نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره1، بهار و تابستان 1399، صفحه 8-1

تاثیر سرعت چرخشی ابزار در شکل‌گیری ریزساختار در مقاطع جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304 حاصل از فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی

محسن حاجی زاده[1]، سجاد امامی[2]، توحید سعید[2*]

1- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند تبریز.

2- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز.

(دریافت مقاله: 1398/05/07 ؛ پذیرش مقاله: 1398/07/09)

چکیده

جوش‌های بدون درزی بر روی ورق‌های 2 میلیمتری فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304 با روش جوشکاری همزن اصطکاکی با سرعت‌های پیشروی 150 میلیمتر بر دقیقه و سرعت‌های چرخشی 400 و 800 دور بر دقیقه ایجاد شد. مطالعات ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به سیستم پراش الکترون‌های برگشتی انجام شد. نتایج نشان داد که کسر بزرگی از مرزدانه‌های کوچک زاویه با وقوع بازیابی دینامیکی در ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی شکل گرفت. درصد بیشتری از این مرزها در نمونه جوشکاری‌شده با سرعت 800 دور بر دقیقه به علت همراه داشتن حرارت و میزان تغییرشکل بالا توسعه یافت. کسر بزرگی از مرزدانه‌های بزرگ زاویه با وقوع تبلور مجدد دینامیکی پیوسته در ناحیه همزده هر دو نمونه تشکیل شد. ریزساختار ظریف‌تری در ناحیه همزده نمونه جوشکاری‌شده با سرعت چرخشی 400 دور بر دقیقه، به علت همراه داشتن حرارت ورودی پایین به دست آمد. تصویر قطبی صفحات {111} نشان داد که اجزای بافت برشی ساده در ناحیه همزده تشکیل شد و شدت مربوط به تصاویر قطبی با افزیش سرعت چرخشی افزایش یافت. توسعه اجزای بافت برشی ساده به طور ضمنی وقوع تبلور مجدد دینامیکی پیوسته را تایید می‌کند.

کلمات کلیدی: جوشکاری همزن اصطکاکی، فولادهای زنگ‌نزن، بازیابی دینامیکی، تبلور مجدد دینامیکی، بافت برشی

Influence of rotational speed on the development of microstructure in a friction stir welded 304 austenitic stainless steel

M. Hajizadeh[1], S. Emami[2], T. Saeid[2*]

1-Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

2-Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

(Received 29 July 2019 ; Accepted 1 October 2019)

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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

Abstract

Friction stir welding was conducted on AISI 304 austenitic stainless steel sheet with dimensions of 100 mm × 100 mm × 2 mm. The FSW was performed at a welding speed of 150 mm/min and rotational speeds of 400 and 800 rpm. The results showed that high frequency of low angle grain boundaries (LAGBs) were formed through dynamic recovery in the thermo-mechanically affected zone (TMAZ). Higher amount of LAGBs were developed in the TMAZ of welded sample with 800 rpm due to the higher amount of strain and heat generated. High fraction of high angle grain boundaries were formed in the stir zone (SZ) of the welded samples through the occurrence of continuous dynamic recrystallization (CDRX). A very fine microstructure developed in the sampled welded with lower rotational speed. Analysis of texture using {111} Pole figures showed the formation of shear texture components in the SZ of both welded samples. The intensity of the obtained texture for the sample welded with 800 rpm was greater. The formation of shear texture components in the SZ of both samples implied the occurrence of CDRX mechanism.

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

1- مقدمه

فرآیند جوشکاری همزن اصطکاکی یکی از روش‌های اتصال در حالت جامد است که گرمای ایجادشده در اثر تغییرشکل پلاستیک و همچنین اصطکاک بین ابزار و قطعه کار باعث نرم‌شدن موضعی ماده در اطراف پین می‌شود که ترکیبی از حرکت دورانی و طولی آن، باعث حرکت ماده از جلوی پین به سمت پشت آن می‌شود و به این ترتیب عمل اتصال صورت می‌پذیرد [1-2]. از این‌رو حرارت و تغییر شکل نقش کلیدی در تحولات ریزساختاری ناحیه اتصال دارد. ماهیت جامد این فرآیند باعث شده است تا به عنوان روشی جایگزین برای فرایندهای مرسوم ذوبی به کارگرفته شود. همچنین این فرآیند باعث بهبود خواص مکانیکی در ناحیه همزده (SZ) می‌شود [1و3]. خواص مکانیکی مطلوب بوجود آمده در SZ ناشی از تحولات ریزساختاری است که در درون ماده در حین جوشکاری ایجاد می‌شود. از جمله این تحولات می‌توان به فعال‌شدن 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 می‌دهد باعث فعال‌شدن چنین سازوکارهایی در درون ماده می‌شود. این سازوکارها عمدتا شامل بازیابی دینامیکی (DRV) و تبلور مجدد دینامیکی (DRX) است که وقوع هر یک از این سازوکارها را انرژی نقص در چیدن و شرایط تغییر شکلی تعیین می‌کند [1و4].

