

بررسی تأثیر دمای بین پاسی فرآیند جوشکاری بر رفتار خوردگی فلز جوش در اتصالات جوشکاری فولاد پرکربن هادفیلد

مسعود سبزی^{۱*}، زهره بلک^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۲۴، ش.ص ۱۴۷-۱۶۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۱۸)

چکیده

در این پژوهش، تأثیر دمای بین پاسی فرآیند جوشکاری بر رفتار خوردگی فلز جوش در اتصالات جوشکاری فولاد پرکربن هادفیلد مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا ۶ عدد ورق آستنیت‌ته شده به ضخامت ۲mm از فولاد هادفیلد تهیه شد. سپس برای جوشکاری آن‌ها از فرآیند جوشکاری با الکتروود دستی و دمای بین پاسی ۷۰۰، ۸۵۰ و ۱۰۰۰°C استفاده گردید. سپس برای بررسی رفتار خوردگی فلز جوش هر سه اتصال جوشکاری شده از روش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم استفاده شد. همچنین برای بررسی ریزساختار فلز جوش در اتصالات جوشکاری شده از میکروسکوپ نوری، برای آنالیز فازهای تشکیل شده در ریزساختار فلز جوش از پراش پرتو ایکس و برای تعیین مکانیسم خوردگی از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده گردید. مشاهدات میکروسکوپ نوری و الگوهای حاصل از پراش پرتو ایکس نشان داد که افزایش دمای بین پاسی منجر به افزایش میزان رسوبات کاربیدی و کاهش اندازه دانه‌های آستنیت در ریزساختار فلز جوش اتصالات فولاد هادفیلد می‌شود. نتایج آزمایش‌های خوردگی نشان می‌دهد که با افزایش دمای بین پاسی در فرآیند جوشکاری، فلز جوش اتصالات فولاد هادفیلد مقاومت خوردگی کمتری از خود نشان می‌دهد. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مورفولوژی خوردگی فلز جوش اتصالات نشان داد که افزایش دمای بین پاسی در فرآیند جوشکاری فولاد هادفیلد منجر به فراهم شدن شرایط برای وقوع خوردگی موضعی میکروگالوانیکی شده است. **واژه‌های کلیدی:** فولاد هادفیلد، فلز جوش، رفتار خوردگی، دمای بین پاسی، فرآیند جوشکاری.

^۱ - مربی، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

^۲ - استادیار، گروه مهندسی مواد، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

*-نویسنده مسئول مقاله: mas.metallurg88@gmail.com

پیشگفتار

اولین فولاد منگنزار آستنیتی که دارای حدود ۱/۲ درصد وزنی کربن و ۱۲ درصد وزنی منگنز بود، توسط رابرت هادفیلد^۱ در سال ۱۸۸۲ میلادی تولید شد [۱]. فولاد آستنیتی پرمگنز از دسته فولادهای پرآلیاژی هستند که معروفترین آن‌ها به نام فولاد هادفیلد است که به دلیل انعطاف پذیری خوب، کارسختی بالا و مقاومت عالی در برابر سایش کاربردهای گسترده‌ای در صنایع گوناگون نظیر صنایع سیمان، معدن، راه‌سازی و راه‌آهن دارد [۱ و ۲]. این فولاد، آلیاژی از آهن، کربن و منگنز است که در موارد خاص و بنا به کاربرد آن، عناصر آلیاژی دیگری نیز به این فولاد اضافه می‌شود. یکی از این عناصر تیتانیوم می‌باشد. استفاده از عنصر تیتانیوم جهت ریزدانه کردن ساختار و افزایش سختی در این فولاد نتایج بسیار مثبتی به جای گذاشته است [۳ و ۴]. اگرچه این عنصر با ایجاد کاربیدهای پایدار، باعث افزایش سختی و بهبود مقاومت سایشی فولاد هادفیلد شده؛ اما از طرفی هم در مقادیر زیاد با ایجاد کاربیدهای پایدار TiC و کاهش اکتیویته کربن، باعث کاهش چقرمگی آن می‌شود [۵]. در تحقیقات دیگری اسری و استاوا و داس^۲ [۶]، گزارش نمودند که با طراحی کامپوزیت‌های شامل زمینه‌ای از فولاد هادفیلد و ذرات تقویت کننده‌ی کاربید تیتانیوم، می‌توان مقاومت به سایش فولاد هادفیلد را بهبود بخشید.

