

## تحولات ریزساختاری فولاد زنگ‌زن آستنیتی 304 در فرایند جو شکاری همزن اصطکاکی

سجاد امامی، توحید سعید\*

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

(دریافت مقاله: 1397/05/06؛ پذیرش مقاله: 1397/07/24)

### چکیده

جوش بدون درزی بر روی ورق 2 میلیمتری فولاد زنگ‌زن آستنیتی 304 با روش جو شکاری همزن اصطکاکی با سرعت چرخشی 400 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 50 میلیمتر بر دقیقه ایجاد شد. مشاهدات ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری نشان داد که اصلاح ریزساختاری شدیدی در ناحیه جوش صورت گرفته است. همچنین، نتایج حاصل از آزمون پراش الکترون‌های برگشتی نشان داد که کسر بزرگی از مرزخانه‌های کوچک زاویه با وقوع بازایی دینامیکی در ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی شکل گرفت. در ادامه مسیر به سمت ناحیه همزده، با کاهش میزان مرزخانه‌های کوچک زاویه کسر بزرگی از مرزخانه‌های بزرگ زاویه با وقوع تبلور مجدد دینامیکی پیوسته توسعه یافت. تصویر قطبی صفحات 100 نشان داد که اجزای بافت برشی  $A^*_1$  و  $A^*_2$  در ناحیه همزده شکل یافته است که به طور ضمنی وقوع تبلور مجدد دینامیکی پیوسته را تایید می‌کند.

کلمات کلیدی: جو شکاری همزن اصطکاکی، فولادهای زنگ‌زن، بازایی دینامیکی، تبلور مجدد دینامیکی، بافت برشی.

## Microstructural evolution of 304 austenitic stainless steel in friction stir welding process

S. Emami, T. Saeid\*

Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

(Received 28 July 2018 ; Accepted 16 October 2018)

### Abstract

Friction stir welding (FSW) was conducted on AISI 304 austenitic stainless steel plate with 2 mm thickness. The FSW was performed at a welding and rotational speeds of 50 mm/min and 400 rpm, respectively. Microstructure observations by the optical microscopy showed that a severe grain refinement occurred in the stir zone (SZ). Electron backscattered diffraction analysis (EBSD) results indicated that high fraction of low angle grain boundaries (LAGBs) developed in the thermo-mechanically affected zone (TMAZ) through the occurrence of the dynamic recovery. Moreover, in the path from the TMAZ towards the SZ, the fraction of high angle grain boundaries (HAGBs) increased with decreasing the fraction of LAGBs through the occurrence of continuous dynamic recrystallization (CDRX). 100 Pole figure showed the formation of shear texture components of  $A^*_1$  and  $A^*_2$  in the SZ which implied the occurrence of CDRX mechanism.

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: saeid@sut.ac.ir

**Keywords:** Friction stir welding, Stainless steels, Dynamic recovery, Dynamic recrystallization, Shear texture.

## 1- مقدمه

(DRX) است که وقوع هر یک از این سازوکارها را انرژی نقص در چیدن و شرایط تغییر شکلی تعیین می کند [6 و 7]. با مروری بر منابع مطالعاتی مشخص می شود که مطالعات اندکی در زمینه تحولات ریزساختاری فولادهای زنگ نزن در حین فرایند FSW انجام شده است. به عنوان مثال مران و همکارانش امکان به کارگیری FSW بر روی فولاد زنگ نزن آستنیتی 304 را بررسی کردند [8]. رینولد و همکارانش ساختار، خواص و تنشهای باقی مانده جوش های FSW فولاد 304L را بدون اشاره به سازوکارهای ترمیم بررسی کردند [9]. پارک و همکارانش [10 و 11]، مران و سانپورت [11] وقوع تبلور مجدد دینامیکی را در ناحیه همزده فولاد 304 بدون اشاره به نوع مکانیزم آن گزارش کرده اند. ساتو و همکارانش [2] شکل گیری ریزساختار در ناحیه همزده جوش را در اثر وقوع تبلور مجدد دینامیکی گزارش کردند و همچنین نشان دادند که بافت تغییر شکل رشته ای <100> را در ناحیه همزده فولاد L 304 توسعه یافت. رضایی نژاد و همکارانش [12] با بررسی تحولات ریزساختاری فولاد 316L فرآوری شده با روش FSP با سرعت چرخشی 315 rpm و سرعت خطی 31/5 mm/min نشان دادند که دانه های بسیار ریزی در ناحیه همزده با اندازه های 200-50 نانومتر از دانه هایی با اندازه 40-30 میکرون فلز پایه توسعه یافت. آنها با مشاهدات ریزساختاری عمده سازوکار احتمالی حاکم بر چنین تحولی را تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته (DDRX) گزارش کردند. در مطالعه دیگری، حاجیان و همکارانش خواص ریزساختاری فولاد L 316 فرآوری شده با روش FSP را مطالعه کردند [13]. آنها با استفاده از تفرق الکترون های برگشتی (EBSD) و میکروسکوپ الکترون عبوری (TEM) نشان دادند که ریزساختار بسیار ظریفی در ناحیه همزده با وقوع DDRX شکل گرفت. شکل گیری کسر بزرگتری از نابجایی ها در داخل ناحیه همزده را دلیلی بر وقوع سازوکار DDRX گزارش

