Archive of SID

نشیریه ی مهندسی متالوژی و مواد

سال بیست و هفتم، شماره دو، ۱۳۹٥

## AISI ۳۱٦ تحولات ریزساختاری در طی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۱٦ به فولاد کم کربن Str۷ \*

اميرحسين خسرواني نژاد<sup>(۱)</sup> مرتضى شمعانيان<sup>(۲)</sup> احمد رضائيان<sup>(۳)</sup> مسعود عطاپور<sup>(٤)</sup>

### چکیدہ

در این مقاله به بررسی تحولات ریزساختاری اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۱۶ به فولاد کم کرین Strv جوشکاری شده با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداخته شده است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با سرعت چرخشی ۲۰۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۵۰ میلیمتر بر دقیقه انجام شد. بررسیهای فازی توسط آزمون پراش اشعه ایکس و آزمون طیف سنجی اشعه ایکس و بررسیهای ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. نتایج بررسیهای فازی در مرز اتصال شواهدی از تشکیل کاربید و ترکیبات بین فلزی را نشان نداد. بررسیهای ریزساختاری نیز نشان داد که بیشترین میزان کاهش اندازه دانهها، در ناحیه اغتشاشی سمت فولاد زنگ نزن آستنیتی رخ میدهد که دلیل آن تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته ناشی از تغییر شکل شدید همراه با دمای بالا در این ناحیه می باشد.

**واژه های کلیدی** جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی؛ اتصال غیرمشابه؛ فولاد زنگ نزن اَستنیتی؛ فولاد کم کربن.

#### Microstructural Evolution during Friction Stir Welding of Austenitic Stainless Steel AISI 316 to Low Carbon Steel St 37

A.H. Khosrovaninezhad M. Shamanian A. Rezaeian M. Atapour

#### Abstract

The microstructural evolution of dissimilar joining of austenitic stainless steel AISI 316 and low carbon steel St37 by friction stir welding has been investigated. Friction stir welding was carried out using a rotational speed of 600 rpm and a linear speed of 50 mm/min. The microstructure was characterized using a scanning electron microscope and optical microscopy. Also, possible phase transformations were determined using X-ray diffraction technique & electron diffraction spectroscopy. The results of phase investigations showed that no carbides and brittle phases were detected at the joined boundary. Microstructural investigations showed that the highest decrease in grain size occurred in the stir zone of the austenitic stainless steel which was attributed to discontinuous dynamic recrystallization caused by severe deformation imposed at high temperatures in this region.

Key Words friction stir welding; dissimilar joint; austenitic stainless steel; low carbon steel.

<sup>\*</sup>نسخهی نخست مقاله در تاریخ ۹۲/۹/۲۸ و نسخهی پایانی آن در تاریخ ۹۳/۱۰/۱٤ به دفتر نشریه رسیده است.

<sup>(</sup>۱) نویسنده مسئول : دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان.

<sup>(</sup>۲) استاد دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان.

<sup>(</sup>۳) استادیار دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان.

<sup>(</sup>٤) استادیار دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان.

تحولات ریزساختاری در طی جوشکاری...

[6]. این روش ابتدا برای ایجاد اتصال فلزات سبک مانند آلومینیوم و منیزیم مورد استفاده قرار گرفت [7]. اما در سال های اخیر از این روش برای ایجاد اتصال فلزات با نقطه ذوب بالا مانند تيتانيم، نيكل و فولاد نيـز استفاده شده است [8]. فاضل و همكاران اتصال لب رو لب جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSLW) تیتانیم خالص تجاری به فولاد زنگ نزن ۳۰۶ را بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که درحالتی که فولاد زنگ نـزن به عنوان لايه بالايي انتخاب شود، استحكام قابل قبول و نزدیک به استحکام تیتانیم خالص تجاری بدست مي آيد [8,9]. واتاناب و همكارانش اتصال غيرمشابه آلیاژ آلومینیوم– منیزیم به فولاد را بررسی کردنـد. آنهـا توانستند حداکثر استحکام کششی حدود ۸۲٪ استحکام آلیاژ آلومینیـوم- منیـزیم را بدسـت آورنـد. حـداکثر استحکام در حالتی بدست آمـد کـه آلیـاژ آلومینیـوم-منیزیم، بهعنوان فلز نرمتر، در سمت پسرو (retreating side) قرار داشت. آنها دریافتنـد در صـورتی کـه آلیـاژ آلومينيوم- منيزيم در سـمت پيشـرو (advancing side) قرار گیرد، ایجاد اتصال غیر ممکن است [10]. جعفرزادگان و همکاران نیـز خــواص مکـانیکی و ریزساختار اتصال غیرمشابه فـولاد زنـگ نـزن ۳۰٤ بـه فولاد کم کربن Strv را بررسی نمودند. آنها گزارش کردند که پدیده تبلور مجدد در فولاد ۳۰٤ و فولاد Strv باعث کاهش قابل ملاحظه اندازه دانه و در نتیجه افزایش سختی و استحکام در ناحیـه جـوش مـیشـود [11]. از این رو، هدف از این تحقیق ایجاد اتصال بین فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۱٦ و فولاد کم کربن Strv و بررسی تحولات ریزساختاری اتصال میباشد.

### مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از فولاد زنگ نـزن آسـتینیتی AISI ۳۱۹ و فولاد کم کربن Strv به عنوان فلزات پایه استفاده شد که در جدول (۱) ترکیب شـیمیایی آنها آورده شـده است. مقدمه

اتصالات غیرمشابه بین فولادهای زنگ نزن آستنیتی و فولادهای کمکربن در بسیاری از کاربردهای دما بالا مانند خطوط بخار نیروگاهها، مبدلهای حرارتی، رآکتورهای هستهای و صنایع پتروشیمی کاربرد دارد. در این کاربردها بخشهایی از قطعه که در معرض دماهای پایین هستند، از فولاد کم کربن و بخشهایی که در دماهای بالاتر قرار دارند، از فولاد زنگ نزن آستنیتی ساخته میشوند [1]. دلیل استفاده از فولادهای کم کربن این است که در زیر دما و فشار معین، این فولادها به خوبی عمل نموده و از نظر اقتصادی نیز نسبت به فولادهای زنگ نزن مقرون به صرفه تر می-باشند [2].

تاکنون محققین زیادی به بررسی این اتصالات غیرمشابه با استفاده از انواع روش های جوشکاری مانند: جوشکاری قوسی تنگستن-گاز (GTAW) [1,3]، جوشکاری نقطهای مقاومتی (RSW) [4]، جوشکاری اصطکاکی (FW) [3]، جوشکاری نقطهای لیزر (LSW) [5] و جوشکاری پرتو الکترونی (EBW) [3] پرداخته-اند. در این تحقیقات، تحولات ریزساختاری، خواص مکانیکی و خواص خوردگی اتصال مورد ارزیابی قرار گرفته است.

تحقیقات انجام شده نشان میدهد که تغییرات متالورژیکی ایجاد شده سبب تشکیل فاز فریت دلتا، فاز سیگما و خوردگی مرزدانهای در فصل مشترک جوش شده و جدایش عناصر آلیاژی در حین انجماد را بدنبال دارد. علاوه براین، بدلیل تفاوت در ضریب انبساط و هدایت حرارتی، تنش حرارتی زیادی در اتصال غیرمشابه بوجود میآید. عیوب ذکر شده مربوط به حضور فاز مذاب در محل اتصال میباشد. اخیراً برای رفع این مشکلات، تحقیقات زیادی روی روش های ایجاد اتصال حالت جامد صورت گرفته است.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) یکی از انواع جدید جوشکاری حالت جامد است که توسط انجمن جوشکاری (TWI) در سال ۱۹۹۱ اختراع شد