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی از جمله آلیاژهای مهندسی پرکاربردی هستند که امروزه در صنایع مختلفی مانند صنایع شیمیایی و پتروشیمی، هوا – فضا و تولید انرژی کاربرد دارند [5]. ذوب و انجماد مجدد صورت‌گرفته در فرآیندهای مرسوم ذوبی، ترک خوردن تحت تنش و حساس‌شدن در ناحیه متاثر از حرارت در فلز جوش این نوع فولادها را ترغیب می‌کند [1و6]. از این‌رو در سال‌های اخیر تلاش‌هایی در راستای به‌کارگیری جوشکاری همزن اصطکاکی (FSW) بر روی این فولادها صورت گرفته است. مران و همکارانش امکان به کارگیری FSW بر روی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 304 را بررسی کردند [7]. رینولد و همکارانش ساختار، خواص و تنش‌های باقی‌مانده FSW فولاد 304L را بدون اشاره به سازوکارهای ترمیم بررسی کردند [8]. پارک و همکارانش [1و9]، مران و سانیورت [10] وقوع DRX را در ناحیه همزده فولاد 304 بدون اشاره به نوع سازوکار آن گزارش کرده‌اند. ساتو و همکارانش [11] شکل‌گیری ریزساختار در ناحیه همزده جوش 304L را در اثر وقوع DRX گزارش کردند و هم‌چنین نشان دادند که ناحیه همزده عمدتاً از بافت تغییرشکل رشته‌ای <100> شکل یافته است. رضایی‌نژاد و همکارانش [12] با بررسی تحولات ریزساختاری فولاد 316L فرآوری‌شده با فرایند همزن اصطکاکی (FSP) با سرعت چرخشی 315 دور بر دقیقه و سرعت خطی 31/5 میلی‌متر بر دقیقه نشان دادند که دانه‌های بسیار ریزی در ناحیه همزده با اندازه‌های 200-50 نانومتر از دانه‌هایی با اندازه 40-30 میکرون فلز پایه توسعه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

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 316L فرآوری‌شده با روش FSP را مطالعه کردند [13]. آن‌ها با استفاده از مشخصه‌یابی تفرق الکترون‌های برگشتی (EBSD) و میکروسکوپ الکترون عبوری (TEM) نشان دادند که ریزساختار بسیار ظریفی در ناحیه همزده با وقوع DDRX شکل گرفت. شکل‌گیری کسر بزرگتری از نابجایی‌ها در داخل ناحیه همزده را دلیلی بر وقوع سازوکار DDRX گزارش 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 است که مرزدانه‌های فرعی زاویه ناهمسویی خود را افزایش می‌دهد و به مرزدانه‌های بزرگ زاویه اصلی تبدیل می‌شوند. لیو و نلسون تحولات ساختار دانه و بافت فولاد 304L را در فرآیند FSW با سرعت چرخشی350 دور بر دقیقه و سرعت خطی 100 میلی‌متر بر دقیقه مطالعه کردند [14].

این محققین سازوکار عامل در شکل‌گیری ریزساختار در ناحیه همزده را عمدتاً DDRX با مهاجرت مرزدانه‌ها و متورم‌شدن آن‌ها عنوان کردند. مروری بر منابع مطالعاتی نشان می‌دهد که در مطالعات اولیه پژوهشگران امکان به‌کارگیری این فرآیند بر فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی را بررسی کرده‌اند. درحالی‌که در مطالعات اخیر به نحوه پیدایش ریزساختار در حین FSW پرداخته شده است. با توجه به اینکه میزان تغییر شکل اعمالی در حین FSW از جمله عواملی است که به شدت تحولات ریزساختاری در ناحیه اتصال را تحت تاثیر قرار می‌دهد و با نظر به این‌که تاکنون در پژوهش‌های صورت گرفته است، تاثیر پارامترهای جوشکاری مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این مطالعه تاثیر سرعت چرخشی ابزار بر ریزساختار و بافت حاصل از FSW بر روی نمونه‌های زنگ‌نزن آستنیتی 304 با به کارگیری مشخصه‌یابی EBSD مورد مطالعه قرار گرفته است.

