نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال چهارم، شماره 1، بهار و تابستان1397، صفحه 54-43

تاثیر حرارت ورودی بر خواص ساختاری و مکانیکی محل اتصال فولاد زنگ نزن دوفازی 2205

مجید طاووسی[1*]، سجاد ارجمند[2]، سعید سلگی[2]

۱- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر

۲- دانشکده مهندسی مواد، موسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو، اصفهان، ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۰۷ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۲۹)

چکیده

بررسی تاثیر حرارت ورودی و عملیات پیش‌گرم بر خواص ناحیه‌ی اتصال فولاد زنگ نزن دو فازی ۲۲۰۵، جوشکاری شده توسط فرایند جوشکاری GTAW هدف اصلی از انجام این تحقیق است. در این ارتباط عملیات جوشکاری با بهره گیری از فلز پر کننده ER2209، در حرارت‌های ورودی ۰/۶ الی ۱/۴ کیلوژول بر میلی‌متر و با پیش‌گرمایش‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شد. بررسی های ریزساختاری و فازی نمونه‌های حاصل توسط پراش‌سنج پرتوایکس و میکروسکپ الکترونی روبشی صورت گرفت. بررسی ها نشان داد که ساختار حاصل از جوشکاری در نمونه‌ها شامل فازهای آستنیت ویدمن اشتاتن و فریت می‌باشد که فاز آستنیت از مرزدانه‌های فریت جوانه‌زنی نموده و به سمت مرکز دانه‌ها گسترش یافته است. با افزایش حرارت ورودی، از درصد فاز فریت کاسته و بر درصد فاز آستنیت افزوده می‌شود. در این مورد بیشترین مقدار استحکام و انعطاف‌پذیری مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده با حرارت ورودی متوسط (۱ کیلوژول بر میلی‌متر) می‌باشد. بررسی مقاومت به خوردگی نمونه ها نشان از تاثیر ناچیز حرارت ورودی بر مقاومت خوردگی محل اتصال داشت. همچنین مشخص شد که عملیات پیش‌گرمایش تاثیر نامطلوبی بر خواص مکانیکی محل اتصال دارد.

کلمات کلیدی: فولاد زنگ نزن دوفازی، حرارت ورودی، جوشکاری GTAW، خواص مکانیکی اتصال.

The Influence of Heat-Input on Structural and Mechanical Properties of 2205 Duplex Stainless Steel

M. Tavoosi[*1], S. Arjomand[2], S. Solgi[2]

1.Department of Mechanical Science, Malek-Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

2- Department of Materials engineering, DaneshpajoohanPishro Institute of Higher Education, Isfahan

(Received 28 June 2017 ; Accepted 20 November 2017)

Abstract

The influence of heat-input and pre-heat treatment on the structure, mechanical and corrosion behavior of 2205 duplex stainless steel joint by means of GMAW process was the goal of this study. In this regards, the welding process was

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: ma.tavoosi@gmail.com

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

done using different heat input in the range of 0.6 to 1.4 kJ/mm and different pre-heating treatments in the range of 25 to 100 oC. The microstructural properties of prepared samples were evaluated using x-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) techniques. Based on archived results, the microstructure of as-welded samples were combinations of Widmaneshtaten austenite which nucleated from boundaries and growth toward central part of ferrite grains.By increasing the heat-input, the percentages of ferrite and austenite phases decreased and increased, respectively. In this condition, the highest value of strength and ductility was achieved in as-weld samples with medium (1.0 kJ/mm)heat-input. The corrosion studies showed that the heat-input has negligible effects on corrosion behaviorof 2205 duplex stainless steel joint. It was also found that the pre-heating treatment has adverse effect on the mechanical properties of the junction.

Keywords: Duplex stainless steel, Heat-input, GTAW, Mechanical properties.

1- مقدمه

فولادهای زنگ‌نزن دوفازی فریتی- آستنیتی، آلیاژهایی بر پایه آهن، کرم و نیکل بوده، ساختار آن‌ها متشکل از دو فاز آستنیت و فریت (حاوی ۵۰ درصد فریت و ۵۰ درصد آستنیت) می‌باشد.این فولادها در سال ۱۹۳۰ میلادی به جامعه‌ی علمی معرفی شده و طی کمبودهای دوره‌ای نیکل در زمان جنگ جهانی دوم جایگاه برجسته‌ای را به خود اختصاص دادند. این آلیاژها از ویژگی‌های مفید هر دو نوع فولاد زنگ‌نزن آستنیتی و فریتی نظیر استحکام کششی و سختی بالا، مقاومت در برابر خوردگی، چقرمگی خوب حتی در دمای پایین و جوش‌پذیری مناسب برخوردار هستند [۲ و ۱]. این فولادها به دلیل دارا بودن درصد بالاتری از فاز فریت نسبت به فولادهای آستنینی، فرو مغناطیس بوده، از هدایت حرارتی بالاتر و انبساط حرارتی کمتری برخوردارند. این آلیاژها اغلب به دلیل مقاومت به خوردگی انتخاب می‌شوند و در بسیاری از کاربردها که خوردگی تنشی و حفره‌ای مهم می‌باشد، جایگزین فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی می‌شوند. از جمله موارد کاربردی فولادهای زنگ‌نزن دوفازی می‌توان به لوله‌های انتقال نفت وگاز در ساحل دریا یا درون دریا اشاره نمود [۲].

نتایج تحقیقات گذشته [۳ و ۴] در مورد جوشکاری فولادهای زنگ‌نزن دوفازی حاکی از آن است که خواص محل اتصال این فولادها، تحت تاثیر ترکیب شیمیایی فلز جوش و نرخ سرمایش قرار دارد. از جمله مشخصه‌های تاثیرگذار بر نرخ سرمایش در فرایند جوشکاری می‌توان به مقدار حرارت ورودی، پیش‌گرمایش و دماهای بین‌پاسی اشاره نمود. نرخ سرمایش بالا امکان شکل‌گیری درصد مناسبی از فاز آستنیت در ساختار را محدود نموده [۵]، نرخ سرمایش آهسته و زمان جوشکاری طولانی، باعث افزایش تجزیه اسپینودال کروم غنی از فریت (به نام تردی ۴۷۵ درجه سانتی‌گراد) و شکل‌گیری ترکیبات بین‌فلزی مضر مانند سیگما در ساختار می‌شود. بنابراین مقدار حرارت ورودی مورد استفاده برای جوشکاری فولادهای دوفازی و از جمله فولاد ۲۲۰۵، جهت رسیدن به ریزساختار و ویژگی‌های مکانیکی مطلوب و مقاومت به خوردگی مناسب، در محدوده ۰/۵ الی ۲/۵ کیلوژول بر میلی‌متر توصیه شده است [۶-۸]. البته در این رابطه گزارشات متعددی ارائه شده است که نشان از خواص برتر جوش در حرارت‌های ورودی بالاتر دارد.