برای انجام جوشکاری، ورقهایی از فلزات پایه با ابعاد ٦ سانتي متر در ١٠ سانتي متر و با ضـخامت ١/٥ میلیمتر آماده سازی و اتصال بصورت لب به لب انجام شد. ابزار جوشکاری از جنس آلیاژ تنگستنی رنیومدار با پین مخروط ناقص در نظر گرفته شد. ابزار جوشکاری دارای قطر شانه ۱٦ میلی متر ، طول پین ۱/۲۵ میلی متر، قطر قسمت بالای پین ٤/٥ میلی متر و قطر قسمت پایین پین ۳/۵ میلیمتر بود. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از دستگاه فرز و با سرعت چرخشی ۲۰۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۵۰ میلیمتر بر دقیقه انجام شد. در این تحقیق و با توجه به استحکام بالاتر فولاد ۳۱٦ نسبت به فولاد Strv، فولاد ۳۱٦ در سمت پسرو و فولاد ۳۱٦ در سمت پیشرو قرار داده شد. تحقیقات نشان میدهد که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی سمت پیشرو دمای بالاتری را تجربه میکند. بنابراین، برای دستیابی به سیلان یکسانی از مواد در محل اتصال، فلز با استحكام بالاتر در سمت پيشرو قرار داده می شود [10,12,13]. جهت حفاظت از منطقه جوش در حین جو شکاری، دمش گاز آرگون با دبی حدود ۱۸ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شـد. در شـکل (۱) سطح ظاهری نمونه جوش آورده شده است. همانطور که ملاحظه میشود، سطح جـوش عـاری از

۳۷

عیب میباشد. بررسی مقطع عرضی نمونه جوشکاری شده نیز عدم وجود عیب را نشان داد. دما در خط مرکزی اتصال و در سطح زیری ورق های جوشکاری شده با استفاده از ترموکوپل نوع K انعطاف پذیر اندازه گیری شد. بیشترین دما در این ناحیه ۹۵۰ درجه سانتی گراد بدست آمد.

بررسی ریزساختار مناطق مختلف در دو مرحله صورت گرفت. ابتدا سمت فولاد کم کربن Strv توسط محلول نایتال ۲٪ و سپس سمت فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۱٦ بصورت الکترولیتی در محلول آستنیتی ۲۱۰ AISI بصورت الکترولیتی در محلول مدت زمان ۱۰-۵ تانیه اچ و بررسی گردید. پس از آماده سازی نمونهها، اندیابی ریزساختاری با میکروسکوپ نوری -NIKON NIKON و میکروسکوپ الکترونی روبشی -ارزیابی ریزساختاری با میکروسکوپ الکترونی روبشی -ارزیابی میکروسکوپ الکترونی روبشی -سنجی اشعه ایکس میکروسکوپ الکترونی روبشی سنجی اشعه ایکس میکروسکوپ الکترونی روبشی تشکیل شده در محل اتصال با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس Philips – XPERT MPD انجام شد. پرتو ایکس ۲۰KV و ۳۰۰۳) انجام شد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فلزات پایه (درصد وزنی)

Fe	Si	Mn	Мо	Ni	Cr	С	-
بقيه	•/1٦	•/97	٠/٠١	•/•٢	•/• \	•/•٩	Strv
بقيه	•/7٨	١/١	۲/٥٩	11/V	۱٦/٣	•/•0	۳۱٦



شکل ۱ سطح نمونه جو شکاری شده



شکل ۲ الگوی پراش اشعه ایکس نمونه جوشکاری شده

مربوطه نيست، در محل آناليز طيف سنجي اشعه ايكس (EDS) انجام شد شکل (۳). همانطور که در شکل دیده می شود، فولاد Strv در سمت چپ و فولاد ۳۱٦ در سمت راست فصل مشترک قرار گرفتهاند. برای بررسی نفوذ عناصر در عرض فصل مشترک و بررسے احتمال تشكيل كاربيدها و تركيبات بين فلـزى، أنـاليز اسکن خطی و نقطهای انجام شد. آزمون طیف سـنجی اشعه ایکس، توزیع عناصر آهن، کُرم، نیکل و مولیبدن را در عرض فصل مشترک نشان می دهد. مشاهده می -شود که با حرکت از سمت فولاد Strv به سمت فولاد ۳۱٦، درصد وزنی عناصر کُرم، نیکل و مولیبدن افزایش و درصد وزنی آهن کاهش می یابد. نتایج نشان می دهـد در فصل مشترک اتصال، به دلیل بالا رفتن دما حین جوشكاري، نفوذ عناصر آلياژي اتفاق افتاده است اما تمرکز عناصر آلیاژی برای تشکیل کاربید و یا سایر محصولات بین فلزی وجود ندارد. بنابراین، به نظر می-رسد که کاربید و یا ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک اتصال تشکیل نشده است. دلیل عدم تشکیل کاربید و ترکیبات بین فلزی این است که تشکیل این فازها در محل اتصال نیاز به قرار گیری در دمای بالا برای مدت زمان طولانی دارد که این شرایط در جوشكاري اصطكاكي اغتشاشي فولادها مهيا نمي باشد. محققان نيز در زمينه جوشكاري اصطكاكي اغتشاشي

