

## مطالعه مشخصات بافتی ناحیه جوش همزن اصطکاکی برنج تک‌فازی به وسیله آزمون پراش الکترونیهای برگشتی

اکبر حیدرزاده<sup>۱\*</sup>، توحید سعید<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی متالورژی و مواد، تبریز، ایران.

<sup>۲</sup>دانشگاه صنعتی سهند تبریز، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، تبریز، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۴/۱۱/۱۸، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۵/۱۱/۳۰، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۶/۰۵/۰۲

**چکیده** پیچیدگی تغییرشکل پلاستیک حین جوشکاری همزن اصطکاکی سبب می‌شود که جهت‌گیری بافت در نقاط مختلف جوش تغییر کند. بنابراین، باید بافت اولیه حاصل از آزمون پراش الکترونیهای برگشتی در چارچوب تغییرشکل برشی مرجع قرار نگرفته و انتقال بافت اولیه به چارچوب بافت برشی مرجع ضروری می‌باشد. در این پژوهش، به بررسی بافت جوش همزن اصطکاکی برنج تک‌فازی پرداخته شد. نتایج نشان داد که  $A_1^*$ ،  $A_2^*$ ،  $C$ ،  $\{001\}\langle 110 \rangle$  و گاوس  $\{011\}\langle 100 \rangle$  اجزاء اصلی تشکیل‌دهنده بافت در ناحیه جوش هستند. اجزاء بافت برشی  $(A_1^*$ ،  $A_2^*$  و  $C$ ) نشان‌دهنده تبلور مجدد دینامیکی پیوسته به عنوان سازوکار غالب و حضور بافت گاوس تابیدکننده تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته به عنوان سازوکار محتمل دیگر در پیدایش ریزساختار نهایی تعیین شد.

**کلمات کلیدی:** جوشکاری همزن اصطکاکی، بافت، تفرق الکترونیهای برگشتی، برنج.

## Texture Analyses of Friction Stir Welded Single-phase Brass Using Electron Back Scattered Diffraction

Akbar Heidarzadeh<sup>1\*</sup>, Tohid Saeid<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Azərbaycan Şahid Madani University, Department of Materials Engineering, Tabriz, Iran.

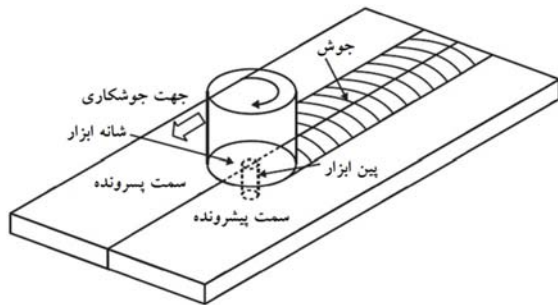
<sup>2</sup>Sahand University of Technology, Department of Materials Engineering, Tabriz, Iran.

**Abstract** Complex plastic deformation during friction stir welding causes variation of texture in different locations of the joint. Therefore, the as-acquired texture data from electron backscattered diffraction analysis are not often in the shear deformation frame of reference. In this study, the texture components of the friction stir welded single phase brass was studied. The results showed that the texture of the joint contained  $A_1^*$ (111)[ $\bar{1}\bar{1}2$ ],  $A_2^*$ (111)[11 $\bar{2}$ ], C{001}{110}, and Goss{011}{100} components. The existence of  $A_1^*$ ,  $A_2^*$ , and C texture components revealed that the continuous dynamic recrystallization plays a dominant role in the microstructural evolution. In addition, the presence of Goss texture component showed that discontinues dynamic recrystallization may also participate in the new grain formation.

**Keywords:** Friction stir welding, Texture, Electron backscattered diffraction, Brass.

## ۱- مقدمه

اتفاق نمی‌افتد، مشکلات ناشی از روش‌های ذوبی حل می‌شود. طرحی از این روش در شکل ۱ نشان داده شده است. در این روش، یک ابزار چرخان (متشکل از پین<sup>۲</sup> و شانه<sup>۳</sup>) با سرعت چرخشی مشخص وارد درز جوش شده و با حرکت در امتداد جوش، اتصال به وجود می‌آید. به عبارتی، حرارت ناشی از اصطکاک ابزار و تغییر شکل پلاستیک شدید اعمالی، باعث اختلاط و اتصال فلزات می‌شوند [۸].



شکل ۱. طرحی از فرآیند جوشکاری همزن اصطکاکی.