فولادهای زنگ نزن آستنیتی مقاومت خوردگی بالا، خواص مکانیکی عالی در دماهای مختلف دارند [1-4]. برای توسعه تجهیزات مختلف صنعتی به کارگیری فرایندهای جوشکاری در فرایندهای ساخت الزامی و دارای اهمیت می باشد [4]. از جمله رایج ترین فرایندهای اتصال مواد فلزی جوشکاری با فرایندهای ذوبی مرسوم است که به کارگیری این روش ها باعث ذوب و انجماد مجدد ماده در ناحیه جوش می شود و ریزساختار اولیه فلز پایه را از بین خواهد برد و همچنین باعث بروز مشکلات متنوعی در فلزات مختلف می شود. به عنوان مثال ذوب و انجماد مجدد ترک خوردن تحت تنش (SCC) و حساس شدن در ناحیه متاثر از حرارت (HAZ) در فلز جوش فولادهای زنگ نزن آستنیتی را ترغیب می کند [1 و 5]. بنابراین حرارت ورودی نقش اساسی در شکل گیری جوشی سالم با حداقل تغییرات در ریزساختار فلز اولیه خواهد داشت. در این راستا فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی (FSW) که برای اولین بار در موسسه انگلیسی TWI ابداع گردید و بر روی آلیاژهای آلومینیوم به کار گرفته شد. ماهیت جامد FSW باعث شده است تا به عنوان روشی جایگزین برای فرایندهای مرسوم ذوبی به کار گرفته شود FSW. به علت داشتن مزایایی متعددی نسبت به فرایندهای ذوبی همچنین باعث بهبود خواص مکانیکی در ناحیه همزده (SZ) می شود [2 و 6]. خواص مکانیکی مطلوب بوجود آمده در ناحیه SZ ناشی از تحولات ریزساختاری است که در درون ماده در حین جوشکاری ایجاد می شود. از جمله این تحولات می توان به فعال شدن برخی از سازوکارهای ترمیم در درون ماده اشاره کرد. میزان بالایی از کرنش پلاستیک و دمای بالا به مانند آنچه که در فرایندهای تغییر شکل داغ رخ می دهد باعث فعال شدن چنین سازوکارهایی در درون ماده می شود. این سازوکارها عمدتاً شامل بازیابی دینامیکی (DRV) و تبلور مجدد دینامیکی

همکارانش [15] نمونه زنگ‌نزن آستنیتی 304 را در گستره وسیعی از پارامترهای فرآیندی 200-800 rpm با روش FSW جوشکاری کردند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که جوش‌های سالم و بدون عیبی در شرایط جوشکاری 400 rpm و 50-350 mm/min عیبی در شرایط جوشکاری 400 rpm و 50-350 mm/min شکل گرفته است. یک ابزار پایه کاربید تنگستنی با شانه 16mm و پین مخروطی با قطر ریشه 4/5 mm قطر نوک 3/5mm با ارتفاع 1/7 mm به کار گرفته شد. ابزار زاویه 3 درجه با جهت نرمال صفحه تحت جوشکاری دارد. در حین جوشکاری عمق فروروی ابزار به داخل نمونه به اندازه 1/8mm و ثابت نگه داشته شد. مشاهدات ریزساختاری با میکروسکوپ‌های نوری و الکترون روبشی مجهز به پراش الکترونی‌های برگشتی در سطح مقطع عمود بر جهت جوشکاری صفحه صورت گرفت. نمونه برای مشاهده ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری ابتدا با شماره‌های مختلف سنباده زنی شدند و پس از پولیش مکانیکی با محلول حاوی 60 mL اسید نیتریک 65% و 40 mL آب مقطر با ولتاژ 1/5v و آمپراژ 0/05A به مدت 2 دقیقه حکاکی الکتروشیمیایی شد. نمونه برای انجام آزمون EBSD ابتدا به صورت مکانیکی با خمیر الماسه 1 و 0/25 میکرونی پولیش شدند و در نهایت با محلول 700 mL اتانول، 120 mL آب مقطر، 100mL گلیسرول و 80 mL پرکلریک اسید در دمای اتاق با ولتاژ V 35 به مدت 35 s به صورت الکتریکی پولیش شد.

### 3- نتایج

شکل (1) درشت ساختار و ریزساختار ناحیه اتصال حاصل از جوشکاری در سمت پیشرونده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل دیده می‌شود که ریزساختار فلز پایه در اثر تغییر شکل پلاستیک شدیدی که توسط ابزار به ماده وارد می‌شود در ناحیه همزده درهم شکسته می‌شود و سه ناحیه ریزساختاری متمایز همزده ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی (TMAZ) و فلز پایه (BM) در ناحیه اتصال شکل می‌گیرد. عدم حضور ناحیه HAZ می‌تواند مرتبط با حرارت ورودی