فولاد هادفیلد به دلیل دارا بودن مقدار کربن بالا، ساختار آن در حالت ریخته‌گری، شامل دانه‌های آستنیت و رسوب‌های کاربید مرزدانه‌ای است که در این حالت ترد و شکننده بوده و به نوعی غیرقابل استفاده هستند. برای رفع این مشکل رواندوست و همکارانش [۷] نشان دادند که اگر پس از ریخته‌گری، این فولاد تحت نندسر مایی مستقیم در آب قرار گیرد، کاربیدهای مرزدانه‌ای حذف شده و این عمل از اثرات نامطلوب کاربیدها بر روی خواص مکانیکی فولاد هادفیلد جلوگیری می‌کند. در همین راستا، حسینی و همکارانش [۸-۱۰] گزارش دادند که اگر پس از فرآیند عملیات حرارتی آستنیت، فولاد هادفیلد در حمام آب نمک سرد شود، می‌توان از تشکیل ذرات کاربید مرزدانه‌ای در ساختار این فولاد جلوگیری نمود.

بدون شک، حضور عناصر آلیاژی و شرایط فرآیند تولید فولادها، تأثیر زیادی بر روی خواص مکانیکی و خوردگی آن‌ها دارد. به‌عنوان مثال تور^۳ [۱۱] نشان داده که با کاهش میزان منگنز و افزایش دمای آنیل انحلالی، مقاومت خوردگی در فولادهای آستنیتی افزایش می‌یابد. همچنین سبزی و کلانتری‌پور [۱۲] با مطالعاتی که بر روی تأثیر حرارت ورودی فرآیند جوشکاری بر روی خواص مکانیکی اتصالات جوش فولاد هادفیلد انجام دادند، گزارش نمودند که افزایش حرارت ورودی فرآیند جوشکاری منجر به کاهش ضربه‌پذیری اتصال جوش فولاد هادفیلد می‌شود.

اهمیت دمای بین پاسی از نظر تأثیر بر خواص مکانیکی، خوردگی و ریزساختار قطعه، اگر بیش‌تر از اهمیت دمای پیشگرم نباشد از آن کم‌تر هم نیست. به‌عنوان مثال مقاومت خوردگی، استحکام تسلیم و استحکام کششی فلز جوش تابعی از دمای بین پاسی می‌باشد [۱۲]. کنترل حداکثر دمای بین پاسی در جوشکاری فولادهای پرکربن نیز اهمیت خاصی دارد. به دلیل اینکه عملیات حرارتی خاصی روی این فولادها اجرا شده است، دمای بین پاسی باید در محدوده مجاز کنترل شود تا به خواص مکانیکی و خوردگی مورد نظر در فلز جوش دست یابیم. به‌طور کلی بررسی‌ها نشان داده است که پارامترهای فرآیند جوشکاری تأثیر زیادی بر رفتار خوردگی و ریزساختار اتصالات جوشکاری فولادها دارد [۱۴-۱۳]. به همین دلیل تحقیقاتی توسط سبزی و همکارانش [۱۵] در رابطه با تأثیر حرارت ورودی بر مقاومت خوردگی اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد صورت پذیرفت. این محققین در نتایج تحقیقات خود گزارش دادند که افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری ورق‌های فولاد هادفیلد، منجر به کاهش مقاومت خوردگی اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد می‌شود. این محققین دلیل این امر را افزایش تشکیل کاربیدهای پیوسته و خوشه‌ای شکل در مرزدانه‌ها در اثر افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری بیان نموده‌اند. در رابطه با تأثیر دمای بین پاسی بر رفتار خوردگی فلز جوش، محققین [۱۶] گزارش دادند که افزایش دمای بین پاسی در فرآیند جوشکاری فولادهای زنگ‌نزن دوفازی، منجر به کاهش مقاومت خوردگی فلز جوش در اتصالات

^۳-Toor

^۱-Robert Hadfield

^۲-Srivastava and Das

این فولادها می‌شود.

