نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره2، پاییز و زمستان 1399، صفحه 102-91

ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی فلز جوش اتصال غیرمشابه فولادهای API 5L X80/DSS 2205 تولید شده به روش PCGTAW

رضا دهملایی[1*] ، محمد سعید رییسی سارانی[2]، خلیل رنجبر[1]

1- گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

2- دانش آموخته دوره کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

(دریافت مقاله: 1399/07/07 ؛ پذیرش مقاله: 1399/09/30)

چکیده

در این پژوهش، جوشکاری غیرمشابه فولادهای API 5L X80 و DSS 2205 با فرایند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با جریان پالسی (PCGTAW) و با استفاده از فلزهای پرکننده ER2209، ER309L و KJS-124، انجام گرفت. بررسی ریزساختاری نشان داد که ریزساختار فلزجوش ER2209 به صورت دوفازی آستنیتی- فریتی است که مقدار فریت فلز جوش در پاس ریشه تا پاس رویی از 35% تا 41% متغیر است. مشخص گردید که مد انجماد فلزجوش ER309L از نوع فریتی- آستنیتی و ریزساختار آن دارای زمینه آستنیتی به همراه فریت اسکلتی و مقدار کمتری فریت کرمی شکل روی مرزدانه است. نتایج بررسی‌ها به وسیله فریت اسکوپ نشان داد که مقدار فریت پاس ریشه (6%) کمتر از فریت در پاس رویه (10%) اتصال است. نتایج بررسی‌های میکروسکپی نشان داد که ریزساختار فلزجوش KJS-124 شامل فریت های مرزدانه ای، ویدمن اشتاتن و سوزنی به همراه جزایر مارتنزیت- آستنیت می باشد. بررسی ها نشان داد که فصل مشترک فلزهای پایه و پرکننده پیوسته بوده و هیچ گونه ترکی مشاهده تشکیل نشده است. در فصل مشترک اتصالات ER2209/DSS 2205، ER309L/DSS 2205 و KJS-124/API 5L X80 رشد اپی تکسیال و در فصل مشترک ER2209/API 5L X80، ER309L/API 5L X80 و KJS-124/DSS 2205 ناحیه مخلوط نشده و مرز نوع II مشاهده گردید. براساس نتایج آزمون ضربه شارپی، فلزجوش حاصل از ER2209، ER309L و KJS-124 به ترتیب دارای بیشترین انرژی ضربه ای بودند. نتایج سختی سنجی نشان داد که بیشترین سختی به ترتیب مربوط به فلزجوش حاصل از KJS-124، ER2209 و ER309L می باشد.

کلمات کلیدی: فولاد کم آلیاژ استحکام بالا، فولاد زنگ نزن دوفازی، فرایند PCGTAW، رقت، ناحیه مخلوط نشده، رشد اپی تکسیال.

The evaluation of microstructure and mechanical properties of API 5L X80/DSS 2205 weld metals produced by PCGTAW

R. Dehmolaei[1*], M. S. Raeisi Sarani[2], K. Ranjbar[1]

1- Department of Material Science and Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2- M. Sc. Graduated, Department of Material Science and Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

(Received 28 September 2020 ; Accepted 20 December 2020)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: dehmolaei@scu.ac.ir

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

Abstract

Dissimilar welding of API 5L X80/DSS 2250 steels was carried out using PCGTAW process. The welds were produced using three types of filler metals (ER2209, ER309L and KJS-124). The microstructural investigations showed that the microstructure of ER2209 weld metal is duplex (ferrite and austenite) and ferrite content changes from root pass (35%) to cap pass (41%). It was revealed that the solidification mode of ER309L weld metal was ferritic-austenitic mode and its microstructure has an austenitic matrix with skeletal ferrites and smaller amount of vermicular ferrites along the grain boundaries. Ferrite scope results revealed that ferrite content of root pass (6%) is less than the final pass (10%). Microscopic results showed that the microstructure of KJS-124 weld metal consists of grain-boundary, Widmanstätten and acicular ferrites with martensite-austenite islands. Epitaxial growth was detected in the interfaces of ER309L/DSS 2209، ER2209/DSS 2205 and KJS-124/API 5L X80 and unmixed zones and type II boundaries were detected in the ER2209/API 5L X80- ER309L/API 5L X80 and KJS-124/DSS 2205 interfaces. The results of impact and hardness tests revealed that ER2209, ER309L and KJS-124 weld metals have the best toughness and the KJS-124, ER2209 and ER309L filler metals got the highest hardness, respectively.

Keywords: High strength low alloy steels, Duplex stainless steels, PCGTAW process, Dilution, Unmixed zone, Epitaxial growth.

1- مقدمه

فولادهای زنگ نـزن دوفـازی (DSS) نظیـر DSS 2205، دارای ریزساختاری با نسبت تقریبا برابر آستنیت و فریت هستند. ایـن نسبت باید برای دستیابی به بهترین خواص این فولادها برقـرار باشد. فولادهای DSS به طـور گسـترده در صـنایع نفـت، گـاز، شیمیایی و سایر محیط های صنعتی خورنده بـه کـار مـی‌رونـد [1و2]. فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا نظیر API 5L X80، بـه دلیل افزودن عناصر میکرو آلیـاژی و عملیـات ترمومکـانیکی از خواص مکانیکی مطلـوبی برخـوردار هسـتند. ایـن فولادهـا در خطوط لوله انتقال نفت و گاز، تاسیسات دریـایی و کشـتی هـا کاربرد فراوان دارند [3].

فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا در محیط هـای مرطـوب نظیـر ساحل دریا و کنار رودخانه به دلیل خورندگی محیط و خشـک و تر شدن سیکلی، دچار خوردگی مـی شـوند. خـوردگی ایـن آلیاژها اضافه بر افزایش هزینـه تعمیـر و نگهـداری مـی توانـد خطرات ایمنی و آلودگی های زیست محیطـی ناشـی از نشـت نفت و گاز را به همراه داشته باشد. بـرای رفـع ایـن مشـکلات معمولا در این نواحی از فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی نظیر 304L و 316L به عنوان جایگزین فولادهای کم آلیـاژ اسـتحکام بـالا استفاده می شود. فولادهای زنـگ نـزن آسـتنیتی معمـولا دارای حساسیت بـه تـرک خـوردگی تنشـی (SCC) در محـیط هـای کلریدی و دریایی هستند. امروزه فولادهای زنگ نـزن دوفـازی نظیر DSS 2205 به دلیل خواص مکـانیکی خـوب و مقاومـت عالی به خوردگی به ویژه SCC در محـیط کلریـدی جـایگزین مناسبی برای فولادهای زنگ نـزن آسـتنیتی هسـتند و بـه طـور گسترده استفاده می شوند. لذا فولادهای زنگ نـزن دوفـازی بـه عنوان جایگزین جدیدی به جای فولادهای کم آلیـاژ اسـتحکام بالا در نواحی بحرانی نظیر ساحل دریا و محیط هـای مرطـوب مورد توجه هستند. از این رو، جوشکاری غیرمشـابه فولادهـای کم آلیاژ استحکام بالا نظیر API 5L X80 و فولادهای زنگ نزن دوفـازی نظیـر DSS 2205 کـاربرد فـراوان دارد[4]. یکـی از چالش‌های اساسی در اتصالات غیرمشابه، انتخاب فلـز پرکننـده مناسب می باشد. در واقع اختلاف در ترکیـب شـیمیایی، نقطـه ذوب، ضـریب هـدایت حرارتـی و ضـریب انبسـاط حرارتـی فلزهای پایه بـا هـم و نیـز فلزهـای پایـه و پرکننـده مـی‌توانـد ریزساختار و خواص متفاوتی را در نواحی اتصال ایجاد کند. در اتصالات غیرمشابه نظیر فولادهای زنـگ نـزن و فولادهـای کـم آلیاژ استحکام بالا علاوه بر موارد فوق، پدیده های متـالورژیکی مختلفی نظیر رقت فلزهای پایه در فلز جـوش، ناحیـه مخلـوط نشده و ناحیه انتقالی وجود دارد که برای انتخاب فلـز پرکننـده مناسب، باید در نظر گرفته شوند[5-7]. هنگـام جوشـکاری بـا استفـاده از فـرایند جوشکـاری قوسـی تنگستن- گـاز با جریان