در سال‌های اخیر، جوشکاری همزن اصطکاکی مس خالص توسط محققین زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است [۹-۱۷]. در اکثر این تحقیقات به بررسی تاثیر متغیرهای مختلف جوشکاری اعم از سرعت چرخشی ابزار، سرعت پیشروی ابزار، عمق نفوذ و نیروی عمودی ابزار، هندسه و ابعاد ابزار مورد استفاده بر ریزساختار و خواص مکانیکی جوش حاصل پرداخته شده است. در مقایسه با مس خالص، تحقیقات بسیار محدودی در زمینه جوشکاری همزن اصطکاکی آلیاژهای برنج صورت گرفته است [۱۸-۲۲]. به عنوان مثال، چام و همکارانش [۱۸]، تاثیر سرعت چرخشی و پیشروی ابزار را بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ برنج حاوی ۳۷ درصد روی را مطالعه کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که بهترین خواص مکانیکی برای سرعت چرخشی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۲۲۵ می‌متر بر دقیقه به دست آمد. به طور مشابه، ژی و همکارانش [۲۱]، جوشکاری همزن اصطکاکی آلیاژ برنج حاوی ۳۸ درصد روی را مورد مطالعه قرار دادند. این محققین دریافتند که با افزایش سرعت چرخشی ابزار، اندازه دانه کاهش یافته و سختی افزایش یافت. هم‌چنین، تغییر در سرعت چرخشی ابزار تاثیر چندانی بر استحکام تسلیم و

فلز مس و آلیاژهای آن مانند آلیاژ مس و روی (برنج) به دلیل دارا بودن خواص منحصر به فردی مانند هدایت حرارتی و الکتریکی بالا، ترکیب مطلوبی از استحکام، انعطاف پذیری و مقاومت عالی به خوردگی به یکی از پرکاربردترین فلزات در صنایع مختلف مبدل شده است. امروزه با افزایش کاربرد مس و آلیاژهای برنج به عنوان مواد مورد استفاده در ساخت تجهیزات صنعتی، تقاضای روزافزونی را برای اتصال آن‌ها به وجود آورده است. اگرچه مس و آلیاژهای برنج می‌توانند توسط روشهای متداول ذوبی مانند جوشکاری با گاز، جوشکاری قوسی، جوشکاری مقاومتی و لحیم‌کاری سخت و نرم اتصال یابند، اما ایجاد اتصالات با استفاده از روشهای متداول ذوبی به‌طور معمول با مشکلات زیادی مواجه است [۱]. به عنوان مثال، در حین جوشکاری ذوبی، اکسیژن موجود در محیط وارد حوضچه مذاب شده که در حین انجماد در مرزدهانه‌ها جدایش یافته و سبب تردی جوش حاصل می‌شود. از طرفی، عناصر موجود در آلیاژهای رسوب سخت مس در حین جوشکاری ذوبی، اکسید شده و خواص مکانیکی آنها تحت تاثیر قرار می‌گیرد. هدایت حرارتی بالای مس و آلیاژهای آن سبب می‌شود حرارت ورودی بیشتری برای جوشکاری نیاز باشد که باعث کاهش سرعت جوشکاری، ذوب ناقص و عدم پر شدن کامل حفره جوش می‌گردد [۲، ۳]. در مورد آلیاژهای برنج، عنصر روی تبخیر شده که علاوه بر ایجاد گاز سمی و خطرناک برای جوشکار، باعث تغییر ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آلیاژ می‌شود [۴، ۵]. هم‌چنین، اکسیداسیون فلز مذاب، ترک‌های انجمادی، تغییر رنگ و اعوجاج از دیگر مشکلاتی هستند که در جوشکاری ذوبی مس و آلیاژهای آن وجود دارند [۶، ۷].

مشکلات اشاره شده، محققین را برآن داشته تا روش‌های جدیدی را برای جوشکاری مس و آلیاژهای آن ارائه نمایند. در سال‌های اخیر، جوشکاری همزن اصطکاکی<sup>۱</sup> به عنوان یک روش مناسب برای جوشکاری مس و آلیاژهای آن مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اینکه این روش یکی از روش‌های حالت جامد می‌باشد و در آن ذوب فلز و آلیاژ

<sup>2</sup> Pin

<sup>3</sup> Shoulder

<sup>1</sup> Friction Stir Welding (FSW)

درز<sup>۲</sup> در یک پاس و در سرعت‌های چرخشی ۴۵۰ دور بر دقیقه و پیشروی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. برای بررسی درشت ساختار و ریزساختار جوش، نمونه پس از آماده‌سازی و پولیش، حکاکی شده و به وسیله میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی مشخصات بافتی در ناحیه جوش حاصل، به وسیله آزمون پراش الکترون‌های برگشتی<sup>۳</sup> استفاده شد. برای آماده‌سازی نمونه‌های آزمون پراش الکترون‌های برگشتی، در مرحله اول از سنباده‌زنی نمونه‌ها تا سنباده شماره ۳۰۰۰ و در مرحله دوم از مسطح و برق انداختن الکتروشیمیایی استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- درشت ساختار و ریزساختار

درشت ساختار سطح مقطع عرضی جوش در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳، سطح مقطع جوش حاوی نواحی ریزساختاری مختلفی اعم از فلز پایه<sup>۴</sup>، ناحیه تحت تاثیر عملیات ترمومکانیکی<sup>۵</sup> و ناحیه همزده<sup>۶</sup> می‌باشد. با توجه به حضور همزمان دما و تغییرشکل پلاستیک در حین جوشکاری همزن اصطکاکی، می‌توان این فرآیند را نوعی فرآیند تغییرشکل گرم در نظر گرفت. اما برخلاف روش‌های مرسوم تغییرشکل گرم (مثل نورد گرم) که تغییرشکل و دما به طور یکنواخت به فلز اعمال می‌شود، در مورد جوشکاری همزن اصطکاکی یک شیب شدید کرنش، نرخ کرنش و دما از ناحیه اطراف پین به سمت فلز پایه وجود دارد [۸]. به همین دلیل ریزساختار جوش حاصل حاوی نواحی مختلفی خواهد بود.