به عنوان نمونه‌ای از این تحقیقات می‌توان به مطالعه‌ی پکارینن و کوجانپا [۹] در زمینه فرایند جوشکاری لیزر فولادهای زنگ نزن دوفازی با کنترل حرارت ورودی اشاره نمود. نتیجه این بررسی نشان داد که با ایجاد چرخه‌های حرارتی در روش جوشکاری لیزر، افزایش حرارت ورودی و به دنبال آن کاهش نرخ سرد شدن فلز جوش فراهم می‌گردد. در این حالت درصد فاز آستنیت افزایش می‌یابد و در مقادیر حرارت ورودی متوسط بهینه می‌گردد. ژانگ و همکاران [۱۰] نیز در تحقیقی به بررسی تاثیر مشخصات مختلف جوشکاری بر خواص مکانیکی و ریزساختاری فلز جوش و ناحیه متاثر از

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

حرارت فولادهای زنگ نزن دوفازی پرداخت. نتایج آزمون‌های مکانیکی به دست آمده موید این مطلب است که اتصال جوش قابل قبول با استفاده از حرارت ورودی ۲/۵کیلوژول بر میلی‌متر قابل حصول می‌باشد. در جوشکاری با حرارت ورودی ۲۰ کیلوژول بر میلی‌متر، به علت ایجاد فازهای ترد ثانویه در فصل مشترک فلز جوش- فلز پایه و نیز تمرکز تنش به واسطه شرایط خاص هندسه جوش، خواص مکانیکی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. در تحقیقی دیگر، تاثیر حرارت ورودی بر ریزساختار جوش غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن سوپر دوفازی به فولاد کم آلیاژ استحکام بالا انجام شده است [۱۱]. نتایج این تحقیق نیز نشان داد که ریزساختار منطقه‌ی جوش تحت تاثیر حرارت ورودی بوده و خواص مکانیکی با افزایش حرارت ورودی از ۰/۵ به ۲ کیلوژول بهینه می‌گردد.

علاوه بر بحث خواص مکانیکی، مطالعات حاکی از آن است که مقاومت به خوردگی محل اتصال فولادهای زنگ نزن دوفازی تحت تاثیر حرارت ورودی تغییر می‌کند. بررسی تاثیر حرارت ورودی بر جوشکاری فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی ۳۲۷۵۰ به روش قوس تنگستن- گاز بر ریزساختار و مقاومت به خوردگی فلز جوش [۱۲] نشان داد که با افزایش حرارت ورودی، فلز جوش نسبت به فلز پایه فعال‌تر شده و پتانسیل خوردگی کمتری از خود نشان می‌دهد. با این حال، فلز جوش دارای چگالی جریان روئین شدن کمتری نسبت به فلز پایه است. این مورد نشان دهنده مقاومت به خوردگی بالاتر فلز جوش نسبت به فلز پایه است. با وجود مطالعات گسترده در زمینه بررسی خواص مکانیکی و خوردگی فولاد زنگ نزن دوفازی [۸-۱۵]، کمتر تحقیقی به بررسی دقیق مشخصه‌های فرایند جوشکاری و به طور خاص تاثیر حرارت ورودی بر خواص مکانیکی و خوردگی فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵ پرداخته است. در این رابطه، در پژوهش حاضر تلاش بر این بوده تا عملیات جوشکاری قوس فلز- گاز روی فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ با استفاده از فلز پرکننده ER2209 و در پنج حرارت ورودی مختلف در محدوده ۰/۶ الی ۱/۴ کیلوژول بر میلی‌متر انجام و تاثیر دقیق حرارت ورودی و عملیات پیش‌گرمایش بر ریزساختار، خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی منطقه‌ی جوش این فولاد، مورد ارزیابی واقع شود.

2- روش تحقیق

در این پژوهش، از ورق فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵ با ضخامت ۱۰ میلی‌متر به عنوان زیرلایه و از فلز پرکننده ER2209 (جدول۱) با قطر ۱/۲ میلی‌متر به عنوان سیم جوش بهره گرفته شد. فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵ مورد استفاده در این تحقیق به عنوان فلز پایه شامل ۵۰ درصد حجمی از فاز آستنیت می‌باشد که در زمینه‌ای از فاز فریت توزیع شده است (شکل۱). استحکام کششی و درصد ازدیاد طول این محصول بنابر کاتولوگ شرکت تولیدکننده (TATA Steel India) در حدود ۶۲۱ مگاپاسکال و ۲۵ درصد برآورد گردید.

به منظور انجام فرایند جوشکاری، نمونه‌هایی با ابعاد ۱۵×۳۰ تهیه، با استفاده از دستگاه فرز به صورت جناغی یک سویه با زاویه ۳۵ درجه برای انجام فرایند آماده‌سازی گردید. قبل از انجام فرایند جوشکاری، زیرلایه فولادی و فلز پرکننده ER2209 تمیزکاری و چربی‌زدایی شدند. در راستای تعیین میزان حرارت ورودی بر خواص ساختاری و فازی منطقه‌ی جوش، تلاش شد تا تمامی مشخصه‌های جوشکاری ثابت در نظر گرفته شده و تنها تاثیر تغییر ولتاژ و یا به عبارتی حرارت ورودی مورد ارزیابی واقع شود (جدول ۲). شایان ذکر است که در دستگاه جوشکاری مورد استفاده سرعت حرکت سیم کاملا اتوماتیک بوده و در تمامی آزمون‌ها ثابت و معادل ۱۵سانتی‌متر در دقیقه در نظر گرفته شد.محاسبه‌ی حرارت ورودی در تمام آزمون‌ها بر مبنای رابطه‌ی (۱) انجام شد [۲]:

$$q = \frac{V*I*60}{s*1000} \quad (1)$$

در این رابطه، q معادل حرارت ورودی (ژول بر میلی‌متر)، V اختلاف پتانسیل جوشکاری یا ولتاژ (ولت)، I شدت جریان (آمپر) و s سرعت جوشکاری (میلی‌متر بر دقیقه) می‌باشد. جهت بررسی تاثیر عملیات پیش‌گرمایش بر خواص جوش،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

جدول1- ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن دوفازی 2205 و فلز جوش مصرفی **ER2209** مورد استفاده در این تحقیق

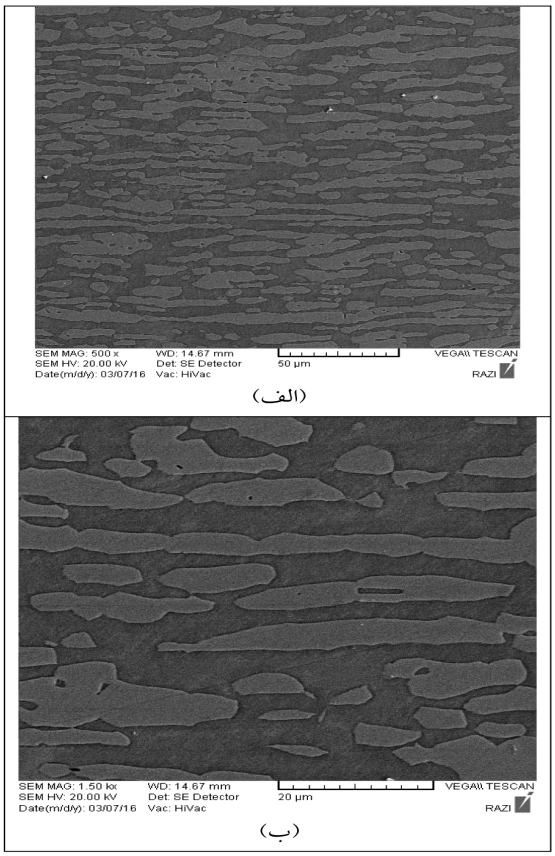
عناصر	درصد وزنی							
	کروم	نیکل	مولیبدن	منگنز	سیلیسیم	کربن	فسفر	گوگرد
فلز پایه	۲۱	۵/۵-۴/۵	۳-۲/۵	۱/۱-۰/۸	۰/۸	۰/۳۱-۰/۲۸	۰/۲	۰/۲
سیم جوش	۲۳/۵-۲۱/۵	۹/۵-۷/۵	۳/۵-۲/۵	۰-۲/۵	۰/۹	۰/۳	۰/۳	۰/۳

