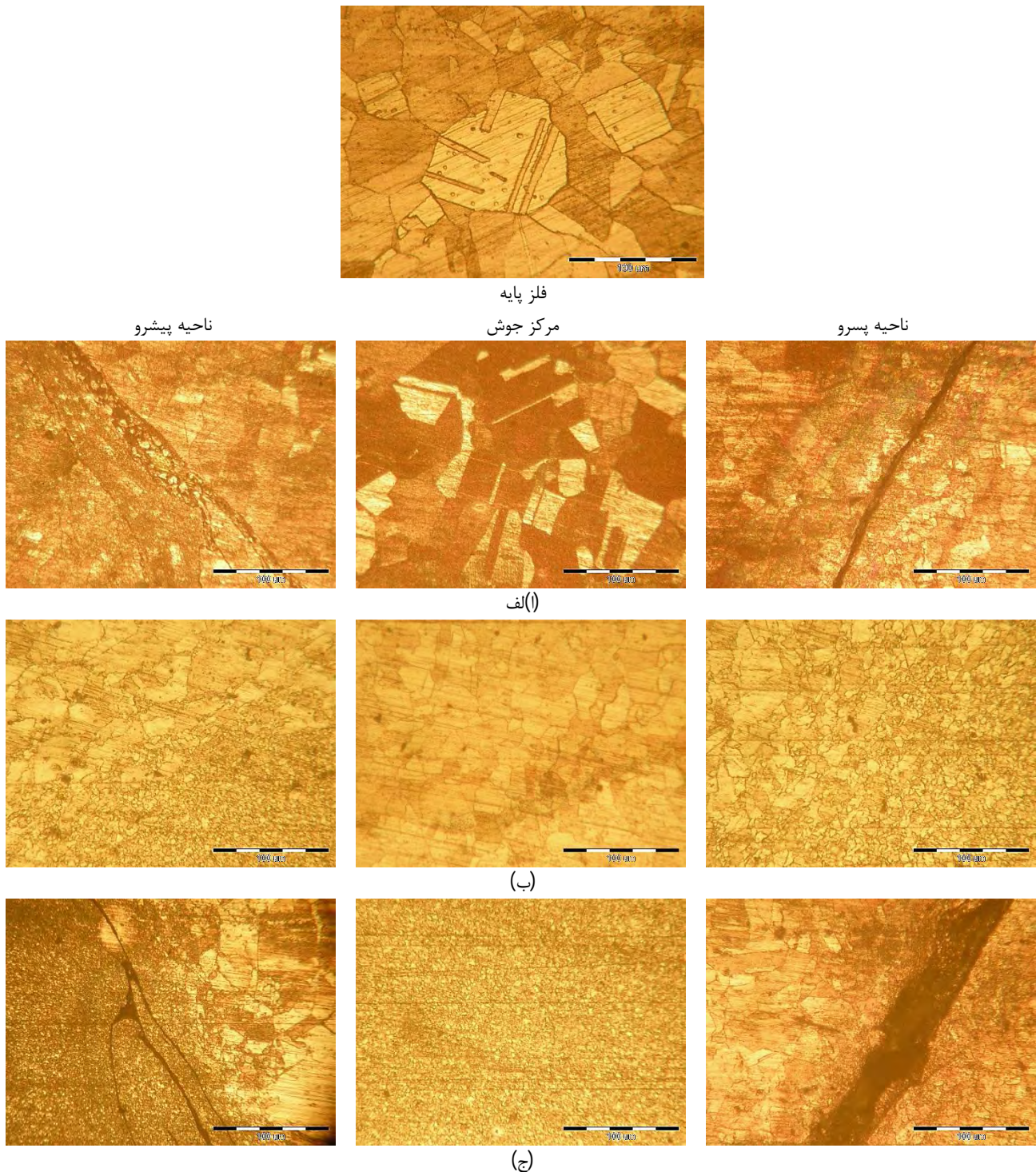


Fig. 6 Metallographic images of copper sample; a. 1 pass in the air, b. 1 pass in the water, and c. 5 passes in the water.

شکل 6 تصاویر متالوگرافی نمونه برنج؛ الف. یک پاسه در هوا، ب. یک پاسه در آب، و ج. پنج پاسه در آب.