می‌باشد. حرارت ورودی محاسبه شده مطابق با فرمول ۱ و کلیه پارامترهای جوشکاری در جدول ۲ گزارش شده است. لازم به ذکر است که برای تثبیت دمای بین پاسی از شمع‌های حرارتی با دمای ذوب ۷۰۰، ۸۵۰ و ۱۰۰۰°C استفاده شده و برای اندازه‌گیری دمای بین پاسی، دستگاه پیرومتر غیرتماسی پرتابل مورد استفاده قرار گرفت. مطابق با استاندارد AWS D ۱,۱ [۲۰]، دمای بین پاسی در فاصله‌ی ۷۵mm از خط جوش اندازه‌گیری شده و پس از پایان فرآیند جوشکاری، ورق‌های اتصال داده شده در هوا سرد شدند. همچنین ترکیب شیمیایی الکترودهای مورد استفاده در این پژوهش توسط طیف‌سنجی نشری جرقه‌ای بررسی شده و در جدول ۳ گزارش شده است.

برای بررسی ریزساختار فلز جوش اتصالات جوشکاری شده، ورق‌های اتصال داده شده با استفاده از سمباده‌های مختلف به روش تر آماده‌سازی شدند و سپس برای حکاکی کردن آن‌ها از محلول نایتال ۲ درصد استفاده گردید و در نهایت ریزساختارهای حاصل توسط میکروسکوپ نوری بررسی شد. به منظور اندازه‌گیری میزان رسوبات در فلز جوش اتصالات جوشکاری از نرم‌افزار Image J و برای بررسی اندازه دانه‌های این منطقه از نرم‌افزار Image Analyzer استفاده گردید. همچنین جهت بررسی رسوبات تشکیل شده در فلز جوش هر سه اتصال از پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده گردید.

برای تهیه‌ی نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمایش‌های خوردگی، نمونه‌ای به ابعاد $2 \times 18 \times 18$ mm^۳ از هر اتصال جوشکاری شده بریده شد و پس از اتصال سیم مسی به آن‌ها، به صورت سرد مانت شدند. سپس نمونه‌های تهیه شده با سمباده‌های مختلف به روش تر و پولیش پرداخت شده تا سطحی بدون آلودگی به دست آید. در این مرحله یک طرف نمونه تهیه شده توسط سیم مسی به گیره دستگاه متصل گردید و طرف دیگر که حاوی فلز جوش بود، به درون محلول ۳٪/۵NaCl فرو برده شد. به منظور ارزیابی رفتار خوردگی فلز جوش اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد در محلول ۳٪/۵NaCl، پس از آماده سازی نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش‌های خوردگی، ابتدا هر نمونه در

باتوجه به اینکه تخریب قطعات ساخته شده از جنس فولاد آستنیتی منگن‌دار هادفیلد در شرایط سرویس‌دهی بسیار پرهزینه است، لذا در این پژوهش لازم دیده شد که به بررسی تأثیر دمای بین پاسی فرآیند جوشکاری بر رفتار و مکانیسم خوردگی فلز جوش در اتصالات جوشکاری فولاد آستنیتی منگن‌دار هادفیلد پرداخته شود که در پژوهش‌های پیشین به این موضوع پرداخته نشده بود.

مواد و روش‌ها

فولاد مورد استفاده در این پژوهش، فولاد آستنیتی منگن‌دار هادفیلد ASTM A-۱۲۸ [۱۷] بود. برای این منظور، ابتدا ۶ عدد ورق آستنیتیه شده از فولاد هادفیلد به ضخامت ۲mm تهیه شده و سپس ترکیب شیمیایی آن‌ها توسط دستگاه طیف‌سنجی نشری جرقه‌ای بررسی شد و در جدول ۱ گزارش داده شده است. سپس ورق‌های تهیه شده توسط دستگاه فرز با زاویه ۳۵ درجه پخ زده شدند تا آماده جوشکاری شوند. شماتیک طرح اتصال در شکل ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که جهت اتصال لب به لب ورق‌های پخ زده شده با شیار V شکل، از استاندارد AWS B2.1 [۱۸] بهره گرفته شد.