شکل ۳. درشت ساختار مقطع عرضی جوش.

ریزساختار نواحی مختلف جوش به دست آمده از میکروسکوپی نوری در شکل ۴ نشان داده شده است. هم‌چنین،

استحکام کششی جوش نداشته اما باعث افزایش انعطاف‌پذیری گردید.

علی‌رغم مطالعات صورت گرفته در زمینه جوشکاری همزن اصطکاکی آلیاژهای برنج، مطالعه مشخصات بافتی<sup>۱</sup> ناحیه ناحیه جوش به طور عمیق تاکنون صورت نگرفته است. بنابراین، در این تحقیق، به بررسی و شناسایی اجزای بافت در ناحیه مرکزی جوش همزن اصطکاکی آلیاژ برنج پرداخته شد.

#### ۲- روش تحقیق

در این تحقیق، از جوشکاری همزن اصطکاکی برای اتصال صفحات برنجی حاوی ۳۰ درصد وزنی روی و به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۲ میلی‌متر استفاده شد. این آلیاژ از کارخانه مس باهنر کرمان خریداری شده و سپس تحت عملیات آنیل در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت قرار گرفت. ورق برنجی پس از عملیات حرارتی، توسط سوهان و سنباده تمیزکاری مکانیکی شد. این کار به منظور ایجاد صافی سطح مناسب و رفع آلودگی‌های احتمالی انجام گرفت. ابزاری متشکل از شان (به قطر ۱۲ میلی‌متر) و پین استوانه‌ای ساده (به قطر ۳ و ارتفاع ۱٫۷۵ میلی‌متر) از فولاد گرم‌کار به روش ماشین‌کاری تولید شده و برای افزایش سختی آن، عملیات حرارتی روی آن انجام گردید. تصویری از ابزار مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۲ نشان داده است.



شکل ۲. تصویر ابزار مورد استفاده برای جوشکاری.

برای انجام جوشکاری، از دستگاه فرز نیمه سنگین استفاده شد. زاویه ابزار با بردار عمود بر سطح ورق ثابت و برابر ۳ درجه در نظر گرفته شد و جوشکاری به صورت بدون

<sup>۲</sup> Bead on plate

<sup>۳</sup> Electron back scattered diffraction (EBSD)

<sup>۴</sup> Base metal (BM)

<sup>۵</sup> Thermomechanically affected zone (TMAZ)

<sup>۶</sup> Stir zone (SZ)

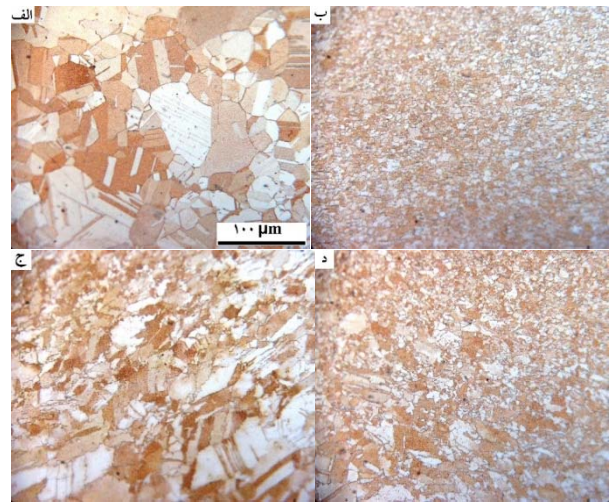
<sup>۱</sup> Texture

گردد [۱۶، ۲۳]. تشکیل فصل مشترک واضح در هر دو طرف پیش‌رونده<sup>۱</sup> و پس‌رونده<sup>۲</sup> جوش نشان می‌دهد که حرارت ورودی در حین جوشکاری پایین بوده است. حرارت ورودی در جوشکاری همزن اصطکاکی تابعی از سرعت‌های پیشروی و چرخشی ابزار می‌باشد به طوری که با افزایش و کاهش به ترتیب سرعت‌های چرخشی و پیشروی، میزان حرارت ورودی افزایش می‌یابد. در این تحقیق به دلیل انتخاب سرعت چرخشی ۴۵۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، حرارت ورودی کم بوده، به طوری که حتی ناحیه تحت تاثیر حرارت<sup>۳</sup> با اندازه دانه‌های درشت قابل تشخیص نبود. همچنین ضریب انتقال حرارت بالای آلیاژ برنج را می‌توان دلیل دیگر عدم تشکیل ناحیه تحت تاثیر حرارت دانست [۳].