جدول2- مشخصه های عملیات جوشکاری مورد استفاده در این تحقیق

نمونه	ولتاژ (V)	حرارت ورودی (kJ/mm)	سرعت سیم (cm/min)	نوع گاز محافظ	دبی گاز (liter/min)	قطر سیم (mm)
۱	۱۵	۰/۶	۱۵	آرگون	۱۰	۱/۲
۲	۲۰	۰/۸				
۳	۲۵	۱/۰				
۴	۳۰	۱/۲				
۵	۳۵	۱/۴				

عملیات حرارتی پیش گرم در دو دمای ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. شایان ذکر است این عملیات در مورد اتصال حاصل در حرارت ورودی ۰/۱ کیلو ژول بر میلی‌متر صورت گرفت.

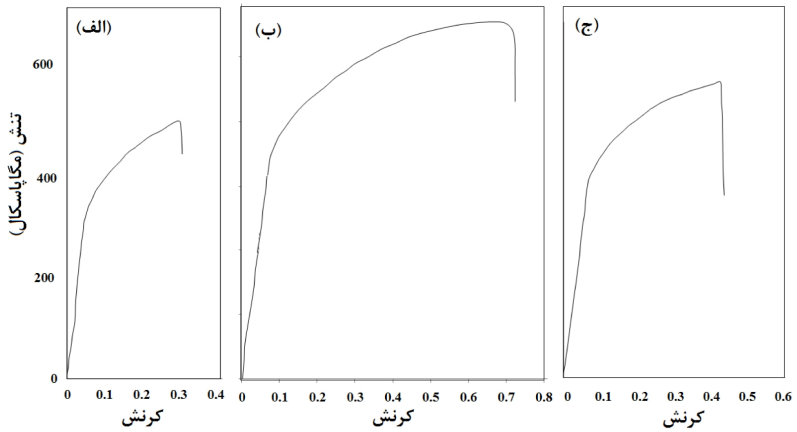
آزمون پراش‌سنجی پرتوایکس با استفاده از دستگاه مدل X'PertProMPD، ساخت شرکت Panalytical هلند انجام شد. تیوپ پرتو ایکس مورد استفاده از نوع مسی با طول موج A^o ۱/۵۴۲، ولتاژ کاری ۴۰ kV، جریان ۲۵mA و اندازه گام ۰/۰۳ درجه انتخاب شد. بررسی‌های ساختاری نمونه‌های حاصل، توسط میکروسکپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مدل Mira 3-XMU انجام شد. به منظور بررسی میکروسختی در منطقه جوش، منطقه‌ی متاثر از حرارت جوش و فلز پایه از دستگاه سختی سنجی مدل ASTM E384-HV، با بار اعمالی ۱۰ نیوتن و مدت زمان ۱۰ ثانیه استفاده گردید. همچنین از آزمون کشش برای بررسی استحکام فلز جوش استفاده شد. در این رابطه نمونه‌ها به صورت عرضی نسبت به جهت جوشکاری برش خورده، براساس استاندارد ASTM-E8 آماده‌سازی شد و تحت آزمون کشش قرار گرفت. برای انجام آزمون خوردگی نمونه‌هایی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ میلی‌متر از محل جوش تهیه و به‌صورت تر با سنباده شماره ۶۰ تا ۱۲۰۰ آماده سازی شدند. برای جلوگیری از خوردگی شیاری بین نمونه و مانت، عملیات پیش‌پسیو به مدت یک ساعت در



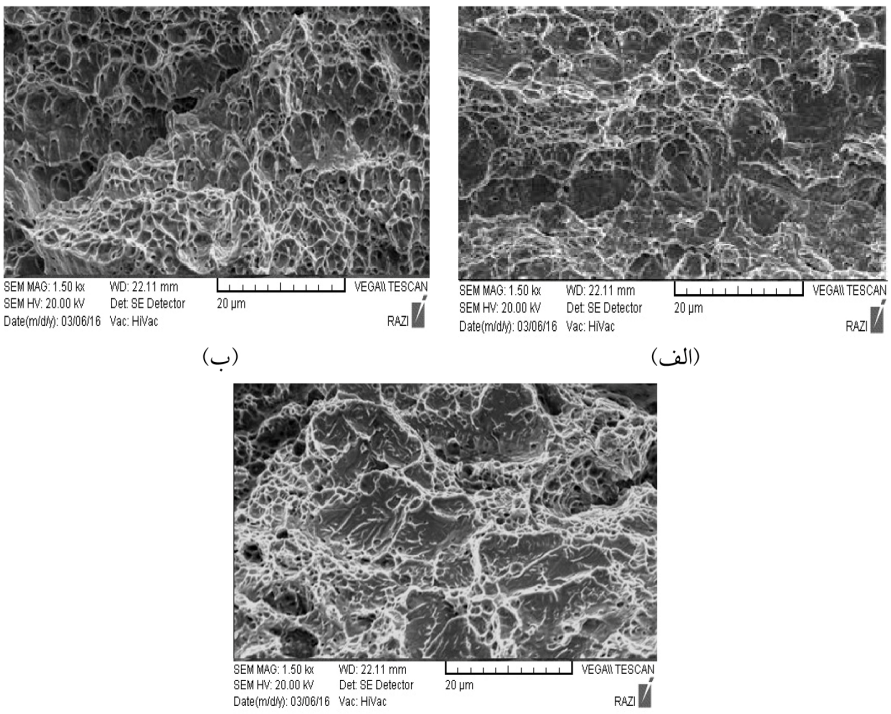
شکل1-تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی از فولاد زنگ نزن دوفازی 2205 مورد استفاده در این تحقیق به عنوان فلز پایه در دو بزرگنمایی مختلف.

محلول ۲ درصد اسید کلریدریک با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. سپس نمونه‌ها با سنباده ۱۲۰۰ مجددا آماده شدند.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]



شکل2-نمودارهای تنش- کرنش مهندسی نمونه‌های حاصل از جوشکاری در حرارت‌های ورودی الف) 0/6، ب) 1/0 و ج) 1/4 کیلوژول بر میلی‌متر.