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

پالسی (PCGTAW) سیکلی بودن جریان جوشکاری بین یک سطح بالا و یک سطح پایین در فرکانس انتخاب شده منظم، باعث کاهش حرارت ورودی و بهبود ریزساختار و خواص اتصال می گردد. از جمله تاثیرات استفاده از جریان پالسی می توان به ریز شدن ساختار فلز جوش و کاهش عرض منطقه مخلوط نشده اشاره کرد [8و9].با توجه به کاربرد گسترده فولادهای API در صنایع دریایی و به ویژه خطوط لوله انتقال نفت و گاز ایران و اهمیت جایگزینی این فولادها با فولادهای مقاوم به خوردگی در محیط های دریایی و مرطوب، در این پژوهش به بررسی جنبه‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی اتصالات جوش غیرمشابه فولاد زنگ نزن دوفازی DSS 2205 به فولاد کم آلیاژ استحکام بالای API 5L X80 با استفاده از فرایند PCGTAW، و فلزات پرکننده مختلف شامل ER2209، ER309L و KJS-124 پرداخته شده است.

2- مواد و روش تحقیق

در پژوهش حاضر از فولاد DSS 2205 و فولاد کم آلیاژ استحکام بالای API 5L X80 با ضخامت 10 میلی متر به عنوان فلز پایه و از فلزهای پرکننده ER2209، ER309L و KJS-124 با قطر 2/5 میلیمتراستفاده شد. ترکیب شیمیایی فلزهای پایه بر اساس آنالیز کوانتومتری و ترکیب شیمیایی فلزهای پرکننده توسط شرکت سازنده در جدول (1) ارائه شده است. برای جوشکاری، نمونه هایی از فلزهای پایه با ابعاد 50×100 میلی‌متر تهیه شد و طرح اتصال به صورت جناغی یک طرفه با زاویه شیار 70 درجه و پای ریشه 1/5 میلی متر آماده گردید. جوشکاری نمونه ها با استفاده از فرایند PCGTAW انجام شد. از گاز آرگون با خلوص 99/9% با دبی 15 و 10 لیتر بر دقیقه به ترتیب به عنوان گاز محافظ و گاز پشتی برای محافظت ریشه استفاده شد. دمای بین پاسی با استفاده از ترموکوپل، 130 درجه سانتی گراد کنترل گردید. پارامترهای جوشکاری استفاده شده در جدول (2) ارائه شده است. از رابطه (1) به منظور محاسبه حرارت ورودی استفاده گردید. در این رابطه Im جریان میانگین فرایند PCGTAW، V ولتاژ، S سرعت جوشکاری و η راندمان حرارتی فرایند است که 0/8 در نظر گرفته شد [10]. Im با استفاده از رابطه (2) تعیین شد که در این رابطه Ip جریان پالس، Ib جریان زمینه، tp زمان جریان پالس و tb زمان جریان زمینه می باشد[11].

$$H.I. = \frac{V.I_m.\eta}{S} \quad (1)$$

$$I_m = \frac{I_p \times t_p + I_b \times t_b}{t_p + t_b} \quad (2)$$

بررسی های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی مجهز به سیستم تحلیل نقطه ای EDS انجام گرفت. برای آنالیز فازی تصاویر متالوگرافی از نرم افزار MIP استفاده شد.جهت تعیین میزان فریت فلز جوش پرکننده های ER309L و ER2209 از دستگاه فریت اسکوپ مدل Mp30 ساخت شرکت Fischer استفاده گردید[12]. به منظور محاسبه رقت فلزجوش، تصاویر ماکروسکپی از مقطع جوش تهیه و با استفاده از نرم افزار Infinity Analyze مساحت قسمت های مختلف جوش محاسبه شد. با استفاده از رابطه (3) میزان رقت محاسبه گردید[13]. در این رابطه، A سطح ذوب شده DSS 2205، B سطح ذوب شده فلز پرکننده و C سطح ذوب شده API 5L X80 می باشد.

$$Dilution\% = \frac{A+C}{A+B+C} \times 100 \quad (3)$$

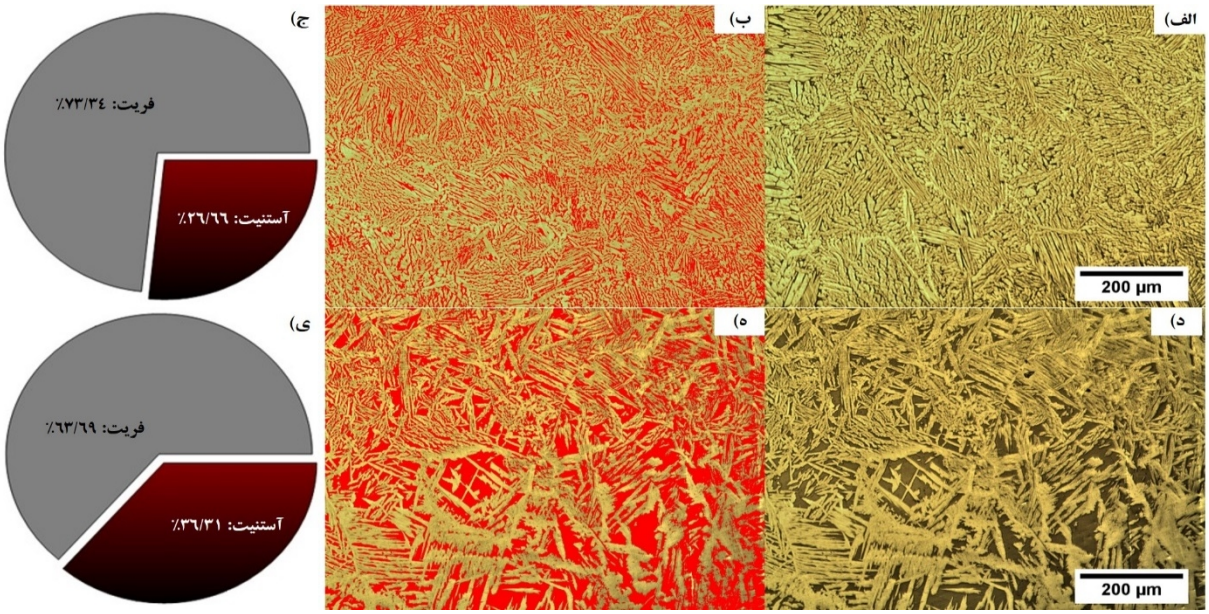
آزمایش ضربه بر اساس استاندارد ASTM A370 انجام گردید[14]. بدین منظور سه نمونه با ابعاد 10×10×55 میلی متر از قطعات جوشکاری شده به گونه ای که فلزجوش در مرکز نمونه و شیار نمونه در وسط نمونه قرار داشت، جدا گردید. آزمایش ضربه برای هر سه نمونه انجام شد و میانگین انرژی ضربه ای حاصل به عنوان نتیجه نهایی گزارش گردید. آزمون سختی به روش ویکرز و با استفاده از بار اعمالی 30 کیلوگرم انجام گرفت.