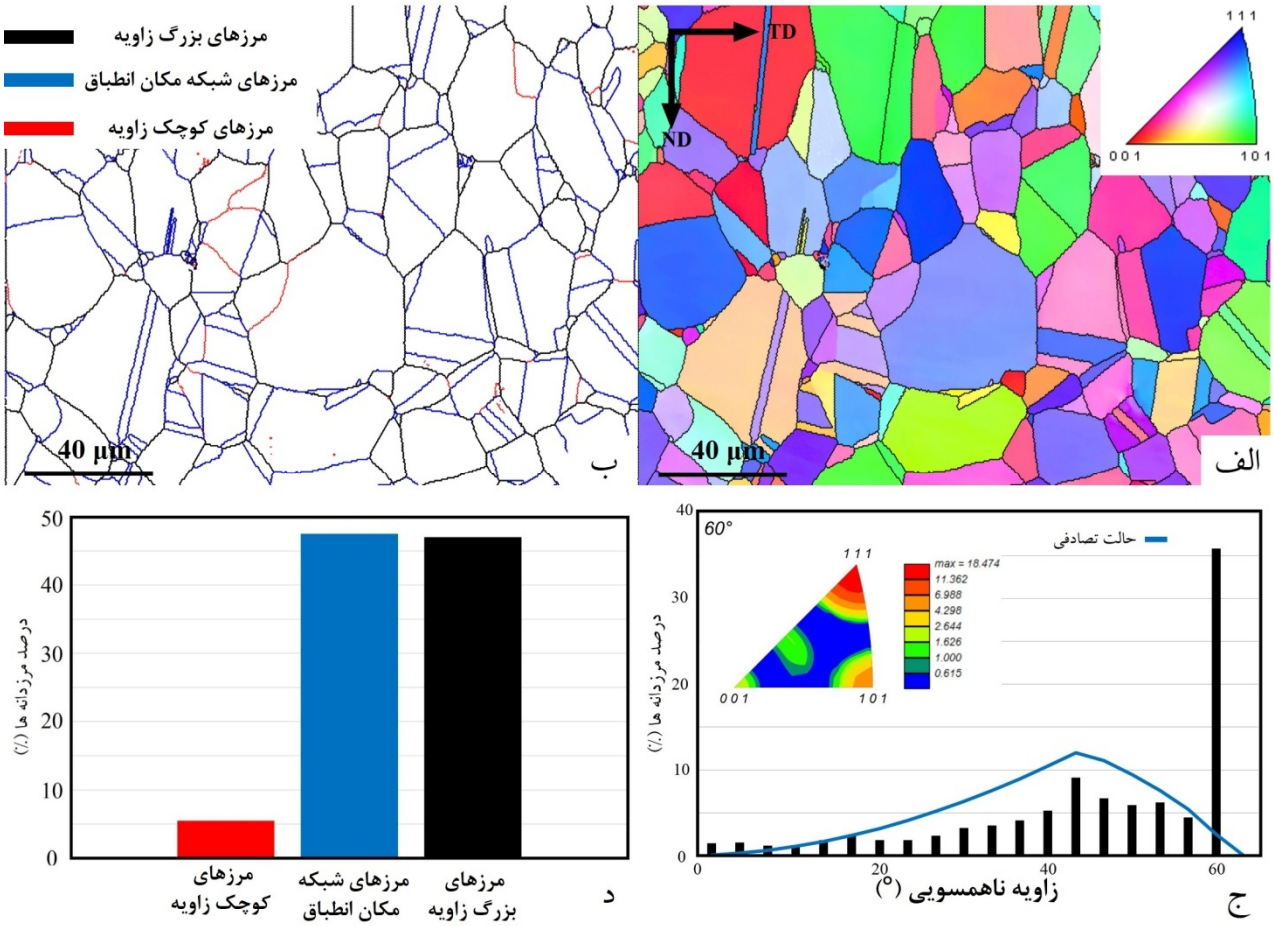
2- مواد و روش انجام آزمایش

دو ورق از جنس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 304 با ابعاد 100 mm × 100 mm × 2 mm برای جوشکاری آماده شدند. فرایند جوشکاری در جهت نورد نمونه‌ها با سرعت جوشکاری 150 میلی‌متر بر دقیقه و سرعت‌های چرخشی 400 و 800 دور بر دقیقه به صورت بدون درز اعمال شد. برای این منظور از یک ابزار پایه کاربید تنگستنی با شانه 16 mm و پین مخروطی با قطر ریشه 4/5 mm و قطر نوک 3/5 mm با ارتفاع 1/7 mm استفاده شد. زاویه ابزار با جهت نرمال صفحه تحت جوشکاری 3 درجه در نظر گرفته شد. در حین جوشکاری عمق فروروی ابزار به داخل نمونه به اندازه 1/8 mm و ثابت نگهداشته شد. مشاهدات ریزساختاری با میکروسکوپ الکترون روبشی مجهز به پراش الکترون‌های برگشتی در سطح مقطع عمود بر جهت جوشکاری (WD) انجام شد. نمونه‌ها 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، 100 mL گلیسیرول و 80 mL پرکلریک اسید در دمای اتاق با ولتاژ 35 V به مدت 35 s به صورت الکتریکی پولیش شدند. جمع‌آوری و پردازش داده‌های EBSD در سیستم TSL-OIMTM و در مؤسسه پژوهشی اتصال و جوشکاری (JWRI) دانشگاه اوزاکای ژاپن صورت گرفت. این سیستم بر روی میکروسکوپ الکترونی روبشی(SEM) JSM-6400 JEOLTM قرار گرفته بود و در ولتاژ 20 kV کار می‌کرد.