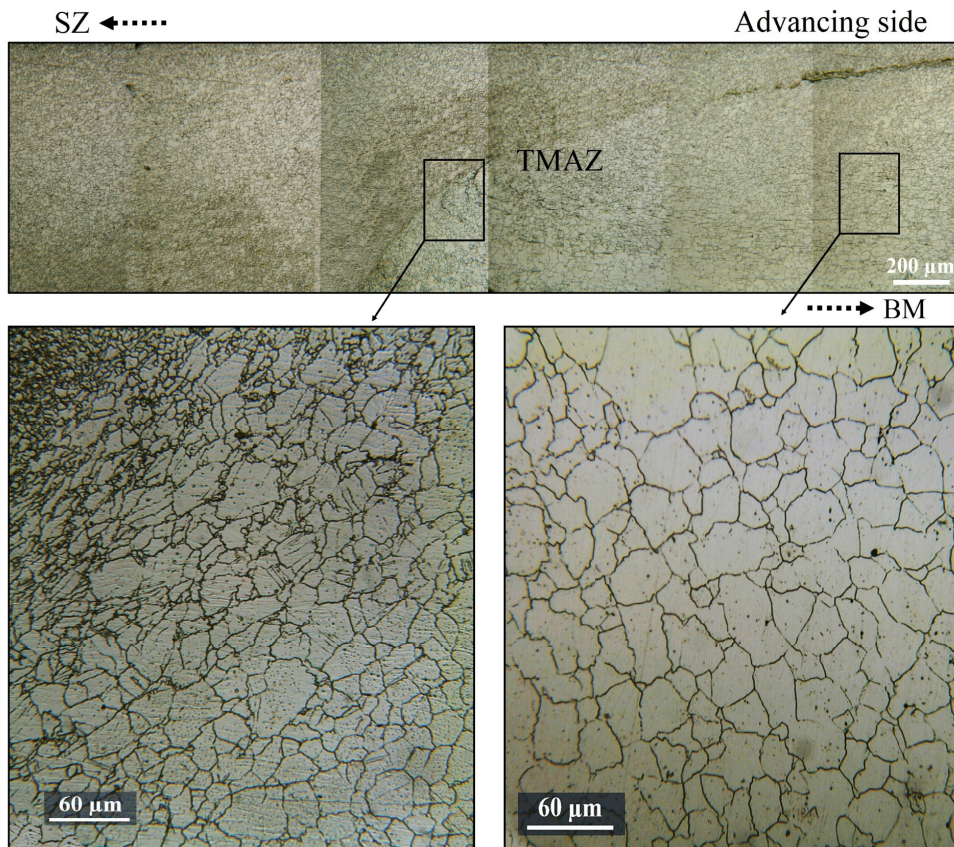
کردند. همچنین از وجود دانه‌های اصلی متشکل از چند دانه فرعی خبر دادند و نیز گزارش کردند که شکل‌گیری چنین دانه‌های فرعی نشان دهنده وقوع تبلور مجدد دینامیکی پیوسته (CDRX) است که مرزدانه‌های فرعی زاویه ناهمسویی خود را افزایش می‌دهند و به مرزدانه‌های بزرگ زاویه اصلی تبدیل می‌شوند. لیو و نلسون تحولات ساختار دانه و بافت فولاد 304L را در فرآیند FSW با سرعت چرخشی 250 rpm و سرعت خطی 100 mm/min مطالعه کردند [14]. این محققین سازوکار عامل در شکل‌گیری ریزساختار در ناحیه همزده را عمدتاً DDRX با مهاجرت مرزدانه‌ها و متورم شدن آنها عنوان کردند.

با وجود اینکه تمام مقالات اشاره شده دارای اطلاعات ارزشمندی در زمینه تحولات ریزساختاری فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی در حین FSW می‌باشند، به نظر می‌رسد که در محدوده‌ای از پارامترهای فرآیندی سازوکار CDRX غالب باشد لذا در این مطالعه از پارامتر 400 rpm و 50 mm/min به عنوان پارامتری مابین پارامترهای در نظر گرفته شده در مطالعات پیشین استفاده شد. مطالعه حاضر سعی در تایید یافته‌های موجود و همچنین تعیین نوع مکانیزم مسؤول در اصلاح ریزساختاری فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304 در فرآیند FSW و ارایه اطلاعات بیشتری در این زمینه با استفاده از تکنیک آنالیز تفرق الکترونی‌های برگشتی (EBSD) می‌باشد.

### 2- روند آزمایشات

فولاد زنگ‌نزن دوفازی AISI 304 به صورت ورق با ضخامت 2 میلیمتر در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ها در ابعاد 100×100×2mm برای جوشکاری آماده شدند. فرآیند جوشکاری در جهت نورد نمونه‌ها با سرعت جوشکاری 50 mm/min و سرعت چرخشی 400 rpm به صورت بدون درز اعمال شد.