3- نتایج و بحث

3-1- ریزساختار

در این قسمت به بررسی ریزساختار فلزات جوش و فصل مشترک فلزات پایه و جوش پرداخته شده است.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل1- ریزساختار فلز جوش ER2209. الف) پاس ریشه، ب) آنالیز فازی تصویری پاس ریشه، ج) آنالیز فازی عددی پاس ریشه، د) پاس آخر، ه)آنالیز فازی تصویری پاس آخر و ی)آنالیز فازی عددی پاس آخر

الف- ریز ساختار فلز جوش

در اتصالات غیرمشابه پاس های ریشه به دلیل رقت بالاتر از توجه بیشتری برخوردارند. در شکل (1) ریزساختار پاس ریشه و پاس آخر فلز جوش ER2209 به همراه آنالیز فازی تصویری و آنالیز فازی عددی آن ها حاصل از نرم افزار MIP نشان داده شده است. مقادیر فریت بر اساس نتایج فریت اسکوپ در جدول (4) ارائه گردیده است. با توجه به اهمیت مد انجمادی و ریز ساختار فلزات جوش در فولادهای زنگ نزن برای تعیین آنها از نمودار ساختاری WRC-1992 استفاده شد. ابتدا بر اساس معادلات (3) و (4) مقادیر کرم معادل (Creq) و نیکل معادل(Ni_{eq}) فلزات پایه و جوش(جدول (3)) محاسبه گردید. نتایج حاصل به نمودار WRC-1992 انتقال داده شد. بر اساس رقت های محاسبه شده (جدول (3)) ریز ساختار نهایی فلز جوش ER2209 فریتی-آستنیتی و مد انجمادی آن فریتی(F) وبرای فلز جوش ER309L ریزساختار نهایی آستنیتی-فریتی با مد انجمادی فریتی-آستنیتی(FA) بدست آمد. شکل (1) نشان می دهدکه ریزساختار فلز جوش ER2209 از دو فاز فریت و آستنیت تشکیل شده است. در فلزجوش حاصل از پرکننده ER2209 انجماد به صورت فریتی رخ می دهد(جدول (3)) و با کاهش دما به زیرخط انحلال فریت، استحاله فریت به آستنیت روی می دهد و ابتدا آستنیت در مرزدانه های فریت تشکیل می‌شود. این استحاله به صورت جوانه زنی و رشد صورت می‌گیرد لذا به شدت وابسته به پدیده نفوذ است. در اثر این استحاله مرزدانه های فریت توسط آستنیت پوشانده می شود. آستنیت اضافی یا به صورت صفحات ویدمن اشتاتن از آستنیت مرزدانه‌ای به طرف داخل دانه ها و یا به صورت درون دانه‌ای (آستنیت ثانویه) داخل دانه‌های فریت تشکیل می شود[5].

در جوشکاری چندپاسه، حرارت جوشکاری پاس های بعدی سبب افزایش دمای فلزجوش و تسریع در نفوذ و لذا بهبود استحاله تشکیل آستنیت می گردد. بعلاوه در اثر این افزایش دما، مقداری آستنیت ثانویه نیز در فلز جوش دوفازی تشکیل می‌گردد. لذا مقدار آستنیت نسبت به حالت پس از جوشکاری، افزایش و درصد فریت کاهش می یابد. تحقیقات دیگر محققان نیز نتایج مشابهی را نشان داده است [7و15].از مقایسه شکل‌های (1-الف) و (1-د)،می توان دریافت که آستنیت تشکیل شده در پاس آخر در مقایسه با پاس ریشه، بیشتر به صورت ویدمن اشتاتن می‌باشد. علت این مسئله بیشتر بودن سرعت سرد شدن پاس آخر در مقایسه با پاس ریشه است. افزایش سرعت سرد شدن با توجه به ماهیت نفوذی استحاله تبدیل فریت به آستنیت سبب کاهش مقدار این استحاله می‌شود.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول1- ترکیب شیمیایی فلزهای پایه و پرکننده (درصد وزنی)

عنصر (%Wt.)	Fe	Ni	Cr	Mn	Mo	Cu	V	Nb	Ti	Si	C	N	S	P
DSS 2205	مانده	۵/۸	۲۲	۲	۳	۰	–	–	–	۰/۷۹	۰/۰۳	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۰۳
API 5L X80	مانده	۰/۲۵	۰/۰۲	۱/۸	۰/۲۹	۰/۰۰۹	۰/۰۰۳	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۲۵	۰/۰۷	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۷
ER2209	مانده	۷/۱۵	۲۳/۵	۱/۸۳	۳/۶۵	۰/۶۵	–	–	–	–	۰/۰۳	۰/۱۴	۰/۱۴	/۰۳
ER309L	مانده	۱۳	۲۴	۱/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	–	–	–	۰/۹	۰/۰۳	–	–	۰/۰۳
KJS-124	مانده	–	–	۲	۰/۴	–	–	–	–	۰/۳۵	۰/۰۷	–	–	۰/۰۳

جدول2- پارامترهای جوشکاری

فلز پرکننده	سرعت (mm/s)	جریان پالس، (A)	جریان زمینه، (A)	زمان جریان پالس، (S)	زمان جریان زمینه، (S)	ولتاژ، (V)	حرارت ورودی، (KJ/mm)
ER2209	0/643	۱۴۰	۷۰	۰/۱	۰/۱	۱۵	۱/۹۶
ER309L	0/633	۱۴۰	۷۰	۰/۱	۰/۱	۱۵	۱/۹۹
KJS-124	0/580	۱۴۰	۷۰	۰/۱	۰/۱	۱۵	۲/۱۷