3- نتایج و بحث

شکل (1) نقشه‌های جهت‌گیری و مرزدانه‌ای و اطلاعات آماری مربوط به فلز پایه فولادهای زنگ‌نزن تک فازی را نشان می‌دهند. در شکل‌های مربوط به نقشه‌های جهت‌گیری رنگ هر دانه بر اساس جهت‌گیری کریستالی است که نسبت به جهت نورد (RD) دارد. فلز پایه دارای دانه‌های هم‌محور درشت و مقدار قابل توجهی HAGBs هستند. به طوری که درصد بالایی مرزدانه‌های بزرگ زاویه را مـرزهای شبکه مکان انطباق (CSL)

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



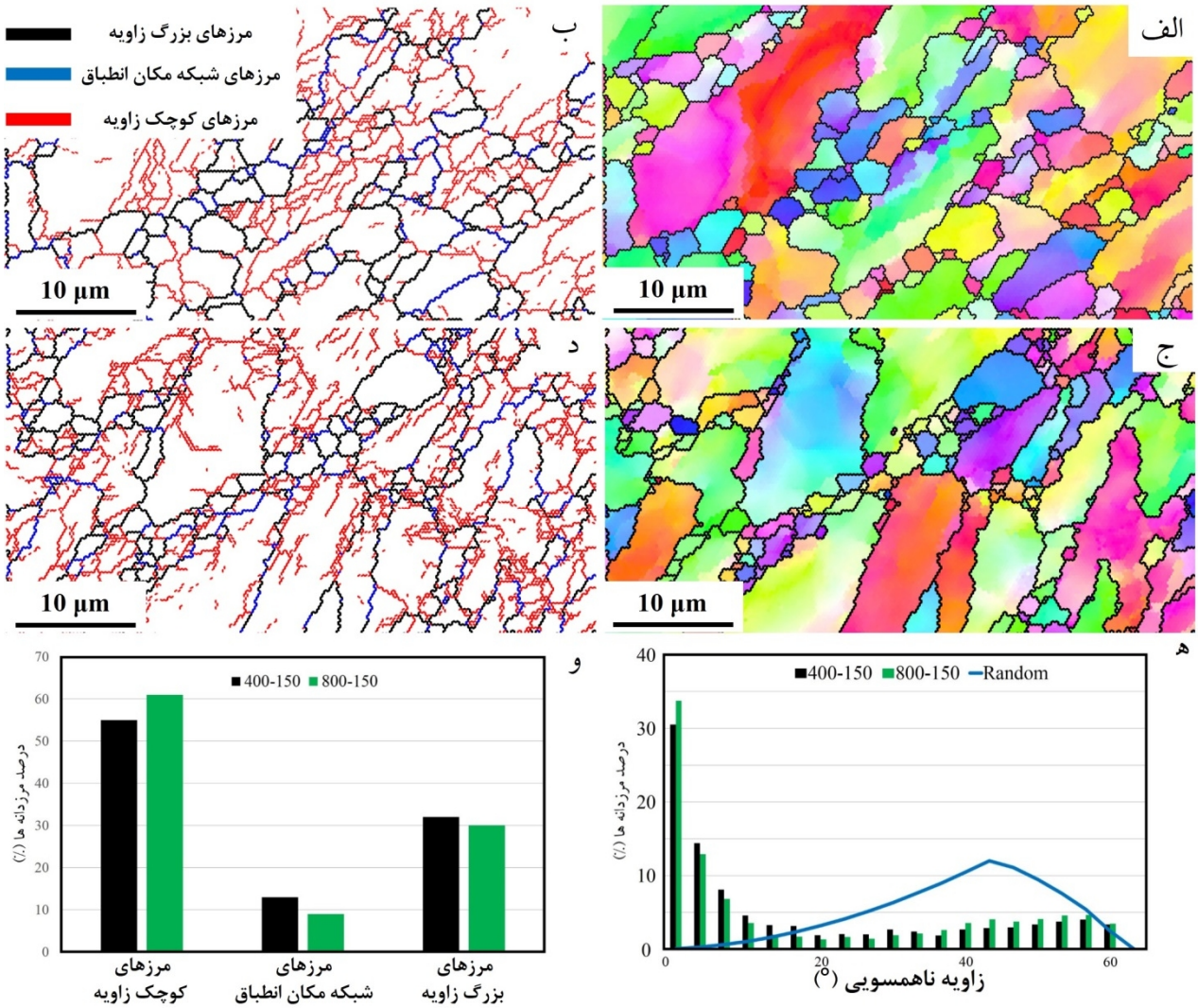
شکل1- داده‌های EBSD بدست آمده از فلز پایه در مقطع عمود بر جهت نورد (عمود بر جهت جوشکاری
الف) نقشه جهت‌گیری فلز پایه، ب) نقشه مرزدانه‌ای فلز پایه، ج) منحنی تغییرات زاویه ناهمسویی و د) منحنی درصد نوع مرزدانه‌ها، مرزهای بزرگ زاویه، کوچک زاویه و شبکه مکان انطباق به ترتیب با رنگ‌های سیاه، قرمز و آبی نشان داده شده‌اند. در شکل الف، مثلث راهنمای جهت‌گیری در کل متن مقاله مورد استفاده خواهد بود. حالت تصادفی مربوط به ریزساختاری می‌شود که دانه‌ها فاقد جهتگیری ترجیهی (بافت) هستند.