شکل3- تصاویر سطح مقطع شکست نمونه‌های حاصل از جوشکاری در حرارت‌های ورودی الف) 0/6، ب) 1/0 و ج) 1/4 کیلوژول بر میلی‌متر.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی تاثیر حرارت ورودی

مشخصه‌های مختلف فرایند جوشکاری فلز- گاز شامل سرعت جوشکاری، ولتاژ، شدت جریان، دمای پیش‌گرم و اتمسفر محافظ بر خواص ساختاری و فازی نمونه‌های حاصل از این فرایند موثر است. در این تحقیق به منظور امکان انجام مقایسه، تمامی مشخصه‌های فرایند ثابت در نظر گرفته شده و تلاش شد تا با تغییر ولتاژ، بهینه حرارت ورودی برای حصول ریزساختار و خواص مکانیکی مطلوب تعیین گردد.

این آزمون در محلول سدیم کلراید با غلظت ۵/۳ درصد در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. الکترود مرجع کالومل و از پلاتین به عنوان الکترود خنثی استفاده گردید. پس از اندازه‌گیری پتانسیل مدار باز برای هر یک از نمونه‌ها نسبت به الکترود مرجع، منحنی پلاریزاسیون به دست آمد. برای انجام آزمون از دستگاه Autolab مدل 302N استفاده شده و نمودار پلاریزاسیون از ۲۵۰ میلی‌ولت پایین‌تر از ولتاژ مدار باز نمونه ترسیم شد. نرخ روبش نیز برای همه‌ی آزمون‌ها ثابت و معادل ۱ میلی‌ولت بر ثانیه انتخاب گردید.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

جدول3-خواص مکانیکی نمونه‌های حاصل از جوشکاری فولاد زنگ نزن دوفازی 2205 در حرارت‌های ورودی مختلف

نمونه	حرارت ورودی (kJ/mm)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)	ازدیاد طول (درصد)	محل شکست
۱	۰/۶	۲۵۳±۱۵	۴۵۲±۱۲	۱۳±۲	منطقه جوش
۲	۰/۸	۳۲۳±۲۵	۵۸۰±۱۵	۱۷±۲	منطقه جوش
۳	۱/۰	۴۵۷±۲۵	۶۱۰±۲۵	۲۴±۰/۵	منطقه مجاور جوش
۴	۱/۲	۴۵۰±۱۷	۵۸۳±۱۵	۲۳±۲	منطقه مجاور جوش
۵	۱/۴	۴۲۳±۱۲	۵۳۸±۱۰	۱۸±۲/۵	منطقه مجاور جوش

جدول4-خواص خوردگی نمونه‌های حاصل از جوشکاری فولاد زنگ نزن دوفازی 2205 در حرارت‌های ورودی مختلف

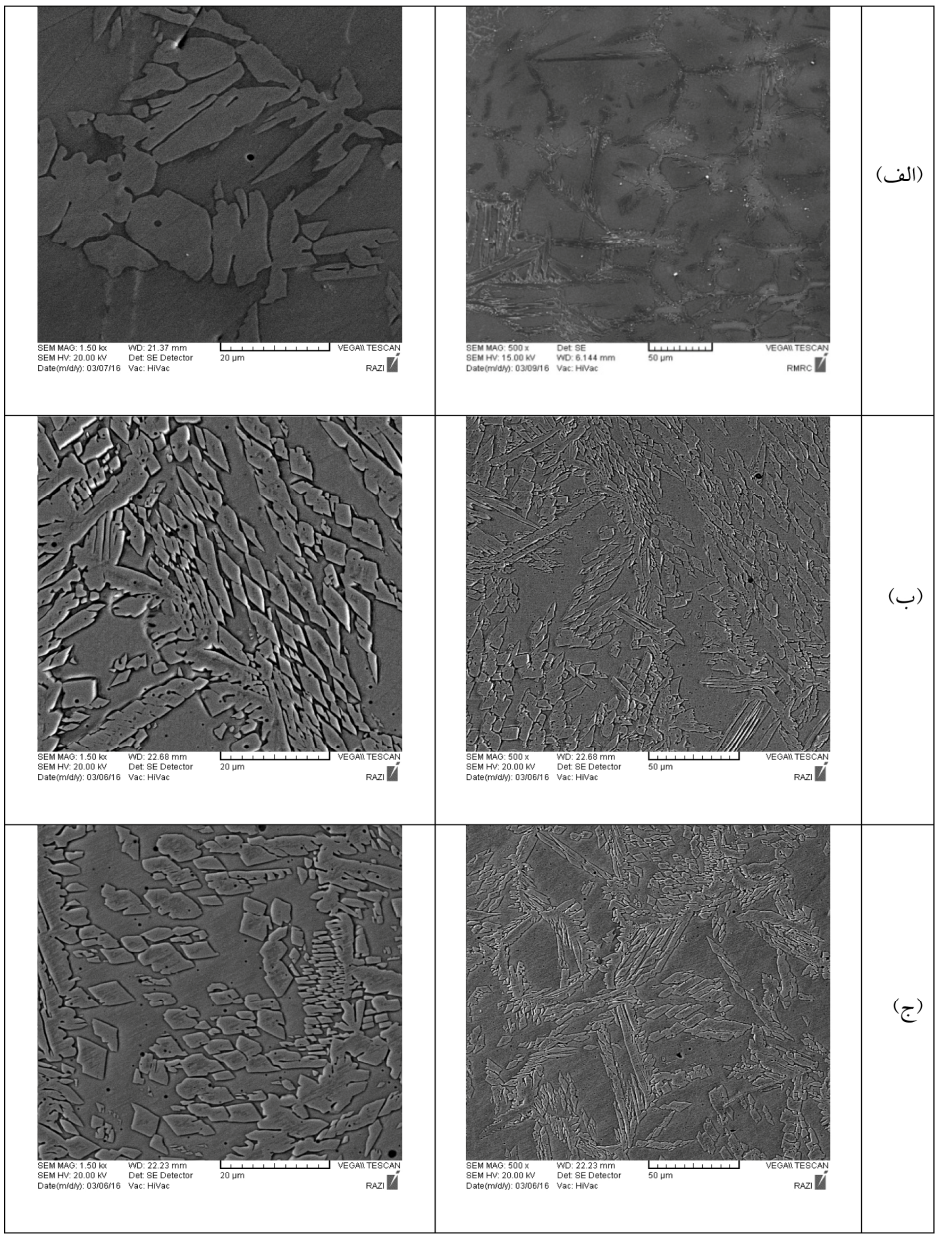
حرارت ورودی (کیلوژول بر میلی‌متر)	چگالی جریان خوردگی (A/dm^2)	پتانسیل خوردگی (V)
۰/۶	۷×۱۰^{-۵}	-۰/۲۵۶
۱/۰	$۸/۵\times۱۰^{-۵}$	-۰/۳۲۸
۱/۴	۱۱×۱۰^{-۵}	-۰/۳۵۵