از طرف دیگر به دلیل عدم بازگرمایش پاس آخر، آستنیت ثانویه کمتری تشکیل می گردد. بنابراین انتظار می رود که پاس آخر در مقایسه با پاس ریشه درصد فریت بالاتری داشته باشد که این مسئله با نتایج حاصل از فریت اسکوپی(جدول(4)) و آنالیز فازی (شکل‌های(1-ج) و (1-ی)) با استفاده از نرم‌افزار MIP همخوانی دارد. تصویر ریزساختار پاس ریشه و پاس آخر فلز جوش ER309L و آنالیز فازی توسط نرم افزار MIP، در شکل(2) نمایش داده شده است. با توجه به جدول(3)، حالت انجمادی فلزجوش ER309L، FA به دست آمد. در مد انجمادی FA، انجماد اولیه با فاز فریت دلتا شروع می شود وساختار نهایی آستنیتی است و همراه با مقداری فریت دلتا است که در مرزهای بین دندریت ها و یا سلول ها ایجاد شده‌اند که علت آن جدایش عناصر پایدارکننده فریت در این نواحی است. مورفولوژی فریت در این مد انجمادی اسکلتی است. با توجه به شکل(2-الف)، ساختار پاس ریشه فلز جوش دارای زمینه آستنیتی و فریت اسکلتی است.بنابراین به نظر می‌رسد که پیش بینی مد انجمادی FA برای این فلز جوش صحیح باشد.با مقایسه شکل(2-الف) و (2-د) مشخص است که در پاس آخر علاوه بر مورفولوژی فریت اسکلتی، فریت کرمی شکل نیز در ساختار وجود دارد. همچنین نتایج فریت اسکوپ در جدول(4) و آنالیز فازی توسط نرم‌افزار MIP در شکل‌های (2-ج) و(2-ی) نشان دهنده بیشتر بودن درصد فریت در پاس آخر می باشد. با توجه به وابستگی شدید استحاله فریت به آستنیت به زمان (به دلیل نفوذی بودن استحاله) و بیشتر بودن سرعت سرد شدن پاس آخر، از میزان این استحاله کاسته می شود و ساختار نهایی فریت بیشتری دارد. همچنین بازگرم شدن پاس ریشه و فعال شدن مجدد پدیده نفوذ، سبب تجزیه بخشی از فریت موجود در ساختار و تبدیل به آستنیت ثانویه می گردد و از میزان درصد فریت پاس ریشه حین جوشکاری پاس های بعدی کاسته می‌شود که چنین شرایطی برای پاس آخر وجود ندارد. اختلاف در نتایج آنالیز فازی تصویر شکل‌های(1) و (2) و نتایج فریت اسکوپ (جدول(4)) می تواند ناشی از خطای دستگاهی باشد.ریزساختار فلزجوش پاس ریشه و پاس آخر حاصل از فلز پرکننده KJS-124 در شکل(3) نشان داده شده است. با توجه به تصاویر، ریزساختار فلزهای جوش شامل فریت سوزنی، مرزدانه ای و ویدمن اشتاتن همراه با جزایر مارتنزیت-آستنیت (M-A) می‌باشد.در فلزجوش KJS-124، ساختار پس از انجماد فریت دلتا است و در طی سرد شدن به

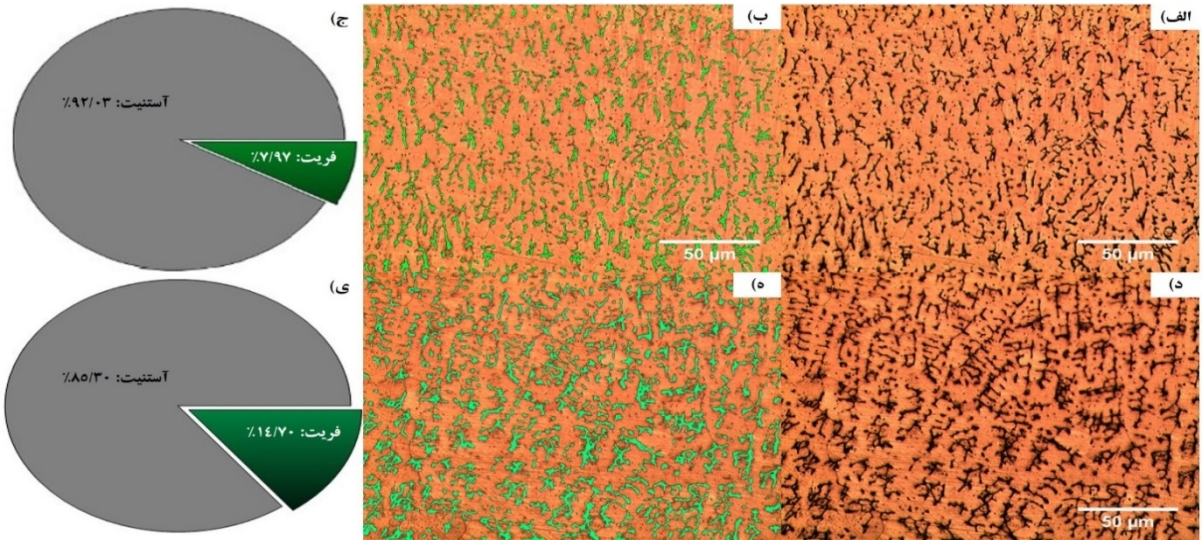
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول3- کروم و نیکل معادل فلزهای پایه و پرکننده (درصد وزنی) و رقت فلز جوش

فلزهای پایه و پرکننده	WRC-1992		درصد رقت	
	کروم معادل	نیکل معادل	پاس ریشه	پاس رویی(آخر)
DSS 2205	۲۵	۹/۶۵	–	–
API 5L X80	۰/۳۲	۲/۵	–	–
ER2209	۲۷/۱۵	۱۱/۲	۳۰	۲۲
ER309L	۲۴/۷۵	۱۴/۱۱	۳۲	۲۱
KJS-124	۰/۴	۲/۵۴	۳۳	۱۹

جدول4- نتایج حاصل از فریت اسکوپ

شماره نمونه	درصد فریت پاس ریشه	درصد فریت پاس آخر
ER2209	۳۵	۴۱
ER309L	۶	۱۰



شکل2- ریزساختار فلز جوشER309L. الف) پاس ریشه، ب) آنالیز فازی تصویری پاس ریشه، ج) آنالیز فازی عددی پاس ریشه، د) پاس آخر، ه)آنالیز فازی تصویری پاس آخر و ی) آنالیز فازی عددی پاس آخر

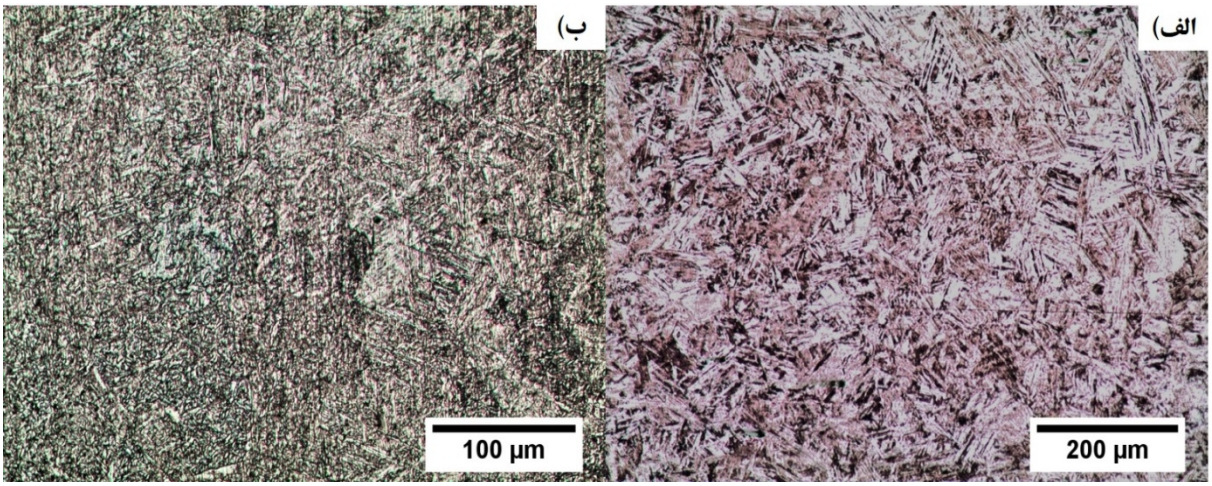
طور کامل به آستنیت تبدیل می‌گردد. با سرد شدن آستنیت، فریت در مرزدانه جوانه می‌زند و به سمت درون دانه رشد می‌کند. با کاهش دما و قابلیت تحرک جبهه رشد صفحات فریت مرزدانه ای، فریت ویدمن اشتاتن تشکیل می شود. با کاهش بیشتر دما، سرعت رشد فریت ویدمن اشتاتن به درون دانه نیز کاهش می یابد و جوانه های جدید فریت در جلوی آن تشکیل می شود که منجر به ایجاد فریت سوزنی می گردد. در مراحل انتهایی تبدیل آستنیت به فریت سوزنی کربن مازاد بر حلالیت فریت پس زده می شود و باعث افزایش کربن در آستنیت استحاله نیافته(باقی‌مانده) می‌گردد. از طرفی آستنیت به دلیل جدایش ایجاد شده غنی از کربن و عناصرپایدار کننده نظیر نیکل و منگنز است.