تشکیل می‌دهند. حضور پیکی با شدت بالا در زاویه 60 درجه نشان می‌دهد که در ریزساختار فلز پایه درصد بالاتری از مرزهای شبکه مکان انطباق از نوع $\Sigma 3$ وجود دارد. مرزهای $\Sigma 3$، در واقع بیانگر رابطه جهت‌گیری دوقلویی درجه اول هستند که مشخصه آن‌ها چرخش 60 درجه‌ای حول محور بلوری <111> می‌باشد (شکل (1-ج)) [15].

از آن‌جایی‌که فرایند اتصال از ناحیه TMAZ شروع می‌شود، مطالعه تغییرات ریزساختاری در این ناحیه اهمیت بسیاری دارد و می‌تواند اطلاعات مفیدی را در زمینه شکل‌گیری ریزساختار در حین FSW در اختیار قرار دهد. شکل (2) نقشه جهت‌گیری و مرزدانه‌ای TMAZ را در سمت پیشرونده جوش‌های شکل‌گرفته را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل دانه‌های فلز پایه در این ناحیه در اثر کرنش واردشده از ابزار در حال چرخش دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود و تمایل دارند که خود را با جهت اعمالی کرنش وفق دهند. برای چنین انطباقی صفحات لغزش آسان هر یک از دانه‌ها که به عنوان یک تک‌کریستال هستند و طوری چرخش می‌یابند تا خود را در جهت کرنش اعمالی قرار دهند. لذا چرخش این دانه‌ها به صورت اختیاری نیست و در جهت خاصی رخ می‌دهد. هم‌چنین دیده می‌شود که شکل‌گیری مرزدانه‌های کوچک زاویه و بزرگ زاویه نیز به صورت ناهمسانگرد هست و در جهت تغییرشکل اعمالی توسط ابزار صورت گرفته است. رفتار مشابهی در TMAZ آهن خالص گزارش شده است [16].