در این ارتباط فرایند جوشکاری در شرایط ذکر شده در جدول(۲) انجام شد و خواص مکانیکی نمونه‌های حاصل مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های حاصل از جوشکاری در حرارت‌های ورودی مختلف در شکل(۲) و نتایج حاصل در جدول(۳) ارائه شده است. همانگونه که در این شکل و جدول مشاهده می‌شود، نمونه‌های حاصل از جوشکاری از استحکام مکانیکی نسبتا بالایی در محدوده‌ی ۴۵۲ الی ۶۱۰مگاپاسکال برخوردار هستند. علاوه بر این درصد ازدیاد طول نمونه‌ها نیز بسیار بالا بوده و در محدوده‌ی ۱۳ الی ۲۴درصد قرار دارد. این موضوع نشان از رخداد شکست نرم در نمونه‌های مورد بحث دارد که با توجه به تصاویر سطح شکست حاصل از آزمون کشش که در شکل(۳) ارائه شده و دارای ظاهری دیمپل مانند است قابل اثبات می‌باشد. با وجودی که استحکام و انعطاف‌پذیری تمامی نمونه‌ها بالاست، روند تغییرات خواص مکانیکی نمونه‌ها حاکی از دستیابی به حداکثرمقدار استحکام و انعطاف‌پذیری در حرارت ورودی متوسط دارد. به این معنی که با افزایش حرارت ورودی از ۰/۶ به ۱/۰ کیلوژول بر میلی‌متر، استحکام نمونه‌ها از مقدار ۴۵۲ مگاپاسکال به حدود ۶۱۰ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. در این مرحله درصد ازدیاد طول نیز از ۱۳ درصد به حدود ۲۴درصد می‌رسد. شایان ذکر است که خواص مکانیکی حاصل در نمونه‌ی جوشکاری شده در این حرارت ورودی بسیار نزدیک به خواص مکانیکی فلز پایه (با استحکام نهایی ۶۲۱مگاپاسکال و درصد ازدیاد طول ۲۵ درصد) می‌باشد. با افزایش مجدد حرارت ورودی، مقادیر استحکام و انعطاف‌پذیری مجددا کاهش یافته و از مقادیر مربوط به فلز پایه فاصله می‌گیرند. در راستای درک دقیق این موضوع تلاش شد تا خواص ساختاری نمونه‌های حاصل به دقت مورد بررسی و ارزیابی واقع شود.تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی منطقه‌ی جوش و منطقه‌ی مجاور جوش نمونه‌های حاصل از فرایند جوشکاری در حرارت‌های ورودی مختلف در شکل(۴و۵) نشان داده شده است. علاوه بر آن، الگوهای پراش پرتوایکس مربوط به ناحیه‌ی جوش نمونه‌های حاصل از اتصال در حرارت‌های ورودی ۰/۶ و ۱/۴ کیلوژول بر میلی‌متر نیز در شکل(۶) قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به این تصاویر موارد زیر قابل بررسی است:

- ساختار منطقه‌ی جوش تمامی نمونه‌ها شامل رسوبات تیغه‌ای شکل از فازهای روشن می‌باشد که در زمینه‌ای از فاز تیره رنگ توزیع شده‌اند. مطابق الگوهای پراش پرتوایکس مربوط به ناحیه‌ی جوش (شکل ۶) و همچنین مطالعات دیگر محققین[۴و۷]، فاز زمینه این ترکیب فریت بوده، رسوبات تیغه‌ای شکل مرزدانه‌ای مربوط به فاز آستنیت ویدمن‌اشتاتن می‌باشد. در واقع این فاز در حین سرد شدن به صورت

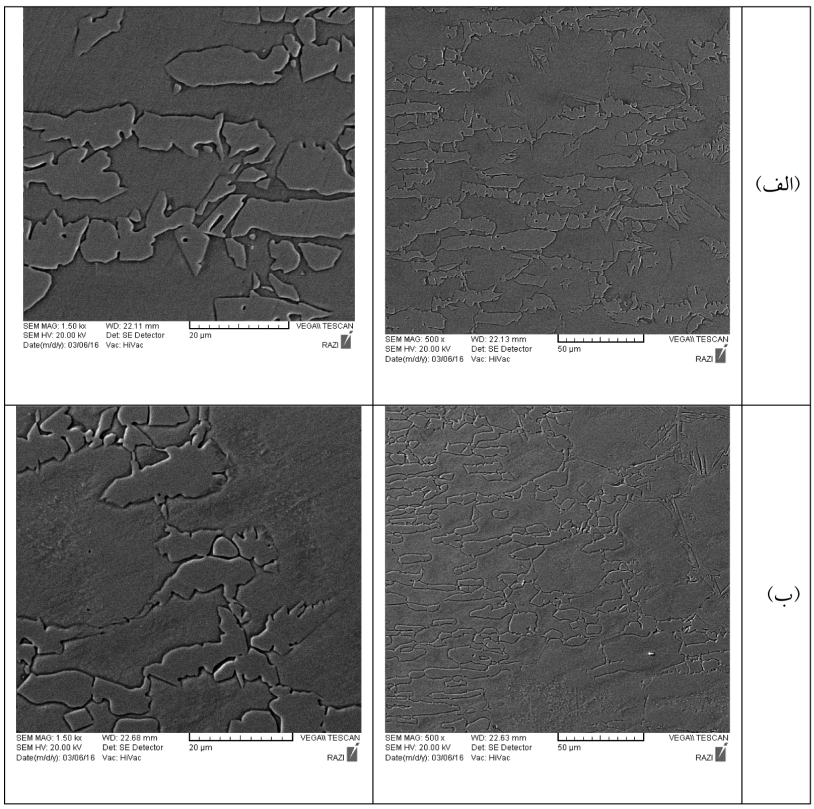
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]



شکل4-تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی از منطقه‌ی جوش نمونه‌های حاصل از جوشکاری در حرارت‌های ورودی الف) 0/6، ب) 1/0 و ج) 1/4 کیلوژول بر میلی‌متر.

تیغه‌ای شکل از مرز دانه‌ها جوانه‌زنی نموده و به داخل دانه‌های فریت رشد کرده است. لازم به ذکر است که بر مبنای نمودارهای تعادل فازی، انجماد فولادهای زنگ نزن دوفازی فریتی- آستنیتی با شکل‌گیری فاز فریت انجام می‌شود. در حین سرد شدن و با فراهم آمدن شرایط مناسب، نمونه از منطقه‌ی دوفازی آستنیت- فریت عبور نموده و به این صورت شرایط جوانه‌زنی فاز آستنیت از فریت فراهم می‌شود. به دلیل سهـولت انجـام جـوانه‌زنی از مرزدانه‌ها، فاز آستنیت عمدتا از مرزها جوانه‌زنی می‌نماید که به دلیل سرعت سرد شدن بالا در حین فرایند جوشکاری آستنیت حاصل عمدتا ویدمن‌اشتاتن است.مطابق شکل‌های(۴-ب وج)، با انجام فرایند جوشکاری در حرارت‌های ورودی بالاتر، شرایط برای تشکیل فاز آستنیت ثانویه نیز فراهم شده است. به طور کلی ساختار انجمادی اولیه فولادهای زنگ نزن دوفازی فریتی بوده، در دماهای پایین‌تر با ورود به منطقه‌ی دوفازی فریت- آستنیت، این فاز به آستنیت تبدیل می‌شود [۴]. تبدیل فاز فریت حاصل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]



شکل5- تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی از منطقه‌ی مجاور جوش نمونه‌های حاصل از جوشکاری در حرارت‌های ورودی الف) 0/6، ب) 1/4 کیلوژول بر میلی‌متر.

