

تأثیر حرارت ورودی بر ریزساختار، سختی و مقاومت به ضربه اتصالات جوش فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵ با روش GTAW

محمدعلی ترحم نژاد^{۱*}، رضا دهملانی^۲، صادق معینی فر^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، خوزستان، ایران

۲- استادیار و عضو هیات علمی، دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، خوزستان، ایران

* m_tarahom@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۱۹، تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۱/۳۰)

چکیده

در این پژوهش ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال جوش فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵ در چهار حرارت ورودی ۰.۸۶، ۰.۹۱، ۱.۰۲، ۱.۱۲ kJ/mm مورد بررسی قرار گرفت. جوشکاری با فرایند^۱ GTAW با قطبیت منفی انجام شد. پس از جوشکاری تأثیر حرارت ورودی بر روی ریزساختار فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به سیستم^۲ EDS بررسی شد. بررسی ها نشان داد که با افزایش حرارت ورودی، تشکیل فاز فریت نسبت به آستنیت در فلز جوش کاهش و در ناحیه متأثر از حرارت افزایش یافته است. علاوه بر این با افزایش حرارت ورودی، پهنای^۳ HAZ و اندازه دانه های فریت در این منطقه بزرگتر شد. در هر یک از اتصالات، تشکیل فاز فریت از پاس آخر تا پاس ریشه کاهش یافته است. با بررسی خواص مکانیکی اتصالات، پروفیل سختی از فلز جوش تا فلز پایه روندی کاهشی و در ناحیه متأثر از حرارت افزایشی داشت. بررسی نتایج آزمون ضربه شارپی^۴ برای نمونه ها روند افزایشی انرژی ضربه با افزایش حرارت ورودی را نشان داد. سطوح شکست نمونه ها نیز دارای مشخصه های شکست نرم بود.

واژه‌های کلیدی:

فولاد زنگ نزن دوفازی، حرارت ورودی، ریزساختار، خواص مکانیکی.

۱- مقدمه

صنایع مختلف شده است [۱-۲]. اتصال این نوع فولادها به دلیل کاربردهای متنوع در صنایع گوناگون اجتناب ناپذیر است. اتصال قطعات فولادهای فوق اغلب با روشهای جوشکاری ذوبی انجام می شود که در طی فرایند جوشکاری ذوبی^۵ تشکیل منطقه

فولادهای زنگ نزن دوفازی حاوی تقریباً مقدار مساوی از آستنیت و فریت بوده و دارای خواص مکانیکی مطلوب و مقاومت خوردگی خوبی خصوصاً در مقابل ترکهای خوردگی تشیی^۵ می باشند که این امر باعث افزایش استفاده از آنها در

توجه به به نتایج مکانیکی بدست آمده با تغییر در حرارت ورودی جوشکاری از 20kJ/cm به 15kJ/cm تغییرات قابل ملاحظه ای در خواص مکانیکی مشاهده شد که این مورد بیانگر وابستگی جوشکاری این فولاد به تغییرات حرارت ورودی می باشد. در تحقیقی، بررسی تأثیر حرارت ورودی بر ریزساختار جوش غیرمشابه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی به فولاد کم آلیاژ استحکام بالا انجام شده که نتایج نشان داد ریزساختار فلز جوش شامل دو فاز فریت و آستنیت است. هم چنین فازهای مضر بین فلزی تشکیل نشده و با افزایش حرارت ورودی از 0.5 به 2kJ/mm، به دلیل کاهش نرخ سرد شدن، میزان آستنیت فلز جوش افزایش یافته است [۷]. در این تحقیق سعی بر این است با استفاده از فرایند GTAW و چهارحرارت ورودی مختلف در محدوده 0.5-2.5kJ/mm جوشکاری فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵ انجام شده و اثرات میزان حرارت ورودی بر خواص مکانیکی اتصال، ریزساختار نواحی مختلف جوش، وسعت ناحیه متأثر از حرارت فلز جوش و منطقه ی HAZ بررسی و ارتباط آن با حرارت ورودی در جوشکاری فولاد مذکور تعیین شد.

۲- مواد و روش پژوهش

در این تحقیق از فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵، تهیه شده از مفتولی به قطر ۱۰۰ میلیمتر، به عنوان فلز پایه و سیم جوش ER2209 به عنوان فلز پرکننده استفاده شد. آنالیز شیمیایی این فولاد و سیم جوش مصرفی به روش کوانتومتری با استفاده از دستگاه PMI مدل Master PMI optiknr 13M0014 pro تعیین گردید. این نتایج در جدول (۱) نشان داده شده است.

متأثر از حرارت اجتناب ناپذیر می باشد. جنبه های ریزساختاری، مقاومت به خوردگی و وسعت این ناحیه به لحاظ حساسیت و تاثیر پارامترهای جوشکاری بر آن، همواره مورد بحث و بررسی محققین بوده است. در خصوص جوشکاری فولادهای دوفازی از جمله فولاد ۲۲۰۵ مقدار حرارت ورودی جهت رسیدن به ریزساختار و خواص مکانیکی مطلوب در محدوده 0.5-2.5 kJ/mm ذکر شده است [۲-۳]. با بررسی نتایج برخی از محققین، وابستگی خواص اتصال و وسعت منطقه HAZ به عوامل متعدد از جمله روش جوشکاری، جنس فلزات پایه، سرعت جوشکاری، درجه حرارت پیش گرمایی، حرارت ورودی، ضخامت قطعات، متغیرهای جوشکاری، شکل طرح اتصال و شکل حوضچه جوش قابل توجه است [۴]. پکارین و کوچانپا [۵] در زمینه فرایند جوشکاری لیزر فولادهای زنگ نزن دوفازی، ضمن کنترل نمودن حرارت ورودی، تغییرات ریزساختاری فولادهای زنگ نزن دوفازی و فریتی را بررسی کرده اند. نتیجه این بررسی حاکی از این است که در روش جوشکاری لیزر با ایجاد سیکهای حرارتی، باعث افزایش حرارت ورودی و به دنبال آن کاهش نرخ سرعت سرد شدن فلز جوش می گردد که در این حالت فاز آستنیت بهتر تشکیل شده که نتیجه آن کاهش میزان فاز فریت فلزات جوش را در پی خواهد داشت. همچنین با توجه به وابسته بودن ساختار میکروسکوپی قطعه به اجزاء سازنده ی آن، می بایست پارامترهای جوشکاری مناسب بطور جداگانه برای هر نوع فولاد تنظیم گردد. قاسمی [۶] تأثیر جوشکاری و حرارت ورودی بر خواص مکانیکی و ریز ساختاری فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت فولاد زنگ نزن دوفازی SAFUREX را بررسی نموده است. نتایج آزمون های مکانیکی بدست آمده مؤید این مطلب است که اتصال جوش قابل قبول با استفاده از حرارت ورودی 15 kJ/cm قابل حصول می باشد. در جوشکاری با حرارت ورودی 20 kJ/cm، به علت ایجاد فازهای ترد ثانویه در فصل مشترک فلز جوش / SAFUREX و نیز ایجاد تمرکز تنش به واسطه شرایط خاص هندسی نمونه خمش ریشه، باعث شکست نسبتاً ترد نمونه های کشش و خمش ریشه گردید. با

جدول (۱): آنالیز شیمیایی فلز پایه و فلز پرکننده (درصد وزنی)

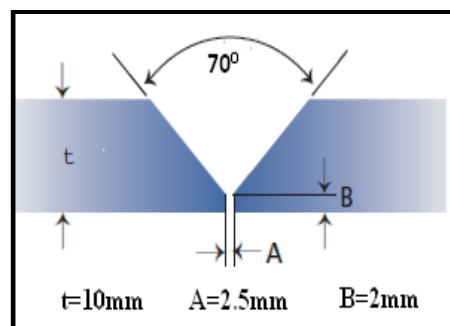
فلز پرکننده ER2209	فلز پایه ۲۲۰۵	نام عنصر
۰/۰۲۰	۰/۰۳۰	C
۰/۵۰۰	۰/۶۹۰	Si
۱/۴۳۰	۱/۶۷۰	Mn
۲۲/۲۰۰	۲۲/۶۰۰	Cr
۲/۶۳۰	۲/۵۲۰	Mo
۹/۱۷۰	۴/۶۴۰	Ni
۰/۰۲۰	۰/۰۱۰	Al
۰/۰۳۰	۰/۰۵۰	Co
۰/۰۳۰	۰/۰۱۰	Cu
۰/۰۱۰	۰/۰۱۰	Nb
۰/۰۵۰	۰/۰۵۰	V
۰/۰۲۰	۰/۰۲۰	W
۰/۰۱۰	۰/۰۱۰	Pb
۰/۰۰۸	۰/۰۰۴	Ti
۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	N
بقیه	بقیه	Fe

جوشکاری نمونه‌ها با روش GTAW-DCEN^A به صورت دستی و با طرح اتصال V شکل بطور لب به لب بر اساس استاندارد ASME B16.9 انجام شد. از سیم جوش ER2209 با قطر ۲ میلیمتر برای فلز پرکننده و از گاز آرگون با خلوص صنعتی، با دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه به عنوان گاز محافظ استفاده گردید. الکتروود مصرف نشدنی مورد استفاده، از جنس الکتروود تنگستنی حاوی ۲ درصد توریم و به قطر ۲/۴ میلیمتر بود. برای هر پاس جوش مقادیر شدت جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری اندازه‌گیری شده و با استفاده از رابطه زیر حرارت ورودی محاسبه شد [۸].

$$H. I = \eta * \frac{I * V * 60}{S * 1000} \quad (۱) \text{ حرارت ورودی}$$

در این رابطه η بازده قوس (که 0.7 در نظر گرفته شد)، I شدت جریان (آمپر)، V ولتاژ (ولت) و S سرعت جوشکاری (میلیمتر بر دقیقه) می باشد. بر اساس میانگین پارامترهای حین پاسهای

سپس نمونه‌هایی از فلز پایه به ضخامت ۱۰ میلیمتر جدا و از وسط نصف و با استفاده از دستگاه فرز به صورت جناغی یک طرفه با زاویه ۳۵ درجه پخ زده و به طور ۴ جفت دوتایی آماده مرحله جوشکاری شدند. شماتیک طرح اتصال در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): شماتیک طرح اتصال

از دستگاه فریت اسکوپ Fischer مدل MP30 استفاده شد. از دستگاه پراش اشعه ایکس مدل GNRMPD3000 برای شناسایی فازهای تشکیل شده در فلز جوش نیز استفاده گردید. ارزیابی مقاومت در برابر ضربه فلزات جوش نمونه های جوشکاری شده با انجام آزمایش ضربه شارپی، مطابق الزامات استاندارد AWS B4.0 صورت گرفت [۱۲]. برای انجام این آزمایش ابتدا از هر ۴ اتصال جوشکاری شده ۳ نمونه مکعب شکل، با ابعاد $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}$ بر طبق استاندارد مذکور به نحوی که فلز جوش درست در مرکز نمونه واقع بوده، تهیه شدند. این آزمایش با دستگاه ضربه شارپی مدل Controlab و در دمای 27°C انجام شد و متوسط نتایج آزمایش نیز برای هر اتصال محاسبه شد. آزمایش ریزسختی سنجی با دستگاه BOWERS مدل 400DAT به روش ویکرز با بار 100 gf و زمان بارگذاری 10 s ، همچنین آزمایش سختی سنجی ویکرز با دستگاه KOOPA مدل UVI با بار 30 Kg نیز انجام شد. آزمایشهای سختی سنجی روی محل جوش، HAZ و فلز پایه نمونه ها انجام و اطلاعات آنها ثبت گردیدند.