از این رو فقط بخشی از آن به مارتزیت استحاله می یابد و بخشی دیگر به عنوان آستنیت استحاله نیافته باقی می ماند.

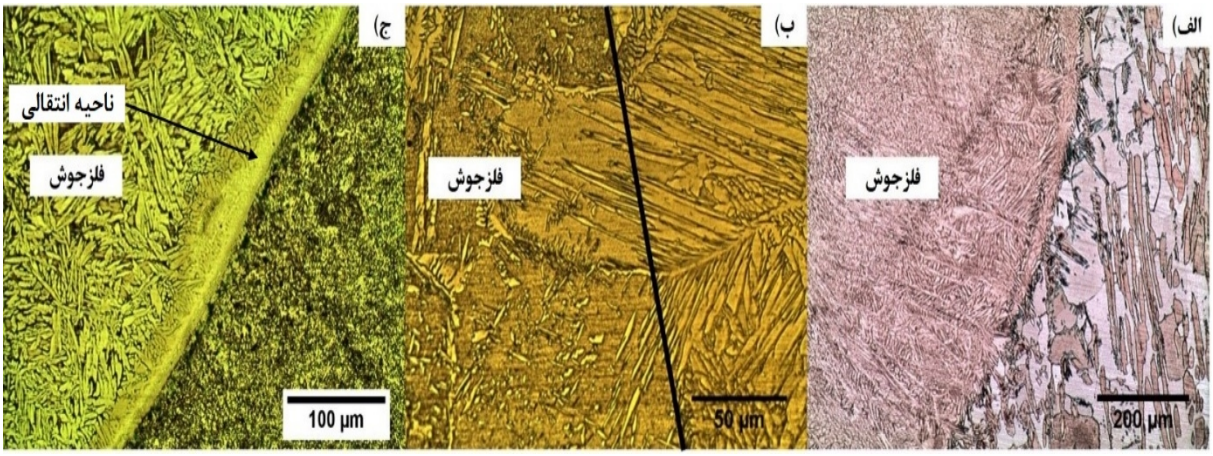
با این مکانیزم جزایر غنی از کربن شامل MA در دماهای پایین و بین فریت های سوزنی تشکیل می گردد [16و17]. میزان کروم و نیکل معادل فلزهای پایه و پرکننده، براساس دیاگرام WRC-1992 محاسبه شده و در جدول(3) ارائه شده است. میزان رقت فلزجوش با استفاده از تصویر ماکروسکپی و با کمک نرم افزار Infinity Analyze تعیین شد. سپس با توجه به ترکیب شیمیایی موجود در جدول(1) و میزان رقت فلزهای پایه، ترکیب شیمیایی فلزجوش محاسبه گردید.

با استفاده از دیاگرام شفلر و WRC-1992 درصد فریت پاس ریشه، مد انجمادی و ریزساختار فلز جوش پیش بینی گردید که

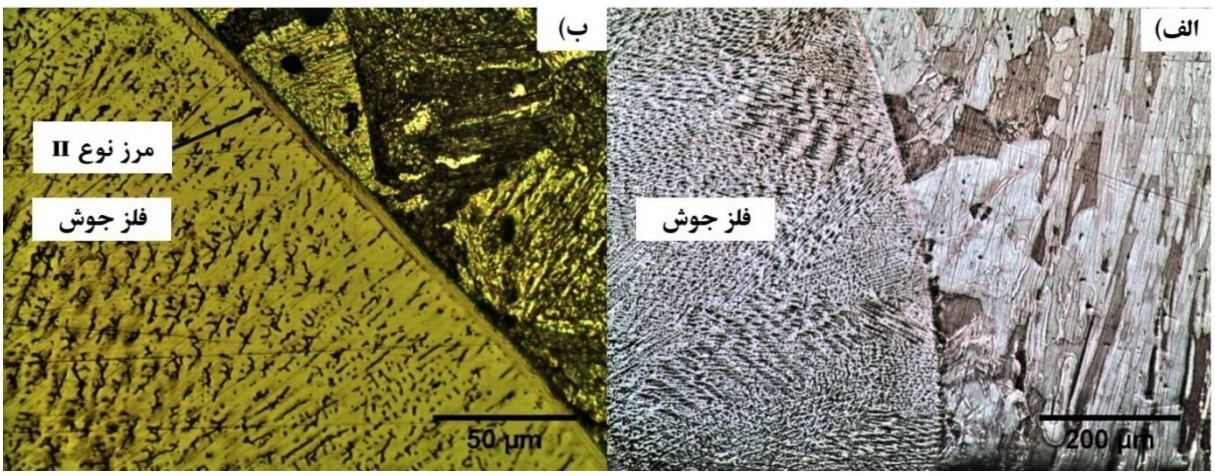
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل3- ریزساختار فلز جوش124-KJS. الف) پاس ریشه و ب) پاس آخر



شکل4- فصل مشترک فلز جوش ER2209 با فلزهای پایه الف)DSS 2205، ب)DSS 2205 با بزرگنمایی بیشتر و ج)API 5L X80



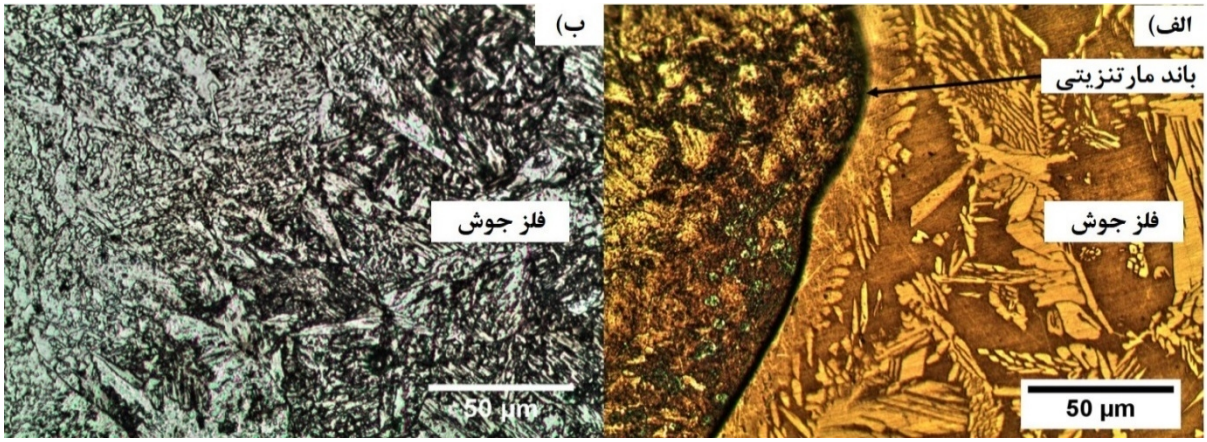
شکل5- فصل مشترک فلز جوش ER309L با فلزهای پایه الف) DSS 2205 و ب) API 5L X80

نتایج آن در جدول (3) ارائه شده است. برای بررسی پیش بینی انجام شده، درصد فاز فریت با استفاده از دستگاه فریت اسکوپ تعیین گردید که نتایج آن در جدول(4) آورده شده است.