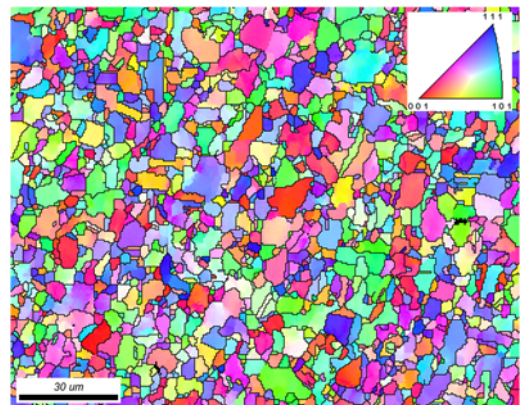
### ۲-۳ تجزیه و تحلیل بافت

مطالعه مشخصات اجزاء بافت به وجود آمده از جوشکاری همزن اصطکاکی، از طریق مقایسه بافت حاصل با اجزاء بافت برشی ایده‌آل<sup>۴</sup> انجام می‌گردد و دارای تفاوت‌ها و پیچیدگی‌هایی در مقایسه با تحلیل بافت حاصل از دیگر روش‌های شکل‌دهی فلزات (مانند نورد، کشش، فشار و غیره) می‌باشد. این تفاوت، اول اینکه به دلیل عدم انطباق سامانه مختصات نمونه جوشکاری شده با سامانه مختصات فرض شده در آزمون پراش الکترون‌های برگشتی می‌باشد. دوم اینکه سامانه مختصات برشی (شامل سه محور جهت برشی<sup>۵</sup>، جهت عمود بر صفحه برشی<sup>۶</sup> و محور چرخش<sup>۷</sup>) با توجه به موقعیت مکانی ناحیه مورد مطالعه در نمونه جوشکاری شده تغییر می‌کند. سوم اینکه نحوه نمایش شکل قطبی<sup>۸</sup> بافت‌های برشی ایده‌آل در مراجع به وسیله جهت برشی در محور افقی، جهت نرمال بر صفحه برشی در محور عمودی و جهت چرخش به سمت بیرون و عمود بر صفحه تصویر می‌باشد، اما شکل قطبی به دست آمده از آزمون پراش الکترون‌های برگشتی به وسیله محورهای مختلف جهت نورد<sup>۹</sup>، جهت عرضی<sup>۱۰</sup> و جهت

ریزساختار ناحیه جوش به دست آمده از آزمون پراش الکترون‌های برگشتی مربوط به ناحیه همزده در شکل ۵ نشان داده است.



شکل ۴. ریزساختار مربوط به نواحی مختلف جوش: الف) فلز پایه، ب) ناحیه همزده، ج) ناحیه تحت تاثیر عملیات ترمومکانیکی در سمت پیش-رونده و د) ناحیه تحت تاثیر عملیات ترمومکانیکی در سمت پس‌رونده.



شکل ۵. نقشه EBSD مربوط به ناحیه همزده جوش. راهنمای نقشه در گوشه سمت راست و بالای تصویر نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ دیده می‌شود، ناحیه همزده از دانه‌های هم‌محور ریز تشکیل یافته است. در این ناحیه، در اثر وجود دما و کرنش کافی برای تبلور مجدد دینامیکی، دانه‌های هم‌محور ریز به وجود می‌آیند [۳]. اما در ناحیه تحت تاثیر عملیات ترمومکانیکی، به دلیل ناکافی بودن میزان دما و کرنش، تبلور مجدد دینامیکی اتفاق نیفتاده و دانه‌ها در جهت تنش برشی وارده کشیده شده و یا تغییر جهت می‌یابند. با افزایش حرارت ورودی در حین جوشکاری، احتمال تبلور مجدد استاتیکی در این ناحیه وجود داشته که باعث غیرواضح شدن فصل مشترک بین ناحیه جوش و فلز پایه می‌

<sup>1</sup> Advancing side (AS)

<sup>2</sup> Retreating side (RS)

<sup>3</sup> Heat affected zone (HAZ)

<sup>4</sup> Ideal shear texture components

<sup>5</sup> Shear direction (SD)

<sup>6</sup> Shear plane normal (SPN)

<sup>7</sup> Rotation axis (RA)

<sup>8</sup> Pole figure (PF)

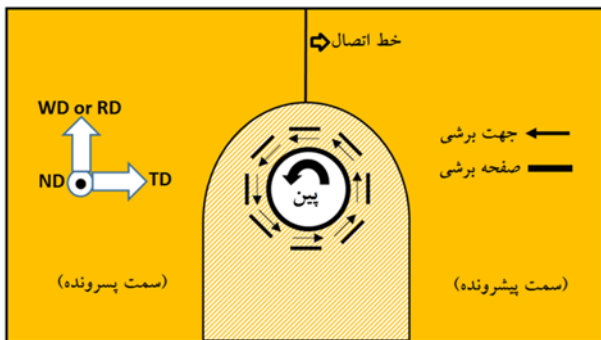
<sup>9</sup> Rolling direction (RD)

<sup>10</sup> Traverse direction (TD)

مکان تحت آزمایش از مرکز ناحیه جوش ( $x$ ) بوده و با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد [۲۴]:

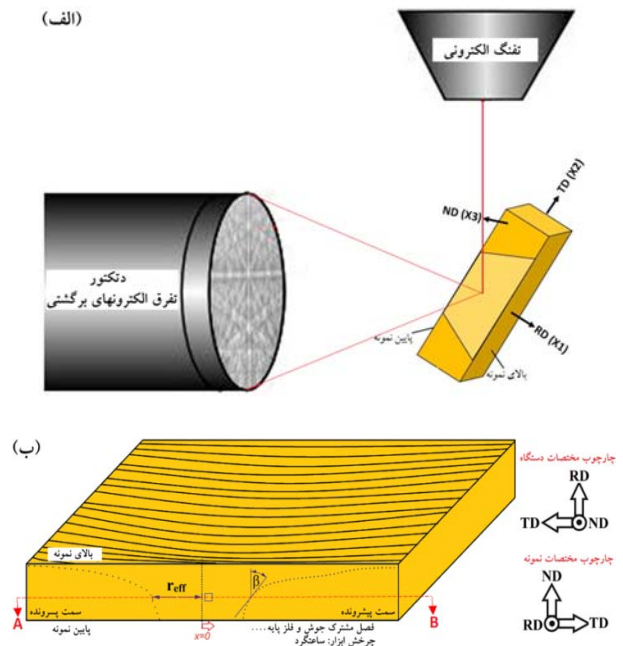
$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{x}{r_{eff}}\right) \quad (1)$$

که  $r_{eff}$  عبارت است از شعاع سطح برشی<sup>۳</sup> در عمق مشخص ناحیه جوش. در این تحقیق، مقدار  $x/r_{eff}$  برابر با ۰/۱۵ بوده و بنابراین مقدار  $\alpha$  با استفاده از رابطه ۱، برابر با ۹ درجه تخمین زده شد.  $\beta$  معرف مقدار شیب صفحه برشی و تابعی از عمق جوش بوده که می‌توان آن را برابر با شیب فصل مشترک ناحیه جوش و فلز پایه فرض کرد [۲۵]. مقدار  $\beta$ ، در این تحقیق برابر با ۴۰ درجه تخمین زده شد. با توجه به شکل ۷، در قسمت مرکزی جوش جهات برشی و بردار نرمال صفحه برشی به ترتیب معادل با جهات عرضی و نوردی هستند. در نتیجه، پس از اعمال چرخش‌های نوع اول و دوم، برای چرخش نوع سوم کافی است در شکل قطبی به دست آمده، جهات عرضی و نوردی را با جهات برشی و بردار نرمال صفحه برشی جایگزین کرده و سپس با اعمال چرخش‌های ۹۰ یا ۱۸۰ درجه‌ای حول محورها، شکل قطبی بافت را به صورت نمایش شکل قطبی بافت‌های برشی ایده‌آل در مراجع درآورد.



در شکل ۸، تصاویر قطبی بافت اولیه و مربوط به مراحل مختلف چرخش، جهت دستیابی به شکل قطبی بافت قابل مقایسه با اجزاء بافت برشی ایده‌آل نشان داده شده است. همچنین، تصاویر مقاطع تابع توزیع جهت‌گیری<sup>۴</sup> مربوط به شکل قطبی نهایی به دست آمده در شکل ۸، در شکل ۹ نشان داده است.

عمودی<sup>۱</sup> نشان داده می‌شوند. بنابراین، در نمونه‌های جوشکاری همزن اصطکاکی شده، بافت اولیه به دست آمده تحت سه نوع چرخش متفاوت حول محورهای مختلف جهت نورد، جهت عرضی و جهت عمودی قرار گیرند. نحوه محاسبه این سه نوع چرخش برای نمونه مورد مطالعه در این تحقیق با استفاده از طرح‌های نشان داده شده در شکل‌های ۶ و ۷ قابل توضیح می‌باشند.



در شکل ۶، نحوه قرارگرفتن نمونه در داخل محفظه میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۲</sup>، مختصات فرض شده توسط دستگاه و مختصات مربوط به نمونه تحت آزمایش نشان داده شده‌اند. در واقع، برای اعمال چرخش نوع اول در مورد نمونه حاضر، کافی است که دو چرخش ۱۸۰ و ۹۰ درجه‌ای به ترتیب حول دو محور جهت عمودی و عرضی اعمال گردد تا محورهای مختصات فرض شده توسط دستگاه منطبق بر محورهای مختصات نمونه گردند. چرخش نوع دوم را با تعریف زوایای  $\alpha$  و  $\beta$  و استفاده از شکل ۶ می‌توان توضیح داد.  $\alpha$  ناشی از چرخش جهت برشی حول ابزار چرخان، تابع فاصله

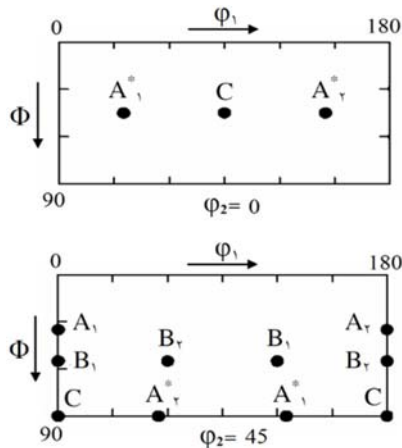
<sup>3</sup> Shear surface

<sup>4</sup> Orientation distribution function (ODF)

<sup>1</sup> Normal direction (ND)