# نتایج و بحث *تشکیل و توزیع فازها*

برای بررسی احتمال تشکیل کاربیدها و ترکیبات بین فلزی در محل اتصال، آنالیز پرتو اشعه ایکس (XRD) انجام شد که در شکل (۲) آورده شده است. با توجه به بالا رفتن دما، احتمال تشكيل فازها و تركيبات بين فلزی در محل اتصال زیاد بود. اما همانطور که در شکل (۲) دیده می شود، نتیجه پراش پرتو ایکس برای نمونههای مختلف حاکی از عدم تشکیل فازها و ترکیبات بین فلزی بوده و تنها پیکهای شناسایی شده مربوط به فازهای فریت و آستنیت میباشد. به نظر می-رسد، با وجود بالا رفتن دما حين جوشكارى، بدليل سرد شدن سریع محل اتصال، فاز دیگری غیر از آستنیت و فریت تشکیل نشده است. این در حالی است که تحقیقات صورت گرفته در زمینه اتصالات ذوبی بین فولادهای کربنی و فولادهای زنگ نزن آستنیتی، تشکیل کاربیدها و فازهای ترد را در محل اتصال نشان میدهند [1,3]. همچنین، تشکیل کاربیدهای غنی از کُرم در برخی از فرایندهای حالت جامد مانند اتصال نفوذی و جوشکاری اصطکاکی نیز گزارش شده است .[14,15]

به منظور بررسی دقیق تر محل اتصال و با توجه به اینکه اگر مقدار فاز تشکیل شده کمتر از ۵٪ باشد، دستگاه آنالیز پراش پرتو ایکس قادر به شناسایی فاز

۱

همانگونه که در این شکل مشاهده می شود، در ناحیه اغتشاشی ساختار پوست پیازی (onion ring) که معمولاً در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومينيوم ديده مي شود، وجود ندارد. تحقيقات نشان میدهد که پوست پیازیها بدلیل یک تغییر شدید در اندازه دانهها و یا تغییر شدید در دانسیته رسوبات در ناحیه اغتشاشی بوجود میآیند [6]. با این وجود، در زمينه فولادها، تشكيل ناحيه يوست ييازي گزارش نشده است [11,17]. دلیل عدم تشکیل این ناحیه در فولادها میتواند مربوط به استحالههای چند شکلی (allotropic) در طی سرد شدن باشد [11,16].

شکل (٥) دیاگرام فازی آهن-کـربن و تغییـرات ریزساختاری مربـوط بـه فـولاد کـم کـربن St۳۷ را در دماهای مختلف نشان می دهد.



	WL. %						
	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4			
Fe	92.9	83.1	66.3	64.1			
Cr	2.4	8.4	16.8	18.5			
Ni	2.8	6.8	13.2	13.3			
Mo	1.9	1.8	3.5	4.7			

شکل ۳ آنالیز طیف سنجی اشعه ایکس خطی و نقطهای در طول فصل مشترک اتصال در ناحیه SZ



شکل ٤ تصویر با بزرگنمایی کم از مقطع عرضی نمونه جوشکاری شده



AISI ۳۱٦

شکل (٦) نیز نمودار شبه دوتایی سیستم آهـن-کُرم-نیکل در ۲۰٪ آهن و تغییرات ریزساختاری مربوط به فلز پایه، ناحیه متاثر از فرایند ترمومکانیکی و ناحیـه اغتشاشی برای فولاد ۲۱٦ AISI را نشان میدهد.

دقت شود که دیاگرامهای نشان داده شده در شکل (۵ و ٦) دیاگرامهای تعادلی میباشند. این در حالی است که در فرایند جوشکاری بدلیل سرعت سریع گرمایش و سرمایش محل اتصال، استحالهها به صورت غیرتعادلی رخ میدهند. لذا دیاگرامها تنها برای بررسی استحالههای احتمالی که در دماهای مختلف انجام میشوند آورده شده است. در ادامه، نواحی مختلف ریزساختاری مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

### فلزات يايه

شکل (۷) الف تصویر میکروسکوپ نوری از فلز پایه فولاد Strv را نشان میدهد. فولاد Strv دارای زمینه فریتی (F) با میانگین اندازه دانه ۱۶ میکرومتر و حدود ۵٪ پرلیت (P) میباشد. در این تصویر، دانههای فریت با رنگ روشن و دانههای پرلیت به رنگ تیره دیده می-شوند. شکل (۷) ب نیز تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی این فلز پایه را نشان میدهد. در این تصویر زمینه فریتی به صورت تیره و دانههای پرلیت با رنگ روشن مشخص شده است.





