

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

تأثیر عملیات حرارتی بر ریزساختار، خواص مکانیکی و رفتار خوردگی قطعات فولاد زنگ نزن دو فازی ۲۲۰۹ تولید شده توسط روش تولید افزودنی مبتنی بر سیم و قوس الکتریک

علی ملازاده کاشکویی^۱، محمود شریفی تبار^{۲*}، مهدی شفیعی آفرانی^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی مواد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

۳- استاد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

* msharifitabar@eng.usb.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۵	در این پژوهش به ساخت دیواره فولاد زنگ‌نزن دو فازی توسط فرآیند تولید افزودنی مبتنی بر سیم و قوس و بررسی ساختار، ریزساختار، خواص مکانیکی و خوردگی آن پرداخته شده است. نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس وجود فازهای فریت و آستنیت در ساختار را نشان داد.
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۷	بررسی‌های ریزساختاری نشان‌دهنده توزیع غیریکنواخت فازهای فریت و آستنیت در ریزساختار نمونه پس از تولید بود. جهت بررسی خواص مکانیکی دیواره از آزمون کشش و آزمون میکروسختی در مناطق مختلف دیواره استفاده شد. بر اساس نتایج این آزمون‌ها، مقدار میانگین استحکام تسلیم و استحکام کششی در راستای جوشکاری به ترتیب در حدود ۲/۷ و ۵/۵ درصد بیشتر و مقدار قابلیت تغییر طول در حدود ۴/۵ درصد کمتر از راستای رسوب گذاری بود. عملیات حرارتی پس از تولید در دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه موجب ریز شدن دانه‌های فریت و آستنیت، هم‌محور شدن ساختار، افزایش درصد آستنیت و بهبود میزان سختی و یکپارگی از مقدار میانگین ۳۱۸ به ۳۷۶ شد. سطح شکست تمامی نمونه‌ها حاکی از مکانیزم شکست نرم بود. نتایج آزمون خوردگی نشان داد که عملیات حرارتی موجب افزایش مقاومت به خوردگی فولاد شد.
کلید واژگان:	
تولید افزودنی	
فولاد زنگ نزن دو فازی	
عملیات حرارتی	
ریزساختار	

Effects of Heat Treatment on the Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of 2209 Duplex Stainless Steel Parts Manufactured By Wire Arc Additive Manufacturing Process

Ali Mollazadeh Kashkoue¹, Mahmood Sharifitabar^{2*}, Mahdi Shafiee Afarani³

1- M.Sc. in Materials Engineering, Department of Materials Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Materials Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

3- Professor, Department of Materials Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

* msharifitabar@eng.usb.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Doi:

20.1001.1.24233226.1401.16.1.5.2

Keywords:

Additive Manufacturing

Duplex Stainless Steel

Heat Treatment

Microstructure

Abstract

The present study deals with the fabrication and investigation of structure, microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 2209 duplex stainless steel parts made by wire arc additive manufacturing method. The formation of ferrite and austenite phases was confirmed by XRD analysis. There was a non-uniform distribution of ferrite and austenite phases in the microstructure of the as-welded microstructure. The tensile and Vickers microhardness tests were employed to evaluate mechanical properties. The results showed that the mean values of yield and tensile strengths were respectively 2.7 and 5.5% higher and the elongation was 4.5% lower in the welding direction than the building direction. Post-processing heat treatment at 1000 °C for 30 min led to the grain refinement of the alloy, the formation of equiaxed microstructure, increase in the austenite volume fraction, and increasing the mean hardness from 318 to 376 HV. The fractography of the tensile test specimens revealed the ductile fracture mode in all samples. Corrosion test results showed that the heat treatment improved the corrosion resistance of the alloy.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Ali Mollazadeh Kashkoue, Mahmood Sharifitabar, Mahdi Shafiee Afarani, Effects of Heat Treatment on the Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of 2209 Duplex Stainless Steel Parts Manufactured By Wire Arc Additive Manufacturing Process, New Process in Material Engineering, 2022, 16(1), 63-75.

۱- مقدمه

محصولات صنعتی و مهندسی عموماً از مواد خام ساخته می‌شود؛ اما در بسیاری از موارد برای تولید این قطعات کارخانه‌های عظیم راه‌اندازی شده و مراحل تولید اولیه شمش، ورق یا اشکال دیگر و سپس فرآیندهای ثانویه جهت تولید قطعه نهایی انجام می‌گیرد. استفاده از این روش تولید زمانی مقرون‌به‌صرفه خواهد بود که حجم بالایی از تولیدات مورد نیاز باشد؛ اما اگر هدف تولید قطعات کوچک (یا بزرگ) با جنس خاص و اشکال پیچیده در تعداد محدود باشد، راه‌اندازی یک کارخانه عظیم هزینه‌های گزاف را به همراه خواهد داشت.

در این گونه موارد استفاده از روش‌های تولید با رویکرد پایین به بالا تحت عنوان تولید افزودنی معرفی می‌گردد. تولید افزودنی معمولاً به‌عنوان یک چاپگر سه‌بعدی شناخته می‌شود. اصطلاح تولید افزودنی طیف وسیعی از تکنولوژی‌های تولید را پوشش می‌دهد و مکانیزم آن به نحوی است که قطعه مدنظر با استفاده از اطلاعات یک مدل سه‌بعدی با رسوب‌دهی مواد مهندسی به‌صورت لایه‌لایه روی هم و یا کنار هم چاپ و تولید می‌گردد [۵-۱].

در این روش تولید جهت رسوب‌دهی آلیاژهای مهندسی و ساخت قطعات فلزی از منابع انرژی متفاوتی مانند قوس الکتریکی، پلاسما، پرتو الکترونی و لیزر استفاده می‌شود [۶]. از نظر مواد مصرفی انواع پلیمرها، فلزات، سرامیک‌ها و کامپوزیت‌ها برای تولید افزودنی استفاده می‌شوند. فرآیندهای تولید افزودنی فلزات به دو نوع ذوب بستر پودر و رسوب‌گذاری مستقیم دسته‌بندی شده است. دقت ابعادی و کیفیت سطح اجزاء ساخته‌شده با روش ذوب بستر پودر به نسبت بهتر از اجزاء ساخته‌شده با روش رسوب‌گذاری مستقیم است. ولی فرآیند ذوب بستر پودر به دلیل نرخ رسوب پایین برای تولید قطعات بزرگ مناسب نیست. از سوی دیگر فرآیند رسوب‌گذاری مستقیم برای تولید اجزاء بزرگ مناسب است و نرخ رسوب‌دهی آن بیش از ده برابر نرخ رسوب‌گذاری در روش ذوب بستر پودر است [۶].

در روش تولید افزودنی مبتنی بر سیم و قوس الکتریکی، معمولاً از روش‌های جوشکاری قوسی با الکتروود تنگستنی و گاز محافظ (GTAW)، روش جوشکاری قوسی با الکتروود فلزی و گاز محافظ (GMAW) و روش جوشکاری پلاسما (PAW) جهت تولید قطعات استفاده می‌شود. در این بین، روش GMAW به دلیل نرخ رسوب بالاتر و تجهیزات ارزان‌تر مورد توجه محققین و صنعت قرار گرفته است [۷-۸].