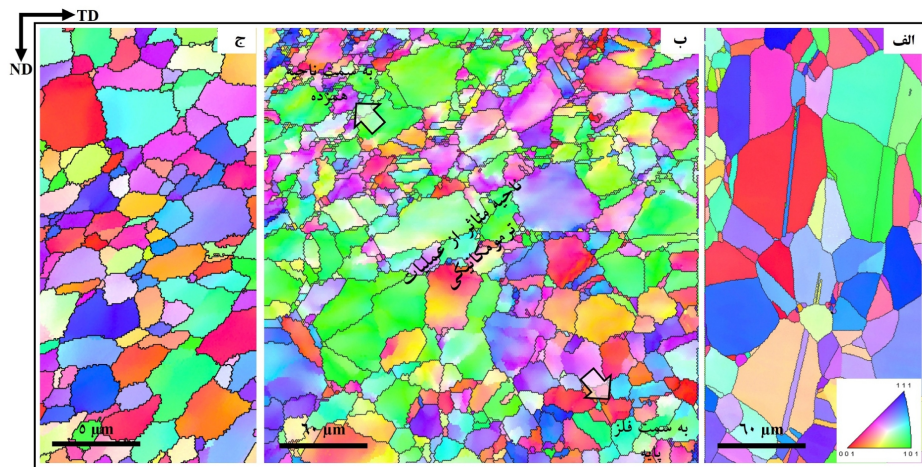
شرایط مورد نظر (400 rpm - 50 mm/min) با در نظر گرفتن نتایج مطالعاتی که تاکنون در زمینه FSW فولادهای زنگ‌نزن صورت گرفته است، انتخاب شد. در این راستا، جعفرزادگان و



شکل 1- ریزساختار ناحیه TMAZ ایجاد شده در فولاد زنگ نزن آستینیتی 304 در حین FSW با سرعت چرخشی 400 rpm و سرعت خطی 50mm/min.

پایین در حین جوشکاری باشد. عدم حضور ناحیه HAZ در مقاطع جوش‌های حاصل از فرآیند FSW بر روی نمونه‌های زنگ‌نزن 316 L نیز گزارش شده است [12 و 13]. شکل‌گیری ناحیه HAZ در مقاطع جوش‌های حاصل از فرآیند FSW بر روی ورق‌های فولادی زنگ‌نزن دوفازی SAF 2205 نیز گزارش نشده است [16]. در ناحیه TMAZ دانه‌های درشت و هم‌محور فلز پایه در امتداد کرنش اعمالی کشیده می‌شوند. کشیدگی دانه‌ها از مشخصه‌های بارز ناحیه TMAZ است که به علت ناکافی بودن کرنش اعمالی دانه‌ها عمدتاً تغییر شکل می‌یابند. همچنین دیده می‌شود که ریزساختار هم‌محور بسیار ظریفی در ناحیه همزده شکل یافته است. وجود چنین ریزساختار ظریف در ناحیه SZ و ساختار دانه‌ای کشیده فلز پایه در ناحیه TMAZ سبب شکل‌گیری مرز مشخصی بین آن‌ها شده است. رفتار مشابهی در جوشکاری همزن اصطکاکی آهن خالص [17]، فولاد زنگ نزن دوفازی 2205 [18]، فولادهای