شکل ۷ تصاویر میکروسکوپ الف) نوری و ب)الکترونی، مربوط به ریزساختار فلزپایه فولاد Strv

شکل (۸) الف و ب به ترتیب تصویر میکروسکوپ نوری و الکترونی از فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۱٦ را نشان میدهد. فلز پایه شامل دانههای آستنیت (A) هم محور با میانگین اندازه دانه ۳۲ میکرومتر می باشد. در این تصاویر، دانههای فریت (F) کشیده شده در جهت نورد نیز دیده می شوند .

## ناحیه متاثر از حرارت (HAZ) در سمت فولاد Strv

ناحیه متاثر از حرارت در طی FSW دچار هیچ گونه تغییر شکلی نمی شود، بنابراین مشابه ناحیه متاثر از حرارت در جوشکاری ذوبی است. با این وجود، در FSW بدلیل حرارت های ورودی کمتر، تغییرات متالورژیکی کمی در HAZ بوجود می آید. به همین دلیل ناحیه HAZ یک ناحیه باریک می باشد که در شکل (٤) نشان داده شده است. همان طور که در شکل (٩) دیده می شود، ناحیه KAZ دارای دو ناحیه ریز ساختاری مجزا می باشد که در ادامه شرح داده می

شکل (۱۰) ناحیه HAZ 1 را نشان میدهد. در این ناحیه که در نزدیکی فلز پایه St۳۷ میباشد، دانـه-

های پرلیت درشت در زمینه فریت اولیه دیده می شود. طبق دیاگرام فازی آهن-کربن شکل (۵)، این ناحیـه در معرض دمای نزدیـک بـه A۱ قـرار گرفتـه و بـه دلیـل افزایش دما، سرعت نفوذ کربن افزایش یافته و در نتیجه دانههای پرلیت اولیه رشد کردهاند.



شکل ۸ تصاویر میکروسکوپ الف)نوری و ب) الکترونی، مربوط به ریزساختار فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۱٦



شکل ۹ تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار ناحیه HAZ در سمت فولاد Strv



شکل ۱۰ تصویر میکروسکوپ الف) نوری و ب) الکترونی، از ریزساختار ناحیه HAZ 1

شکل (۱۱) قاحیه 2 HAZ را نشان میدهد. در جوشکاری ذوبی به این ناحیه، ناحیه HAZ ریزدانه جزئی گفته میشود. طبق دیاگرام فازی آهن-کربن شکل (۵) این ناحیه در معرض دمای بین A و A قرار می گیرد. در این ناحیه دانههای پرلیت به آستنیت استحاله یافته و کمی به داخل دانههای فریت اولیه رشد میکنند. سپس در طی سرد شدن، آستنیت به دانههای بسیار ریز فریت و پرلیت تبدیل می شود. در این محدوده دمایی، دانههای فریت اولیه تحت تاثیر قرار نمی گیرند. تحقیقات انجام شده در زمینه جوشکاری ذوبی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولادها، تشکیل این ناحیه را گزارش کردهاند [11,16,18].

در این تحقیق، ناحیه متاثر از حرارت در سمت فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱٦ به عنوان یک ناحیه مجزا مشاهده نشد. دلیل عدم مشاهده این ناحیه در فولادهای زنگ نزن آستنیتی میتواند مربوط به میزان رسانایی حرارتی کم این فولادها در مقایسه با سایر فولادها باشد. رسانایی حرارتی کم سبب میشود که حرارت نسبتاً کمی به خارج از ناحیه جوش انتقال یافته و در نتیجه نواحی اطراف جوش تحت تاثیر حرارت کمتری

تحولات ریزساختاری در طی جوشکاری...