فولادهای زنگ‌نزن دسته‌ای از مواد مهندسی هستند که به دلیل مقاومت به خوردگی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. این فولادها عموماً بر اساس ریزساختار و نوع فازهای موجود در آن‌ها به ۵ دسته فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، فریتی، مارتنزیتی، رسوب سخت شونده و دوفازی تقسیم می‌شوند. فولادهای زنگ‌نزن دو فازی دارای ریزساختار حاوی حدود ۵۰ درصد فریت و ۵۰ درصد آستنیت هستند. امروزه این فولادها به دلایل استحکام و چقرمگی بالاتر در مقایسه با سایر فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۹].

تاکنون در زمینه تولید قطعات فولاد زنگ‌نزن توسط فرایند تولید افزودنی مبتنی بر سیم و قوس تحقیقاتی صورت گرفته است [۱۰-۱۶]. به‌عنوان مثال ژانگ و همکارانش^۱ [۱۰] با استفاده از این فرایند موفق به ساخت دیواره‌هایی از جنس فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۵۹۴ شدند. نتایج این محققین نشان داد که درصد فاز آستنیت در ساختار دیواره بیشتر از فریت بود. نتایج آزمون‌های مکانیکی نیز نشان داده که خواص در دو راستای جوشکاری و رسوب‌گذاری دارای ناهمسانگردی قابل توجهی بود. بررسی دقیق‌تر سایر پژوهش‌ها نیز نشان داد که دستیابی به متغیرهای بهینه فرایند تولید، تشکیل ساختار ناهمسانگرد با خواص مکانیکی متفاوت در جهات مختلف و تشکیل فازهای غیرتعدالی مانند دلتا فریت به‌عنوان مهم‌ترین چالش‌های تولید قطعات ذکر شده است. لذا در برخی موارد، عملیات مکانیکی و حرارتی پس از تولید جهت دستیابی به خواص مکانیکی و خوردگی مناسب انجام

متحرک و زیرلایه ثابت باشد. فرایند جوشکاری با استفاده از دستگاه جوشکاری قوسی با الکتروود فلزی و گاز محافظ ساخت شرکت جوشا مدل MIG303C-S استفاده شد. در ابتدا به منظور تعیین متغیرهای بهینه تولید، فرایند جوشکاری با استفاده از شدت جریان، سرعت جوشکاری و سرعت تغذیه سیم متفاوت انجام شد تا بتوان خط جوش سالم و یکنواخت ایجاد کرد. جدول (۱) محدوده متغیرهای جوشکاری انتخابی را نشان می‌دهد. سپس، دیواره‌هایی با طول ۳۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۸ سانتی‌متر و ضخامت حدود ۶ میلی‌متر با استفاده از ۳۱ پاس جوشکاری تهیه شد.

بررسی فازهای مختلف موجود در قطعه توسط دستگاه آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD Bruker Advanced D8) و هدف مسی با طول موج ۱/۵۴۱۸ آنگستروم انجام شد. به منظور بررسی ریزساختار، نمونه‌هایی از قسمت‌های مختلف دیواره برش داده شده و سطح آن‌ها پرداخت گردید. از محلول حکاکی حاوی ترکیبی با نسبت حجمی برابر از اسید استیک، اسید کلریدریک و اسید نیتریک و مدت زمان ۵ ثانیه جهت آشکارسازی ریزساختار استفاده شد. همچنین، حکاکی رنگی فازهای مختلف با استفاده از محلول براها انجام شد.

جدول (۱): متغیرهای انتخابی جهت ساخت دیواره

محدوده تغییرات	نوع متغیر
۱۴۴-۱۳۶	شدت جریان (آمپر)
۳۶/۵-۲۴/۵	ولتاژ (ولت)
۱۰-۸	سرعت تغذیه سیم (متر بر دقیقه)
۱۵	دبی گاز محافظ (لیتر بر دقیقه)
۱۵۰	دمای بین پاسی (درجه سلسیوس)

بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری (Olympus) و میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدانی (FESEM MIRA3 TESCAN) مجهز شده به آنالیز طیف‌سنج انرژی (EDS SAMX) انجام شد. جهت اندازه‌گیری میزان سختی نمونه از آزمون سختی سنجی ویکرز بر اساس استاندارد ASTM E92 [۱۹] با استفاده از دستگاه INNOVA Test با بار اعمالی ۵۰۰ گرم، مدت زمان ۱۰ ثانیه و فاصله بین نقاط ۵ میلی‌متر در دو راستای

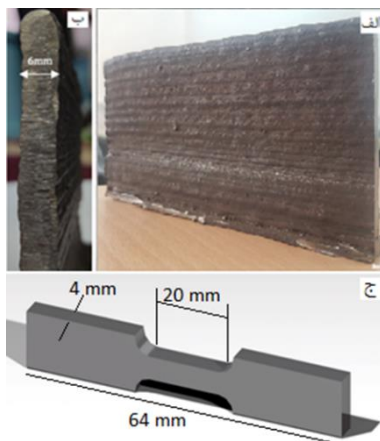
شده است [۱۰ و ۱۷]. به عنوان مثال پاپولا و همکاران [۱۶] تأثیر عملیات حرارتی در دمای ۹۵۰ تا ۱۱۰۰ درجه سلسیوس بر خواص مکانیکی قطعات فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵ تولید شده توسط فرایند ذوب بستر پودر با پرتو لیزر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ساختار قطعه پس از انجماد کاملاً فریتی بود؛ اما عملیات حرارتی در دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس منجر به تشکیل بالاترین میزان آستنیت در ساختار قطعات شد.

با توجه به آنچه بیان شد ملاحظه می‌شود که اغلب تحقیقات انجام شده در زمینه ساخت افزایشی فولادهای زنگ نزن دوفازی بر بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی قطعات ساخته شده از جنس فولادهای ۲۵۹۴ و ۲۲۰۵ متمرکز بوده و قطعات تولیدی از جنس سایر فولادهای زنگ نزن دوفازی مانند آلیاژ ۲۲۰۹ توسط فرایند تولید افزودنی مبتنی بر سیم و قوس کمتر مدنظر قرار گرفته‌اند [۱۸]. از سوی دیگر، بررسی مقاومت به خوردگی به عنوان یکی از مهم‌ترین خواص کاربردی فولادهای زنگ نزن دوفازی و بهبود این رفتار از طریق عملیات حرارتی از دیدگاه صنعتی اهمیت ویژه‌ای دارد. لذا، هدف از تحقیق حاضر بررسی ساختار، ریزساختار، خواص مکانیکی و خوردگی دیواره فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۹ تولید شده توسط روش ساخت افزایشی مبتنی بر سیم و قوس و بهبود این ویژگی‌ها از طریق انجام عملیات حرارتی پس از تولید است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از ورق فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴L با ابعاد ۵×۲۰×۳۰۰ میلی‌متر مکعب به عنوان زیرلایه استفاده شد. برای ساخت دیواره از سیم جوش فولاد زنگ نزن دوفازی ER۲۲۰۹ با قطر ۱ میلی‌متر استفاده گردید. ترکیب شیمیایی سیم جوش مصرفی بر اساس مشخصات شرکت سازنده (ESAB) برحسب درصد وزنی شامل ۸/۵ تا ۱۰/۵ درصد نیکل، ۲۱/۵ تا ۲۳/۵ درصد کرم و ۲/۵ تا ۳/۵ درصد مولیبدن ذکر شده است. جهت ساخت نمونه‌ها از یک میز متحرک با قابلیت کنترل سرعت به صورت خطی استفاده شد. میز به گونه‌ای طراحی شده بوده که مشعل جوشکاری

نتایج آنالیز کوانتومتری نشان داد که دیواره تولید شده دارای ۲۲/۶ درصد کرم، ۸/۶ درصد نیکل، ۳/۲ درصد مولیبدن، ۱/۶ درصد منگنز و ۰/۴ درصد سیلیسیم (همگی بر حسب درصد وزنی) است که با ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۹ همخوانی دارد. شکل‌های (۱-الف) و (۱-ب) به ترتیب تصویر دیواره پس از تولید و سطح مقطع دیواره را نشان می‌دهد.