مختلف جوشکاری، میزان متوسط حرارت ورودی بر حسب kJ/mm برای هر نمونه محاسبه گردید که نتایج آنها در جدول شماره (۲) قابل مشاهده می باشد. به منظور بررسی ریزساختار نواحی مختلف جوش، نمونه هایی از قطعات جوشکاری شده شامل بخشهایی از فلز پایه و جوش جدا گردید. سپس نمونه ها تحت آزمایش متالوگرافی قرار گرفته و پس از سنگ زنی توسط سمباده های از شماره ۶۰ تا ۴۰۰۰ سمباده زنی گردیده و سپس در دو نوبت توسط پارچه های مخصوص و به کمک پودرهای محلول آلومینا با دانه بندی $0/3$ و $0/05$ میکرون پولیش شدند. اچ نمودن نمونه ها با محلول گلیسرژیا (۳ بخش گلیسرول، ۵ بخش HCl، ۱ بخش HNO_3) به مدت ۲ دقیقه انجام شد [۹-۱۱]. سپس ریز ساختار نواحی مختلف فلز پایه و جوش از جمله فلز جوش و ناحیه ی مجاور جوش توسط میکروسکوپ نوری مدل MEIJI و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل TECHNO مجهز به سیستم تحلیل نقطه ای EDS بررسی گردید. تصاویر SEM از نمونه ها در حالت آشکارساز Secondary Electron با ولتاژ کاری 15 kV تهیه شدند. برای اندازه گیری عدد فریت در محل فلز جوش نمونه ها

جدول (۲): میانگین حرارت ورودی محاسبه شده برای نمونه ها

میانگین حرارت ورودی (kJ/mm)	مقدار حرارت ورودی برای هر پاس جوشکاری (kJ/mm)								میانگین جریان ثابت (آمپر)	تعداد پاسهای جوشکاری	شماره نمونه
	پاس ۸	پاس ۷	پاس ۶	پاس ۵	پاس ۴	پاس ۳	پاس ۲	پاس ۱			
۱/۱۲۰	۱/۵۸۰	۱/۴۰۰	۲/۱۱۰	۱/۰۵۰	۰/۶۰۰	۰/۶۴۰	۰/۸۶۰	۰/۸۱۰	۹۵/۵۰۰	۸	۱
۱/۰۲۰	-	۱/۳۸۰	۲/۰۸۰	۰/۹۸۰	۰/۸۷۰	۰/۵۵۰	۰/۴۶۰	۰/۸۳۰	۱۱۱/۲۹۰	۷	۲
۰/۹۱۰	-	۱/۳۰۰	۱/۷۱۰	۰/۸۱۰	۰/۸۰۰	۰/۴۳۰	۰/۶۳۰	۰/۷۴۰	۱۲۶/۰۰۰	۷	۳
۰/۸۶۰	-	۱/۱۲۰	۱/۱۷۰	۰/۷۷۰	۰/۹۷۰	۰/۵۴۰	۰/۵۷۰	۰/۸۴۰	۱۴۲/۱۴۰	۷	۴

که مشاهده می شود ساختار این فولاد متشکل از دو فاز فریت و آستنیت به صورت لایه ای بوده و با توجه به اینکه این نوع فولاد بنا به نیاز صنایع مختلف از حالات ریخته گری به اشکالی مانند صفحه، ورق، یا بصورت لوله تبدیل می شوند لذا در شکل مذکور آثار ساختار نوردی نیز قابل رویت است. در این تصویر

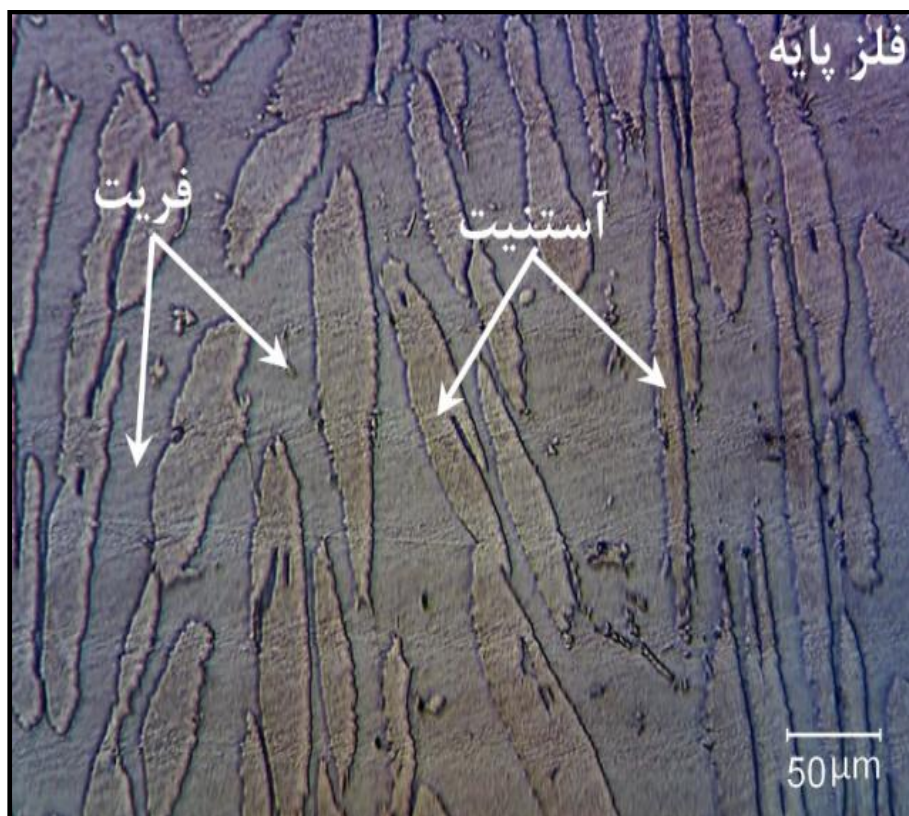
۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریز ساختار

۳-۱-۱- ریز ساختار فلز پایه

تصویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار فلز پایه فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵ در شکل (۲) نشان داده شده است. همانگونه

فاز زمینه فریت و فاز برجسته آستنیت بوده که در فاز زمینه بصورت جزیره ای شکل گرفته اند. با استفاده از دستگاه فریت اسکوپ میزان عدد فریت فلز پایه ۸۰ اندازه گیری شد که این مقدار مساوی ۵۶ درصد حجمی فریت می باشد.



شکل (۲): تصویر میکروسکوپ نوری فلز پایه فولاد دوفازی ۲۲۰۵

داده شده اند. ساختار متشکل از فاز فریت (زمینه)، آستنیت (برجسته) است. تمام فولادهای زنگ نزن دوفازی به صورت فریتی منجمد شده و تا پایان انجماد هم فریتی باقی می ماند. با پایین آمدن دما، استحاله حالت جامد فریت به آستنیت شروع می شود. ترتیب استحاله های فازی که در فولادهای زنگ نزن دوفازی در حین سرد شدن اتفاق می افتد به صورت زیر است:



چون انجماد فلزهای جوش این فولادها بصورت فریتی رخ می دهد و در پایان انجماد آستنیت تشکیل نمی شود، فریت در حالت جامد در دمای بالا پایدار می باشد. هنگامی که تبدیل به آستنیت در زیر خط انحلال آغاز گردد، ابتدا آستنیت در طول

با توجه به اینکه این مقدار نزدیک به ۵۰ درصد بوده، بیانگر این است که تعادل یک به یک بین آستنیت و فریت در فلز پایه تقریباً حفظ گردیده است. برای آلیاژهای دوفازی ضریب تبدیل عدد فریت به درصد حجمی تقریباً ۷۰ درصد در نظر گرفته می شود [۱۳]. با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نوری میانگین اندازه دانه های آستنیت فلز پایه براساس استاندارد ASTM E112 و با استفاده از نرم افزار کلمکس^۹ حدود ۲۱ μm اندازه گیری شد.

۳-۱-۲- ریز ساختار فلزات جوش

تصاویر میکروسکوپ نوری ریزساختار فلز جوش حاصل از فلز پرکننده ER2209 در قسمتهای پاس ریشه، پاسهای پرکننده و پاس آخر برای نمونه اتصال ۱ تا ۴ با میانگین حرارت ورودی به ترتیب ۱/۱۲، ۱/۰۲، ۰/۹۱ و ۰/۸۶ در شکل (۳) نشان

میانگین حرارت ورودی $1/12$ ، $1/02$ ، $0/91$ و $0/86$ می باشد، تشکیل میزان فاز فریت نسبت به فاز آستنیت با افزایش حرارت ورودی روند کاهشی را نشان می دهد. با استفاده از نرم افزار ImageJ مقادیر درصد حجمی فاز فریت نسبت به فاز آستنیت در تصاویر شکل (۳) انجام گردید که نتایج حاصله در جدول (۳) نشان داده شده است. بمنظور پیش بینی ساختار فلز جوش و عدد فریت فولادهای زنگ نزن دوفازی از دیاگرام هایی نظیر WRC-1992 استفاده می شود [۱۱، ۱۳-۱۴]. در این نمودار با محاسبه مقدار Cr_{eq} و Ni_{eq} می توان ساختار فلز جوش را پیش بینی کرد. کرم معادل $1'$ و نیکل معادل $1''$ از روابط (۳) و (۴) بدست می آیند [۱۳].