قرار گیرند. بدین ترتیب، تغییرات ریزساختاری بسیار کمی در نواحی اطراف جوش اتفاق افتاده و تشخیص آن به عنوان یک ناحیه مجزا بسیار دشوار میشود. تحقیقات صورت گرفته در زمینه FSW فولادهای زنگ نون آستنیتی نیز نتایج مشابهی را نشان می دهد [11,17].



شکل ۱۱ تصویر میکروسکوپ الف) نوری و ب) الکترونی، از ریزساختار ناحیه HAZ 2.

# ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی ( TMAZ) در سمت فولاد ۳۱٦

ناحیه TMAZ ناحیه ای بسیار باریک، بین فلز پایه فولاد ۳۱۲ و ناحیه اغتشاشی در سمت فولاد ۳۱۲ می باشد شکل (٤). شکل (۱۲) ریز ساختار این ناحیه را نشان می دهد که شامل دانه های آستنیت تغییر شکل یافته است. مواد در ناحیه TMAZ نسبت به ناحیه اغتشاشی، دماها و کرنش های کمتری را تجربه می کنند. بنابراین، به نظر می رسد که در این ناحیه بازیابی دینامیکی عامل تغییر شکل دانه ها است. تحقیقات انجام شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، چگالی بالایی از نابجایی ها و مرزهای فرعی در این ناحیه را نشان می دهد که ویژگی بازیابی دینامیکی است

.[11,17,19]

همانطور که بیان شد، ناحیه TMAZ در نزدیکی ناحیه SZ قرار دارد. با حرکت از سمت ناحیه TMAZ به سمت ناحیـه SZ انتظار مـیرود کـه بـدلیل وجـود مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی در ناحیه SZ، ریزساختاری با دانه های آستنیت تبلور مجدد یافته مشاهده شود. بنابراین، شروع ناحیه SZ می تواند شواهدی از مکانیزم تبلور مجدد در این ناحیه را نشان دهد. در شکل (۱۳) تصویری از مرز ناحیـه TMAZ و ناحیه SZ آورده شده است. در این تصویر، دانه های ریز آستنیت در مرزدانههای آستنیت اولیه دیده می شود. در این ناحیه نابجاییها در مرزدانهها تجمع یافته و از محل تجمع نابجاییها در مرزدانهها، جوانهزنی و رشد دانههای جدید آستنیت اتفاق افتاده است. این تجمع نابجایی ها در مرزدانه ها و جوانهزنی و رشد دانه های جدید، شاهدی از مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته است که برای فلزات با انرژی نقص چیدن کم مانند فولادهای زنگ نزن آستنیتی پیشنهاد شده است .[16,20,21]



شکل ۱۲ تصویر میکروسکوپ الف) نوری و ب) الکترونی، از ریزساختار ناحیه TMAZ در سمت فولاد ۳۱۹ ناحیـه TMAZ در سـمت فـولاد Strv مشـاهده

نشد. عدم تشکیل این ناحیه در سمت فولاد Strv می-

تواند مربوط به تغییر استحالههای چند شکلی در طی سیکل سرد شدن باشد که سبب تخریب ویژگیهای بازیابی دینامیکی میشود [11].

## ناحیه اغتشاشی (SZ)

ناحیه اغتشاشی یکی از نواحی اصلی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی محسوب میشود. مواد در این ناحیه، تغییر شکل بسیار شدید همراه با حرارت نسبتاً بالایی را تجربه میکنند. این تغییر شکل و حرارت بالا زمینه را برای وقوع پدیده تبلور مجدد فراهم میسازد. در این ناحیه دانههای ریزتبلور مجدد یافته مشاهده میشود. تحقیقات نشان میدهد که مکانیزم تبلور مجدد انرژی نقص چیدن بالا مانند آلیاژهای آلومینیوم و فولادهای فریتی، مکانیزم تبلور مجدد غالب، مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی پیوسته است. این در حالی است فولادهای زنگ نون آستنیتی، مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته بهعنوان مکانیزم غالب معرفی شده دینامیکی ناپیوسته بهعنوان مکانیزم غالب معرفی شده است [16,20,21].