شکل (۱): تصویر دیواره تولیدی: (الف) و (ب): از جهات مختلف، (ج): ابعاد نمونه آزمون کشش استخراج شده از دیواره

ملاحظه می‌شود که دیواره کاملاً سالم و عاری از عیوب ماکروسکوپی مانند ترک، تخلخل و اعوجاج است. شکل (۱-ج) نیز ابعاد نمونه آزمون کشش استخراج شده از دیواره را نشان می‌دهد.

شکل (۲) الگوی پراش پرتو ایکس از دیواره تولید شده پس از فرایند تولید را نشان می‌دهد. پیک‌های ایجاد شده بیانگر حضور فازهای آستنیت با شماره کارت (۰۰۳-۱۴۱۷) و فریت با شماره کارت (۰۰۳-۱۰۵۰) هستند.

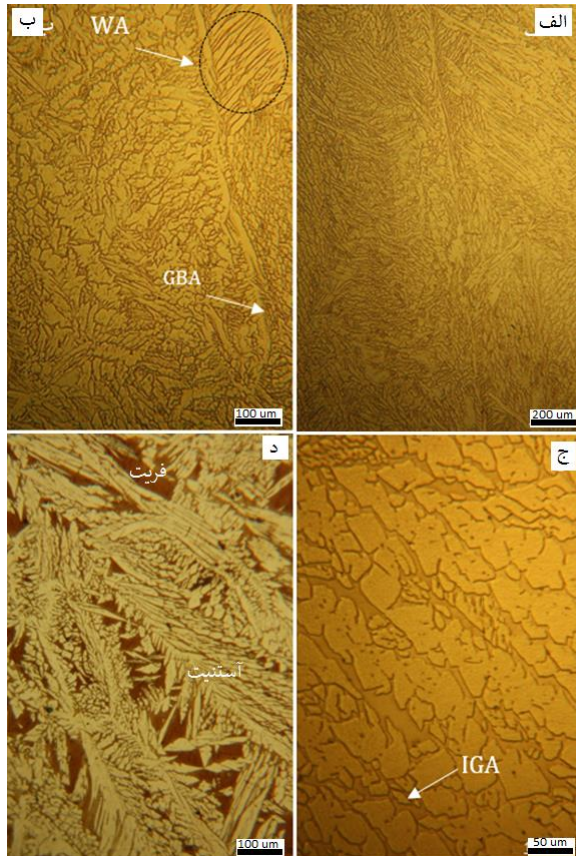
جوشکاری و رسوب‌گذاری انجام شد. در هر محل سختی چهار نقطه مختلف اندازه‌گیری شده و میانگین سختی به‌عنوان سختی ناحیه مدنظر در نظر گرفته شد. برای بررسی خواص کششی نمونه‌ها در راستای جوشکاری و رسوب‌گذاری، تعداد ۳ نمونه در هر راستا تهیه شده و آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM E8 [۲۰] توسط دستگاه کشش مدل INSTRON در دمای محیط انجام شد. شایان ذکر است که نمونه‌های کشش تهیه‌شده در راستای رسوب‌گذاری از پایین، وسط و بالای دیواره تهیه شد تا امکان بررسی تغییرات خواص مکانیکی در راستای ارتفاع دیواره‌ها نیز فراهم گردد. سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش نیز توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM KYKY EM3900 بررسی شد. جهت بررسی مقاومت به خوردگی نمونه‌های تولیدی آزمون خوردگی طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) در محیط آب دریای عمان با غلظت ۳/۵ درصد نمک توسط دستگاه Metrohm Autolab انجام گرفت. در نهایت، به‌منظور دستیابی به توزیع یکنواخت فازهای فریت و آستنیت، عملیات حرارتی آیل بر روی نمونه‌ها در دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس به مدت نیم ساعت انجام شد. سرعت گرم کردن نمونه‌ها ۱۰ درجه بر دقیقه بود و پس از نگهداری در دمای مدنظر به مدت ۳۰ دقیقه، نمونه‌ها در هوا سرد شدند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی‌های ساختاری

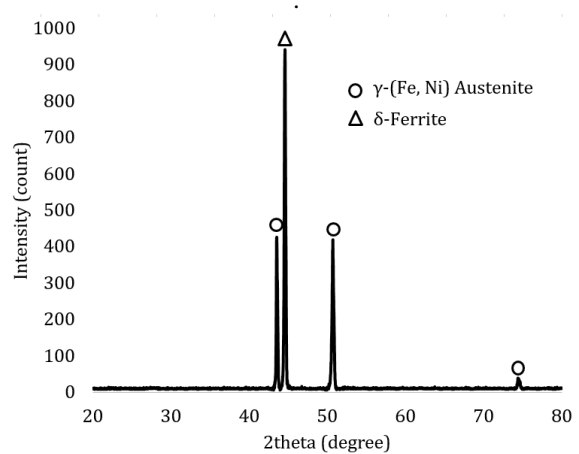
با توجه به اینکه تغییر متغیرهای جوشکاری بر کیفیت جوش تأثیرگذار است، لذا قبل از ساخت دیواره‌ها، باید شرایط مناسب برای اجرای یک خط جوش سالم و یکنواخت و با بیشترین نسبت ارتفاع به عرض مشخص گردد. در این تحقیق با استفاده از روش آزمون و خطا، متغیرهای ذکر شده در جدول (۱) به‌عنوان متغیرهای مناسب تعیین شد. سایر متغیرهای فرآیند شامل طول قوس ۱۰ میلی‌متر، دبی جریان تخلیه گاز محافظ ۱۵ لیتر بر دقیقه، دمای بین پاسی ۱۵۰ درجه سلسیوس و زاویه مشعل نسبت به سطح زیرلایه ۹۰ درجه ثابت در نظر گرفته شد.

همان‌طور که در شکل (۳-الف) مشاهده می‌شود، شبکه‌ی پیوسته فاز آستنیت که به‌عنوان آستنیت مرزدانه‌ای (GBA) مشخص شده است، در طول مرزدانه‌های فریت تشکیل شده است. این شکل آستنیت که با مکانیسم جوانه‌زنی و رشد تشکیل می‌شود، منجر به پوشش کامل مرزدانه‌های فریت شده است.