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0.7Nb \quad (3)$$

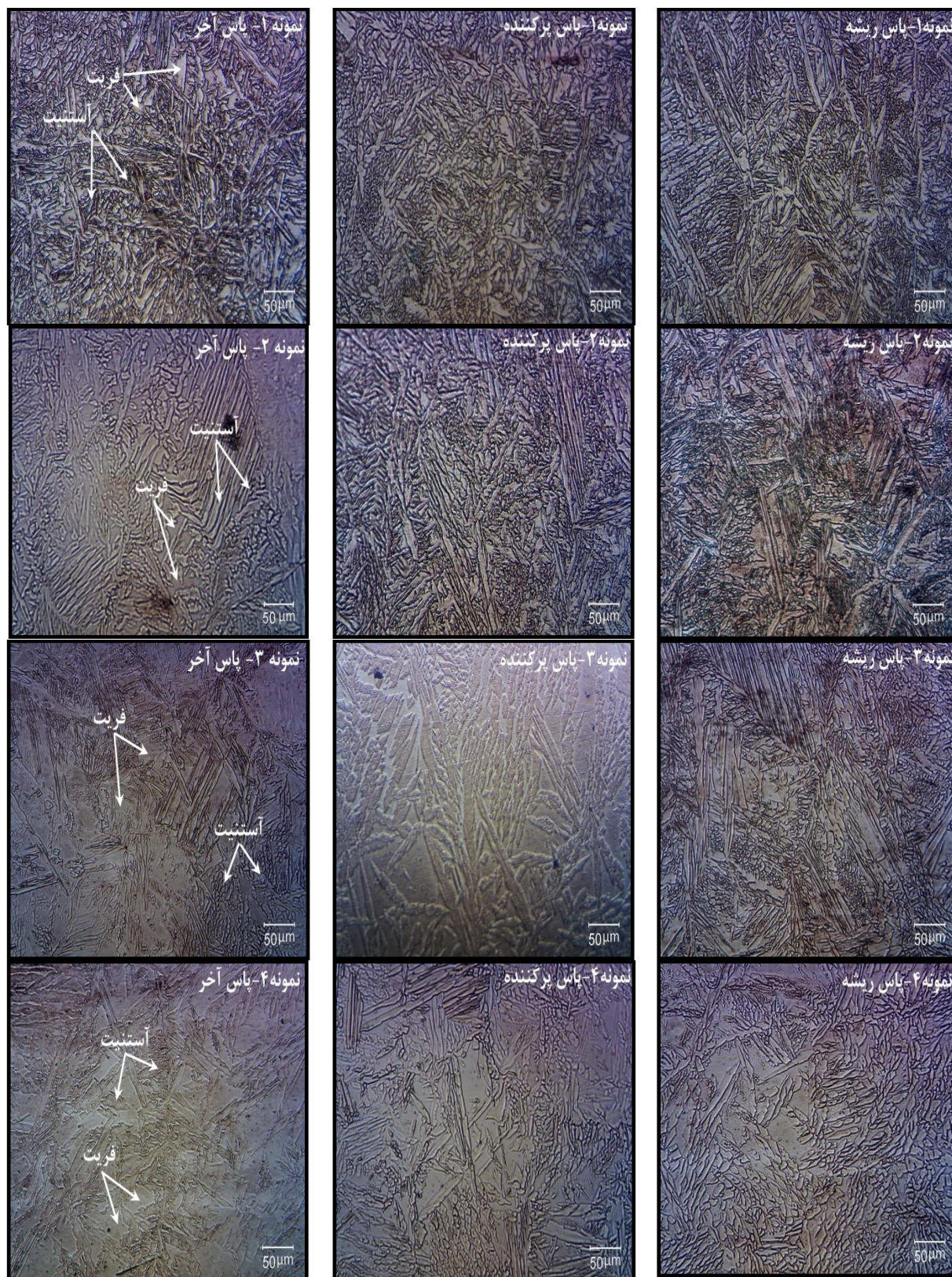
$$Ni_{eq} = Ni + 35C + 20N + 0.25Cu \quad (4)$$

برای فلز پایه، فلز پرکننده هر ۴ نمونه جوشکاری شده به روش کوانتومتری آنالیز شیمیایی تعیین و بر اساس آنها Cr_{eq} و Ni_{eq} محاسبه شد که نتایج در جدول (۴) نشان داده شده است.

مرز دانه های فریت تشکیل می شود. این امر از طریق فرآیند جوانه زنی و رشد صورت می گیرد و معمولاً سبب پوشش کامل مرز دانه های فریت توسط آستنیت می شود. آستنیت اضافی ممکن است بصورت صفحات ویدمن اشتاتن دور از آستنیت مرز دانه ای، یا بصورت درون دانه ای داخل دانه های فریت تشکیل شود [۱۳]. نسبت فریت به آستنیت در فلز جوش بستگی به دو عامل ترکیب شیمیایی فلز جوش و سرعت سرد شدن دارد، همچنین سرعت سرد شدن وابسته به هدایت حرارتی فلز و میزان حرارت ورودی جوش است، افزایش حرارت ورودی باعث کاهش سرعت سرد شدن فلز جوش گردیده که نتیجتاً افزایش زمان تغییر تشکیل آستنیت از فریت را در پی خواهد داشت [۵]. بازگرمایش قطعه جوشکاری شده سبب می شود نفوذ گرمایی بیشتری صورت گیرد که می تواند سبب رشد بیش تر آستنیت موجود و یا جوانه زنی آستنیت جدید شود. با توجه به مطالب فوق همانگونه که از تصاویر شکل (۳) مشاهده می شود، برای هر ۴ نمونه اتصال که دارای میانگین حرارت ورودی $1/12$ ، $1/02$ ، $0/91$ و $0/86$ می باشند، به صورت مقایسه ای از پاس رو تا پاس ریشه روند تشکیل فاز فریت نسبت به فاز آستنیت کاهش یافته است. همچنین برای نمونه های ۱ تا ۴ که به ترتیب دارای

جدول (۳): در صدهای حجمی فازهای فریت و آستنیت در پاسهای ریشه، پرکننده و پاس آخر برای نمونه های ۱ تا ۴

شماره نمونه	میانگین حرارت ورودی (kJ/mm)	پاس ریشه		پاس های پرکننده		پاس آخر	
		فریت	آستنیت	فریت	آستنیت	فریت	آستنیت
۱	۱/۱۲	۴۰/۲	۵۹/۸	۴۴/۲	۵۵/۸	۴۷/۷	۵۲/۳
۲	۱/۰۲	۴۵/۵	۵۴/۵	۴۹/۸	۵۰/۲	۶۵	۳۵
۳	۰/۹۱	۵۰/۳	۴۹/۷	۵۸/۶	۴۱/۴	۷۶/۲	۲۳/۸
۴	۰/۸۶	۵۷	۴۳	۷۲	۲۸	۷۷/۶	۲۲/۴



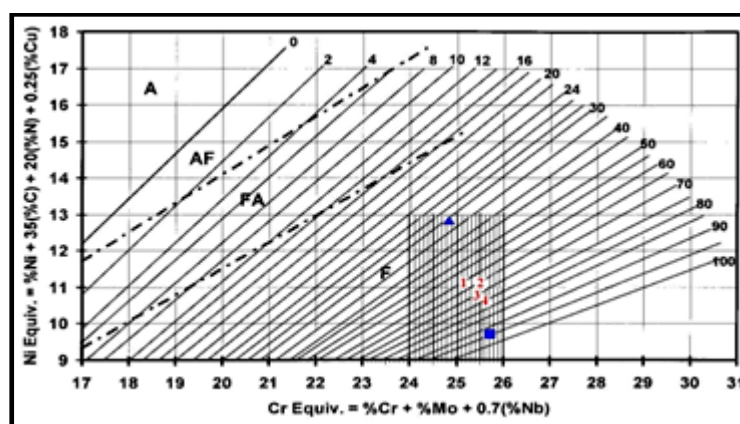
شکل (۳): تصاویر ریزساختار میکروسکوپ نوری فلز جوش در نواحی پاس ریشه، پاسهای پرکننده و پاس آخر برای نمونه های ۱ تا ۴ به ترتیب دارای میانگین حرارت ورودی ۰/۸۶، ۰/۹۱، ۱/۰۲، ۱/۱۲ (kJ/mm)

جدول (۴): مقادیر کرم معادل و نیکل معادل فلز پایه، فلز پرکننده و نمونه های جوشکاری شده (آنالیز درصد وزنی)