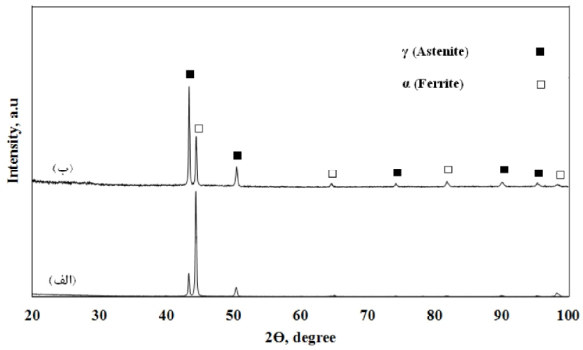
از ذوب به فاز آستنیت و به عبارتی جوانه‌زنی و رشد فاز آستنیت ثانویه یک فرایند نفوذی است و برای کامل شدن نیاز به زمان دارد. همانطور که در تصاویر مشخص است، فاز آستنیت ثانویه با افزایش حرارت ورودی منظم‌تر شده و جهت‌گیری مشخصی دارد. به این معنی که با افزایش حرارت ورودی و کاهش نرخ سرد شدن، فرصت مناسب برای افزایش درصد فاز آستنیت ثانویه و منظم‌تر شدن آن فراهم شده است. اگرچه درصد آستنیت حاصل در کل ناحیه‌ی جوش یکنواخت نبوده و با فاصله گرفتن از مرکز جوش از درصد این فاز کاسته می‌شود، نتایج آنالیز تصاویر میکروسکپی توسط نرم‌افزار آنالیز تصویر از خط مرکزی جوش نشان از آن دارد که با افزایش حرارت ورودی، درصد حجمی فاز آستنیت از ۵±۱۵ درصد در نمونه‌ی جوشکاری شده در حرارت ورودی ۰/۶ کیلوژول بر میلی‌متر تا حدود ۷±۵۰ درصد در نمونه‌ی جوشکاری شده در حرارت ورودی ۱/۴ کیلوژول بر میلی‌متر افزایش می‌یابد.این موضوع با توجه به الگـوی پـراش پرتوایکس مربوطه در شکل(۶) نیز قابل بررسی است. با افزایش حرارت ورودی از درصد فاز فریت کاسته شده و بر درصد فاز آستنیت افزوده شده است. در واقع افزایش درصد فاز آستنیت با افزایش حرارت ورودی با توجه به کاهش نرخ سرد شدن قابل توجیه است. به این معنی که با کاهش نرخ سرد شدن، شرایط برای انجام استحاله‌ی فریت به آستنیت فراهم شده، درصد این فاز در ساختار افزایش می‌یابد. نکته‌ی جالب توجه این است که در مقادیر حرارت ورودی بالاتر از یک کیلوژول بر مول، درصد این فاز در منطقه‌ی در مقدار ۵۰ درصد حجمی تقریبا ثابت مانده است.

– مطابق شکل(۵)، تغییر حرارت ورودی تاثیرات قابل توجهی بر منطقه‌ی مجار جوش دارد. با توجه به شکل(۵–الف)، انجام جوشکاری تحت حرارت ورودی ۰/۶ کیلوژول بر میلی‌متر تاثیر چندانی بر ریزساختار منطقه‌ی مجاور جوش نداشته و تنها تغییرات ناچیزی در شکل و مورفولوژی فاز آستنیت حاصل شده است. این در حالی است که ریزسـاختـار منطقه‌ی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

جدول5-خواص مکانیکی نمونه‌های حاصل از جوشکاری در دو دمای پیش‌گرم 50 و 100 درجه‌ی سانتی‌گراد

حرارت ورودی (kJ/mm)	دمای پیش‌گرم(°C)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)	ازدیاد طول (درصد)	محل شکست
۱	۲۵	۴۵۷±۲۵	۶۱۰±۲۵	۲۴±۰/۵	منطقه مجاور جوش
	۵۰	۱۷۵±۳۵	۳۷۵±۱۵	۲۳±۲	منطقه مجاور جوش
	۱۰۰	۱۳۶±۱۲	۲۲۰±۲۵	۱۷±۲/۵	منطقه مجاور جوش



شکل6-الگوهای پراش پرتوایکس مربوط به منطقه‌ی جوش نمونه‌های حاصل از جوشکاری در حرارت‌های ورودی الف) 0/6، ب) 1/4 کیلوژول بر میلی‌متر.

مجاور جوش نمونه‌های حاصل از جوشکاری در حرارت ورودی ۱/۴ کیلوژول بر میلی‌متر به شدت تحت تاثیر قرار گرفته است.به این صورت که با افزایش حرارت ورودی در حین جوشکاری، درصد فاز آستنیت در منطقه‌ی مجاور جوش از ۸±۵۰ درصد حجمی در نمونه‌ی جوشکاری شده در حرارت ورودی ۰/۶ کیلوژول بر میلی‌متر تا ۵±۲۰ درصد حجمی در نمونه‌ی جوشکاری شده در حرارت ورودی ۱/۴کیلوژول بر میلی‌متر کاهش یافته و دانه‌های فریت درشت‌تر شده‌اند. این موضوع می‌تواند به معنی کاهش استحکام منطقه‌ی مجاور جوش با افزایش حرارت ورودی باشد.

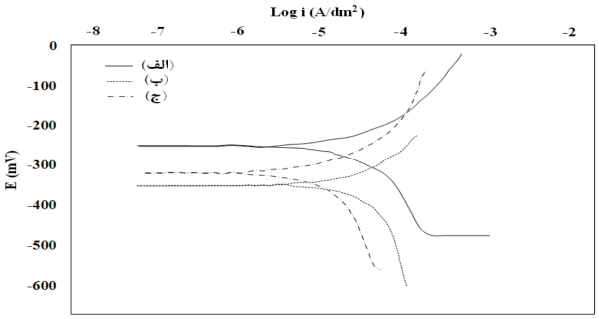
با توجه به مطالب مطرح، تغییر خواص مکانیکی نمونه‌های جوشکاری شده با تغییر حرارت ورودی قابل توجیه است. به طور قطع بالاترین خواص مکانیکی در مورد فولادهای زنگ‌نزن دوفازی وقتی حاصل می‌آید که درصد فازهای فریت و آستنیت در حد بهینه‌ای (۵۰ درصد فریت و ۵۰ درصد آستنیت) قرار گیرد. همانطور که در بخش قبل بیان شد، با افـزایش حـــرارت ورودی در حیـن جوشکاری، از درصد فاز فریت کاسته و بر درصد فاز آستنیت افزوده می‌شود. با توجه به این نکته و حصـول بـــالاترین خواص مکانیکی در مقادیر حرارت ورودی متوسط (۱/۰ کیلوژول بر میلی‌متر)، به نظر می‌رسد که انجام جوشکاری در این شرایط به خوبی توانسته توزیع مناسبی از فازهای آستنیت و فریت را در منطقه‌ی جوش نمونه‌ها به همراه داشته و به این ترتیب مقادیر بالایی از استحکام و انعطاف‌پذیری حاصل شده است.