شکل (۳): تصاویر میکروسکوپی نوری ریزساختار دیواره تولیدشده از جنس فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۹ (الف) تا (ج): بزرگنمایی‌های مختلف و (د): تصویر متالوگرافی حکاکی رنگی دیواره با محلول براها، GBA: آستنیت مرزدانه‌ای، WA: آستنیت ویدمن‌اشتان، IGA: آستنیت درون دانه‌ای

شکل (۳-د) تصویر متالوگرافی نمونه حکاکی شده با محلول براها را نشان می‌دهد. فاز فریت با رنگ قهوه‌ای و فاز آستنیت به رنگ زرد قابل تفکیک هستند. درصد فاز-های فریت و آستنیت با استفاده از تصاویر حکاکی رنگی و نرم‌افزار Image J در قسمت‌های مختلف دیواره تعیین شد. نتایج نشان داد که میزان فاز فریت تشکیل شده در حدود ۳۲



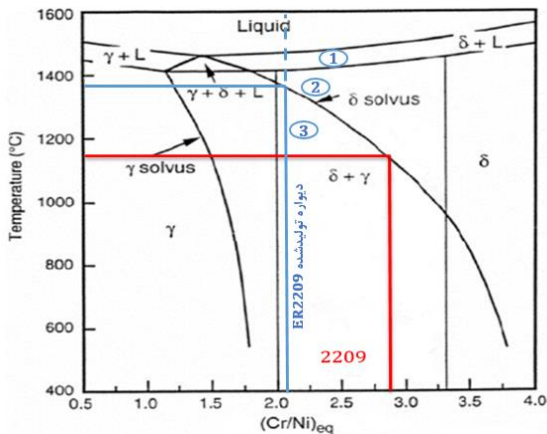
شکل (۲): الگوی پراش اشعه ایکس دیواره تولیدشده

در فولادهای زنگ‌نزن دوفازی انجماد با تشکیل فاز فریت خاتمه می‌یابد [۲۱-۲۴]. بسته به ترکیب شیمیایی، فاز فریت قبل از اینکه دما در حین سرد شدن به محدوده آغاز دگرگونی تشکیل آستنیت برسد، در دمای بالا پایدار است. دمای دگرگونی فریت به آستنیت به ترکیب شیمیایی و سرعت سرد کردن بستگی دارد. این استحاله حالت جامد درصد نهایی فریت و آستنیت و نحوه توزیع این دو فاز در ریزساختار فلز جوش را تعیین می‌کند. معمولاً هنگامی که تبدیل فریت به آستنیت در حین سرد شدن آغاز می‌گردد، ابتدا آستنیت در طول مرزدانه‌های فریت تشکیل می‌شود. این امر از طریق فرآیند جوانه‌زنی و رشد صورت می‌گیرد و معمولاً سبب پوشش کامل مرزدانه‌های فریت توسط آستنیت می‌شود. در ادامه آستنیت ممکن است به‌صورت صفحات ویدمن‌اشتان از آستنیت مرزدانه‌ای، یا به‌صورت درون‌دانه‌ای داخل دانه‌های فریت تشکیل شود [۲۱].

۳-۲- بررسی‌های ریزساختاری

شکل (۳) تصاویر متالوگرافی ریزساختار دیواره تولیدشده در بزرگنمایی‌های مختلف را نشان می‌دهد. جهت تهیه تصاویر متالوگرافی، نمونه‌هایی از دیواره در نزدیکی زیرلایه، میانه و بالای دیواره استخراج شدند؛ اما نتایج بررسی‌ها نشان داد که ساختار دیواره در قسمت‌های مختلف تفاوت اندکی دارد. لذا، تصاویر نمونه‌های استخراج شده از میانه دیواره جهت بررسی‌های ریزساختاری انتخاب شد.

شکل (۶) تصویر میکروسکوپی الکترونی ریزساختار دیواره در دو بزرگنمایی مختلف را نشان می‌دهد. این تصاویر با استفاده از آشکارساز الکترون‌های برگشتی گرفته شده است.



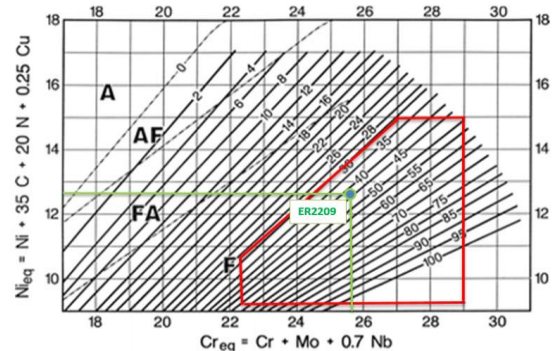
شکل (۵): نمودار فازی شبه دوتایی فولادهای زنگ‌نزن [۲۵].

همان‌گونه که در شکل (۶-الف) مشاهده می‌شود جهت قرارگیری آستنیت مرزدانه‌ای در راستای عمود بر فصل مشترک جوش است. علت این امر رشد ترجیحی دانه‌های فریت در حین انجماد حوضچه مذاب در راستای بیشینه انتقال حرارت می‌باشد. در ادامه، به دلیل بالا بودن سرعت سرد شدن قطعه در فرایند جوشکاری، آستنیت به صورت صفحات ویدمن‌اشانتن (WA) از آستنیت مرزدانه‌ای شکل گرفته است.

در شکل (۶-ب) ملاحظه می‌شود که فاز جوش حاوی دو فاز مختلف است که با حروف A و B نام‌گذاری شده است. ترکیب شیمیایی این دو فاز که با آنالیز طیف‌سنج انرژی اندازه‌گیری شده است، در جدول (۲) آورده شده است. نقطه A با غلظت بالای نیکل (عنصر پایدارکننده فاز آستنیت) فاز آستنیت و نقطه B با غلظت بالای کرم (عنصر پایدارکننده فاز فریت) فاز فریت است. بر اساس این مشاهدات هیچ‌گونه فاز ثانویه مضر از جمله فاز سیگما و یا فازهای کاربیدی دیگر در ریزساختار تشکیل نشده است.

درصد و آستنیت ۶۸ درصد بود. شایان‌ذکر است که درصد فاز فریت در فولاد زنگ‌نزن دوفازی بین ۳۰ درصد تا ۶۰ درصد متغیر است [۹]. لذا ساختار دیواره تولیدی در دسته فولادهای زنگ‌نزن دوفازی فریتی-آستنیتی قرار می‌گیرد.

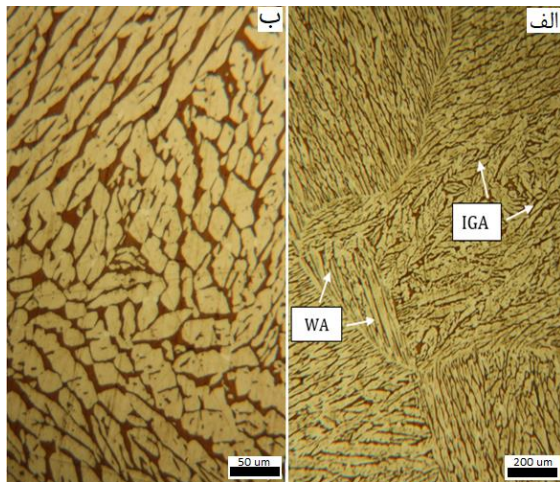
در فولادهای زنگ‌نزن جهت سهولت تعیین نحوه انجماد آلیاژها، نقش عناصر پایدارکننده فریت در قالب کرم معادل (Cr_{eq}) و نقش عناصر پایدارکننده آستنیت در قالب نیکل معادل (Ni_{eq}) در نظر گرفته می‌شود. بر اساس روابط مربوط به نمودار WRC-1992 [۲۱] که در شکل (۴) نشان داده شده است، مقدار کرم معادل و نیکل معادل در فولاد زنگ-نزن دو فازی ۲۲۰۹ به ترتیب ۲۵/۸۴ و ۱۲/۷۹ محاسبه شد. بر انجام این محاسبات نسبت کرم معادل به نیکل معادل ۲/۰۲ به دست آمد. با توجه به نمودار WRC-1992 در شکل ۴، عدد فریت (FN) برای دیواره تولیدشده ۴۵ است. در صورتی که ضریب تبدیل عدد فریت به کسر حجمی فریت ۰/۷ در نظر گرفته شود، ساختاری حاوی ۳۱/۵ درصد فریت پیش‌بینی می‌شود که با نتایج تصاویر متالوگرافی همخوانی کامل دارد.