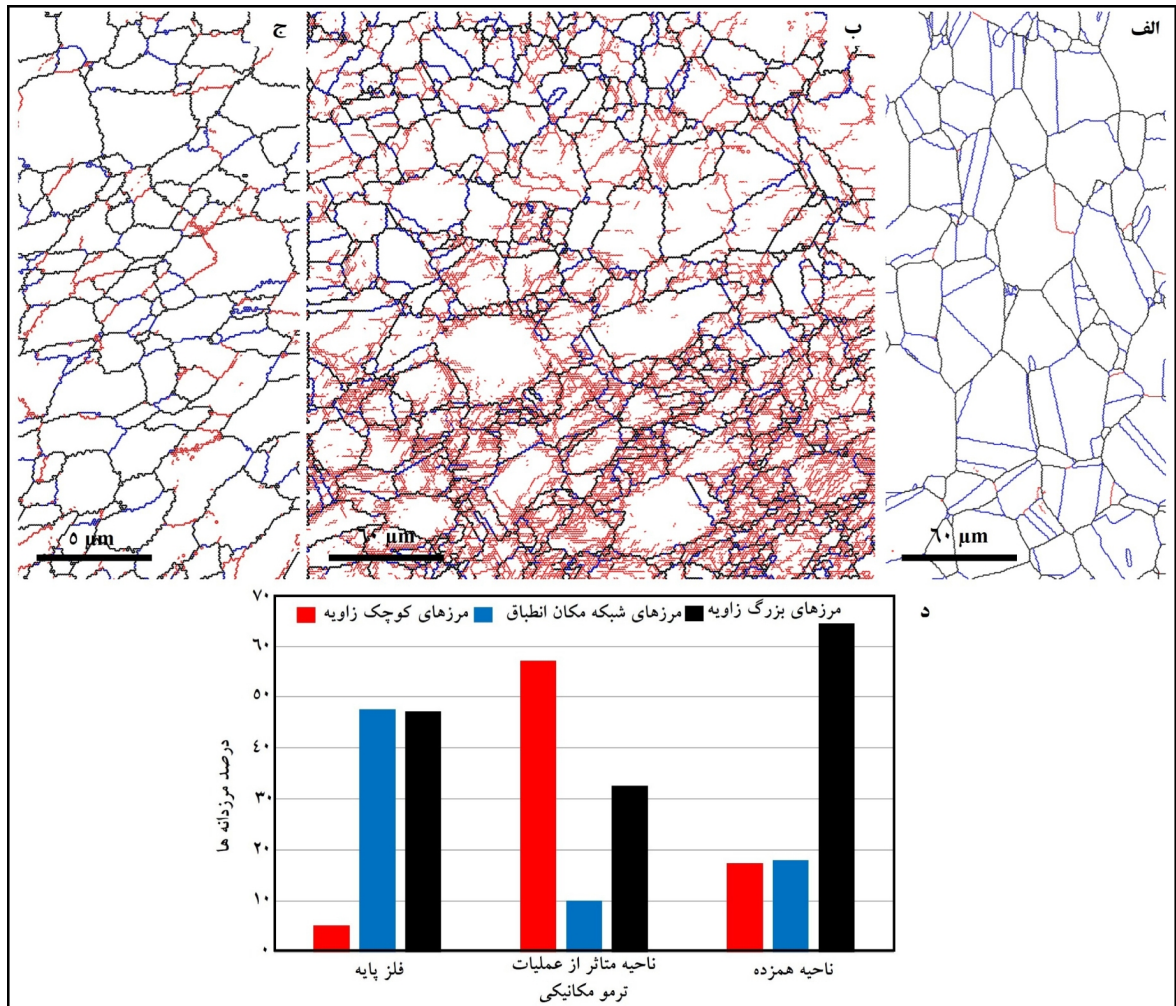
زنگ نزن آستینیتی [12 و 13] و فریتی [19] نیز گزارش شده است. شکل (2) داده‌های نقشه جهت‌گیری بدست آمده برای فلز پایه و ناحیه TMAZ از سطح مقطع عمود بر جهت نورد (TD-ND) را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل دارای آستینیت فاز از دانه‌های هم‌محور با اندازه تقریباً 18 میکرون است. رنگ هر دانه بر اساس جهت‌گیری کریستالی است که نسبت به جهت نورد (RD) و جهت جوشکاری (WD) دارد. نقشه‌های مرزدانه‌ای و همچنین نحوه توزیع کسر نوع مرزدانه‌ها در فلز پایه (GBCD) در شکل (3) نشان می‌دهند که اکثر مرزدانه‌ها (تقریباً 95%) از نوع مرزدانه‌های بزرگ زاویه هستند به طوری که 47% از کل مرزدانه‌ها را مرزهای شبکه مکان تشکیل می‌دهند که دارای رابطه جهت‌گیری با چرخش 60 درجه‌ای حول محور  $\langle 111 \rangle$  می‌باشند ( $\Sigma 3$ ) و تنها 5% از مرزدانه‌ها از نوع کوچک زاویه هستند. این نوع مرزهای شبکه مکان انطباق در موادی با انرژی نقص در چیدن پایین در حین



شکل 2- نقشه های جهت گیری از فلز پایه (الف) فلز پایه، (ب) سمت پیشرونده ناحیه همزده، و (ج) ناحیه همزده

گفته می شود. عکس نسبت تعداد مکان های CSL به مکان های شبکه را با علامت  $\Sigma$  نشان می دهند. بنابراین حضور مرزهای  $\Sigma 3$  در ریزساختار فلزات پایه، نشان دهنده وقوع تبلور مجدد و رشد دانه در حین آنیل و فراوری نمونه ها می باشد [7]. مرزهای CSL رابطه جهت گیری ایده آل خود را در اثر کرنش و چرخش های دانه ای از دست می دهند. رفتار مشابهی در ناحیه TMAZ فولاد SAF 2205 [16، 18 و 25] و ریزساختار فولاد آستنیتی 304 به هنگام اعمال تغییر شکل داغ [21-23] گزارش شده است. کرنش و چرخش های دانه ای است که باعث واکنش نابجایی ها با مرزهای شبکه مکان انطباق و در نهایت انحراف مرزهای شبکه مکان انطباق از روابط جهت گیری ایده آل می شود [16، 18، 21 و 22]. برهمکنش نابجایی ها در یک ماده بلوری اهمیت زیادی دارد چرا که اغلب خواص مکانیکی دما بالا و سازوکارهای ترمیم مانند تبلور مجدد را کنترل می کند. مطابق با داده های آماری مربوط به فلز پایه نمونه ها قسمت عمده مرزخانه های بزرگ زاویه را مرزهای CSL تشکیل می دهد و اغلب این مرزها دارای رابطه جهت گیری  $\Sigma 3$  هستند. ویژگی های مرزهای دوقلویی (مانند هم سیمایی و زاویه ناهمسویی زاویه/محور) با وارد شدن به ناحیه TMAZ توسط تغییر شکل اعمالی از طرف ابزار از حالت مطلوب خود فاصله می گیرند و به مرزهای بزرگ زاویه تبدیل می شوند. چنین رفتاری با برهمکنش نابجایی های موجود در شبکه با مرزهای شبکه مکان انطباق صورت می گیرد [16].