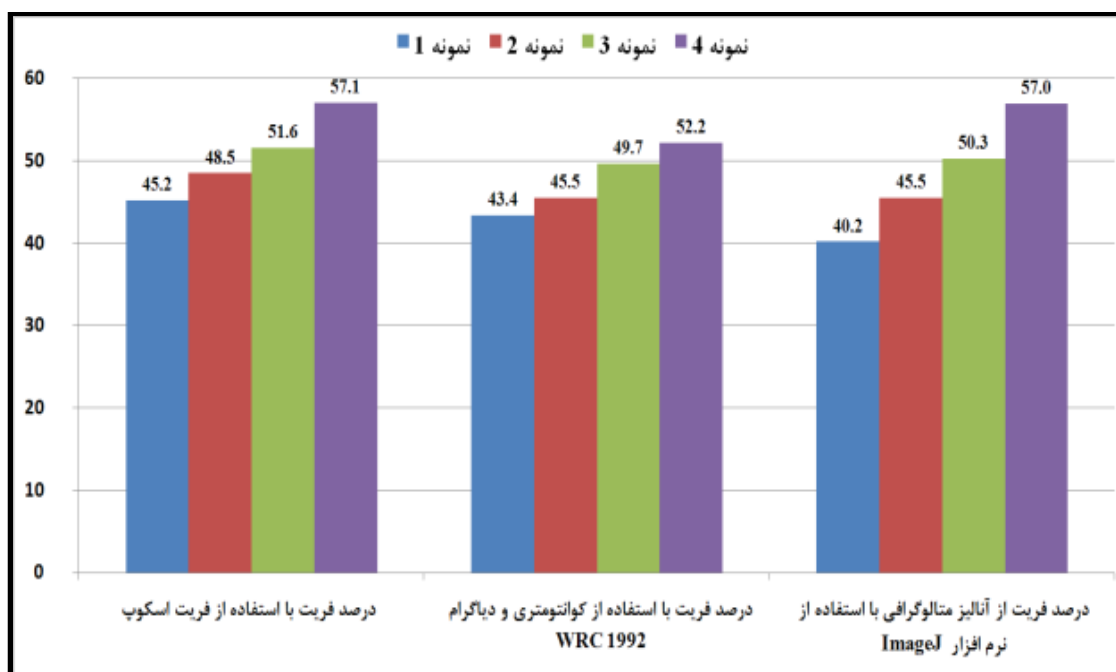
عنصر	C	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	N	کرم معادل	نیکل معادل	Cr _{eq} /Ni _{eq}
۲۲۰۵	۰/۰۳	۲۲/۶۰	۲/۵۲	۵/۵۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۱۵	۲۵/۷۰	۹/۷۰	۲/۶۴
ER2209	۰/۰۲	۲۲/۲۰	۲/۶۳	۹/۱۷	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۱۵	۲۴/۸۳	۱۲/۸۰	۱/۹۴
نمونه شماره ۱	۰/۰۲	۲۲/۳۰	۲/۸۲	۷/۴۰	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۱۵	۲۵/۱۲	۱۱/۰۴	۲/۲۸
نمونه شماره ۲	۰/۰۳	۲۲/۷۰	۲/۸۶	۷/۳۷	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۱۵	۲۵/۵۶	۱۱/۳۵	۲/۲۵
نمونه شماره ۳	۰/۰۲	۲۲/۶۰	۲/۷۹	۶/۹۸	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۱۵	۲۵/۳۹	۱۰/۷۱	۲/۳۷
نمونه شماره ۴	۰/۰۲	۲۲/۶۰	۳/۰۴	۶/۸۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۱۵	۲۵/۶۴	۱۰/۶۰	۲/۴۱

وسیله دستگاه فریت اسکوپ برای نمونه های ۱ تا ۴ به ترتیب ۴۵/۲، ۴۸/۵، ۵۱/۶ و ۵۷/۱ می باشند که پیش بینی این درصدها با استفاده از نتایج نمودار شکل (۴)، تقریباً تطابق دارند. مقایسه مقادیر فریت در فلز جوش برای نمونه های ۱ تا ۴ که به سه روش مختلف شامل اندازه گیری با دستگاه فریت اسکوپ، استفاده از نمودار WRC-1992 و نرم افزار ImageJ بدست آمده، در شکل (۵) نشان داده شده اند. در شکل مذکور، مقایسه مقادیر فریت اندازه گیری شده با دستگاه فریت اسکوپ نسبت به دو روش دیگر، نشان داد که بیشترین و کمترین درصد اختلاف مقادیر ۱۱/۰۶ و ۰/۱۷ مربوط به روش استفاده از نرم افزار ImageJ بوده که به ترتیب برای نمونه های ۱ و ۴ بدست آمدند. از این شکل همچنین روند افزایش مقدار فریت با کاهش میزان حرارت ورودی مرتبط بوده که این موضوع در تصاویر میکروسکوپ نوری شکل (۳) نیز مشهود است.

انجماد جوشهای فولادهای دوفازی با نسبت Cr_{eq}/Ni_{eq} بیش از ۱/۹۵، تنها به صورت فاز فریت می باشد [۱۵]. آلیاژی که کرم معادل WRC-1992 آنها ۱/۸۵ برابر نیکل معادل یا بیشتر باشد، به صورت ۱۰۰٪ فریت منجمد می شوند که در ارتباط فلزات پایه فولاد زنگ نزن دوفازی معمولاً دارای نسبتهای بین ۲/۲۵ تا ۳/۵ می باشند [۱۳]. در شکل (۴) نمودار WRC-1992، ترکیب شیمیایی به صورت کرم معادل و نیکل معادل برای فلز پرکننده ER2209 با علامت مثلث، برای فلز پایه دوفازی ۲۲۰۵ با علامت مربع، و برای ناحیه جوش نمونه های ۱ تا ۴ در قسمت پاس ریشه که رقت بالاتری نسبت به سایر پاس ها داشته، به ترتیب با عداد ۱ تا ۴ مشخص شده است. از این نمودار، عدد فریت برای فلز پرکننده برابر ۳۳، برای فلز پایه برابر ۹۳، و برای نمونه جوشهای ۱ تا ۴ به ترتیب برابر ۶۲، ۶۵، ۷۱ و ۷۵ مشاهده می شود. بنابراین، میزان فریت فلز جوش برای نمونه های ۱ تا ۴ به ترتیب برابر ۴۳/۴، ۴۵/۵، ۴۹/۷ و ۵۲/۵ درصد حجمی پیش بینی می شوند. درصد حجمی فاز فریت اندازه گیری شده به



شکل (۴): دیاگرام WRC-1992 برای فولادهای زنگ نزن دوفازی



شکل (۵): نمودار مقایسه ای بین سه روش اندازه گیری و محاسبه مقدار فریت در فلز جوش برای نمونه های ۱ تا ۴

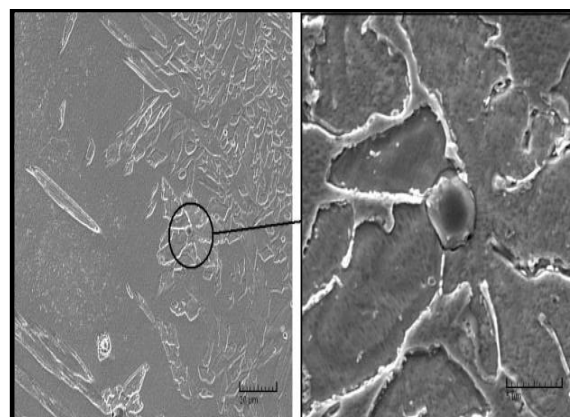
با مقایسه عناصر تشکیل دهنده این ناخالصی با آنالیز فلز پایه و فلز پرکننده که در جدول (۱) آمده، مشاهده می شود که به جز عنصر اکسیژن، مابقی عناصر مشترک و مشابه هستند. با توجه به درصد وزنی نسبتاً زیاد اکسیژن (۳۹/۱۹) و نیز میل ترکیبی شدید فلزاتی مانند کرم، منیزیم، آلومینیوم، تیتانیوم با اکسیژن، می توان نتیجه گرفت که احتمالاً این یک ذره ناخالصی اکسیدی است. در فرآیند جوشکاری GTAW وجود تخلخل و اکسید در فلز جوش ناشی از عوامل متعددی بوده که می توان به مواردی همچون استفاده از گاز محافظ نامناسب یا وجود ناخالصی در آن، جریان اضافی گاز محافظ، عدم برداشتن اکسیدهای سطحی قبل از جوشکاری، وجود ناخالصی های فلزی در فلز پایه، اشاره نمود [۱۶]. برای بدست آوردن درصد وزنی اکسیدهای هر فلز می توان از روابط زیر استفاده نمود.

$$W_{MmOn} = W_M \times \frac{M_{MmOn}}{mM_M} \quad (۴)$$

$$(W_t)_{MmOn} = \frac{W_{MmOn}}{m_T} \times 100 \quad (۵)$$

$$(W_t)_M = \frac{W_M}{m_T} \times 100 \quad (۶)$$

شکل (۶) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) یک ذره ناخالصی واقع در مرکز یک دانه ی دندرتی هم محور را نشان می دهد.



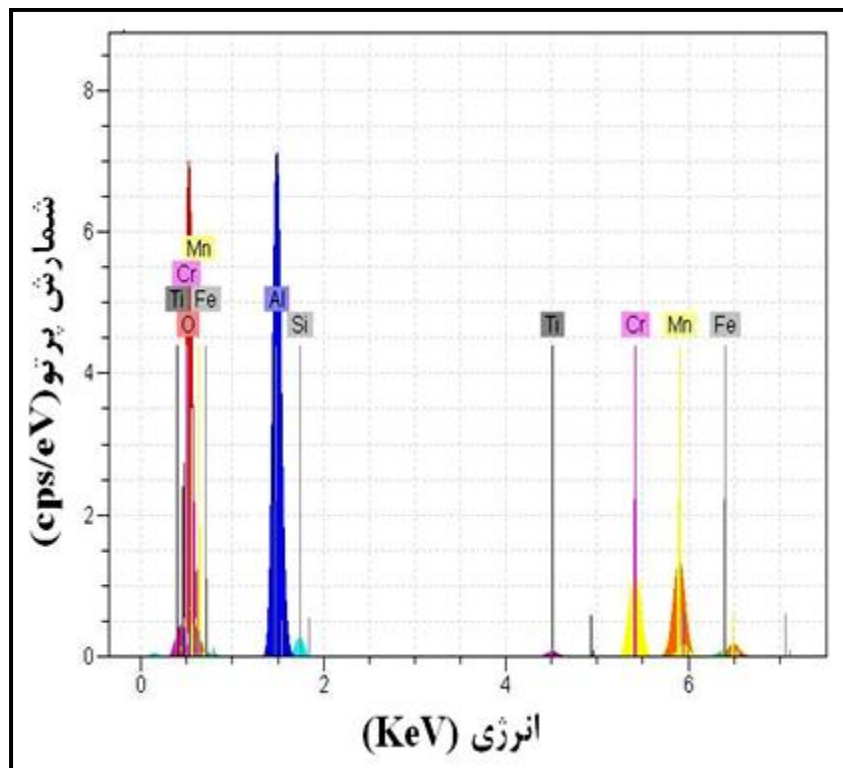
شکل (۶): تصاویر SEM یک ذره ناخالصی جوانه زا در فلز جوش (بزرگنمایی از راست به چپ 6kx و 1kx)

این ذره ناخالصی با قطر حدوداً ۵ میکرون محلی برای جوانه زنی در مرز دانه ی آستنیت، بوده است. در این نقطه آنالیز EDS برای مشخص شدن درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده انجام شد که نتایج آن در نمودار شکل (۷) و جدول (۵) آمده است.

$$(W_t)_{M_mO_n} = (W_t)_M \times \frac{M_{M_mO_n}}{mM_M} \quad (7)$$

با استفاده از فرمول (۷) در صد وزنی اکسیدهای احتمالی محاسبه شده که در جدول (۶) قابل مشاهده است.