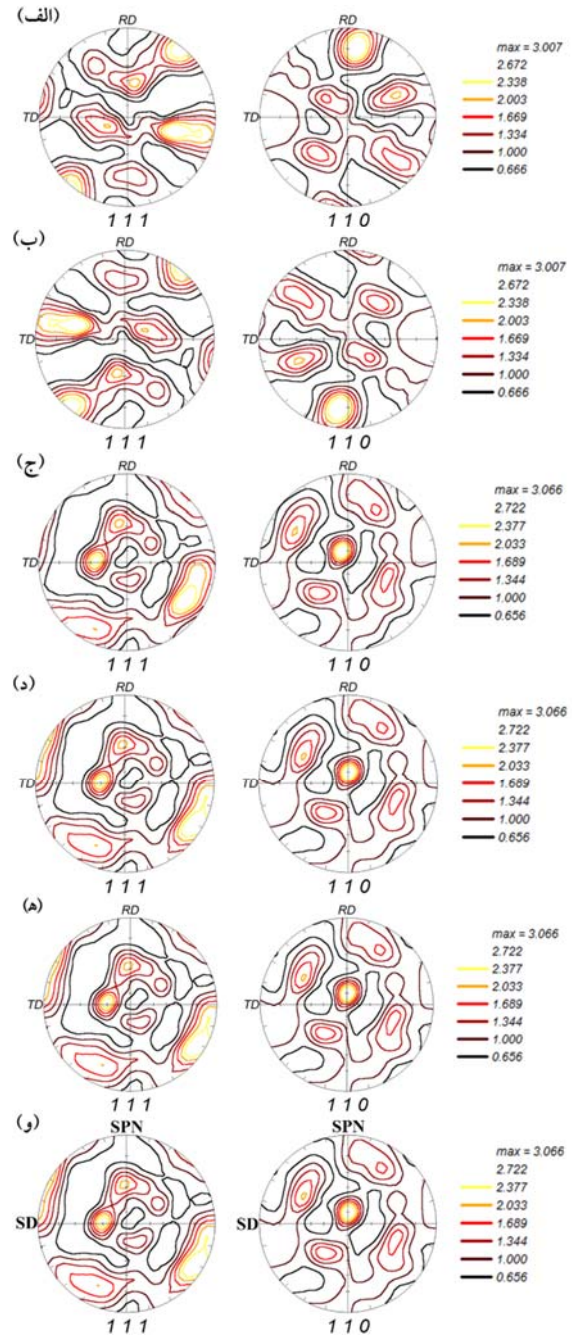
<sup>2</sup> Scanning electron microscopy



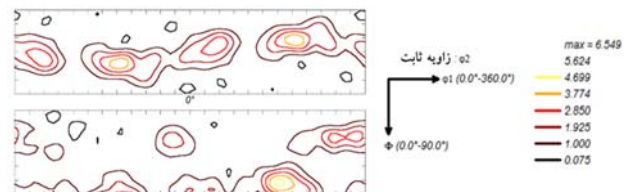


شکل ۱۰. موقعیت اجزای بافت برشی ایده‌آل در مقاطع  $\phi_2$  (۰ و ۴۵ درجه).

با مقایسه شکل ۹ و موقعیت اجزای ایده‌آل بافت برشی و تبلور مجدد در فلزات با ساختار بلوری مکعبی با وجوه مرکزپر [۲۶] (شکل ۱۰ و جدول ۱) می‌توان دریافت که  $A_1^*$ ،  $A_2^*$  و  $C$  اجزاء اصلی بافت در ناحیه جوش می‌باشند. همچنین، بافت گاوس<sup>۱</sup> نیز در ناحیه جوش تا حدودی قابل تشخیص می‌باشد. حضور اجزاء بافت برشی  $A_1^*$ ،  $A_2^*$  و  $C$  در ناحیه جوش حاکی از اتفاق سازوکار تبلور مجدد دینامیکی پیوسته<sup>۲</sup> در حین جوشکاری همزن اصطکاکی است [۲۶]. در این سازوکار، جوانه‌زنی و رشد وجود نداشته و در اثر تبدیل مرزهای زاویه کوچک<sup>۳</sup> به مرزهای زاویه بزرگ<sup>۴</sup>، دانه‌های ریز هم‌محور به وجود می‌آیند [۲۷]. بنابراین، سازوکار تبلور مجدد دینامیکی پیوسته بافت تغییرشکل برشی در حین جوشکاری همزن اصطکاکی را نمی‌تواند تغییر دهد. از طرفی، حضور تنها بافت تبلور مجددی گاوس در ناحیه جوش، می‌تواند به دلیل سازوکار تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته<sup>۵</sup> باشد [۲۶]. در سازوکار ناپیوسته، مراحل جوانه‌زنی و رشد به‌طور مجزا وجود داشته و بنابراین، سبب تضعیف بافت تغییرشکلی می‌شوند [۲۷]. در نتیجه، هر دو سازوکار پیوسته و ناپیوسته در حین جوشکاری همزن اصطکاکی اتفاق افتاده، به‌طوری‌که سهم سازوکار پیوسته بیشتر از سازوکار ناپیوسته است.