فرایند تبلور مجدد تشکیل می شوند [20-23]. در شکل (3-ب)، دیده می شود که کسر بزرگی از مرزخانه های کوچک زاویه در ناحیه TMAZ شکل گرفته اند که با رنگ قرمز مشخص شده اند. شکل گیری کسر بالایی از چنین مرز دانه های کوچک زاویه به صورت ناگهانی به احتمال زیاد مربوط به وقوع فرایند DRV است. چنین رفتاری در ناحیه TMAZ فولاد زنگ نزن دوفازی SAF 2205 جوشکاری شده با روش FSW نیز گزارش شده است [17]. زمانی که یک ماده پلی کریستال تحت تغییر شکل قرار می گیرد چگالی مشخصی از نابجایی های متحرک نیاز است تا ماده بتواند خود را با کرنش اعمالی تطبیق دهد. لذا ساختارهای فرعی با شروع اعمال کرنش با برهمکنش نابجایی های ایجاد شده در آن دمای بالا صورت می گیرد و نابجایی های غیرهم علامت همدیگر حذف می کنند و نابجایی های هم علامت خود را دیواره از مرزهای فرعی با انرژی کم قرار می دهند [7 و 16]. با افزایش کرنش سامانه های لغزشی بیشتری فعال می شود، لذا با ادامه اعمال کرنش دانه های بیشتری خود را با تغییر شکل وفق می دهند که این اتفاق باعث شکل گیری جهت گیری ترجیحی یا بافت در ریزساختار می شود [16 و 24]. رفتار بارز دیگری که از BM به سمت TMAZ دیده می شود کاهش کسر مرزهای شبکه مکان انطباق است. هنگامی که دو شبکه بلوری در هم ادغام می شوند، برخی از نقاط شبکه بر روی برخی از نقاط شبکه مجاور منطبق می شود که به این نقاط شبکه مکان انطباق



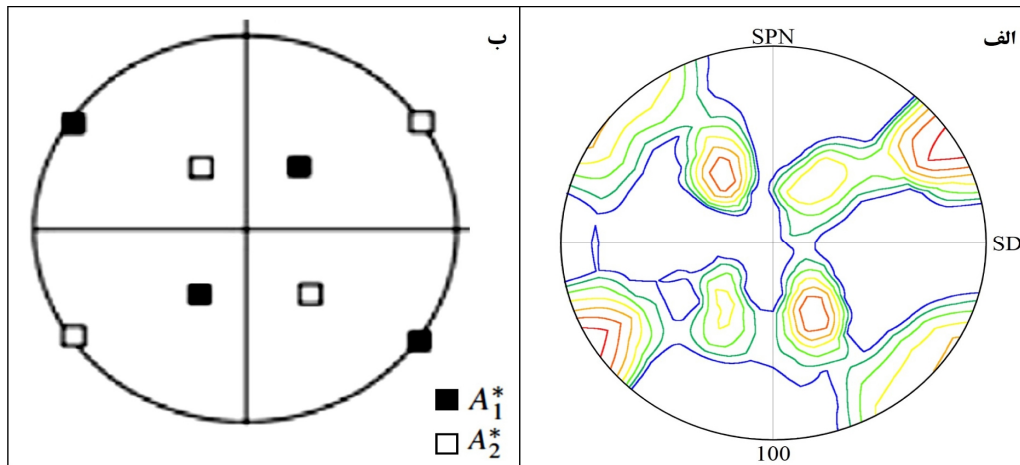
شکل 3- نقشه های مرزدانه ای: الف) فلز پایه، ب) TMAZ، ج) ناحیه همزده و د) نحوه توزیع کسر نوع مرزدانه ها (GBCD).

از مرزدانه های کوچک زاویه (دانه های فرعی) در ریزساختار شکل می گیرد. مرزهای فرعی شکل گرفته با جذب نابجایی های موجود در شبکه زاویه ناهمسویی خود را به طور پیوسته افزایش می دهد و به مرزدانه های بزرگ زاویه تبدیل می شوند (تبلور مجدد دینامیکی پیوسته). از این رو، افزایش میزان مرزهای بزرگ زاویه با کاهش میزان مرزهای کوچک زاویه از ناحیه TMAZ به سمت SZ احتمال وقوع سازوکار CDRX را قوت می بخشد [16 و 17].

جهت گیری کریستالی یا بافت پارامتر مهمی در توصیف ریزساختار یک ماده بلوری به شمار می آید. زمانی که یک ماده چند بلور تحت تغییر شکل قرار می گیرد هر یک از دانه های تشکیل دهنده ریزساختار که به عنوان یک تک بلور هستند

با توجه به شکل (3-د) دیده می شود که فراوانی مرزهای کوچک زاویه با وارد شدن به ناحیه همزده کاهش می یابد این تغییرات نشان می دهند که مکانیزم حاکم با وارد شدن به این ناحیه تغییر یافته و درصد مصرف این نوع مرزدانه ها می باشد و ساختار لایه ای با دانه های کشیده ناحیه TMAZ جای خود را به ریزساختاری هم محور ریز در ناحیه SZ می دهد. افزایش کرنش از ناحیه TMAZ به سمت SZ و دمای بالا در این ناحیه باعث شکل گیری دانه های تبلور مجدد ریز هم محور در این ناحیه می شود. شکل گیری چنین رفتاری در توافق کلی با یافته های پیشین است [16-19].

فرایند بازیابی دینامیکی مقدمه ای بر وقوع تبلور مجدد دینامیکی به حساب می آید که در نتیجه رخداد آن کسر بزرگی



شکل 4- الف) تصویر قطبی صفحات {100} در مرکز ناحیه همزده، ب) تصویر قطبی صفحات {100} که نماینده جهتگیری اجزای ایده ال در بافت برشی ساده فلزات FCC.