که در آن $(W_t)_M$ ، $(W_t)_{M_mO_n}$ ، M_M ، $M_{M_mO_n}$ ، W_M ، $W_{M_mO_n}$ ، m و m_T به ترتیب جرم اکسید فلز، جرم فلز، جرم مولکولی اکسید فلز، جرم مولکولی فلز، درصد وزنی اکسید فلز، درصد وزنی فلز، تعداد مول فلز در اکسید فلز و جرم کل است [۱۷]. با ترکیب سه رابطه فوق می توان به رابطه زیر برای بدست آوردن درصد وزنی اکسیدهای هر فلز دست یافت:



شکل (۷): آنالیز نقطه ای EDS از ذره‌ی ناخالص جوانه‌زا در شکل ۶

جدول (۵): نتایج آنالیز نقطه ای EDS تشکیل دهنده ذره‌ی ناخالصی جوانه‌زا در فلز جوش

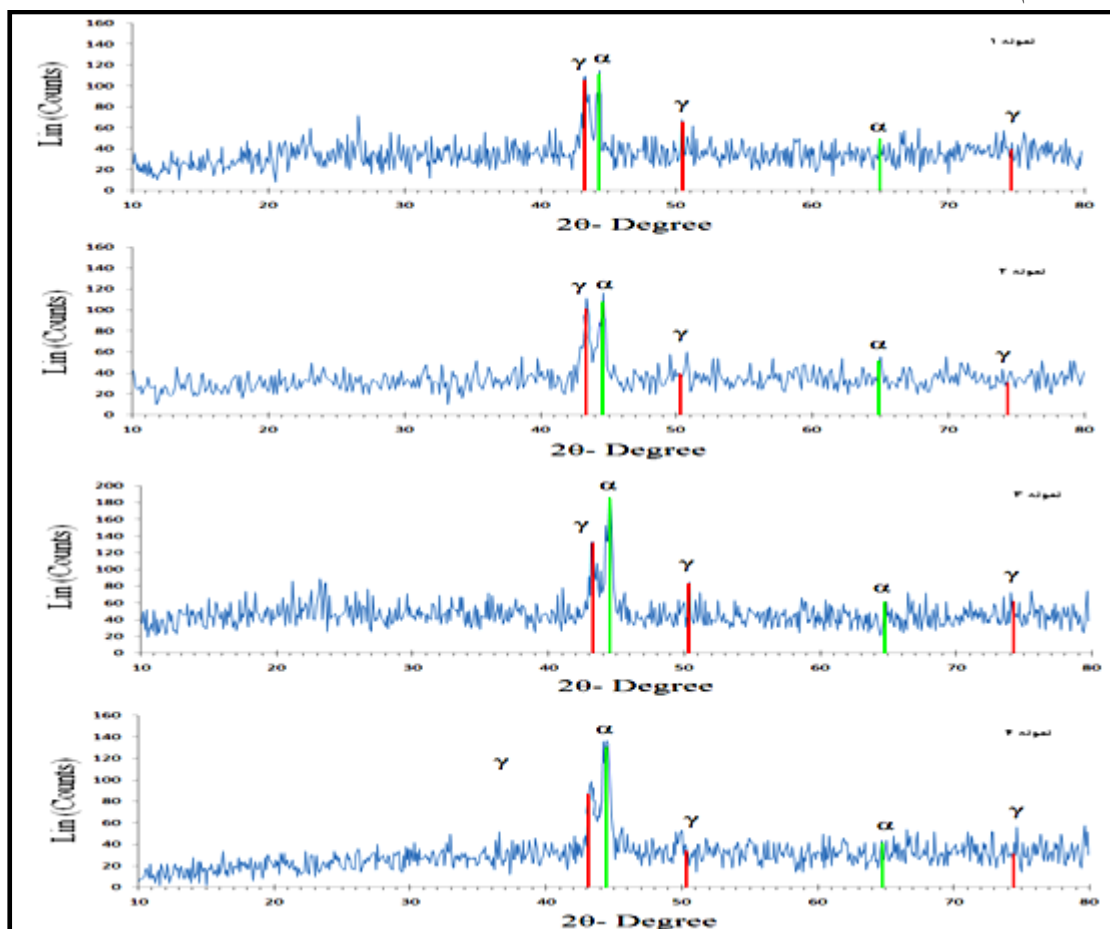
نام عنصر	درصد وزنی	درصد اتمی
اکسیژن	۳۹/۱۹	۵۸/۹۲
آلومینیم	۲۰/۴۲	۱۹/۲۹
تیتانیوم	۰/۳۰	۰/۱۶
کرم	۱۵/۳۸	۷/۵۴
منگنز	۲۲/۵۲	۱۰/۴۵
سیلیسیم	۰/۷۶	۰/۶۹
آهن	۱/۴۳	۰/۶۵

جدول (۶): پارامترهای مورد استفاده در فرمول (۷) برای محاسبه تشکیل اکسید احتمالی در فلز جوش

نام عنصر	علامت اختصاری (M)	اکسید احتمالی	m	M_M	M_{MmO_n}	$(W_t)_M$	$(W_t)_{MmO_n}$
اکسیژن	O	-	-	۱۶	-	۳۹/۱۹	-
آلومینیم	Al	Al_2O_3	۳	۲۶/۹۸	۱۰۱/۹۶	۲۰/۴۲	۳۸/۵۸
تیتانیوم	Ti	Ti_2O_3	۳	۴۷/۸۷	۱۴۳/۷۴	۰/۳۰	۰/۴۵
کروم	Cr	Cr_2O_3	۳	۵۲/۰۰	۱۵۲/۰۰	۱۵/۳۸	۲۲/۴۸
منگنز	Mn	MnO_2	۲	۵۴/۹۴	۸۶/۹۴	۲۲/۵۲	۳۵/۶۴
سیلیسیم	Si	-	-	-	-	۰/۷۶	-
آهن	Fe	-	-	-	-	۱/۴۳	-
جمع	-	-	-	-	-	۱۰۰	-

یا حداقل مقادیر آنها به حدی کم بوده که در آنالیز پراش پرتو ایکس قابل تشخیص نبوده‌اند [۷].

الگوی پراش پرتو ایکس برای نمونه های جوش در شکل (۸) ارائه شده اند. همانطور که مشاهده می شود تنها فازهای آستنیت و فریت در فلزات جوش به وجود آمده و فازهای مضرمانند رسوبات نیتريد کروم (Cr_2N) و سیگما (σ) در آنها یافت نشده و

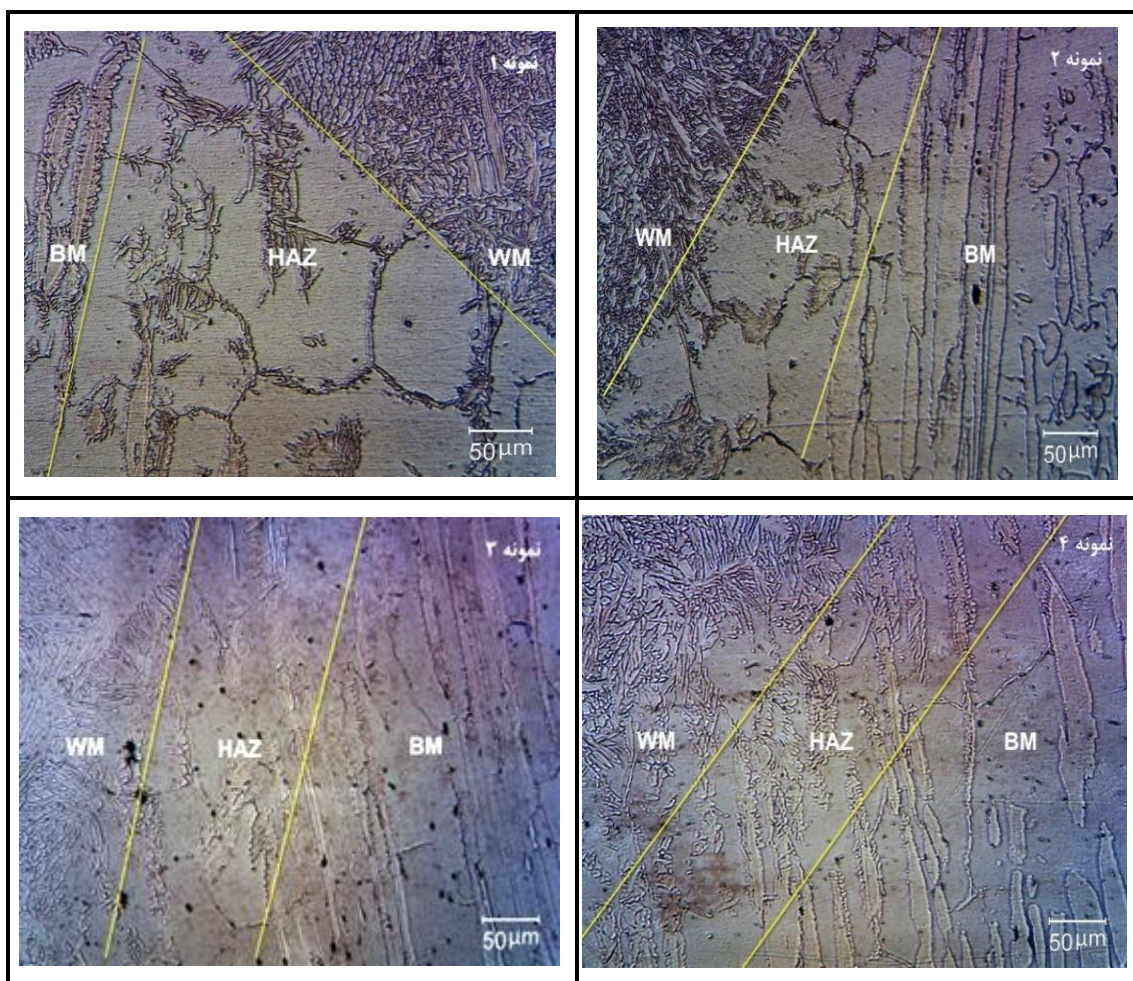


شکل (۸): نمودارهای الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) برای نمونه های جوش ۱ تا ۴

۳-۱-۳- ریزساختار فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه

تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک فلز پایه و فلز جوش برای هر ۴ نمونه اتصال در شکل (۹) ارائه شده است. با مقایسه ظاهری این تصاویر برای نمونه های ۱ تا ۴ که به ترتیب دارای میانگین حرارت ورودی ۱/۱۲، ۱/۰۲، ۰/۹۱ و

(۰/۸۶ kJ/mm) می باشد، نشان دهنده روند کوچک شدن اندازه دانه های فریت در مناطق متأثر از حرارت بوده، همچنین در این منطقه مقدار آستنیت کمتری نسبت به فلز پایه و فلز جوش تشکیل شده است.