نکته قابل توجه در مورد آزمون کشش (بر اساس اطلاعات موجود در جدول۳) انجام شکست در نمونه‌های جوشکاری‌شده در حرارت ورودی کمتر از یک کیلوژول بر میلی‌متر در منطقه‌ی جوش و در مورد نمونه‌های جوشکاری شده در حرارت‌های ورودی بالاتر در منطقه‌ی مجاور جوش است. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش حرارت ورودی به خوبی توانسته شکل‌گیری درصد مناسبی از فاز آستنیت و به دنبال آن استحکام بالایی برای منطقه‌ی جوش به همراه داشته باشد اما با کاهش درصد فاز آستنیت منطقه‌ی مجاور جوش، کاهش استحکام این ناحیه را موجب شده است.

در شکل(۷) نتایج آزمون خوردگی حاصل از منطقه‌ی جوش نمونه‌های جوشکاری شده تحت حرارت‌های ورودی ۰/۶، ۱/۰ و ۱/۴ کیلوژول بر میلی‌متر ارائه و نتایج حاصل از این آزمون در جدول(۴) آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، چگالی جریان و اختلاف پتانسیل خوردگی نمونه‌های مورد بررسی به ترتیب در محدوده‌ی ۷×۱۰^{-۵} الی ۱۱×۱۰^{-۵}آمپر بر دسی‌تر مربع و ۲۵۰- الی ۳۵۰- میلی‌ولت قرار دارد. مقایسه نتایج خوردگی نمونه‌های مورد بحث حاکی از آن است که رفتار خوردگی ناحیه‌ی جوش در سه حرارت ورودی بسیار نزدیک بوده و تفاوت معنی‌داری در مورد آن‌ها وجود ندارد. به این معنی که تغییر حرارت ورودی و تغییرات

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

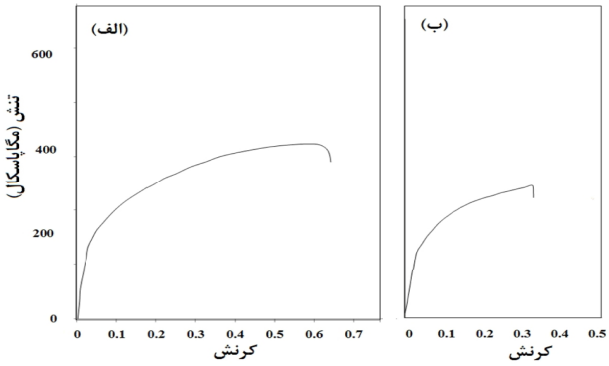
ساختاری ناشی از آن تاثیر قابل توجهی بر خواص خوردگی ناحیه‌ی جوش نداشته است.



شکل7-نمودارهای حاصل از آزمون خوردگی در مورد نمونه های جوشکاری شده در سه حرارت ورودی الف) 0/6، ب) 1/0 و ج) 1/4 کیلو ژول بر میلی متر.

3-2- بررسی تاثیر عملیات پیش‌گرم

مطابق مطالب مطرح در بخش قبل، حرارت ورودی ۱/۰کیلوژول بر میلی‌متر برای انجام اتصال فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵ مناسب تشخیص داده شد. در راستای فهم دقیق تاثیر عملیات پیش‌گرمایش بر خواص مکانیکی و ساختاری ناحیه جوش، عملیات پیش‌گرمایش در دو دمای ۵۰ و ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام و پس از انجام فرایند جوشکاری، نمونه‌های حاصل مورد بررسی واقع شدند. در این ارتباط نمودارهای تنش- کرنش مربوطه در شکل(۸) و خواص مکانیکی حاصل در جدول(۵) ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده و مقایسه‌ی آن با نتایج نمونه‌ی بهینه، مشخص است که خواص مکانیکی نمونه‌های جوشکاری شده فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵ به شدت تحت تاثیر عملیات حرارتی پیش‌گرمایش قرار گرفته و با افزایش دمای عملیات کاهش یافته است. در این مورد استحکام از حدود ۶۱۰مگاپاسکال در نمونه‌ی بدون پیش‌گرمایش به حدود ۲۲۰مگاپاسکال در نمونه‌ی پیش‌گرم شده تا دمای ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و درصد ازدیاد طول از ۲۴ درصد به ۱۷ درصد کاهش یافته است. نکته‌ی جالب توجه در این مورد، انجام شکست در ناحیه مجاور جوش نمونه‌های مورد بررسی است.در این رابطه تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی به همراه آنالیز پراش‌پرتوایکس ازمنطقه‌ی جوش نمونه جوشکاری

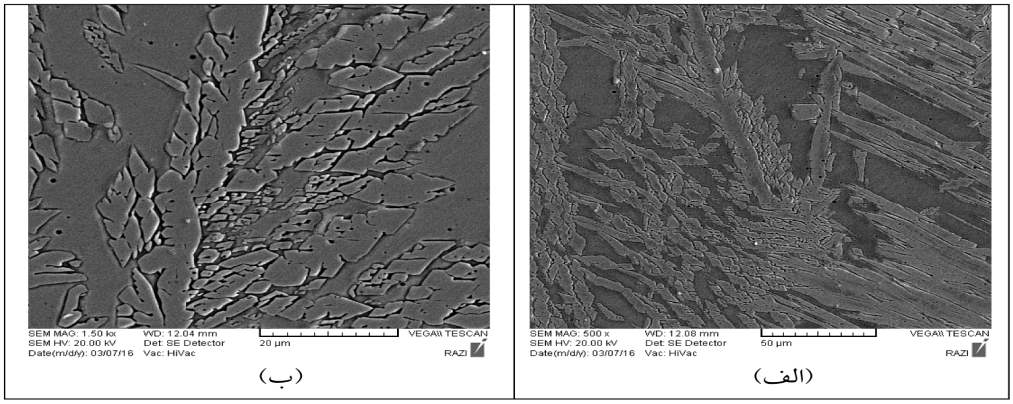


شکل8-نمودارهای تنش- کرنش مهندسی نمونه‌های حاصل از جوشکاری و با انجام پیش‌گرمایش در دماهای الف) 50 و ب) 100 درجه‌ی سانتی‌گراد.

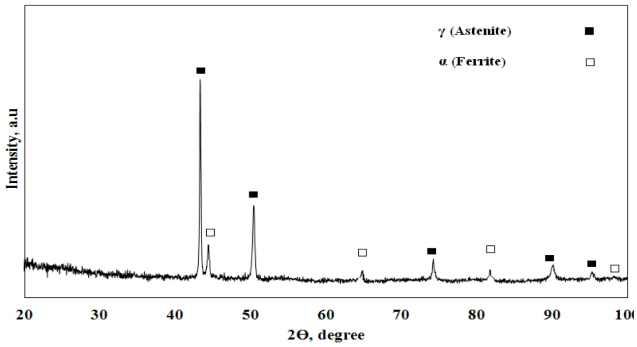
در این رابطه تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی به همراه آنالیز پراش پرتوایکس از منطقه‌ی جوش نمونه‌ی جوشکاری‌شده با عملیات حرارتی پیش‌گرمایش ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به ترتیب در شکل‌های(۹و۱۰) ارائه شده است. با توجه به این دو شکل مشاهده می‌شود که نمونه‌های حاصل در این شرایط جوشکاری نیز دارای ساختاری متشکل از فریت زمینه و آستنیت ویدمن‌اشتاتن می‌باشد. محاسبات مربوط به کسر حجمی فازهای مختلف موجود در نمونه‌ها نشان می‌دهد که افزایش دمای پیش‌گرمایش تاثیر چندانی بر درصد فازهای فریت و آستنیت موجود نداشته و درصد حجمی این دو فاز در هر سه نمونه تقریبا یکسان و در حدود ۵۰ درصد می‌باشد. با وجود آنکه تفاوت‌هایی در مورفولوژی فاز آستنیت حاصل در نمونه‌های جوشکاری شده با و بدون انجام پیش‌گرمایش وجود دارد، تفاوت اصلی نمونه‌های جوشکاری شده در استفاده و عدم استفاده از عملیات پیش‌گرمایش در درصد متفاوت فازهای فریت و آستنیت موجود در ناحیه‌ی مجاور جوش می‌باشد.