سپس برای جوشکاری ورق‌های تهیه شده از روش جوشکاری با الکترودهای منگن‌دار به قطر ۱۰۰۰°C و همچنین از الکترودهای منگن‌دار به قطر ۲mm با کد AWS A5.13 استفاده شد. برای محاسبه حرارت ورودی به قطعه کار از رابطه زیر استفاده گردید [۱۹]:

$$Q = \eta (60VI / 1000 S) \quad (1)$$

که در این فرمول η ضریب ثابتی بوده و برای روش جوشکاری با الکترودهای دستی برابر با ۰/۷۵ است. همچنین Q حرارت ورودی به قطعه کار برحسب کیلوژول بر میلیمتر، V ولتاژ برحسب ولت، I شدت جریان برحسب آمپر و S سرعت جوشکاری برحسب میلیمتر بر دقیقه

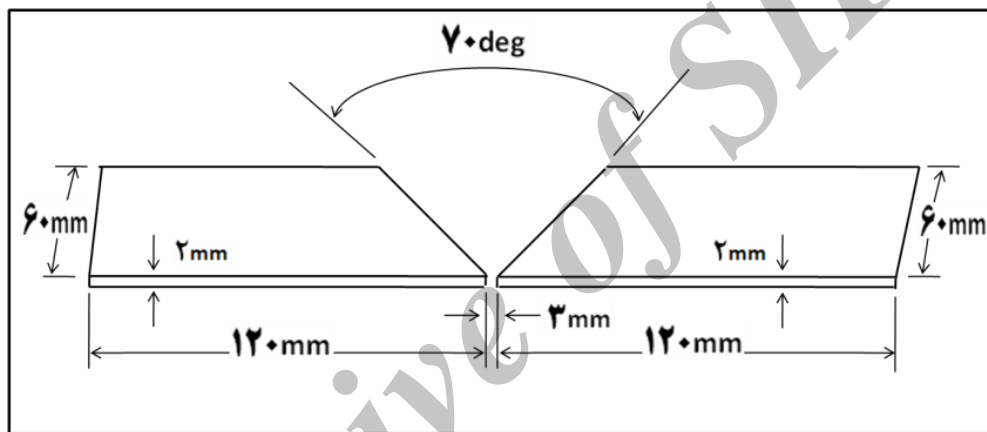
^۱ X-Ray Diffraction (XRD)

شد. سپس آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محدوده -50.0mV تا $+100.0\text{mV}$ نسبت به پتانسیل مدار باز و با نرخ روبش 0.01V/s انجام شد.

پتانسیل مدار باز به مدت زمان نیم ساعت غوطه‌ور شد تا به حالت پایدار برسد. ابتدا آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در پتانسیل مدار باز و با بکارگیری دامنه 10mV در محدوده فرکانسی $10\text{mHz} - 10\text{kHz}$ انجام

جدول ۱- آنالیز شیمیایی ورق‌های فولاد هادفیلد تهیه شده بر حسب درصدوزنی

عنصر	کربن	منگنز	فسفر	سیلیسیم	آهن
استاندارد ASTM A-۱۲۸	۱,۳۵ - ۱,۰۵	۱۴ - ۱۰	۰,۰۷max	۱max	بقیه
ورق‌های تهیه شده	۱,۲۵	۱۲,۷۲	۰,۰۲۲	۰,۵۲	بقیه



شکل ۱- شماتیکی از طرح اتصال

جدول ۲- پارامترهای فرآیند جوشکاری SMAW برای جوشکاری ورق‌های فولاد هادفیلد

فرآیند جوشکاری	سرعت (میلی متر بر دقیقه)	جریان (آمپر)	ولتاژ (ولت)	کیلوژول بر میلی متر)	حرارت ورودی
SMAW	۲۰	۱۵۰	۲۰	۶,۷۵	