شکل (۴): نمودار WRC-1992 با گستره تقریبی ترکیب شیمیایی فولادهای زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۹ [۲۱].

رفتار انجمادی دیواره، با توجه به مقدار کروم معادل به نیکل معادل و با استفاده از نمودار شبه دوتایی شکل (۵) به گونه‌ای است که انجماد فریتی آلیاژ در دمای تقریبی ۱۴۳۰ درجه سلسیوس خاتمه می‌یابد. سپس، آستنیت طی یک دگرگونی حالت جامد در دمای پایین‌تر از ۱۳۸۰ درجه سلسیوس تشکیل می‌شود [۲۵].

میانگین گرفتن از درصد فازها مشخص شد که میزان فاز فریت تشکیل شده ۲۵/۳ درصد و آستنیت ۷۴/۷ درصد است.

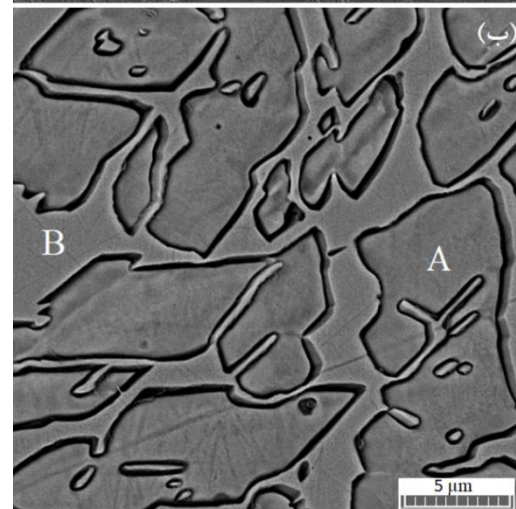
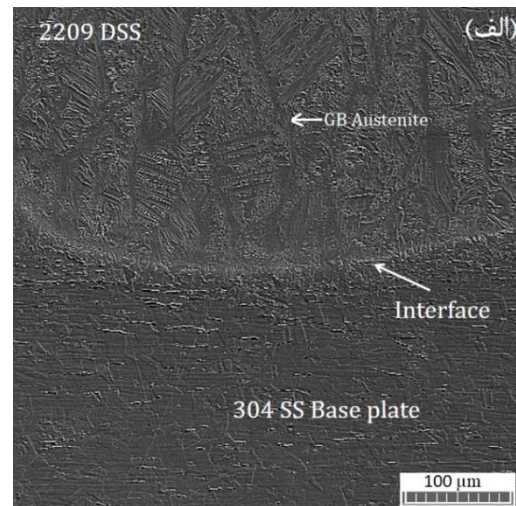


شکل (۷): تصاویر میکروسکوپ نوری ریزساختار فلز جوش در دو بزرگنمایی مختلف بعد از عملیات حرارتی در دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه

با توجه به نتایج حاصل از تعیین درصد فازها و همچنین با مشاهده تصاویر متالوگرافی در شکل (۷) می‌توان استناد کرد که میزان آستنیت فلز جوش پس از انجام عملیات حرارتی، به میزان قابل توجهی افزایش یافته است [۱۶-۱۷]. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که عملیات حرارتی در دمای ۱۰۵۰-۱۰۰۰ درجه سلسیوس به تشکیل بیشترین میزان آستنیت در فولادهای زنگ نزن دوفازی منجر می‌شود [۲۶-۲۹]. یکی دیگر از اهداف انجام عملیات حرارتی نرماله رسیدن به ساختاری ریزدانه و هم‌محور بود. همان‌طور که در شکل (۷) ملاحظه می‌شود، ساختار نسبت به قبل از عملیات حرارتی ریزدانه‌تر و هم‌محور و دارای نظم بیشتری می‌باشد. همچنین، آستنیت درون دانه‌ای، آستنیت ویدمن اشتاتن و آستنیت مرزدانه‌ای در ریزساختار مشاهده می‌شود.

۳-۳- خواص مکانیکی

خواص مکانیکی یک آلیاژ تابعی از ترکیب شیمیایی، نوع، غلظت، شکل و توزیع فازهای موجود در ریزساختار و همچنین اندازه دانه است. شکل (۸) منحنی تغییرات سختی



شکل (۶): تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی فلز جوش (الف): در نزدیکی زیرلایه و (ب): تصویر بزرگنمایی بالاتر از میانه دیواره

جدول (۲): ترکیب شیمیایی فازهای نشان داده شده در شکل (۶)

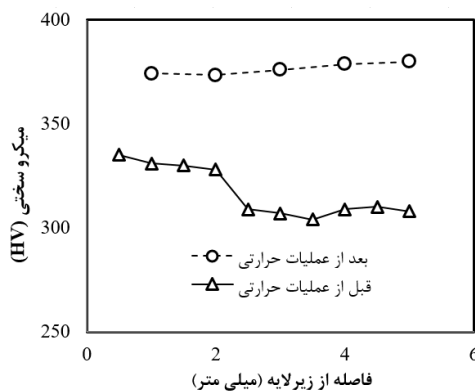
نقطه آنالیز	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)				
	Fe	Mn	Si	Ni	Cr
A	باقی	۰/۹	۰/۸	۸/۸	۲۱/۹
B	باقی	۰/۹	۱/۱	۵/۸	۲۷/۰

شکل (۷) ریزساختار فلز جوش در دو بزرگنمایی مختلف پس از عملیات حرارتی در دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس بر اساس پژوهش پاپولا و همکاران [۱۷] جهت دستیابی به نسبت یکسان از فازهای فریت و آستنیت در ساختار فولاد زنگ‌نزن دوفازی پس از عملیات حرارتی انتخاب شد. ملاحظه می‌شود که توزیع یکنواختی از فازهای فریت و آستنیت ایجاد شده است. به‌منظور تعیین درصد فازها، پردازش تصاویر متالوگرافی انجام شد و با

جدول (۳): نتایج حاصل از آزمون کشش دیواره در دو راستای

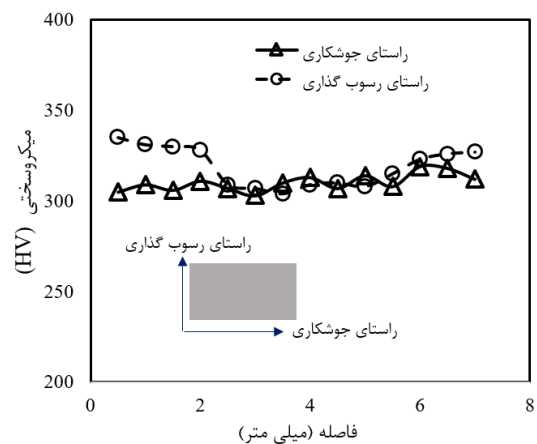
جوشکاری و رسوب گذاری		استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)	قابلیت تغییر طول (%)
راستای آزمون	راستای جوشکاری	۵۶۰±۸	۷۴۲±۱۳	۴۲/۳±۱/۸
راستای رسوب گذاری	راستای رسوب گذاری	۵۴۴±۱۱	۷۰۲±۱۶	۴۴/۳±۱/۶