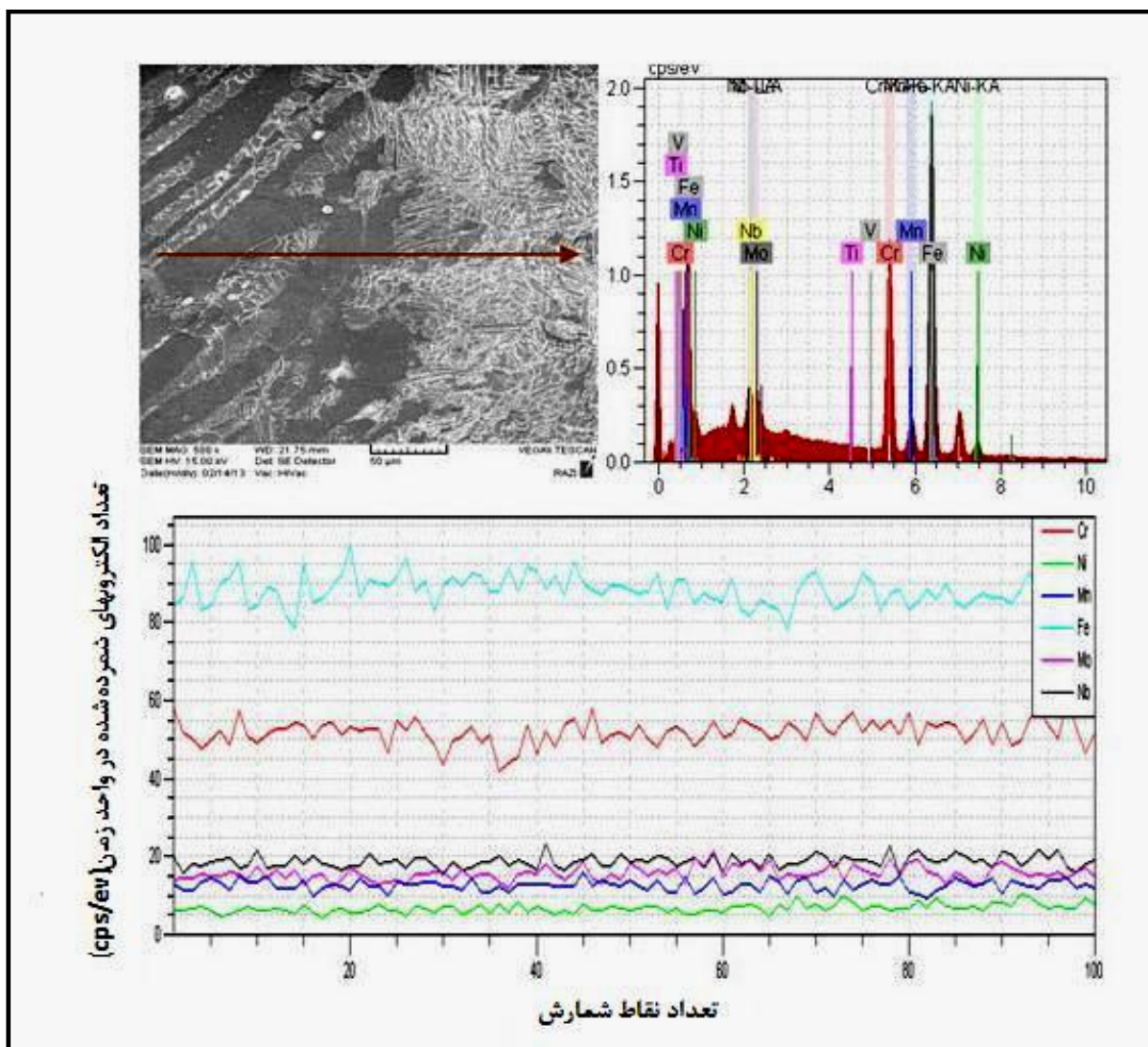
شکل (۹): تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک فلز پایه و فلز جوش برای نمونه های ۱ تا ۴ به ترتیب دارای میانگین حرارت ورودی ۱/۱۲، ۱/۰۲، ۰/۹۱ و ۰/۸۶ (kJ/mm)

HAZ یک فولاد زنگ نزن دوفازی بطور معمول حدود ۵۰ میکرون (تقریباً ۲ دانه) بوده، در حالیکه پهنای این منطقه در یک فولاد زنگ نزن آستنیتی حدود ۵۰۰ میکرون (تقریباً ۲۰ دانه) است. به همین دلیل اندازه گیری منطقه HAZ بسیار باریک فولادهای دوفازی در مقیاسهای صنعتی و تجاری بسیار مشکل می باشد [۱۸]. تعیین دقیق متالوگرافی تعادل فازی در ناحیه HAZ

متوسط پهنای ناحیه HAZ برای نمونه های ۱ تا ۴ به ترتیب تقریباً ۱۲۰، ۱۱۰، ۹۰ و ۵۰ میکرون بدست آمد. فولادهای زنگ نزن دوفازی در مقایسه با فولادهای زنگ نزن آستنیتی، منطقه HAZ بسیار باریکتری دارند که این امر بدلیل استفاده از فرایندهای جوشکاری با حرارت ورودی کم و همچنین هدایت حرارتی بسیار زیاد این فولادها می باشد [۱۸]. بر این اساس پهنای منطقه

آستنیت است، اغلب جزایر آستنیتی در ریزساختار دوفازی در زمینه فریتی حل می شوند. طی سرد شدن، در گستره دمایی ۸۰۰ تا ۱۳۰۰°C آستنیت شروع به جوانه زنی می کند، اما در نرخ سرد شدن بالا، استحاله فریت به آستنیت به تأخیر افتاده و در مقایسه با فلز پایه مقدار کمتری آستنیت تشکیل می شود [۷ و ۱۱]. روی نمونه های ۱ تا ۴ اسکن خطی به روش نیمه کمی EDS جهت تعیین عناصر موجود در حد فاصل فلز جوش تا فلز پایه انجام گردید. همانگونه که در شکل (۱۰) نشان شده، عناصر موجود در فلز جوش نمونه ها نسبت به عناصر فلز پایه، دارای طیفی همگن و مشابه به هم می باشند.

فولادهای زنگ نزن دوفازی تقریباً غیر ممکن است [۲]. برای فولادهای دوفازی اندازه دانه در HAZ و پهنای این منطقه با افزایش حرارت ورودی، افزایش می یابد. همچنین برای فولادهای زنگ نزن دوفازی بستگی به ترکیب شیمیایی، محدوده دمای انحلال فریت آنها از ۱۲۵۰ تا ۱۳۵۰°C می باشد، بنابراین پهنای منطقه کاملاً فریتی در HAZ می تواند به طور قابل ملاحظه ای تغییر کند [۱۳ و ۱۹]. به دلیل نرخ بالای سرد شدن ناشی از جوشکاری، ریزساختار منطقه متأثر از حرارت در جوش های فولاد زنگ نزن دوفازی دارای نسبت نا تعادلی از فریت و آستنیت است. از آن جایی که حداکثر دما در منطقه متأثر از حرارت بسیار بیش تر از حد بالایی تعادل فازی بین فریت و