ریزدانه شدن در ساختار زمینه گردیده است. نتایج تحقیقات گذشته بیان می‌کند که برای دستیابی به ساختار ریزدانه‌تر یا به عبارت دیگر افزایش عدد سختی در نمونه‌های تولیدی می‌توان از سرعت دورانی بالاتر و سرعت پیشروی کمتر استفاده نمود. در این تحقیق با سرعت دورانی 1800 دور بر دقیقه و سرعت خطی 4 میلی‌متر بر دقیقه حرارت بالایی تولید شد. با جلوگیری از

در تعداد پاس‌های بالاتر ابزار به‌طور مثال در نمونه‌های دو، سه و پنج پاسه، موجب افزایش سختی گردیده است؛ زیرا سرعت خنک‌کنندگی آب مانع رشد دانه‌های تبلور مجدد یافته دینامیکی که در اثر تغییر شکل پلاستیک شدید فرآوری اصطکاکی اغتشاشی پدید آمده، گردید و همچنین مانع حرکت مرز دانه‌ها شده و محلی برای ایجاد جوانه‌زنی بیشتر و در نهایت

رسیدن به لایه آمورف و بهبود خواص تریبولوژیکی مس و آلیاژ مس بوده است، لذا نمونه‌های فرآوری شده تحت آزمون سایش قرار گرفتند که خلاصه نتایج آن در شکل‌های 8 و 9 گزارش شده است.

رشد دانه در ناحیه اغتشاش یافته توزیع سختی نمونه‌های تولیدی را بهبود بخشیده و این پدیده بخصوص در نمونه پنج پاسه با بالا رفتن عدد سختی آن نمایان‌تر می‌باشد. با توجه به اینکه اجرای فرآوری اصطکاکی اغتشاشی برای

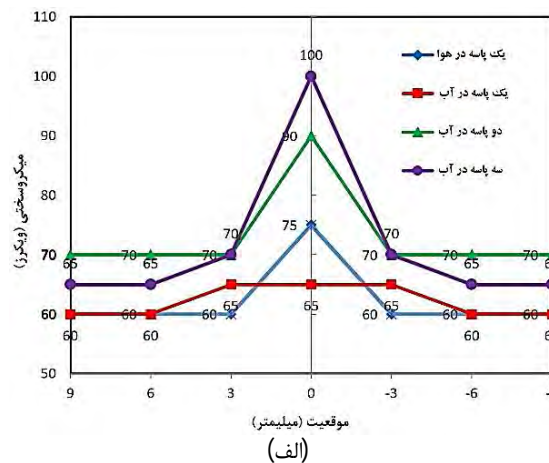
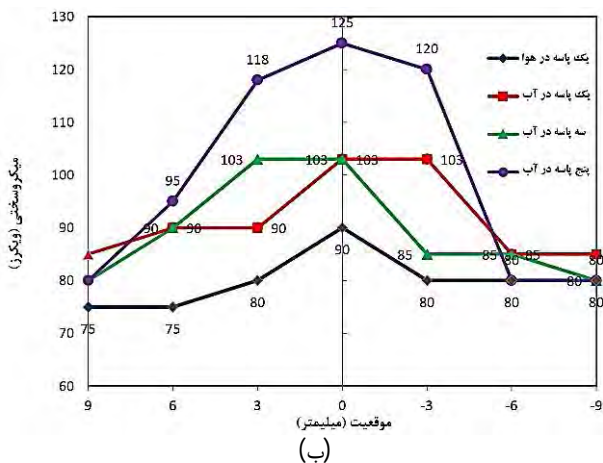


Fig. 7 Microhardness profile of samples: a. copper, and b. brass.

شکل 7 پروفیل ریزسختی نمونه‌های: (الف) مس، و (ب) برنج.