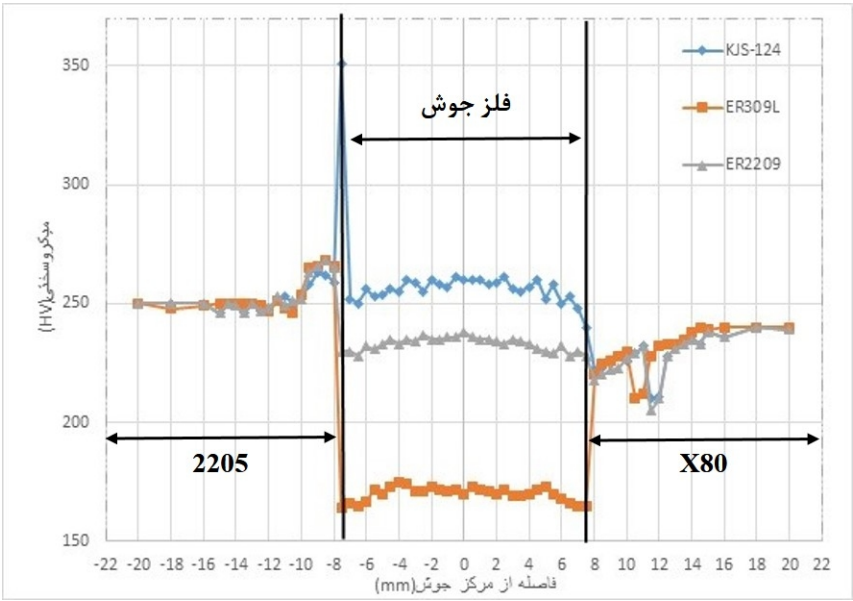
ب- فصل مشترک فلزجوش با فلزهای پایه

فصل مشترک فلزجوش ER2209 با فلزهای پایه در شکل(4) نمایش داده شده است. شکل(4-الف) و (4-ب) مربوط به

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل6- فصل مشترک فلز جوش KJS-124 با فلزهای پایه الف) ER2205 و ب) API 5L X80



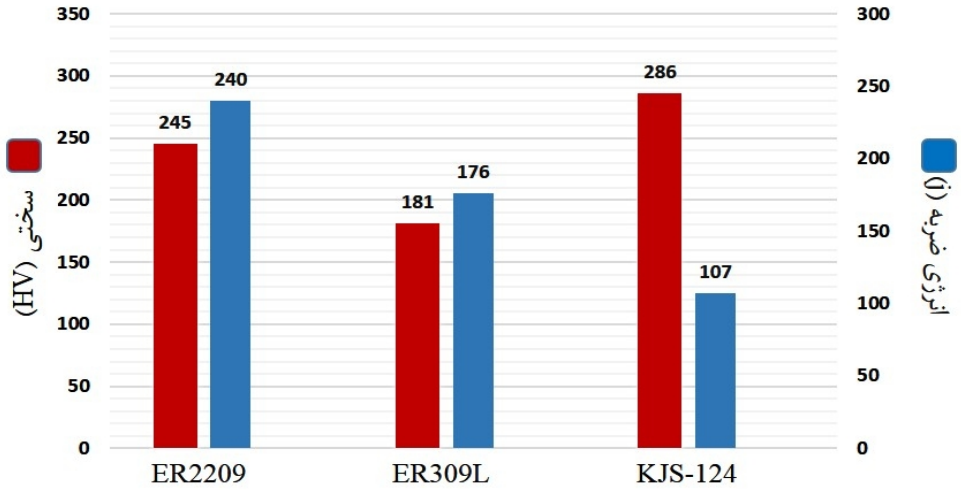
شکل7- پروفیل سختی نواحی مختلف اتصال

ریزساختار فصل مشترک فلزجوش با فولاد DSS 2205 می‌باشد.از شکل مشاهده می شود که فصل مشترک بین فلزجوش و فولاد DSS 2205 کاملا پیوسته و فاقد هرگونه ترک می باشد. به دلیل نزدیکی ترکیب شیمیایی فلزجوش و پایه و تشابه ساختار کریستالی، رشد اپی-تکسیال در این ناحیه به وضوح دیده می شود.

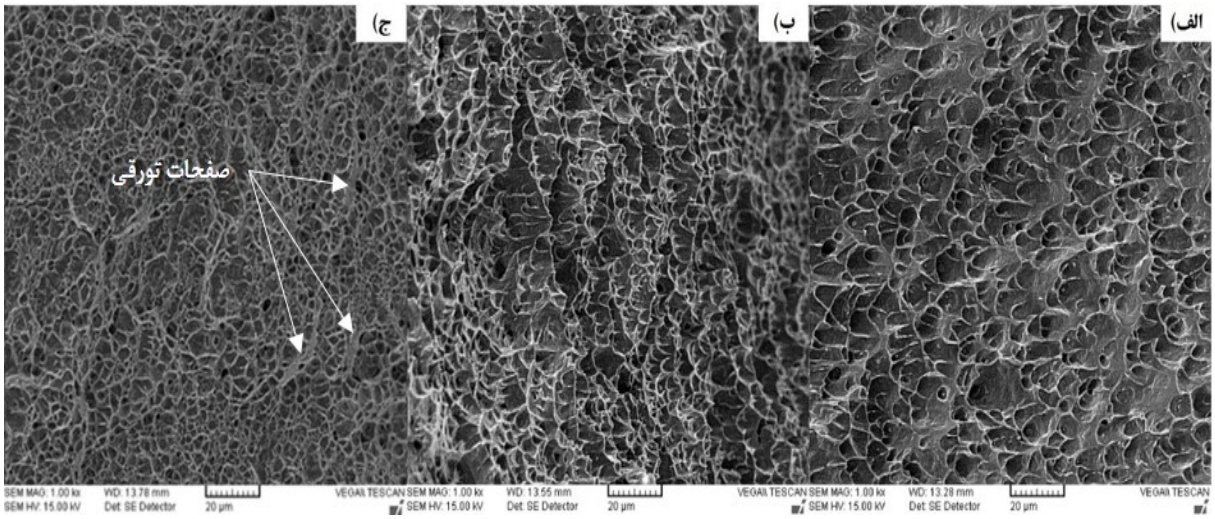
در فصل مشترک فلزجوش با فولاد API 5L X80 رشد اپی تکسیال مشاهده نمی شود که دلیل آن، تفاوت ترکیب شیمیایی و ساختار کریستالی فلزجوش و فلز پایه می باشد. پدیده دیگری که در این فصل مشترک دیده می شود، تشکیل مرز نوع II می باشد که در مجاورت مرز ذوب است. مکانیزم تشکیل مرز نوع II به این صورت است که در هنگام انجماد به دلیل تفاوت ترکیب شیمیایی و ساختار کریستالی رشد اپی تکسیال متوقف می گردد و فلزجوش به صورت ناهمگن روی فلز پایه جوانه زنی می کند. در ادامه و با سرد شدن فلزجوش و ناحیه متاثر از حرارت فلزپایه، در محدوده دمایی که هردو دارای ساختار آستنیتی هستند، فصل مشترک به صورت FCC-FCC با عدم انطباق قابل توجه می باشد که انرژی بالایی دارد و متحرک است. این مرز به دلیل گرادیان دمایی، شیب ترکیبی و انرژی کرنشی ناشی از تفاوت پارامتر شبکه کریستالی، فاصله کوتاهی را به سمت داخل فلز جوش طی می کند و با کاهش دما و یا استحاله فلزپایه به ساختار غیر FCC متوقف می شود [18و19].