با مقایسه این اشکال و داده‌های آماری مرزدانه‌ای این ناحیه با

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

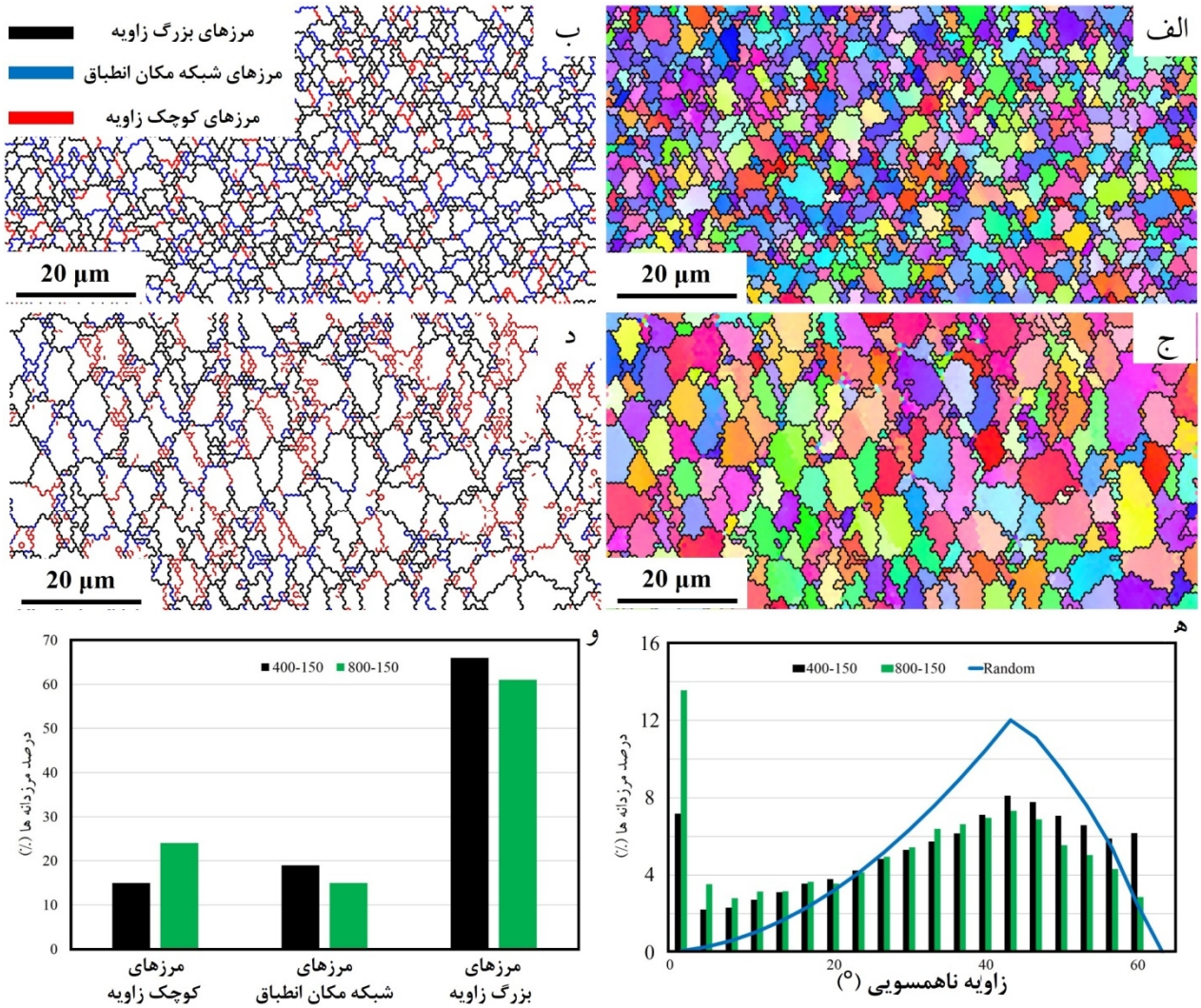


شکل 2- الف) و ب) نقشه جهت‌گیری و مرزدانه‌ای TMAZ نمونه 400 دور بر دقیقه، ج) و د) نقشه جهت‌گیری و مرزدانه‌ای TMAZ نمونه 800 دور بر دقیقه، ه) و و) منحنی توزیع زوایای ناهمسویی و منحنی درصد نوع مرزدانه‌ها.

فلز پایه آشکار می‌شود که مقدار مرزهای دوقلویی در TMAZ در مقایسه با فلز پایه به مراتب کاهش یافته‌اند. مرزهای CSL رابطه جهت‌گیری مطلوب خود را در اثر کرنش و چرخش‌های دانه‌ای در حین فرآیند جوشکاری از دست می‌دهند. هم‌چنین این مرزها در حین فرایند تبلور مجدد و رشد دانه در حین آنیل در ریزساختار توسعه می‌یابند. از این‌رو درصد این نوع مرزدانه‌ها در فلز پایه که مدت زمان طولانی‌تری در حین فرآیند تولید دماهای بالا را تجربه می‌کند، بیشتر است. رفتار مشابهی در ناحیه TMAZ فولاد SAF 2205 [15] و ریزساختار فولاد آستنیتی 304 به هنگام اعمال تغییر شکل داغ [17-19] گزارش شده است. کرنش و چرخش‌های دانه‌ای است که باعث واکنش نابجایی‌ها با مرزهای شبکه مکان انطباق و در نهایت انحراف مرزهای شبکه مکان انطباق از روابط جهت‌گیری مطلوب می‌شود [18-19].