شکل ۸. تصاویر قطبی مربوط به بافت ناحیه بررسی شده در قسمت همزده جوش: الف) اولیه، ب) بعد از چرخش ۱۸۰ درجه‌ای حول جهت عمودی، ج) بعد از چرخش ۹۰ درجه‌ای حول جهت عرضی، د) بعد از چرخش ۹۰ درجه‌ای حول جهت نوردی، ه) بعد از چرخش ۴۰ درجه‌ای حول جهت عرضی و و) بعد از جایگزین کردن جهت عرضی با جهت برشی و جهت نوردی با جهت نرمال صفحه برشی.



شکل ۹. مقاطع  $\phi_2$  (۰ و ۴۵ درجه) تابع توزیع جهت‌گیری مربوط به بافت نهایی نشان داده شده در شکل ۸.

<sup>1</sup> Goss

<sup>2</sup> Continuous dynamic recrystallization (CDRX)

<sup>3</sup> Low angle grain boundary (LAGB)

<sup>4</sup> High angle grain boundary (HAGB)

<sup>5</sup> Discontinuous dynamic recrystallization (DDRX)

## مراجع

- Ma, Z.Y., Friction Stir Processing Technology: A Review, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39 (2008) 642-658.
- Çam, G., Friction stir welded structural materials: beyond Al-alloys", *International Materials Reviews*, 56 (2011) 1-48.
- Mishra, R. S. and Ma, Z.Y., Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 50, pp. 1-78, 2005.
- Emamikhah, A., Abbasi, A., Atefat, A. and Givi, M.K. B., Effect of tool pin profile on friction stir butt welding of high-zinc brass (CuZn40), *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71 (2014) 81-90.
- Emamikhah, A., Abbasi, A., Lirabi, I., Fegghi, A. and Atefat, A., The Role of Tool Pin Profile and Temperature on Friction Stir Welding of High Zinc Brass, *Advanced Materials Research*, 685 (2013) 264-268.
- Heidarzadeh, A., Jabbari, M. and Esmaily, M., Prediction of grain size and mechanical properties in friction stir welded pure copper joints using a thermal model, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77 (2015) 1819-1829.
- Heidarzadeh, A. and Saeid, T., Prediction of mechanical properties in friction stir welds of pure copper, *Materials & Design*, 52 (2013) 1077-1087.
- Heidarzadeh, A., Kazemi-Choobi, K., Hanifian, H. and Asadi, P. 3 - Microstructural evolution". In: M. K. B. Givi and P. Asadi, editors, *Advances in Friction-Stir Welding and Processing*, Woodhead Publishing; 2014. p. 65-140.
- Ambroziak, A., Hydrogen damage in friction welded copper joints, *Materials & Design*, 31 (2010) 3869-3874.
- Chen, H.-C., Bi, G., Nai, M.L. S. and Wei, J., Enhanced welding efficiency in laser welding of highly reflective pure copper, *Journal of Materials Processing Technology*, 216 (2015) 287-293.
- Farrokhi, H., Heidarzadeh, A. and Saeid, T., Frictions stir welding of copper under different welding parameters and media, *Science and Technology of Welding and Joining*, 18 (2013) 697-702.
- Khodaverdizadeh, H., Mahmoudi, A., Heidarzadeh, A. and Nazari, E., Effect of friction stir welding (FSW) parameters on strain hardening behavior of pure copper joints, *Materials & Design*, 35 (2011) 330-334.
- Leal, R.M., Sakharova, N., Vilaça, P., Rodrigues, D.M. and Loureiro, A., Effect of shoulder cavity and welding parameters on friction stir welding of thin copper sheets, *Science and Technology of Welding and Joining*, 16 (2011) 146-152.
- Mironov, S., Inagaki, K., Sato, Y.S. and Kokawa, H., Microstructural evolution of pure copper during friction-stir welding, *Philosophical Magazine*, 95 (2015) 367-381.
- Pashazadeh, H., Masoumi, A. and Teimournezhad, J., Numerical modelling for the hardness evaluation of friction stir welded copper metals, *Materials & Design*, 49 (2013) 913-921.
- Shen, J.J., Liu, H.J. and Cui, F., Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of friction stir welded copper, *Materials & Design*, 31 (2010) 3937-3942.
- Xu, N., Ueji, R., Morisada, Y. and Fujii, H., Modification of mechanical properties of friction stir welded Cu joint by additional liquid CO2 cooling, *Materials & Design*, 56, (2014) 20-25.

جدول ۱. جهت‌گیری‌های ایده‌آل در تغییرشکل برشی ساده و تبلور مجدد

فلزات با ساختار بلوری مکعبی با وجوه مرکزپر [۲۶].