در واقع عملیات پیش‌گرمایش با ایجاد شرایط تعادلی در حین سرد شدن در ناحیه‌ی جوش، منجر به حصول درصد تعادلی فاز آستنیت در این ناحیه شده است. این موضوع در حالی است که شرایط در منطقه‌ی مجاور جوش متفاوت بوده و با اعمال پیش‌گرمایش، درصد فاز آستنیت در منطقه‌ی مجاور جوش کاهش می‌یابد. در حقیقت پیش‌گرمایش باعث می‌شود

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]



شکل9-تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی از منطقه‌ی مجاور جوش نمونه‌های حاصل از جوشکاری تحت عملیات پیش‌گرمایش 100 درجه‌ی سانتی‌گراد (در دو بزرگنمایی مختلف).



شکل10-الگوی پراش پرتوایکس از منطقه‌ی مجاور جوش نمونه‌های حاصل از جوشکاری تحت عملیات پیش‌گرمایش 100 درجه‌ی سانتی‌گراد.

در مرحله‌ی گرم‌شدن در حین فرایند جوشکاری درصد بیشتری از فاز آستنیت اولیه به فاز فریت استحاله یابد. به دلیل بالا بودن نرخ سرد شدن پس از فرایند جوشکاری، زمان کافی برای رسوب این فاز فراهم نشده است. با توجه به این نتایج می‌توان ادعا نمود که کاهش استحکام منطقه‌ی مجاور جوش (که شکست در آن متمرکز شده است) با انجام عملیات حرارتی پیش‌گرمایش به علت فاصله گرفتن نسبت حجمی فریت و آستنیت در این منطقه از نسبت بهینه‌ی این دو فاز در حصول خواص مکانیکی بهینه است.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر حرارت ورودی و عملیات پیش‌گرمایش بر ریزساختار، خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی محل اتصال فولاد زنگ نزن دو فازی ۲۲۰۵ جوشکاری شده توسط فرایند جوشکاری GTAW مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج، ساختار حاصل از جوشکاری در نمونه‌های مورد بحث شامل فازهای آستنیت ویدمن‌اشتاتن و فریت می‌باشد که فاز آستنیت از مرزدانه‌های فریت جوانه‌زنی نموده و به سمت مرکز دانه‌های فریت گسترش یافته است. با افزایش حرارت ورودی، از درصد فاز فریت کاسته و بر درصد فاز آستنیت افزوده می‌شود. در این مورد بیشترین مقدار استحکام و انعطاف‌پذیری مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده با حرارت ورودی متوسط (یک کیلوژول بر میلی‌متر) می‌باشد. بررسی مقاومت به خوردگی نمونه‌های حاصل از اتصال، نشان از تاثیر ناچیز حرارت ورودی بر مقاومت خوردگی محل اتصال داشت. همچنین مشخص شد که عملیات پیش‌گرمایش تاثیر نامطلوبی بر خواص مکانیکی محل اتصال دارد.

منابع

1- Armas, I.A.,Duplex Stainless steels: Brief History and Some Recent Alloys, UAS: Recent Patents on Mechanical Engineering,Bentham Science Publishers, 2008.
2- Lippold, J.C., Koteki, D., Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels,New Jersey: John Wiley and Sons, 2005.
3- Fourie, J.W., Robinson, F.P.A., Literature review on the influence of weld-heat inputs on the mechanical and corrosion properties of duplex stainless steels, *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 90, No. 3, pp. 59-65, 1990.
4- Urena, A., Otero, E., Utrilla, M.V.,Munez, C.J., Weldability of a 2205 duplex stainless steel using

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

plasma arc welding, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 182, pp. 624-631, 2007.
5- Nilsson, J.O., Jonsson, P., Wilson, A., Formation of secondary austenite in super duplex stainless steel metal and its dependence on chemical composition, Duplex Stainless Steel, Vol. 94, pp.39-46, 1994.
6- Tavaresa, S.S.M., Rodriguesa, C.R., Pardala, J.M., Effects of post weld heat treatments on the microstructure and mechanical, properties of dissimilar weld of super-martensíticstainless steel, *Materials Research*, Vol. 17, pp. 1336-1343, 2014.
7-Mehtedi, El. M., Spigarelli, S., Pricci, P., Paternoster, C., Quandrini, E., Mechanical characterization of phases in 2205 stainless steel by nano-indentation technique, *La MetallurgiaItaliana*, Vol. 9, pp. 11-16, 2010.
8- Zhang, Z., Jing, H., Xu, L., Han, Y., Zhao, L., Zhou, C., Effects of nitrogen in shielding gas on microstructure evolution and localized corrosion behavior of duplex stainless steel welding joint, *Applied Surface Science*, Vol. 404, pp. 110-128, 2017.
9- Pekkarinen, J.,Kujanpa, V., The effects of laser welding parameters on the microstructure of ferritic and duplex stainless steels welds, Physics Procedia, Vol. 5, pp. 517-523, 2010.
10- Zhang, Z., Jing, H., Xu, L., Han, Y., Zhao, L., The influence of microstructural evolution on selective corrosion in duplex stainless steel flux-cored arc welded joints, *Corrosion Science*, Vol. 120, pp. 194-210, 2017.
11- Zhang, Z., Jing, H., Xu, L., Han, Y., Zhao, L., Investigation on microstructure evolution and properties of duplex stainless steel joint multi-pass welded by using different methods, *Materials & Design*, Vol. 109, pp. 670-385, 2016.
12- Verma, J., Taiwade, R.V., Effect of welding processes and conditions on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of duplex stainless steel weldments, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 25, pp.134-152, 2017.
13- Tasalloti, H., Kah, P., Martikainen, J., Effect of heat input on dissimilar welds of ultra high strength steel and duplex stainless steel: Microstructural and compositional analysis, *Materials Characterization*, Vol. 123, pp. 29-41, 2017.
14- Sivakumar, G., Saravanan, S., Raghukandan, K., Investigation of microstructure and mechanical properties of Nd:YAG laser welded lean duplex stainless steel joints, *Optik- International Journal for Light and Electron Optics*, Vol. 131,pp.1-10, 2017.
15-Jebaraj, A.V., Kumar, L.A., Deepak, C.R., Investigations on anisotropy behavior of duplex stainless steel AISI 2205 for optimum weld properties, *Procedia Engineering*, Vol. 173, pp. 883-890, 2017.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]