در شکل (4-ج) همچنین یک ناحیه انتقالی بین فلز جوش و فلز

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل 8-. نتایج آزمون ضربه و سختی



شکل9. تصاویر میکروسکوپی الکترونی سطوح شکست فلزات جوش. الف) ER2209، ب) ER309L و ج) KJS-124

پایه دیده می شود. در جوش های غیرمشابه معمولا این ناحیه انتقالی بین فلزجوش کاملا مخلوط شده و فلز پایه تشکیل می‌گردد. اگر تفاوت ترکیب شیمیایی بین فلز پرکننده و فلزپایه بزرگ نباشد، این ناحیه انتقالی غیرقابل تشخیص است، بویژه اگر ناحیه انتقالی و ناحیه ذوب ترکیب شده دارای ریزساختار مشابه باشند. هنگامی که تفاوت ترکیب شیمیایی بزرگ است ناحیه انتقالی قابل تشخیص است. بنابراین با توجه به تفاوت ترکیب شیمیایی فلز جوش ER2209و فلز پایه این ناحیه به وضوح مشاهده می گردد.فصل مشترک فلزجوش ER309L با فلزهای پایه در شکل(5-الف) و (5-ب) نشان داده شده است. در شکل (5-الف)مشخص است که فصل مشترک فلزجوش آستنیتی با فولاد DSS 2205 از پیوستگی خوبی برخوردار است و رشد رقابتی در ساختار فلزجوش در مجاورت فصل مشترک دیده می شود. در فصل مشترک فلز جوش آستنیتی و فلزپایه API 5L X80 به دلیل تفاوت ترکیب شیمیایی بزرگ، رشد اپی تکسیال متوقف شده است و فلزجوش به صورت غیرهمگن روی فلزپایه جوانه‌زنی کرده است. در این فصل مشترک نیز به دلیل ایجاد فصل مشترک FCC-FCC در بازه ای از دما، مرز نوع II به وجود آمده است و ناحیه تشکیل مرز نوع II در فصل مشترک دیده می شود.

فصل مشترک فلز جوش KJS-124 با فلزهای پایه در شکل(6) نمایش داده شده است. از شکل مشاهده می شود که فصل

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

مشترک فلز جوش با هر دو فلز پایه از پیوستگی خوبی برخوردار است و فاقد هر گونه ترک و ناپیوستگی است. با توجه به شکل(6-الف)، در فصل مشترک فلزجوش با فولاد DSS 2205 به دلیل تفاوت ترکیب شیمیایی بزرگ، رشد اپی‌تکسیال متوقف می‌شود و فلزجوش به صورت غیرهمگن روی فلزپایه جوانه زنی می کند. به دلیل امکان ایجاد فصل مشترک FCC-FCC در محدوده ای از دما و برخی مناطق فصل مشترک، مرز نوع II ایجاد شده است و ناحیه تشکیل مرز نوع II دیده می شود. علاوه براین یک باند مارتنزیتی در مرز ذوب دیده می‌شود. تشکیل این باند مارتنزیتی میتواند ناشی از ذوب شدن فلز جوش و سرد شدن سریع آن در در کناره خط ذوب پس از انجماد حوضچه جوش باشد. تغییرات ریزسختی در کناره های جوش در فصل مشترک فلز جوش با فلز پایه DSS 2205 نیز وجود نوار نازک مارتنزیتی را تایید می کند (شکل (7)). وجود لایه نازک مارتنزیتی در فصل مشترک توسط دیگر محققان نیز گزارش گردیده است [7]. شکل(6-ب) نشان می دهد که فصل مشترک فلزجوش با فلزپایه API 5L X80 پیوسته می باشد و در این فصل مشترک به دلیل نزدیکی ترکیب شیمیایی و نقطه ذوب فلز پایه و جوش رشد اپی تکسیال روی داده است. با توجه به رشد دانه در ناحیه متاثر از حرارت در مجاورت مرز ذوب، دانه های درشت در فلزجوش، به دلیل رشد اپی تکسیال، ایجاد شده است.

3-2- خواص مکانیکی

در شکل (8) نتایج آزمون های سختی سنجی و ضربه گزارش گردیده است. از شکل مشاهده می شود که فلز جوش KJS-124 بالاترین سختی را دارد. علت این مسئله حضور فریت سوزنی به همراه جزایر M-A در ریزساختار میکروسکوپی آن می باشد که موجب افزایش سختی فلزجوش شده است. سختی فلزجوش ER2209 بیش از فلز جوش ER309L می باشد. ماهیت دوفازی ساختار فلزجوش ER2209 به همراه وجود مقداری نیتروژن در ترکیب شیمیایی سبب افزایش سختی نسبت به فلزجوش آستنیتی ER309L شده است. نیتروژن به عنوان یک عنصر حل شونده بین نشین می تواند تاثیر زیادی بر افزایش سختی و استحکام داشته باشد.

نتایج آزمون ضربه شارپی برای فلزجوش نمونه های مختلف در شکل (8) نشان می دهد که فلز جوش ER2209 دارای بیشترین مقدار انرژی ضربه (بهترین چقرمگی شکست) می‌باشد. پس ازآن، بیشترین انرژی ضربه به ترتیب مربوط به فلزات جوش ER309L و KJS-124 می باشد. بیشتر بودن انرژی ضربه فلزجوش ER2209 ناشی از پیچیدگی فصل مشترک فریت-آستنیت در ساختار دوفازی آن است. پیچیدگی فصل مشترک به دلیل افزایش مانع در مسیر اشاعه ترک باعث بهبود چقرمگی وافزایش انرژی ضربه ای می شود. فلزجوش ER309L به دلیل وجود مقداری فریت دلتا در زمینه آستنیتی خود، انرژی ضربه قابل قبولی را نشان می دهد. فلزجوش KJS-124 به دلیل وجود فاز مارتنزیت وجزایر M-A در ریزساختار انرژی ضربه کمتری را در مقایسه با سایر فلزهای جوش از خود نشان می دهد.