شکل (3) نقشه‌های جهت‌گیری، مرزدانه‌ای و اطلاعات آماری مربوط به SZ نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با مقایسه این اطلاعات با نتایج TMAZ می‌توان دریافت که مقدار مرزهای فرعی با واردشدن به ناحیه SZ کاهش می‌یابد. از آن‌جایی که فرآیندهای صعود و لغزش نابجایی‌ها لازمه فرآیندهای ترمیم مواد می‌باشند، با افزایش دما تحرک نابجایی‌ها افزایش و انجام چنین سازوکارهایی شتاب می‌یابد. از این‌رو به عنوان نتیجه دیده می‌شود که در SZ مربوط به نمونه جوشکاری‌شده با سرعت

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



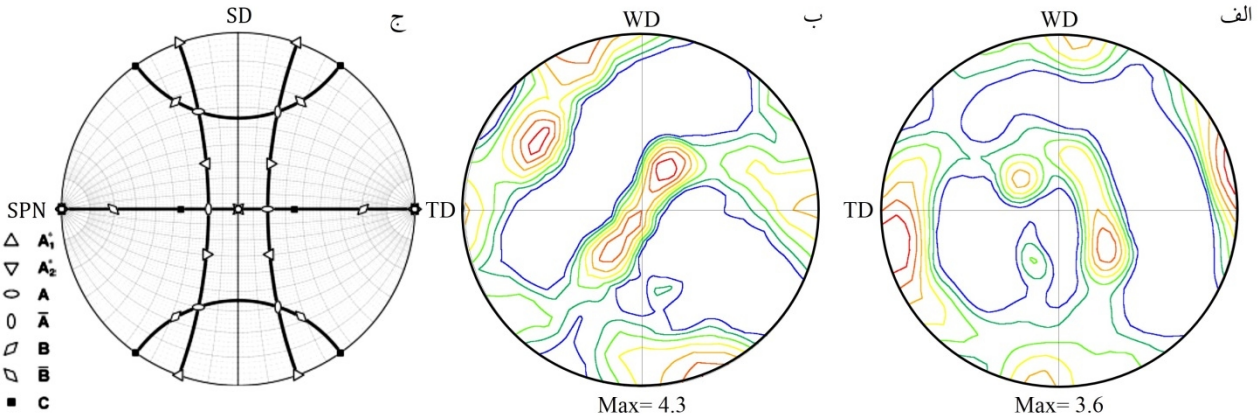
شکل 3- الف) و ب) نقشه جهت‌گیری و مرزدانه‌ای SZ نمونه 400 دور بر دقیقه، ج) و د) نقشه جهت‌گیری و مرزدانه‌ای SZ نمونه 800 دور بر دقیقه ، ه) و و) منحنی توزیع زوایای ناهمسویی و منحنی درصد نوع مرزدانه‌ها.

چرخشی 800 دور بر دقیقه که دمای بیشتری نسبت به نمونه 400 دور بر دقیقه دریافت می‌کند، مرزهای کوچک زاویه بیشتری توسعه می‌یابد. همچنین دیده می‌شود که به علت حرارت ورودی بالا در نمونه 800 دور بر دقیقه ریزساختار درشت‌تری توسعه یافته است [4]. شکل‌گیری مرزهای فرعی همزمان با حذف نابجایی‌های اضافی و آرایش مجدد نابجایی‌ها به صورت مرزهای پایدار است. ساختارهای فرعی با شروع اعمال کرنش با برهمکنش نابجایی‌های ایجادشده در آن دمای بالا صورت می‌گیرد و نابجایی‌های غیرهم‌علامت هم‌دیگر حذف می‌کنند و نابجایی‌های هم‌علامت خود را به صورت دیواره از مرزهای فرعی با انرژی کم قرار می‌دهند. فرایندهایی مانند لغزش و صعود نابجایی‌ها که لازمه شکل‌گیری ساختارهای فرعی است، با افزایش دما افزایش می‌یابد. از طرفی افزایش دما باعث رشد دانه می‌شود [4]. از طرفی مطابق با رابطه (1) میزان حرارت ورودی در فرایند FSW با افزایش سرعت چرخشی افزایش می‌یابد [2].

$$Q = \left(\frac{4}{3}\right)\pi^2 \frac{\eta \mu R_s P r^3}{W_s} \qquad (1)$$

در این رابطه η راندمان حرارت ورودی، μ ضریب اصطکاک، Rs سرعت چرخشی (دور بر دقیقه)، W_s سرعت پیشروی (میلیمتر بر دقیقه)، P فشار عمودی (پاسکال) و r شعاع شانه بر حسب میلی‌متر می‌باشد. بنابراین ریزساختار نمونه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل 4- تصاویر قطبی صفحات {111}: الف) نمونه 400 دور بر دقیقه، ب) 800 دور بر دقیقه و ج) موقعیت ایده‌آل اجزای بافت برشی