(WD) قرار می گیرد و در مرکز ناحیه همزده در راستای TD قرار می گیرد. مقایسه این تصاویر با موقعیت اجزای ایده ال فلزات FCC که کرنش برشی به آنها اعمال شده است نشان می دهد که بافت برشی ساده در ناحیه همزده حاکم است [24]. این نتایج نشان می دهد که در مرکز ناحیه همزده رشته بافتی  $\{111\} \langle uvw \rangle$  A، که شامل اجزای  $A_1^*$  و  $A_2^*$  در ناحیه همزده حضور دارد. حضور چنین بافتی برشی (A) در ناحیه همزده در فاز آستنیت نمونه زنگ نزن دوفازی SAF 2205 با سرعت چرخشی 800 rpm و سرعت پیشروی 50mm/min نیز گزارش شده است. امامی و همکارانش شکل گیری چنین بافتی (A) را برای فاز آستنیت نمونه زنگ نزن دوفازی SAF 2205 با سرعت چرخشی 400 rpm و سرعت پیشروی 50 mm/min نیز گزارش کرده اند. با توجه به اصول سازوکار CDRX و این موضوع که هیچ گونه مراحل مجزای جوانه زنی و رشد در آن وجود ندارد، این سازوکار سبب تغییر بافت تغییر شکل اعمالی از طرف ابزار در حین FSW نمی شود [16 و 18]. بنابراین انتظار می رود که در صورت وقوع این مکانیزم، بافت تغییر شکل برشی در SZ باقی بماند. نتایج مربوط به آنالیز صورت گرفته درباره بافت شکل گرفته در ناحیه همزده حضور اجزای بافت برشی را نشان می دهد. این نتایج به طور ضمنی وقوع سازوکار CDRX در ناحیه همزده ایجاد شده در حین جوشکاری را تایید می کند.

خود را با تغییر شکل ماکروسکوپی نمونه وفق می دهند و بر این اساس جهت گیری هر یک از دانه های سازنده ریزساختار تغییر می کند. تغییر جهت گیری اتفاق افتاده در حین تغییر شکل در هر یک از دانه ها تصادفی نیست، بلکه در جهت خاصی رخ می دهد. در واقع این تغییر شکل در سامانه هایی با مطلوب ترین جهت لغزش یا دوقلویی رخ می دهد. صفحات و جهات هر دو فرایند تابعی از ساختار بلوری ماده هستند و معمولاً روی متراکم ترین صفحات و جهات بلوری رخ می دهد. لذا بلورهای تشکیل دهنده یک ماده مطابق با سامانه های لغزشی ماده تغییر شکل می یابند که این امر باعث بوجود آمدن جهت ترجیحی یا همان بافت در ماده می شود [7 و 24]. شکل (4) تصاویر قطبی مربوط به صفحات {100} در مرکز ناحیه همزده بعد از اعمال چرخش های مناسب جهت انطباق با سیستم برشی را نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که نوعی بافت برشی در ناحیه همزده حاکم است [16-19]. برای مطالعه بافت برشی، سیستم مختصات را از سیستم مختصات جوشکاری (ND-TD-WD) به سیستم مختصات برشی (SPN-SD) باید تغییر داد. با چرخش پین در ناحیه همزده یک مخروط ناقصی در این ناحیه شکل می دهد، سطح جانبی این مخروط به عنوان صفحه برشی و جهت برش مماس بر سطح جانبی و در جهت چرخش است. لذا جهت برش در مرز بین TMAZ/SZ هر دو سمت ناحیه جوش در جهت

## 4- نتیجه گیری

تحولات ریزساختاری و بافتی فولاد زنگ نزن آستنیتی در فرآیند FSW مطالعه شد. اصلاح ریزساختاری شدیدی در اثر وقوع تبلور مجدد دینامیکی در ناحیه همزده مشاهده شد. کسر بزرگی از مرزدانه های کوچک زاویه با وقوع بازیابی دینامیکی در ناحیه TMAZ و کسر بزرگی از مرزدانه های بزرگ زاویه با وقوع تبلور مجدد دینامیکی در ناحیه همزده توسعه یافتند. تصویر قطبی محاسبه شده نشان داد که اجزای بافت برشی  $A^*1$  و  $A^*2$  با چرخش ابزار در ناحیه همزده بوجود آمد. نتایج حاصل از داده های آماری از مرزدانه ها به همراه نتایج حاصل از مطالعات بافتی نشان داد که ریزساختار فولاد زنگ نزن آستنیتی 304 با وقوع سازوکار تبلور مجدد دینامیکی پیوسته توسعه یافته است.