نماد نمایش	شاخص میلر	زوایای اوپلری		
		$\Phi_1$	$\Phi$	$\Phi_2$
(تغییر شکل برشی ساده)				
$A_1^*$	(111)[ $\bar{1}\bar{1}\bar{2}$ ]	۳۵.۲۶/۲۱۵.۲۶	۴۵	۰/۹۰
		۱۲۵.۲۶	۹۰	۴۵
$A_2^*$	(111)[112]	۱۴۴.۷۴	۴۵	۰/۹۰
		۵۴.۷۴/۲۳۴.۷۴	۹۰	۴۵
$A$	( $\bar{1}\bar{1}\bar{1}$ )[110]	۰	۳۵.۲۶	۴۵
$\bar{A}$	( $\bar{1}\bar{1}\bar{1}$ )[ $\bar{1}\bar{1}\bar{0}$ ]	۱۸۰	۳۵.۲۶	۴۵
$B$	( $\bar{1}\bar{1}\bar{2}$ )[110]	۰/۱۲۰/۲۴۰	۵۴.۷۴	۴۵
$\bar{B}$	( $\bar{1}\bar{1}\bar{2}$ )[ $\bar{1}\bar{1}\bar{0}$ ]	۶۰/۱۸۰	۵۴.۷۴	۴۵
$C$	{001}<110>	۹۰/۲۷۰	۴۵	۰/۹۰
		۰/۱۸۰	۹۰	۴۵
(تبلور مجدد)				
Cube	{001}<100>	۰	۰	۰
-	{236}<385>	۷۹	۳۱	۳۳
Goss (G)	{011}<100>	۰	۴۵	۰
S	{123}<634>	۵۹	۳۷	۶۳
P	{011}<122>	۷۰	۴۵	۰
Q	{013}<231>	۵۸	۱۸	۰
R	{124}<211>	۵۷	۲۹	۶۳

## ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ریزساختار و مشخصات بافتی جوش همزن اصطکاکی برنج تک‌فازی با استفاده از میکروسکوپی نوری و آزمون پراش الکترون‌های برگشتی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که ساختار جوش حاوی سه ناحیه مجزای فلز پایه، ناحیه تحت تاثیر عملیات ترمومکانیکی و ناحیه همزده بوده و ناحیه تحت تاثیر حرارت تشکیل نمی‌گردد. برای بررسی بافت ناحیه جوش به‌دست آمده از روش همزن اصطکاکی، نیاز به سه نوع چرخش متفاوت بافت اولیه به‌دست آمده از آزمون پراش الکترون‌های برگشتی می‌باشد. در اثر اعمال این چرخش‌ها، بافت ناحیه جوش قابل مقایسه با بافت‌های ایده‌آل برشی مرجع می‌گردد. نتایج بافت نشان داد که  $A_1^*$ ،  $A_2^*$ ،  $C$  و گاوس اجزاء اصلی تشکیل‌دهنده بافت در ناحیه جوش هستند. بنابراین، با توجه به وجود سه نوع اجزاء بافت برشی ( $A_1^*$ ،  $A_2^*$  و  $C$ )، تبلور مجدد دینامیکی پیوسته به عنوان سازوکار غالب در پیدایش دانه‌های هم‌محور و ریزناحیه جوش می‌باشد. از طرفی، سازوکار تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته نیز به دلیل وجود بافت گاوس می‌تواند تا حدودی در تحولات ریزساختاری دخیل باشد.

18. Çam, G., Mistikoglu, S. and Pakdil, M., Microstructural and Mechanical Characterization of Friction Stir Butt Joint Welded 63% Cu-37% Zn Brass Plate, *Welding Journal*, 88 (2009) 225-232.
19. Çam, G., Serindağ, H.T., Çakan, A., Mistikoglu, S. and Yavuz, H., The effect of weld parameters on friction stir welding of brass plates, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 39 (2008) 394-399.
20. Emami, S. and Saeid, T., Effects of Welding and rotational speeds on the Microstructure and Hardness of Friction Stir Welded Single-Phase Brass, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 28 (2015) 766-771.
21. Xie, G.M., Ma, Z.Y. and Geng, L., Effects of Friction Stir Welding Parameters on Microstructures and Mechanical Properties of Brass Joints, *Materials Transactions*, 49 (2008) 1698-1701.
22. Xu, N., Ueji, R. and Fujii, H., Enhanced mechanical properties of 70/30 brass joint by rapid cooling friction stir welding, *Materials Science and Engineering A*, 610 (2014) 132-138.
23. Liu, H. J., Shen, J.J., Huang, Y.X., Kuang, L.Y., Liu, C. and Li, C., Effect of tool rotation rate on microstructure and mechanical properties of friction stir welded copper, *Science and Technology of Welding and Joining*, 14 (2009) 577-583.
24. Fonda, R.W., Knipling, K.E. and Rowenhorst, D.J., EBSD Analysis of Friction Stir Weld Textures, *JOM*, 66 (2014) 149-155.
25. Saeid, T., Abdollah-zadeh, A., Shibayanagi, T., Ikeuchi, K. and Assadi, H., On the formation of grain structure during friction stir welding of duplex stainless steel, *Materials Science and Engineering: A*, 527 (2010) 6484-6488.
26. Humphreys, F.J. and Hatherly, M., Hot Deformation and Dynamic Restoration, Recrystallization and Related Annealing Phenomena (Second Edition). Oxford: Elsevier; (2004).
27. McNelley, T.R., Swaminathan, S. and Su, J.Q., Recrystallization mechanisms during friction stir welding/processing of aluminum alloys, *Scripta Materialia*, 58 (2008) 349-354.