شکل ۱۳ تصویر میکروسکوپ الف) نوری و ب) الکترونی، از مرز بین ناحیه TMAZ و SZ در سمت فولاد ۳۱٦

*الف) ناحیه اغتشاشی (SZ) در سمت فولاد Strv* را شکل (۱٤) ناحیه اغتشاشی در سمت فولاد Strv را نشان می دهد. دیاگرام فازی آهن-کربن شکل (۵) نشان می دهد که این ناحیه تا دمای بالاتر از A حرارت می-بیند. در نتیجه، ریز ساختار فریتی-پرلیتی به ریز ساختار آستنیتی تبدیل می شود. در طی سیکل سرد شدن جوش، در محدودهی دمایی بین دمای A و A، دانه-های فریت در مرز دانه های آستنیت اولیه تشکیل می-شوند. در ادامهی سیکل سرد شدن و در زیر دمای A، آستنیت باقیمانده به فریت تبدیل می شود. به نظر می-جوشکاری، پرلیت زمان کافی برای جوانه زنی و رشد داشته است.



شکل ۱٤ تصاویر میکروسکوپ الف) نوری و ب) الکترونی، از ریزساختار ناحیه SZ در سمت فولاد St۳۷

در این ناحیه، پدیده تبلور مجدد به ریز شدن دانهها کمک میکند. میانگین اندازه دانهها در این ناحیه به ۹/۱ میکرومتر کاهش مییابد. با توجه به اینکه دما به بالاتر از A3 میرسد و ریزساختار آستنیتی تشکیل میشود، در حین تغییر شکل، تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته در این ناحیه اتفاق میافتد. با این وجود گزارش شده است که تغییر فازهای صورت گرفته در

تحولات ریزساختاری در طی جوشکاری...

طی سیکل سرد شدن، ویژگیهای تبلور مجدد دینامیکی در این ناحیه را از بین میبرد [11,16].

ب) ناحیه اغتشاشی (SZ) در سمت فولاد ۳۱۲. شکل (۱۵) ناحیه اغتشاشی در سمت فولاد ۳۱۶ را نشان میدهد. بدلیل تغییر شکل شدید و دمای بالا، دانههای آستنیت در ایـن ناحیـه تحـت تبلـور مجـدد دینامیکی قرار می گیرند. همانطور که اشاره شد، بـدلیل اینکه فولادهای زنگ نزن آستنیتی، انرژی نقص چیدن کمی دارند، تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته در این ناحیه رخ میدهد. نمودار شبه دوتایی سیستم آهـن-کُرم-نیکل در ۷۰٪ آهن شکل(٦) نشان میدهد که بر خلاف فولاد Strv، در فولاد ۳۱٦ هیچگونه تغییر فازی پس از جوشکاری اتفاق نمیافتد. میانگین اندازه دانهها در این ناحیه به ٤/٩ میکرومتر کاهش مییابد. بـه نظـر میرسد که به همین دلیل فرایند تبلور مجدد در این ناحیه بطور کامل انجام شده و اندازه دانه های آستنیت نسبت به سـمت فـولاد Strv كـاهش بيشـتري داشـته است. جعفرزادگان و همکاران نیز گزارش کردهاند کـه اندازه دانهها در سمت فولاد زنگ نزن آستنیتی نسبت به سمت فولاد كم كربن، كاهش بیشتری داشته است .[11]



شکل ۱۵ تصاویر میکروسکوپ الف) نوری و ب) الکترونی، از ریزساختار ناحیه SZ در سمت فولاد ۳۱٦

٤٤

بين فلزي مي تواند مربوط به مدت زمان بسيار كم طبق بررسی های فازی در فصل مشترک اتصال، با ورارگیری در دمای بالا باشد. ناحیه اغتشاشی در سمت وجود اینکه نفوذ عناصر آلیاژی اتفاق افتاده است، اما فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ بیشترین کاهش اندازه دانه را نشان داد که دلیل آن تبلور مجدد دینامیکی ناشبی از

نتيجه گيري

هیچگونه شواهدی از تشکیل کاربیـد و ترکیبـات بـین فلزی مشاهده نشد. دلیل عدم تشکیل کاربید و ترکیبات تاثیر همزمان تغییر شکل شدید و دمای بالا می باشد.