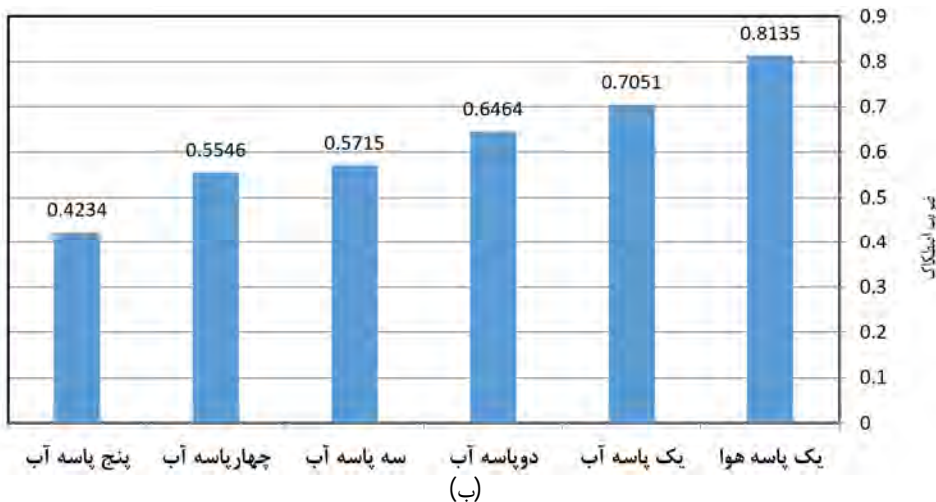
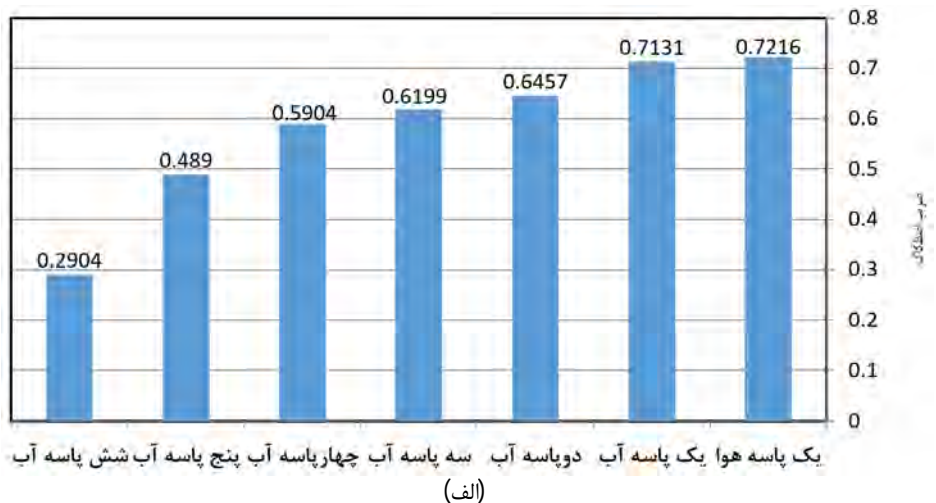


Fig. 8 Friction coefficient value of samples: a. copper, and b. brass.

شکل 8 میزان ضریب اصطکاک نمونه‌های: (الف) مس، و (ب) برنج.