ناهمگنی موجود در خواص مکانیکی دیواره در دو راستای مختلف را می توان به جهت گیری ترجیحی دانه های فریت در حین انجماد نسبت داد. همان گونه که قبلاً بیان شد، دانه های فریت در حین انجماد تمایل دارند تا اغلب در راستای عمود بر زیرلایه و در جهت رسوب گذاری رشد کنند. در ادامه سرد شدن و دگرگونی حالت جامد فریت به آستنیت، فاز آستنیت مرزدانه ای در امتداد مرزدانه های فریت و در راستای رسوب گذاری رشد کرد. لذا، عدم رشد یکنواخت آستنیت در جهات مختلف سبب ناهمگنی خواص مکانیکی دیواره گردید. شایان ذکر است که وجود ناهمگنی در خواص مکانیکی قطعات تولیدی توسط فرایند تولید افزودنی مبتنی بر سیم و قوس الکتریک یکی از بزرگ ترین معایب این روش محسوب می شود. در بسیاری از موارد جهت برطرف نمودن این معضل، عملیات حرارتی همگن سازی پس از تولید انجام می شود. در این پژوهش نیز جهت دستیابی به ساختار یکنواخت در آلیاژ فولاد زنگ نزن دو فازی، عملیات حرارتی آنیل در دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس انجام شد. شکل (۹) نمودار توزیع سختی دیواره در راستای رسوب گذاری قبل و بعد از عملیات حرارتی را نشان می دهد.



شکل (۹): نمودار توزیع سختی دیواره در راستای رسوب گذاری قبل و بعد از عملیات حرارتی

دیواره در دو راستای جوشکاری و رسوب گذاری را نشان می دهد. مشاهده می شود که میزان سختی در نقاط مختلف دیواره در جهت جوشکاری تقریباً یکسان است؛ اما در راستای ارتفاع دیواره نتایج متفاوتی به دست آمد. مقدار سختی در نزدیکی زیرلایه و در قسمت بالایی دیواره نسبت به قسمت میانی دیواره بیشتر است. این نحوه توزیع سختی در راستای ارتفاع دیواره توسط وانگ و همکاران^۳ نیز گزارش شد [۱۳].



شکل (۸): منحنی تغییرات میکروسختی در دو جهت جوشکاری و رسوب گذاری

علت این امر آن است که در نزدیکی زیرلایه سرعت سرد شدن فلز جوش بسیار زیاد بوده که این سبب کاهش اندازه دانه فریت و آستنیت در این ناحیه شده است؛ اما تجمع حرارت در لایه های میانی دیواره در حین فرایند تولید منجر به رشد دانه ها و کاهش سختی شده است. از سوی دیگر، در لایه های بالایی دیواره نیز فرصت کافی برای رشد دانه ها وجود نداشته که این امر سبب افزایش مجدد سختی شده است. جدول (۳) نتایج حاصل از آزمون کشش دیواره در دو راستای جوشکاری و رسوب گذاری را نشان می دهد. مقدار میانگین استحکام تسلیم و استحکام کششی در راستای جوشکاری به ترتیب در حدود ۲/۷ و ۵/۵ درصد بیشتر از راستای رسوب گذاری است. از سوی دیگر مقدار قابلیت تغییر طول در راستای جوشکاری در حدود ۴/۵ درصد کمتر از راستای رسوب گذاری است.

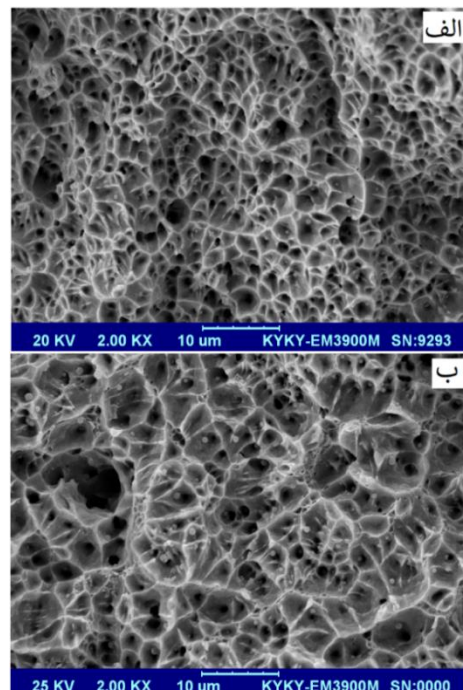
۴-۳- خواص خوردگی

در آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نیز مشابه با آزمون پلاریزاسیون خطی از یک محدوده پتانسیل با دامنه کم برای پلاریزه کردن الکتروود کار استفاده می‌گردد [۳۰]. در شکل (۱۱) منحنی‌های نایکوئیست، بد و بد- فاز به دست آمده از آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در پتانسیل مدار باز برای نمونه‌های قبل و بعد از عملیات حرارتی آورده شده است. برای فیت کردن از نرم‌افزار NOVA استفاده شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تمامی منحنی‌های نایکوئیست، بد و بد- فاز دارای رفتاری مشابه می‌باشند که به معنای وقوع رخداد‌های الکتروشیمیایی مشابه در سیستم موردنظر است.

سایر محققین نیز در خصوص خواص خوردگی فولادهای زنگ نزن دوفازی نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند [۳۳-۳۱]. حلقه موجود در منحنی نایکوئیست تمامی نمونه‌ها نشان‌دهنده یک رفتار خازنی (ثابت زمانی) است. مقاومت این حلقه بسیار بالا و شکل نیم دایره‌ای تمام آن بیانگر حضور یک لایه رویین چسبنده می‌باشد [۳۳].

بزرگ‌ترین مشکل در استفاده از منحنی‌های نایکوئیست، مشخص نبودن فرکانس‌های بالا و به دست آوردن مقادیر امپدانس‌های مربوط به این فرکانس‌ها می‌باشد. بدین منظور، علاوه بر نمایش منحنی‌های نایکوئیست، منحنی‌های بد و بد- فاز نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در منحنی‌های بد نمایش داده شده در شکل (۱۱)، در فرکانس‌های کم مقادیر بالای امپدانس مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که وجود شیب منفی در منحنی بد نشان‌دهنده وجود رفتار خازنی ماده است [۳۰]. علاوه بر این، مقادیر بالای زاویه‌های فازی در محدوده وسیعی از فرکانس برای هر دو نمونه نشان‌دهنده وجود لایه رویین سطحی است. در فرکانس‌های پایین، به علت افزایش عیوب و کاهش خواص حفاظتی لایه رویین، کاهش مقدار زاویه فازی رخ می‌دهد [۳۴].

هر عدد گزارش شده میانگین پنج مقدار سختی اندازه‌گیری شده است. همان‌طور که در نمودار مذکور مشاهده می‌شود، سختی نمونه عملیات حرارتی شده نسبت به نمونه‌های قبل از عملیات حرارتی از میانگین ۳۱۶ ویکرز به حدود ۳۷۶ ویکرز افزایش یافته است. کاهش اندازه دانه‌ها و یکنواخت شدن ریزساختار و همچنین افزایش درصد آستنیت موجود در ریزساختار از جمله مهم‌ترین دلایل افزایش سختی است. علاوه بر این، یکنواخت شدن ریزساختار بعد از عملیات حرارتی منجر به یکنواخت شدن سختی در راستای ارتفاع دیواره در مقایسه با قبل از عملیات حرارتی شد که این امر می‌تواند منجر به همسانگرد شدن خواص مکانیکی دیواره گردد. شکل‌های (۱۰-الف) و (۱۰-ب) به ترتیب تصویر سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش در دو راستای جوشکاری و رسوب‌گذاری را نشان می‌دهد. حضور و توزیع یکنواخت دیمپل‌ها در سطح شکست تأییدکننده مکانیسم شکست کاملاً نرم در هر دو نمونه است.