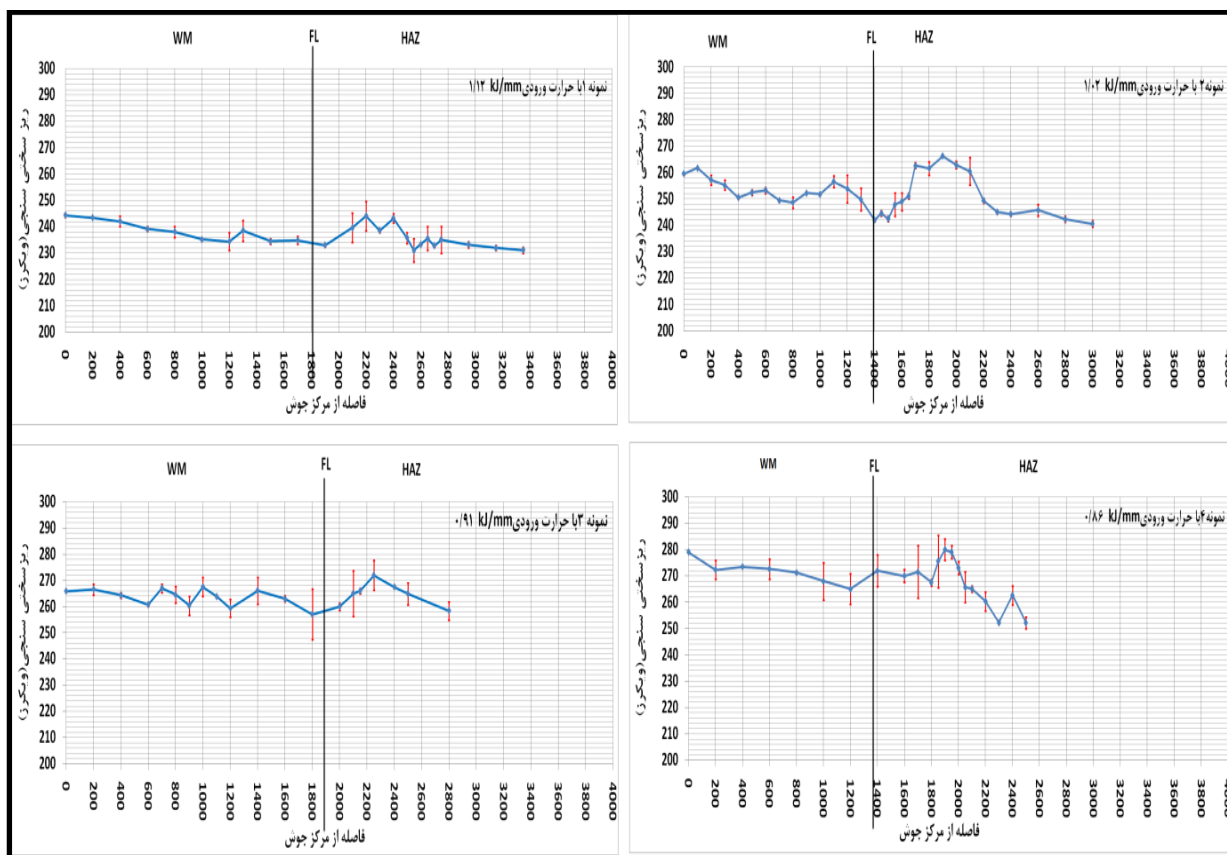


شکل (۱۰): نمونه آنالیز خطی به روش EDS در حد فاصل فلز پایه به سمت فلز جوش روی نمونه های ۴ تا ۱

۲-۳- خواص مکانیکی

نتایج اندازه گیری ریزسختی سنجی و سختی سنجی از فلز جوش تا فلز پایه از قسمت سطح مقطع اتصال جوش نمونه های ۱ تا ۴ به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است. در دو روش فوق همانگونه که از شکل‌های مذکور مشاهده می گردد در

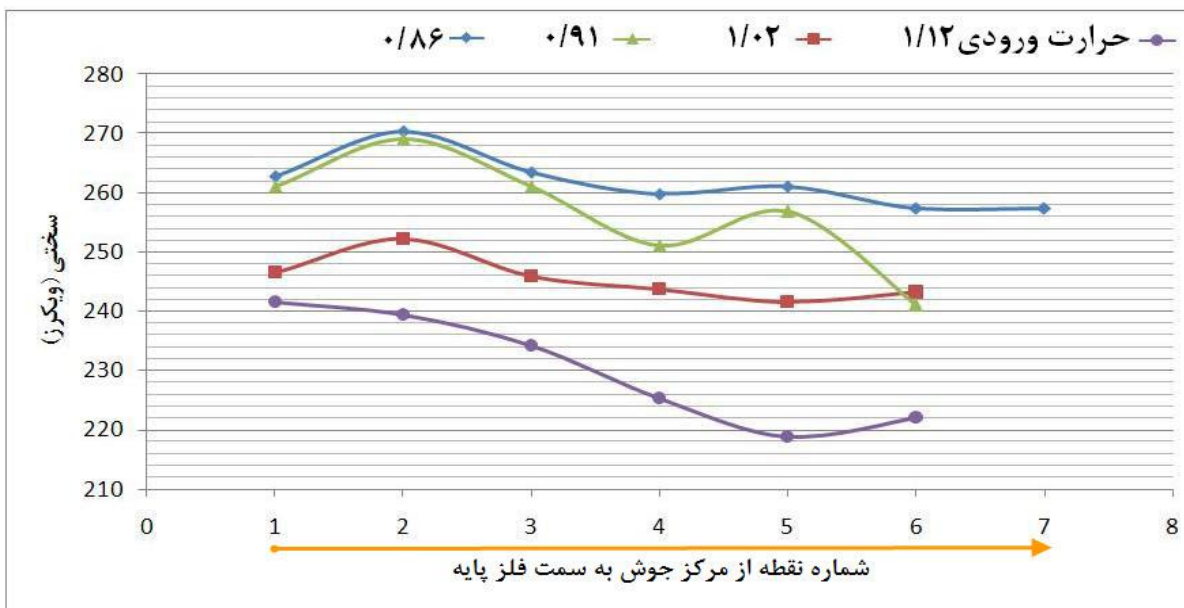
همه‌ی نمونه‌ها اعداد سختی از مرکز جوش تا HAZ و فلز پایه کاهش یافته به نحوی که کاهش این روند در نمونه‌ها تقریباً ثابت است. میانگین سختی سنجی فلز پایه حدود ۲۴۵ ویکرز بدست آمد.



شکل (۱۱): نتایج ریزسختی سنجی از قسمت فلز جوش تا فلز پایه مربوط به نمونه های ۱ تا ۴ به ترتیب دارای میانگین حرارت ورودی ۱/۱۲، ۱/۰۲، ۰/۹۱ و ۰/۸۶ (kJ/mm)

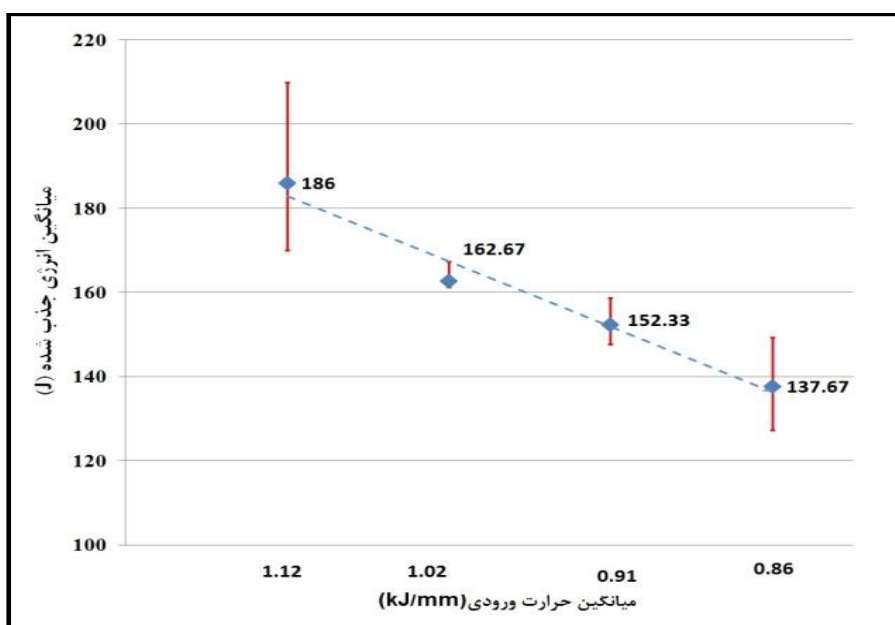
استفاده از این مطلب افزایش سختی فلزات جوش و HAZ نمونه های ۱ تا ۴ می تواند بر اثر رشد دانه های فاز فریت بوده و از طرف دیگر افزایش تنش پسماند ناشی از جوشکاری و افزایش سرعت خنک شدن نیز به عنوان عامل کمکی، باعث افزایش سختی در این نمونه ها شده است. نمونه ۴ دارای کمترین حرارت ورودی و به دنبال آن افزایش سرعت خنک شدن و رشد بیشتر فاز سخت فریت را داشته که می تواند از دلایل افزایش بیشتر سختی نسبت به سایر نمونه ها باشد.

نتایج برخی از پژوهشها [۲۰-۲۲] بیانگر این موضوع بوده که در فولادهای دوفازی ۲۲۰۵، فاز فریت در مقایسه با فاز آستنیت میزان سختی بیشتری داشته به نحوی که فاز فریت حدوداً به میزان ۱۲ درصد از فاز آستنیت سختی بالاتری را نشان می دهد. نتایج تحقیقات پژوهشگرانی همچون وستن و لیائو [۲۳-۲۴] حاکی از این است که در فولادهای دوفازی معمولاً سختی منطقه جوش و HAZ نسبت به فلز پایه بیشتر است و این تا حدود زیادی ناشی از حجم بیشتر فریت بوده اما تنش پسماند نیز می تواند به عنوان عامل کمک کننده ثانویه برای این کار باشد. با



شکل (۱۲): نتایج سختی سنجی مربوط به نمونه های ۱ تا ۴ به ترتیب دارای میانگین حرارت ورودی ۰/۱۲، ۰/۰۹۱، ۰/۰۸۶ و ۰/۰۲ (kJ/mm)

آزمایش ضربه شاریبی از منطقه‌ی جوش برای نمونه های ۱ تا ۴ مربوط به این پژوهش در دمای ۲۷°C انجام شده که در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل (۱۳): نتایج آزمایش ضربه برای نمونه های ۱ تا ۴ به ترتیب دارای میانگین حرارت ورودی ۰/۱۲، ۰/۰۹۱، ۰/۰۸۶ و ۰/۰۲ در دمای ۲۷°C

ضربه آنها انجام شده که نتایج حاکی از روند کاهش انرژی ضربه نمونه ها همراه با افزایش سختی آنها می باشد. رسوب

با توجه به این شکل و اطلاعات جدول (۷)، مقایسه درصد تغییرات میانگین ریزسختی نمونه ها نسبت به نمونه ۱ و انرژی

جوش و منطقه متأثر از حرارت طی جوشکاری چند پاسه رایج است [۱۰-۱۱].