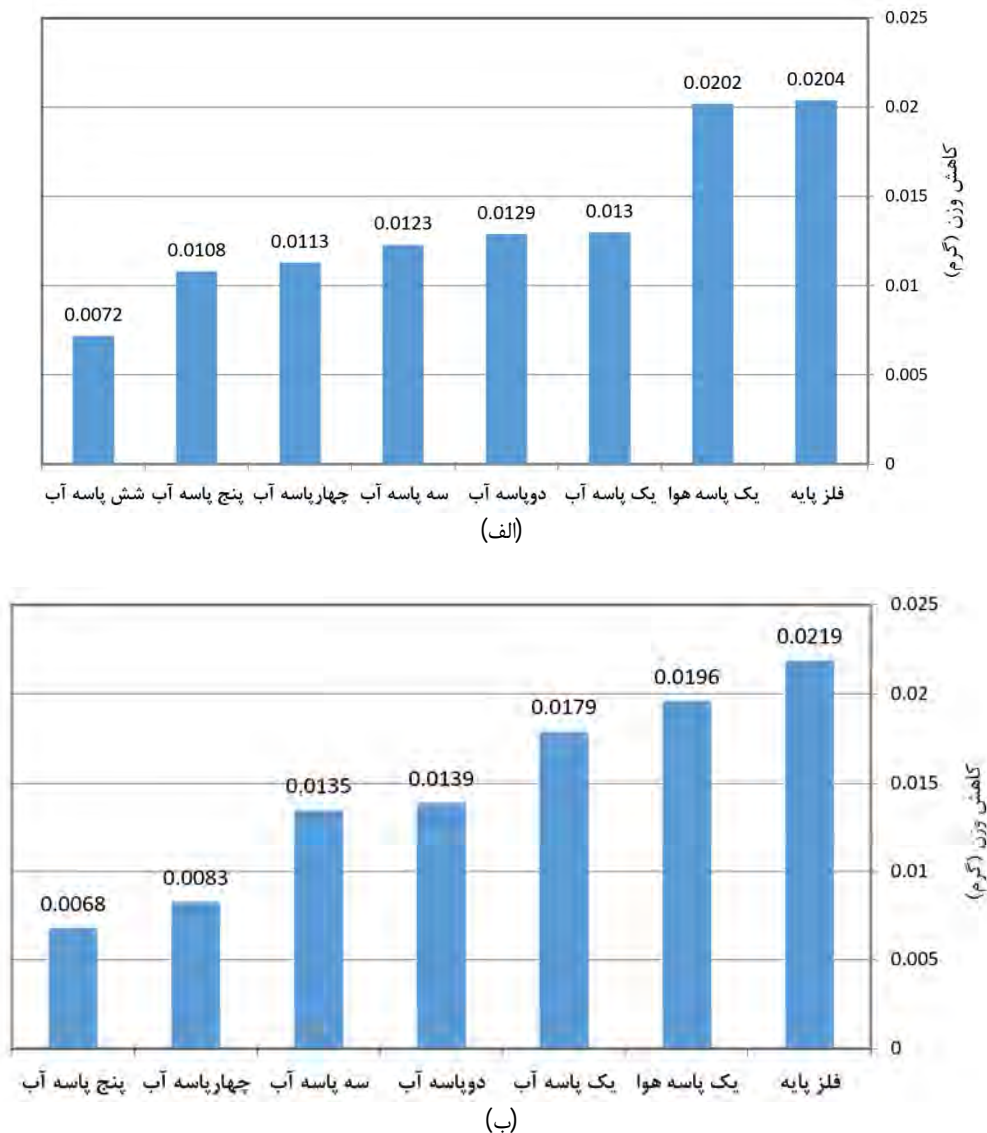


Fig. 9 Weight loss changes of samples: a. copper, and b. brass.

شکل 9 تغییرات کاهش وزن نمونه‌های: الف) مس، و ب) برنج.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از فرآوری اصطکاکی اغتشاشی زیر آب لایه آمورف/نانوساختار به‌طور مطلوب بر روی مس و آلیاژ برنج تولید گردید و خواص مکانیکی و تریبولوژیکی حاصل از این ساختار مورد بررسی و مقایسه با نمونه تولید شده با فرآوری اصطکاکی اغتشاشی در هوا قرار گرفت. خلاصه مهمترین و اصلی ترین نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

- انجام فرآوری اصطکاکی در زیر آب، سبب افزایش نرخ انتقال حرارت و کاهش دمای قطعه می‌شود که مانع از فرایند تبلور مجدد در ساختار شدیداً کار سرد شده می‌شود. لذا اندازه دانه را کاهش داده و مقاومت سایشی، سختی و شکل‌پذیری ماده را افزایش می‌دهد.

بهبود رفتار سایشی و کاهش ضریب اصطکاک در نتیجه اجرای فرآوری اصطکاکی اغتشاشی توسط سایر پژوهشگران گزارش شده است [16]. با توجه به نمودارهای مربوط تغییرات میانگین ضریب اصطکاک نمونه‌ها مشخص می‌گردد که با افزایش تعداد پاس گذر ابزار ضریب اصطکاک کاهش یافته و نمودار مربوطه نیز یکدست می‌گردد و این به علت کوچک شدن دانه‌ها بخصوص در نمونه شش پاره مس و نمونه پنج پاره برنج می‌باشد. با توزیع همگن ذرات، موجب کاهش ضریب اصطکاک در نمونه‌های دارای پاس بالاتر در طی آزمون سایش شده است. بررسی نمودارها نشان می‌دهد که خواص سایشی مس و برنج را بهبود یافته و در نمونه شش پاره مس و پنج پاره برنج، خواص سایشی به مراتب بهتر گردیده است.