تصویر سطوح شکست نمونه های ضربه مختلف در شکل(9) نمایش داده شده است. در سطح شکست فلزات جوش ER2209 وER309L تعداد زیادی دیمپل های سهمی شکل نسبتا درشت دیده می شود که نشان از حالت شکست نرم فلزات جوش آن‌ها می‌باشد. شکل (9-الف) مربوط به سطح شکست فلز جوش ER2209 دارای تعداد دیمپل های بیشتر وبزرگتری می باشد که نشان از نرم تر بودن شکست آن دارد. در مقابل سطح شکست فلز جوش KJS-124 دارای دیمپل های به مراتب کمتری و ریزتری بوده است و بعضی سطوح شکست تورقی نیز در آن مشاهده می شود که تمایل به شکست نرم در آن را کاهش و تمایل به شکست ترد را افزایش داده است. این وضعیت می تواند به حضور جزایر M-A و فاز ماتنزیت در ریزساختار فلزجوش آن مرتبط باشد.

4- نتیجه گیری

در این قسمت نتایج حاصل از این پژوهش به اختصار ارائه گردیده است.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

• مشخص گردید که فلزجوش ER2209 دارای ریزساختار دوفازی آستنیت-فریت است که آستنیت در مرزدانه های فریت و به صورت صفحات ویدمن اشتاتن درون دانه های آن وجود دارد. فلزجوش ER309L دارای ریزساختار با زمینه آستنیتی همراه با فریت دلتای اسکلتی و فلزجوش KJS-124، دارای ریزساختار با فریت مرزدانه ای، ویدمن اشتاتن و سوزنی همراه با جزایر M-A می باشد.

• در فصل مشترک های ER2209/DSS2205، ER309L/DSS 2205 و KJS-124/API 5L X80 رشد اپی‌تکسیال و در فصل مشترک ER2209/API 5L X80، ER309L/API 5L X80 و KJS-124/DSS 2205 یک ناحیه انتقالی به همراه مرز نوع II مشاهده شد. مشخص گردید که در فصل مشترک KJS-124/DSS 2205 یک باند مارتنزیتی تشکیل گردیده است.

• نتایج نشان داد که میزان فریت در پاس ریشه فلزهای جوش ER2209 و ER309L، به دلیل تفاوت در رقت و بازگرمایش ناشی از پاس های بعدی جوشکاری، کمتر از پاس نهایی می‌باشد.

• بیشترین مقدارسختی معادل 286 ویکرز برای فلز جوش KJS-124 و کمترین مقدار سختی معادل 181 ویکرز برای فلزجوش ER309L به دست آمد.

• بیشترین انرژی ضربه ای به ترتیب برای فلزهای جوش ER2209، ER309L و KJS-124به میزان 240، 176 و 107 ژول به دست آمد. بررسی سطح شکست نمونه های ضربه نشان داد که حالت شکست فلزجوش ER2209 و ER309L نرم و KJS-124 مایل به ترد می باشد.

منابع

[1] Ramkumar, K. Devendranath, D. Mishra, G. Thiruvengatam, S. P. Sudharsan, T. H. Mohan, V. Saxena, R. Pandey, and N. Arivazhagan. "Investigations on the microstructure and mechanical properties of multi-pass PCGTA welding of super-duplex stainless steel. "Bulletin of Materials Science", Vol. 38, No. 4, pp. 837-846, 2015.

[2] C. Farrar, "The alloy tree: a guide to low-alloy steels, stainless steels and nickel-base alloys", Elsevier, 2004.

[3] H. Aydin, and T.W. Nelson, "Microstructure and mechanical properties of hard zone in friction stir welded X80 pipeline steel relative to different heat input", Materials Science and Engineering: A, Vol. 586, pp.313-322, 2013.

[4] J. Wang, M.X. Lu, L. Zhang, W. Chang, L.N. Xu, and L.H. Hu, , "Effect of welding process on the microstructure and properties of dissimilar weld joints between low alloy steel and duplex stainless steel", International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, Vol. 19, No. 6, pp.518-524, 2012.

[5] J. C. Lipold, D. J. Kotecki, "welding metallurgy and weldability of stainless steels", John Wiley & Sons, 2005.

[6] S. Wang, Q. Ma, and Y. Li, "Characterization of microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of dissimilar welded joint between 2205 duplex stainless steel and 16MnR", Materials & Design, Vol. 32, No. 2, pp. 831-837, 2011.

[7] B. I. Mendoza, Z. C. Maldonado, H. A. Albiter, and P. E. Robles. "Dissimilar welding of super duplex stainless steel/HSLA steel for offshore applications joined by GTAW", Journal of Engineering, Vol. 2, No. 7, pp. 520-528, 2010.

[8] M. Yousefieh, M. Shamanian, A.R. Arghavan, "Analysis of Design of Experiments Methodology for Optimization of Pulsed Current GTAW Process Parameters for Ultimate Tensile Strength of UNS S32760 Welds", Journal of Metallography, Microstructure and Analysis, Vol. 1, No. 2, pp. 85-91, 2012.

[9] S. Kou, "Welding metallurgy", John Wiley & Sons, 2003.

[10] م. جولا، س.ر. علوی زارع و ر. دهملایی، "تاثیر حرارت ورودی بر ریزساختار فلز جوش اتصال غیرمشابه فولاد زنگنزن AISI316 و فولاد مقاوم به حرارت A387-Gr.91"، اولین همایش منطقه ای مهندسی جوش و بازرسی فنی خوزستان، 1395.

[11] M. Jula, R. Dehmolaei, and S.R. Alavi Zaree, "Statistical Approach to the Corrosion Behavior of Dissimilar Welds of A387-Gr91/AISI316 Steels with PCGTAW Process", Journal of Advanced Materials and Processing, Vol. 5, No. 1, pp. 3-12, 2017.

[12] American Welding Society, "Standard Procedures for Calibrating Magnetic Instruments to Measure the Delta Ferrite Content of Austenitic and Duplex Ferritic-Austenitic Stainless Steel Weld Metal", AWS A4.2M, 2006.

[13] R.W. Messler, "Principles of Welding", John Wiley & Sons, 1999.

[14] American Society for Testing and Materials, "Standard

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products", ASTM A370, 2008.

[15] E. J. Barnhouse, and J. C. Lippold. "Microstructure/property relationships in dissimilar welds between duplex stainless steels and carbon steels", WELDING JOURNAL, Vol. 77, pp. 477-s_487-s, 1998.

[16] ا. پارسایی راد، ص. معینی فر، م. عزیزیه و ر. پوریامنش، "بهبود خواص مکانیکی و ریز ساختاری فلز جوش فولاد API-X 70 جوشکاری شده به روش زیرپودری با استفاده از عملیات حرارتی"، اولین کنفرانس بین المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی، 1391.

[17] F. Sheykh Jaberi, and A.H. Kokabi. "Influence of nickel and manganese on microstructure and mechanical properties of shielded metal arc-welded API-X80 steel", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 21, No. 7, pp. 1447-1454, 2012.

[18] J.C. Lippold, "Welding metallurgy and weldability", John Wiley & Sons, 2014.

[19] س.ح. میرکریمی، خ. رنجبر، ر. دهملایی، "ارزیابی منطقه انتقالی در اتصال غیر همجنس فولاد کم آلیاژ فریتی A387-Gr.11 به فولاد زنگ نزن آستنیتی 316"، اولین کنفرانس بین‌المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی، 1391.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]