مراجع

- 1. Celik, A., Alsaran, A., "Mechanical and Structural Properties of Similar and Dissimilar Steel Joints", Materials Characterization, Vol. 43, pp. 311-318, (1999).
- 2. Lippold, J.C., Kotecki, D.J., "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels", Wiley-Interscience, (2005).
- 3. Arivazhagan, N., Singh, S., Prakash, S., Reddy, G.M., "Investigation on AISI 304 Austenitic Stainless Steel to AISI 4140 low Alloy Steel Dissimilar Joints by Gas Tungsten Arc, Electron Beam and Friction Welding", Materials & Design, Vol. 32, pp. 3036-3050, (2011).
- 4. Marashi, P., Pouranvari M., Amirabdollahian S., Abedi A., Goodarzi M., "Microstructure and Failure Behavior of Dissimilar Resistance Spot Welds Between low Carbon Galvanized and Austenitic Stainless Steels", Materials Science and Engineering A, Vol. 480, pp. 175-180, (2008).
- 5. Torkamany, M.J., Sabbaghzadeh J., Hamedi M.J., "Effect of Laser Welding Mode on the Microstructure and Mechanical Performance of Dissimilar Laser Spot Welds Between Low Carbon and Austenitic Stainless Steels", Materials & Design, Vol. 34, pp. 666-672, (2012).
- 6. Mishra, R.S., Ma Z.Y., "Friction Stir Welding and Processing", Materials Science and Engineering R, Vol. 50, pp. 1-78, (2005).
- 7. Thomas, W.M., Threadgill, P.L., Nicholas E.D., "Feasibility of Friction Stir Welding Steel", Science and Technology of Welding & Joining, Vol. 4, pp. 365-372, (1999).
- 8. Fazel-Najafabadi, M., Kashani-Bozorg S.F., Zarei-Hanzaki A., "Joining of CP-Ti to 304 stainless steel using friction stir welding technique", Materials & Design, Vol. 31, pp. 4800-4807, (2010).
- 9. Fazel-Najafabadi, M., Kashani-Bozorg, S.F., Zarei-Hanzaki A., "Dissimilar lap joining of 304 stainless steel to CP-Ti employing friction stir welding", Materials & Design, Vol. 32, pp. 1824-1832, (2011).
- 10. Watanabe, T., Takayama, H., Yanagisawa, A., "Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 178, pp. 342-349, (2006).
- 11. Jafarzadegan, M., Feng, A.H., Abdollah-zadeh, A., Saeid, T., Shen, J., Assadi, H., "Microstructural Characterization in Dissimilar Friction Stir Welding Between 304 Stainless Steel and st37 Steel", Materials Characterization, Vol. 74, pp. 28-41, (2012).
- 12. Chung, Y.D., Fujii, H., Sun, Y., Tanigawa, H., "Interface Microstructure Evolution of Dissimilar

Friction Stir butt Welded F82H Steel and SUS304", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, pp. 5812-5821, (2011).

- Bang, H., Bang, H., Jeon, G., Oh, I., Ro, C., "Gas Tungsten Arc Welding Assisted Hybrid Friction Stir Welding of Dissimilar Materials Al6061-T6 Aluminum Alloy and STS304 Stainless Steel", *Materials & Design*, Vol. 37, pp. 48-55, (2012).
- 14. Kurt, B., "The Interface Morphology of Diffusion Bonded Dissimilar Stainless Steel and Medium Carbon Steel Couples", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 190, pp. 138-141, (2007).
- Hascalik, A., Unal E., Ozdemir, N., "Fatigue Behaviour of AISI 304 steel to AISI 4340 Steel Welded by Friction Welding", *Journal of Materials Science*, Vol. 41, pp. 3233-3239, (2006).
- Lienert, T. J., Grimmett, B.B., Warke, R.W., "Friction Stir Welding Studies on Mild Steel", *Welding Journal*, Vol., pp. 1-9, (2003).
- Park, S.H.C., Sato, Y.S., Kokawa, H., Okamoto, K., Hirano, S., 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).
- 18. Kou S., "Welding metallurgy", Cambridge Univ Press, (2002).
- 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).
- 20. Rollett, A., Humphreys, F.J., Rohrer, G.S., "Recrystallization and Related Annealing Phenomena", *Elsevier Science*, (2004).
- Saeid, T., Abdollah-zadeh, A., Assadi, H., Malek, Ghaini F., "Effect of Friction Stir Welding Speed on the Microstructure and Mechanical Properties of a Duplex Stainless Steel", *Materials Science and Engineering*: A, Vol. 496, pp. 262-268, (2008).