- AA-5754 in water and air: a comparative study," *Materials Research Express*, Vol. 6, p. 016545, 2018.
- [7] M. A. Wahid, Z. A. Khan, A. N. Siddiquee, R. Shandley, and N. Sharma, "Analysis of process parameters effects on underwater friction stir welding of aluminum alloy 6082-T6," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, p. 095440541878998, 2018.
- [8] M. A. Wahid, A. N. Siddiquee, Z. A. Khan, and N. Sharma, "Analysis of cooling media effects on microstructure and mechanical properties during FSW/UFSW of AA 6082-T6," *Materials Research Express*, Vol. 5, p. 046512, 2018.
- [9] M. A. Wahid, Z. A. Khan, and A. N. Siddiquee, "Review on underwater friction stir welding: A variant of friction stir welding with great potential of improving joint properties," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 28, pp. 193-219, 2018.
- [10] M. Srivastava, S. Rathee, S. Maheshwari, and A. N. Siddiquee, "Investigation on underwater FSP of Al-Mg-Si alloy surface composites," *Materials Research Express*, Vol. 6, p. 026520, 2018.
- [11] H. Gleiter, "Nanostructured materials: basic concepts and microstructure," *Acta Materialia*, Vol. 48, pp. 1-29, 2000/01/01/ 2000.
- [12] Y. Zhao, X. Wei, Y. Zhang, J. Wang, and D. Huo, "Crystallization of amorphous materials and deformation mechanism of nanocrystalline materials under cutting loads: A molecular dynamics simulation approach," *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 439, pp. 21-29, 2016.
- [13] Z. Y. Ma, "Friction Stir Processing Technology: A Review," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 39, pp. 642-658, 2008.
- [14] M. Sudhakar, C. H. Srinivasa Rao, and K. M. Saheb, "Production of Surface Composites by Friction Stir Processing-A Review," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, pp. 929-935, 2018.
- [15] V. Sharma, U. Prakash, and B. V. M. Kumar, "Surface composites by friction stir processing: A review," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 224, pp. 117-134, 2015.
- [16] h. aghamohammadi, r. jamshidi, A. Heidarpour, y. mazaheri, and m. nemati, "Effect of friction stir processing with different pass numbers on the mechanical, tribological and corrosion properties of Al6061," *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, pp. 12-21, 2018. (in Persian فارسی)
- وجود عنصرآلیاژی روی به نسبت 37/4% در آلیاژ برنج موجب بهبود تولید لایه آمورف/فوق ریزدانه می‌گردد. لذا میزان فاز آمورف/فوق ریزدانه در نمونه‌های برنجی بیشتر از نمونه‌های تهیه شده از مس خالص است.
- اجرای فرآوری اصطکاکی اغتشاشی با ایجاد ساختاری آمورف/فوق ریزدانه و کاهش نابجایی‌ها باعث افزایش سختی تا 125 ویکرز در نمونه پنج پاسه در آب گردید.
- ارزیابی ضریب اصطکاک نمونه‌های مس فرآوری شده نشان داد که با افزایش تعداد پاس فرایند، نمودار ضریب اصطکاک نمونه‌ها یکنواخت‌تر شده و میانگین ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. در نمونه شش پاسه میانگین ضریب اصطکاک به حدود 0/2904 می‌رسد که در مقایسه با ماده خام که در حدود 0/7216 است دارای ضریب اصطکاک پایین‌تری می‌باشد.
- در خصوص نمونه‌های مس آلیاژی، نرخ کاهش ضریب اصطکاک با افزایش تعداد پاس فرایند بیشتر می‌باشد که به دلیل تأثیر عنصر آلیاژی روی بر افزایش سختی و تولید ساختار آمورف/فوق ریزدانه است.

5- مراجع

- [1] K.-s. Wang, J.-l. Wu, W. Wang, L.-h. Zhou, Z.-x. Lin, and L. Kong, "Underwater friction stir welding of ultrafine grained 2017 aluminum alloy," *Journal of Central South University*, Vol. 19, pp. 2081-2085, 2012.
- [2] H.-j. Zhang, H.-j. Liu, and L. Yu, "Thermal modeling of underwater friction stir welding of high strength aluminum alloy," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 23, pp. 1114-1122, 2013.
- [3] H. Farrokhi, A. Heidarzadeh, and T. Saeid, "Frictions stir welding of copper under different welding parameters and media," *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 18, pp. 697-702, 2013.
- [4] J. Zhang, Y. Shen, X. Yao, H. Xu, and B. Li, "Investigation on dissimilar underwater friction stir lap welding of 6061-T6 aluminum alloy to pure copper," *Materials & Design*, Vol. 64, pp. 74-80, 2014.
- [5] I. M. Ikram, A. Ismail, A. Zakaria, M. Awang, M. A. Rojan, D. A. Hamid, et al., "A Preliminary Experimental Study of Underwater Friction Stir Welding AA5083 Plate Butt Joint," *Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 9, pp. 462-466, 2016.
- [6] M. A. Wahid, A. N. Siddiquee, Z. A. Khan, T. Majeed, and N. Sharma, "Friction stir welding of