شکل (۱۰): تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش (الف): راستای جوشکاری و (ب): راستای رسوب‌گذاری

جدول (۴) مقادیر المان‌های به دست آمده از مدار معادل شکل (۱۲) را نشان می‌دهد. مقدار ظرفیت لایه رویین برای فولادهای زنگ نزن دوفازی معمولاً از مرتبه میکروفاراد بر سانتیمتر مربع است که این مطلب در جدول (۴) نیز مشاهده می‌شود. می‌توان دید که بیشترین و کمترین مقدار ظرفیت لایه رویین به ترتیب برای نمونه‌ی قبل از عملیات حرارتی و بعد از عملیات حرارتی می‌باشد. بیشترین مقاومت لایه رویین برای نمونه بعد از عملیات حرارتی و کمترین برای نمونه قبل از عملیات حرارتی به دست آمده است.

جدول (۴): مقادیر المان‌های به دست آمده از مدار معادل شکل (۱۲)

نمونه	R_s ($\Omega.cm^2$)	R_{ct} (Ω/cm^2)	CPE ($F.cm^2$)
قبل از عملیات حرارتی	28.93	76227	1.30E-4
بعد از عملیات حرارتی	30.12	87854	7.00E-5

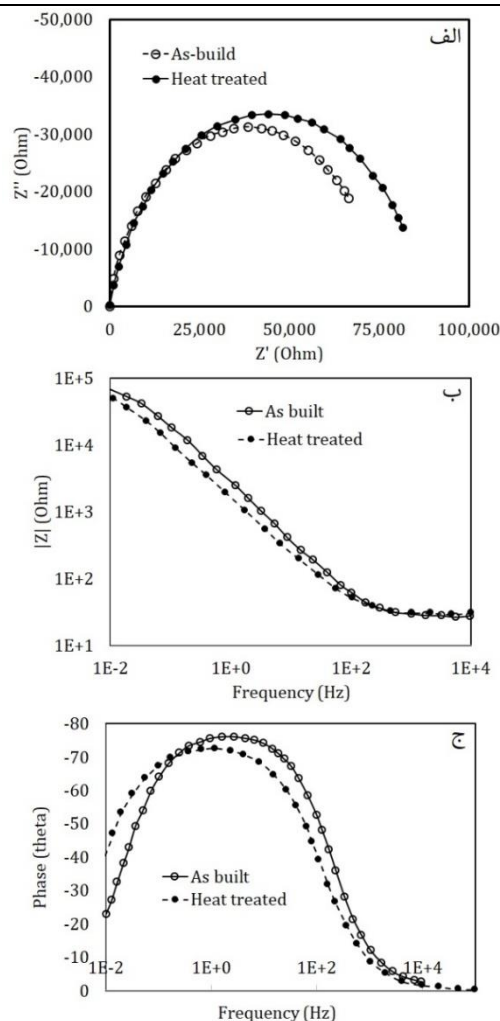
نتایج به دست آمده از آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نشان داد که مقاومت و پایداری لایه رویین با انجام عملیات حرارتی و یکنواخت شدن ریزساختار افزایش یافته است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش دیواره فولاد زنگ‌نزن دوفازی توسط فرآیند تولید افزودنی مبتنی بر سیم و قوس با فلز پرکننده ER2209 و توسط فرآیند جوشکاری قوسی با الکتروود فلزی تحت پوشش گاز محافظ ساخته شد. در ادامه ساختار، ریزساختار، خواص مکانیکی و مقاومت خوردگی دیواره مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، تأثیر عملیات حرارتی بر سختی و خوردگی بررسی شد. مهم‌ترین نتایج این پژوهش عبارت‌اند از:

۱- ریزساختار فلز جوش ER 2209 شامل ترکیبی از فریت به همراه آستنیت با مورفولوژی‌های مختلف ویدمن اشتاتن، مرزدانه‌ای و درون‌دانه‌ای بود.

۲- استحکام تسلیم و کششی دیواره در راستای جوشکاری اندکی بهتر از راستای رسوب‌گذاری بود. همچنین، توزیع سختی در راستای رسوب‌گذاری غیریکنواخت بود و



شکل (۱۱): مقایسه منحنی‌های (الف): نایکوئیست، (ب): بد و (ج): بد- فاز نمونه‌های فولاد زنگ نزن دوفازی قبل و بعد از عملیات حرارتی

شکل (۱۲) مدار معادل الکتریکی حاصل از مدل‌سازی طیف‌های امپدانس را نشان می‌دهد. مدار معادل از یک خازن و دو مقاومت تشکیل شده است که در مدار تعیین شده مقاومت محلول بین الکتروود مرجع و کاری R_s ، مقاومت پلاریزاسیون یا انتقال بار در سطح تماس محلول و الکتروود R_{ct} ، خازن لایه دوگانه در این سطح تماس C_p و ظرفیت خازنی پوشش یا لایه اکسیدی C_pE می‌باشد.



شکل (۱۲): مدار معادل الکتریکی مورد استفاده برای نتایج حاصل از

آزمون EIS

- challenges", *Thin-Walled Structures*, vol. 159, pp. 107228, 2021.
- [7] S. Srivatsav, V. Jayakumar & M. Sathishkumar, "Recent developments and challenges associated with wire arc additive manufacturing of Al alloy: A review", *Materials Today: Proceedings*, 2021.
- [8] N. A. Rosli, M. R. Alkahari, M. F. Abdollah, S. Maidin, F. R. Ramli & S. G. Herawan, "Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process", *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 11, pp. 2127-2145, 2021.
- [9] R. Singh, "Chapter 8 - Stainless Steels, in: R. Singh (Ed.)", *Applied Welding Engineering (Second Edition)*, Butterworth-Heinemann, pp. 83-90, 2016.
- [10] Y. Zhang, F. Cheng & S. Wu, "Improvement of pitting corrosion resistance of wire arc additive manufactured duplex stainless steel through post-manufacturing heat-treatment", *Materials Characterization*, vol. 171, pp. 110743, 2021.
- [11] V. T. Le, D. S. Mai, T. K. Doan & H. Paris, "Wire and arc additive manufacturing of 308L stainless steel components: Optimization of processing parameters and material properties", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 24, no. 4, pp. 1015-1026, 2021.
- [12] J. Chen, H. Wei, X. Zhang, Y. Peng, J. Kong & K. Wang, "Flow behavior and microstructure evolution during dynamic deformation of 316 L stainless steel fabricated by wire and arc additive manufacturing", *Materials & Design*, vol. 198, pp. 109325, 2021.
- [13] C. Wang, T. G. Liu, P. Zhu, Y. H. Lu & T. Shoji, "Study on microstructure and tensile properties of 316L stainless steel fabricated by CMT wire and arc additive manufacturing", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 796, pp. 140006, 2020.
- [14] A. Caballero, J. Ding, S. Ganguly & S. Williams, "Wire + Arc Additive Manufacture of 17-4 PH stainless steel: Effect of different processing conditions on microstructure, hardness, and tensile strength", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 268, pp. 54-62, 2019.
- بیشترین میزان سختی دیواره در نزدیکی زیرلایه و کمترین مقدار در میانه دیواره به دست آمد.
- ۳- عملیات حرارتی آئیل در دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه باعث یکنواخت شدن ریزساختار و کاهش درصد فریت شد. در نتیجه سختی نمونه عملیات حرارتی شده به میزان قابل توجهی افزایش یافت.
- ۴- آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نشان داد که مقاومت و پایداری لایه روئین با افزایش سرعت پیشروی و کاهش اندازه دانه افزایش یافت و نمونه بعد از عملیات حرارتی مقاومت به خوردگی بهتری را از خود نشان داد.