جوشکاری‌شده سرعت چرخشی 800 دور بر دقیقه که میزان حرارت ورودی بالاتری نسبت به سرعت چرخشی 400 دور بر دقیقه دارد، دارای ریزساختاری درشت با کسر بالاتری از مرزهای کوچک زاویه است. همانند سایر روش‌های اعمال تغییر شکل پلاستیک، در FSW نیز تغییرشکل اعمال‌شده توسط ابزار در حال چرخش باعث چرخش شبکه بلوری و تغییر بافت اولیه ماده می‌شود. در این فرایند به علت گرمای شدیدی که در حین تغییر شکل در ناحیه اتصال ایجاد می‌شود. مانند آنچه که در حین فرایندهای تغییر شکل داغ در درون ماده رخ می‌دهد، برخی از سازوکارهای ترمیم وارد عمل می‌شوند که بر بافت نهایی ریزساختار شکل‌گرفته اثر می‌گذارند. از مهم‌ترین حالت‌های تغییر شکلی در فلزات و آلیاژها لغزش است که مسؤلیت چرخش بلورها درحین تغییر شکل را دارد. به هنگام لغزش، شبکه بلوری طوری می‌چرخد که جهت لغزشی فعال در امتداد نیروی واردشده قرار می‌گیرد و در نهایت باعث تغییر جهت‌گیری بلور می‌شود [4 و20]. شکل (4) نتایج آنالیز بافت را در نقاط مختلف SZ نشان می‌دهد. برای نمایش بافت، از تصاویر قطبی صفحات {111} چارچوب محورهای ND، WD و TD استفاده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، بافت حاصل در مناطق مختلف SZ شبیه به بافت برشی ساده است. با مقایسه تصاویر قطبی به دست آمده از نمونه‌ها و موقعیت ایده‌ال اجزای بافت برشی در تصویر قطبی استاندارد صفحات {111} دیده می‌شود که بافت ناحیه همزده عمدتاً از اجزای A_1^* و A_2^* تشکیل شده است. همچنین دیده می‌شود که شدت بافت به دست‌آمده برای نمونه جوشکاری‌شده با سرعت چرخشی 800 دور بر دقیقه بیشتر از 400 دور بر دقیقه است. این رفتار مربوط به تفاوت میزان کرنش اعمالی در حین جوشکاری می‌باشد.

4- نتیجه‌گیری

تحولات ریزساختاری و بافت ورق‌های فولاد زنگ‌نزن آستنیتی در ناحیه اتصال شکل گرفته با روش FSW مطالعه شد. نتایج حاصل از آزمون EBSD نشان داد که در ناحیه TMAZ کسر بزرگی از مرزدانه‌های کوچک زاویه با وقوع فرآیند بازیابی دینامیکی توسعه یافت. اصلاح ریزساختاری شدیدی در اثر وقوع تبلور مجدد دینامیکی پیوسته در SZ هر دو نمونه مشاهده شد. تصویر قطبی صفحات {111} محاسبه‌شده نشان داد که اجزای بافت برشی ساده با چرخش ابزار در ناحیه همزده به وجود آمد. همچنین مطالعات بافتی شدت بیشتری برای تصاویر قطبی در نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی 800 دور بر دقیقه نشان داد.

منابع

[1] Mishra, R.S., Ma, Z.Y., “Friction stir welding and processing”, Materials Science and Engineering R, Vol. 50, pp. 1–7, 2005.
[2] Mishra, R.S., De, P.S., Kumar, N., Friction stir welding and processing, Springer, Switzerland, 2014..
[3] 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.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

[4] Humphreys, F.J., Hatherly, M., Recrystallization and related annealing phenomena, 2nd edition, Elsevier, Oxford, 2004.
[5] S. Kou, Welding metallurgy, 2nd Ed, John Wiley & Sons, New Jersey, 2003.
[6] 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.
[7] 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.
[8] 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.
[9] 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.
[10] Meran, C., Canyurt, O.E., "Friction Stir Welding of austenitic stainless steels", Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 43(1), pp. 432-439, 2010.
[11] 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.
[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] 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.
[16] S. Mironov, Y.S. Sato, H. Kokawa, "Microstructural evolution during friction stir-processing of pure iron", Acta Materialia, Vol. 56, pp. 2602–2614, 2008.
[17] A. Dehghan-Manshadi, H. Beladi, M.R. Barnett and P.D. Hodgson, "Recrystallization in 304 Austenitic Stainless Steel", Journal of Materials Science Forum, Vol. 467–470, pp. 1163–1168, 2004.
[18] H. Mirzadeh, J.M. Cabreraa, A. Najafizadeh, P.R. Calvillo, "EBSD study of a hot deformed austenitic stainless steel", Materials Science and Engineering A, Vol. 538, 236– 245, 2012.
[19] D. Jorge-Badiola, A. Iza-Mendia, I. Gutierrez, "Study by EBSD of the development of the substructure in a hot deformed 304 stainless steel", Materials Science and Engineering A, Vol. 394, 445–454, 2005.
[20] R.W. Fonda, K.E. Knipling, "Texture development in friction stir welds", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 16(4), 288–294, 2011.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]