آستنیت ثانویه می تواند به طور قابل ملاحظه ای چقرمگی جوش های رسوب داده شده را بهبود بخشیده [۱۳] که این می تواند دلیلی برای نتیجه فوق باشد. تشکیل آستنیت ثانویه بیش تر در فلز

جدول (۷): مقایسه درصد تغییرات میانگین ریزسختی نمونه ها نسبت به نمونه ۱ و انرژی ضربه

شماره نمونه	میانگین حرارت ورودی (kJ/mm)	میانگین انرژی ضربه (J)	میانگین ریزسختی HAZ (ویکرز)	میانگین ریزسختی فلز جوش (ویکرز)	درصد تغییرات میانگین ریزسختی سنجی نمونه های ۲ تا ۴ نسبت به نمونه ۱		درصد تغییرات میانگین ریزسختی سنجی نسبت به انرژی ضربه	
					در منطقه HAZ	در فلز جوش	در منطقه HAZ	در فلز جوش
۱	۱/۱۲	۱۸۶	۲۳۴/۷۰	۲۳۸/۰۰	-	-	۲۷/۹۰	۲۶/۲۰
۲	۱/۰۲	۱۶۲/۶۷	۲۵۰/۵۰	۲۵۳/۸۰	۶/۶۳	۶/۷۳	۵۶/۰۰	۵۴/۰۰
۳	۰/۹۱	۱۵۲/۳۳	۲۶۱/۱۰	۲۶۳/۳۰	۱۰/۶۳	۱۱/۲۵	۷۲/۸۵	۷۱/۴۰
۴	۰/۸۶	۱۳۷/۶۷	۲۶۷/۶۰	۲۷۱/۷۰	۱۴/۱۶	۱۴/۰۰	۹۷/۳۵	۹۴/۸۰

۴- نتیجه گیری

به منظور بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات جوش فولاد زنگ نزن دوفازی نوع ۲۲۰۵، چهار نمونه آزمایش با چهار حرارت ورودی ۰/۸۶، ۰/۹۱، ۱/۰۲ و ۱/۱۲ (kJ/mm) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد.

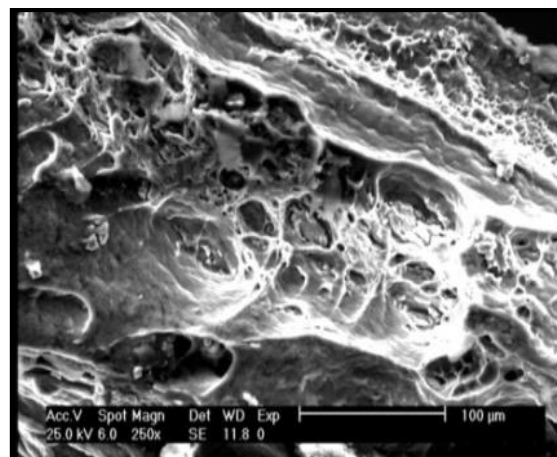
۱- با افزایش حرارت ورودی تشکیل فاز فریت نسبت به آستنیت در فلز جوش کاهش و در ناحیه متأثر از حرارت افزایش یافته است. علاوه بر این پهنای ناحیه متأثر از حرارت نیز افزایش یافته که متوسط پهنای این ناحیه به ترتیب تقریباً ۵۰، ۹۰، ۱۱۰ و ۱۲۰ میکرون بدست آمد.

۲- نتایج اندازه گیری تغییرات مقدار فاز فریت فلز جوش برای هر نمونه در هر حرارت ورودی نشان داد که تشکیل فاز فریت از پاس آخر تا پاس ریشه کاهش یافته است.

۳- افزایش حرارت ورودی باعث کاهش درصد حجمی فریت فلز جوش در پاس ریشه تقریباً از ۵۷٪ به ۴۰٪ شد.

۴- میزان بدست آمده درصد حجمی فاز فریت در فلز جوش چهار نمونه با سه روش دستگاه فریت اسکوپ، نمودار-WRC 1992 و نرم افزار ImageJ تقریباً با هم تطابق دارند همچنین نتایج SEM نشان داد که ذره ناخالصی با قطر تقریباً پنج میکرون محلی مناسب برای جوانه زنی، در مرز دانه های آستنیت بوده است.

نتایج بررسی شکست نگاری برخی از پژوهش ها [۱۱ و ۲۰] روی سطوح شکست فلز جوش در فولادهای دوفازی منجمله فولاد دوفازی ۲۲۰۵ در دمای اتاق با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، مؤید شکستی نرم به لحاظ وجود حفرات و دیپل های عمیق در سطوح شکست بوده است. شکل (۱۴) تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه های شکست آزمایش ضربه شاری مربوط به این پژوهش می باشد. در این شکل روی سطوح شکست وجود مشخصه هایی مثل حفرات و دیپل های عمیق همچنین شکل الیافی سطوح، حاکی از شکست نرم آنها می باشد.



شکل (۱۴): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه

های ضربه

[۶] م. قاسمی، "بررسی تأثیر جوشکاری و حرارت ورودی بر خواص مکانیکی و ریز ساختار ی فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت فولاد زنگ نزن دوپلکس SAFUREX"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، صفحه ۵، ۱۳۸۵.

[۷] م. صادقیان، م. شمعانیان، ع. شفیع، "تأثیر حرارت ورودی بر ریزساختار جوش غیرمشابه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی به فولاد کم آلیاژ استحکام بالا"، ششمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی و انجمن علمی ریخته‌گری ایران، ۱۳۹۱.

[8] ASME Sec IX, Qualification Standard for Welding and Brazing Procedure, Article II, Welding Procedure Qualification, 2010.

[9] P. Walker & w. h. Tern, eds. CRC Handbook of Metal Etchants, CRC Press, Boca Raton, FL, PP. 1188-1199, 1991

[10] J. O. Nilsson, P. Jonsson & A. Wilson, "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.

[۱۱] م. رحمانی، م. شمعانیان، م. کثیری، "بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی جوش های نامشابه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS32750 به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304L"، مجله مواد نوین، جلد ۳، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۱.

[12] AWS B4.0, "Standard Methods for Mechanical Testing of Welds", An American National Standard, 2007.

[13] J. C. Lippold & D. Koteki, "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels", John Wiley and Sons, New Jersey, 2005.

[14] A. L. Schaeffler, "Selection of Austenitic Electrodes for Welding Dissimilar Metals", Welding Journal, pp. 601-620, 1947.

[15] J. W. Fourie, F. P. A. Robinson, "Literature review on the influence of weld-heat inputs on the mechanical and corrosion properties of duplex stainless steels", J. S. Afr. Inst. Min. Metal, Vol. 90, No. 3, pp. 59-65, 1990.

۵- تصویر نمونه های شکست آزمایش ضربه شارپی بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی رویشی مربوط به این پژوهش، موید شکست نرم آنها است. همچنین روند افزایش انرژی ضربه نمونه ها، متناسب با کاهش مقادیر سختی آنها است.

۵- در بررسی ریزساختار فلز جوش با استفاده از الگوی پراش- پرتوایکس نمونه ها در محدوده حرارت ورودی این پژوهش، موید وجود فازهای آستنیت و فریت در فلز جوش است. همچنین فازهای مضرى مانند رسوبات نیتريد كرم (Cr_2N) و سیگما (σ) در آنها تشکیل نشده است.

۵- تشکر و قدردانی

بدینوسیله از مدیر عامل محترم شرکت پالایش گاز بیدبلند و کارکنان محترم واحد پژوهش و فن آوری، بازرسی فنی و کارگاه مرکزی این شرکت و همچنین پرسنل محترم واحد بازرسی فنی، آزمایشگاه متالورژی و خوردگی مواد مجتمع پتروشیمی رازی بندر امام(ره)، بخاطر فراهم آوردن امکانات اجرایی این تحقیق تشکر و قدردانی می گردد.

۶- منابع

[1] I. A. Armas, "Duplex Stainless Steels Brief History and Some Recent Alloys", Recent Patents on Mechanical Engineering, Vol. 1, pp. 51-57, 2008.

[2] The International Molybdenum Association, "Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless", pp. 51-53, second edition, 2009.

[3] Welding type 2205 code plus two duplex stainless steel with minimal risk of hot cracking, Outokumpu release note, Outokumpu stainless, Inc, 2009.

[4] A. Urena, E. Otero, M. V. Utrilla & C. J. Munez, "Weldability of a 2205 duplex stainless steel using plasma arc welding", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 182, pp. 624-631, 2007.

[5] J. Pekkarinen & V. Kujanpaa, "The effects of laser welding parameters on the microstructure of ferritic and duplex stainless steels welds", Physics Procedia, Vol. 5, pp. 517-523, 2010.

۷- پی نوشت

- [1] Gas Tungsten Arc Welding
- [2] Energy Dispersive Spectrometers
- [3] Heat Affected Zone
- [4] Charpy Impact Testing
- [5] Stress Corrosion Cracking
- [6] Fusion Welding
- [7] Pekkarinen and Kujanpaa
- [8] Direct Current Electrode Negative
- [9] Clemex Vision
- [10] Chromium - Equivalent
- [11] Nickel- Equivalent
- [16] CK Worldwide, Inc, "Technical Specifications for TIG Welding", www.CKWORLDWIDE.com, Form 116, 2008.
- [17] D. A. Skoog, D. M. West & F. J. Holler, "Fundamentals of Analytical Chemistry", Vol. 1, 2nd edition, 1997.
- [18] M. Barry, W. Andrew & O. Vasile, "Duplex stainless steel welding Best practices (Part 1)", Stainless Steel World, Fluor Canada Ltd, Canada, November, 2007.
- [19] S. Jana, "Effect of heat input on the HAZ properties of two duplex stainless steels", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 33, pp. 247-261, 1992.
- [20] J. D. Kordatos, G. Fournalaris & G. Papadimitriou, "The effect of cooling rate on the mechanical and corrosion properties of SAF 2205 (UNS 31803) Duplex Stainless Steel welds", Scripta mater, Vol. 44, pp. 401-408, 2001.
- [21] El. M Mehtedi, S. Spigarelli, P. Pricci, C. Paternoster & E. Quandrini, "Mechanical Characterization of Phases in Duplex 2205 Stainless Steel by Nanoindentation Technique", La Metallurgia Italiana, Vol. 9, pp. 11-16, 2010.
- [22] J. Hay, "Mapping the Mechanical Properties of 2205 Duplex Stainless Steel", Agilent Technologies, Document, No. 5991-0381EN, , 2013.
- [23] E. M. Westin, "Microstructure and properties of welds in the lean duplex stainless steel LDX 2101", Royal Institute of Technology School of Industrial Engineering and Management Department of Materials Science and Engineering Division of Physical Metallurgy, SE-10044 Stockholm Sweden, 2010.
- [24] J. Liao, "Nitride Precipitation in Weld HAZs of a Duplex Stainless Steel", ISIJ International, Vol. 41, No. 5, pp. 460-467, 2001.