۵- مراجع

- [1] C. V. Haden, G. Zeng, F. M. Carter, C. Ruhl, B. A. Krick & D. G. Harlow, "Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties", *Additive Manufacturing*, vol. 16, pp. 115-123, 2017.
- [2] E. Maleki, S. Bagherifard, M. Bandini & M. Guagliano, "Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities", *Additive Manufacturing*, vol. 37, pp. 101619, 2021.
- [3] J. Savolainen & M. Collan, "How Additive Manufacturing Technology Changes Business Models—Review of Literature", *Additive Manufacturing*, vol. 32, pp. 101070, 2020.
- [4] S. Abidaryan, A. H. Behraves, M. Barmouz & S. K. Hedayati, "Effect of infill percentage and raster angle in fused deposition modeling (FDM) process on shape memory properties of poly (lactic acid) and comparison with compression molding", *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 7, no. 5, pp. 14- 23, 2020 [in Persian].
- [5] M. Mashhadi, R. Hamzeloo & J. Kadkhodapoor, "Experimental study of the electrochemical corrosion rate of medical implants of titanium and stainless steel made by machining and selective laser melting under different surface conditions", *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 24-38, 2018 [in Persian].
- [6] M. Bhuvanesh Kumar & P. Sathiya, "Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and

- [۲۴] ر. نیسی و م. شمعیان، "ارزیابی خواص اتصال فولاد زنگ‌نزن دوفازی UNS S32205 به فولاد زنگ‌نزن آستینیتی AISI 316L با استفاده از فرایند جوشکاری قوسی تنگستن تحت گاز محافظ پالسی"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۹، شماره ۴، صفحه ۱۶۱-۱۵۱، ۱۳۹۵.
- [25] F. Hejripour, F. Binesh, M. Hebel & D. K. Aidun, "Thermal modeling and characterization of wire arc additive manufactured duplex stainless steel", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 272, pp. 58-71, 2019.
- [26] F. Hengsbach, P. Koppa, K. Duschik, M. J. Holzweissig, M. Burns, J. Nellesen, W. Tillmann, T. Tröster, K. P. Hoyer & M. Schaper, "Duplex stainless steel fabricated by selective laser melting - Microstructural and mechanical properties", *Materials & Design*, vol. 133, pp. 136-142, 2017.
- [27] J. Wan, Y. Lou & H. Ruan, "The partition coefficient of alloying elements and its influence on the pitting corrosion resistance of 15Cr-2Ni duplex stainless steel", *Corrosion Science*, vol. 139, pp. 13-20, 2018.
- [28] Z. Zhang, H. Jing, L. Xu, Y. Han, L. Zhao, X. Lv & J. Zhang, "The impact of annealing temperature on improving microstructure and toughness of electron beam welded duplex stainless steel", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 31, pp. 568-582, 2018.
- [29] L. Q. Guo, M. Li, X. L. Shi, Y. Yan, X. Y. Li & L. J. Qiao, "Effect of annealing temperature on the corrosion behavior of duplex stainless steel studied by in situ techniques", *Corrosion Science*, vol. 53, no. 11, pp. 3733-3741, 2011.
- [30] W. S. Tait, "An introduction to electrochemical corrosion testing for practicing engineers and scientists", PairODocs Publications, USA, 1994.
- [31] E. S. M. Sherif, "Corrosion behavior of duplex stainless steel alloy cathodically modified with minor ruthenium additions in concentrated sulfuric acid solutions", *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 6, no. pp. 2284 - 2298, 2011.
- [32] E. S. M. Sherif, J. H. Potgieter, J. D. Comins, L. Cornish, P. A., Olubambi & C. N. Machio, "The beneficial effect of ruthenium additions on the passivation of duplex stainless steel corrosion in sodium chloride solutions", *Corrosion Science*, vol. 51, no. 6, pp. 1364-1371, 2009.
- [15] X. Zhang, K. Wang, Q. Zhou, J. Ding, S. Ganguly, G. Marzio, D. Yang, X. Xu, P. Dirisu & S. W. Williams, "Microstructure and mechanical properties of TOP-TIG-wire and arc additive manufactured super duplex stainless steel (ER2594)", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 762, pp. 138097, 2019.
- [16] A. Vahedi Nemani, M. Ghaffari, S. Salahi & A. Nasiri, "Effects of post-printing heat treatment on the microstructure and mechanical properties of a wire arc additive manufactured 420 martensitic stainless steel part", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 813, pp. 141167, 2021.
- [17] S. Papula, M. Song, A. Pateras, X. B. Chen, M. Brandt, M. Easton, Y. Yagodzinsky, I. Virkkunen & H. Hänninen, "Selective Laser Melting of Duplex Stainless Steel 2205: Effect of Post-Processing Heat Treatment on Microstructure", *Mechanical Properties, and Corrosion Resistance, Materials (Basel, Switzerland)*, vol. 12, no. 15, 2019.
- [18] A. Rajesh Kannan, N. Siva Shanmugam, V. Rajkumar & M. Vishnukumar, "Insight into the microstructural features and corrosion properties of wire arc additive manufactured super duplex stainless steel (ER2594)", *Materials Letters*, vol. 270, pp. 127680, 2020.
- [19] ASTM E92, "Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [20] ASTM E8 / E8M, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [21] J. C. Lippold & D. J. Kotecki, "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels", Wiley 2005.
- [۲۲] م. رحمانی، م. شمعیان و م. کثیری، "ارزیابی ریزساختار جوش‌های غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن سوپر دوفازی UNS 32750 به فولاد زنگ‌نزن آستینیتی AISI 304L"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۷، شماره ۱، صفحه ۹-۱، ۱۳۹۲.
- [۲۳] م. ح. ترجم نژاد، ر. دهملائی و ص. معینی فر، "تأثیر حرارت ورودی بر ریزساختار، سختی و مقاومت به ضربه اتصالات جوش فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ با روش GTAW"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۹، شماره ۲، صفحه ۱۹۶-۱۷۹، ۱۳۹۴.

- [33] Y. H. Yoo, Y. S. Choi, J. G. Kim & Y. S. Park, "Effects of Ce, La and Ba addition on the electrochemical behavior of super duplex stainless steels", Corrosion Science, vol. 52, no. 4, pp. 1123-1129, 2010.
- [34] M. Magnani, M. Terada, A. O. Lino, V. P. Tallo, E. B. D. Fonseca, T. F. A. Santos & A. J. Ramirez, "Microstructural and electrochemical characterization of friction stir welded duplex stainless steels", Int. J. Electrochem. Sci., vol. 9, pp. 2966-2977, 2014.

۶- پی نوشت

- [1] Zhang et al
[2] Caballero et al
[3] Wang et al