## منابع

- [1] Park, S.H.C., Sato, Y.S., Kokawa, H., Okamoto, K., Hirano, S., and Inagaki, M., "Microstructural characterisation of stir zone containing residual ferrite in friction stir welded 304 austenitic stainless steel", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 10, pp. 550-556, 2005.
- [2] Sato, Y.S., Nelson, T.W., Sterling, C.J., "Recrystallization in type 304L stainless steel during friction stirring", Acta Materialia, Vol. 53, pp. 637-645, 2005.
- [3] Marchattiar, A., Sarkar, A., Chakravarty, J.K., and Kashyap, B.P., "Dynamic recrystallization during hot deformation of 304 austenitic stainless steel", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 22, 2168-2175, 2013.
- [4] Kou S, Welding Metallurgy, 2nd edition, John Wiley & Sons Publication, 2003.
- [5] Tokita, S., Yokoyama, T., Kokawa, H., Sato, Y.S., Fujii, H.T., "Friction stir welding of grain boundary engineered 304 austenitic stainless steel", Proceeding of National Meeting of JWS, pp. 407-408, 2013.
- [6] Mishra, R.S., Ma, Z.Y., "Friction stir welding and processing", Materials Science and Engineering R, Vol. 50, pp. 1-7, 2005.
- [7] Humphreys, F.J., Hatherly, M., Recrystallization and related annealing phenomena, 2nd edition, Elsevier, 2004.
- [8] Meran, C., Kovan, V., Alptekin, A., "Friction stir welding of AISI 304 austenitic stainless steel", Mat.-wiss. u. Werkstofftech, Vol. 10, pp. 829-835, 2007.
- [9] Reynolds, A.P., Tang, W., Gnaupel-Herold, T., Prask, H., Structure, "properties, and residual stress of 304L stainless steel friction stir welds", Scripta Materialia, Vol. 48, pp. 1289-1294, 2003.
- [10] Park, S.H.C., Sato, Y.S., Kokawa, H., Okamoto, K., Hirano, S., Inagaki, M., "Rapid formation of the sigma phase in 304 stainless steel during friction stir welding", Scripta Materialia, Vol. 49, pp. 1175-1180, 2003.
- [11] Meran, C., Canyon, O.E., "Friction Stir Welding of austenitic stainless steels", Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 43/1, pp. 432-439, 2010.
- [12] Rezaei-Nejad S.S., Abdollah-zadeh A., Hajian M., Kargar F., Seraj R., "Formation of Nanostructure in AISI 316L Austenitic Stainless Steel by Friction Stir Processing", Procedia Materials Science, Vol. 11, pp. 397 - 402, 2015.
- [13] Hajian M., Abdollah-zadeh A., Rezaei-Nejad S.S., Assadi H., Hadavi S.M.M., Chung K., Shokouhimehr M., "Microstructure and mechanical properties of friction stir processed AISI 316L stainless steel", Materials and Design, Vol. 67, pp. 82-94, 2015.
- [14] Liu F.C., Nelson T.W., "In-situ grain structure and texture evolution during friction stir welding of austenite stainless steel", Materials and Design, Vol. 115, pp. 467-478. 2017.
- [15] م. جعفرزادگان، تاثیر پارامترهای جوشکاری همزن اصطکاکی بر خواص مکانیکی و ریزساختار فولاد زنگ نزن 304، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، 1386.
- [16] Emami S., Saeid T., Azari Khosroshahi R., "Microstructural evolution of friction stir welded SAF 2205 duplex stainless steel", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 739, pp. 678-689, 2018.
- [17] Mironov, S., Sato, Y.S., Kokawa, H., "Microstructural evolution during friction stir-processing of pure iron", Acta Materialia, Vol. 56, pp. 2602-2614, 2008.
- [18] Saeid, T., Abdollah-zadeh, A., Shibayanagi, T., Ikeuchi, K., Assadi, H., "On the formation of grain structure during friction stir welding of duplex stainless steel", Materials Science and Engineering A, Vol. 527, pp. 6484-6488, 2010.
- [19] Cho, H.H., Han, H.N., Hong, S.T., Park, J.H., Kwon, Y.J., Kim, S.H., Steel, R.J., "Microstructural analysis of friction stir welded ferritic stainless steel", Materials Science and Engineering A, Vol. 528, pp. 2889-2894, 2011.
- [20] Beladi, H., Cizek, P., and Hodgson, P.D., "Dynamic recrystallization of austenite in Ni-30 Fe model alloy: microstructure and texture evolution", Metallurgical And Materials Transactions A, Vol. 40A, pp. 1175-1189, 2009.
- [21] Mirzadeh, H., Cabrera, J.M., Najafzadeh, A., Calvillo, P.R., "EBSD study of a hot deformed austenitic stainless steel", Materials Science and Engineering A, Vol. 538, pp. 236-245, 2012.
- [22] Badiola, D.J., Iza-Mendia, A., Gutierrez, I., "Study by EBSD of the development of the substructure in a hot



materials, Springer, 2014.

[25] Santos, T.F.A., Torres, E.A., Lippold, J.C., and Ramirez, A.J., "Detailed microstructural characterization and restoration mechanisms of duplex and superduplex stainless steel friction-stir-welded joints", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 25(12), pp. 5173–5188, 2016.

deformed 304 stainless steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 394, pp. 445–454, 2005.

[23] Dehghan-Manshadi, A., Beladi, H., Barnett, M.R. and Hodgson, P.D., "Recrystallization in 304 austenitic stainless steel", *Materials Science Forum*, Vol. 467-470, pp. 1163-1168, 2004.

[24] Suwas, S., Ray, R.K., Crystallographic texture of