جدول ۳- آنالیز شیمیایی الکتروود مورد استفاده بر حسب درصد وزنی

عنصر	کربن	منگنز	نیکل	سیلیسیم	کروم	فسفر	آهن
میزان	۰,۷۲	۱۲,۵۳	۳,۸۹	۰,۹۴	۰,۲۵	۰,۰۲	بقیه

است. در واقع در اثر افزایش دمای اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد، میزان کاربید بیشتری تشکیل شده و این کاربیدها به عنوان موانع حرکت مرزخانه‌ها عمل می‌کنند و از رشد دانه‌های آستنیت پس از پایان فرآیند جوشکاری نیز جلوگیری نموده‌اند. چراکه به‌طور کلی نرخ انتقال حرارت در فولاد هادفیلد بسیار پایین بوده و از طرفی هم فولاد هادفیلد یک فولاد پرکربن است [۱۲ و ۲].

مشاهدات میکروسکوپ نوری با نتایج حاصل از پژوهش کوریل-رینا^۲ و همکارانش [۲۲] در رابطه با تأثیر حرارت بر رسوب کاربید در اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد شباهت دارد. همچنین پیش از این سیزی و کلانتری پور [۱۵ و ۱۲] گزارش داده بودند که افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری فولاد هادفیلد منجر به افزایش دمای اتصال شده و این امر منجر به افزایش میزان کاربید و کاهش اندازه دانه‌های آستنیت در ریزساختار فلز جوش این اتصال می‌شود.

لذا تصاویر متالوگرافی تهیه شده بیانگر این موضوع هستند که در اثر افزایش دمای بین پاسی در فرآیند جوشکاری، شرایط دمایی برای تشکیل رسوبات کاربیدی (واکنش کربن با عناصر کاربیدزا) بیش‌تر، دانه‌های آستنیت کوچک‌تر، تعداد مرزخانه‌ها و میزان کاربیدها نیز بیش‌تر خواهد شد. اندازه‌گیری اندازه دانه‌ها بوسیله نرم‌افزار Image Analyzer نشان می‌دهد که افزایش 300°C در دمای بین پاسی در فرآیند جوشکاری فولاد هادفیلد، منجر به کاهش بسیار زیادی در اندازه دانه‌های آستنیت در ریزساختار فلز جوش اتصالات فولاد هادفیلد می‌شود. برای بررسی میزان کاربیدها، میزان ذرات بوسیله نرم‌افزار Image J برای هر سه فلز جوش مورد آزمایش، اندازه‌گیری شده و در جدول ۴ گزارش داده شده است. از این جدول هم مشاهده می‌شود که به موازات افزایش دمای بین پاسی در فرآیند جوشکاری، به میزان کاربیدها افزوده شده است.

درواقع با افزایش دمای بین پاسی فرآیند جوشکاری، فلز جوش یک ساختار ریزدانه و حاوی مقادیر بالایی از کاربید را شامل می‌شود؛ زیرا در اثر افزایش دمای بین پاسی

لازم به ذکر است که آزمایش‌های خوردگی با استفاده از پیل استاندارد سه الکترودی، شامل الکترود مرجع Ag/AgCl، الکترود کمکی پلاتین و همچنین از نمونه‌های تهیه شده از اتصالات جوشکاری شده به عنوان الکترود کار، انجام شدند و سل مذکور به دستگاه پتانسیواستات - گالوانواستات (Autolab) مدل PGStat ۳۰۲N متصل گردید. هر دو آزمایش خوردگی مورد استفاده، در دمای 25°C انجام شده و برای اطمینان از به دست آمدن نتایج دقیق، هر آزمایش خوردگی سه بار تکرار شد. به منظور بررسی تأثیر دمای بین پاسی فرآیند جوشکاری بر مکانیسم خوردگی فلز جوش اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد، پس از پایان آزمایش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، از سطوح خورده شده فلز جوش اتصالات تهیه شده با دمای بین پاسی 700°C و 1000°C ، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تصاویری تهیه شد.

نتایج و بحث

مشاهدات ریزساختاری

در شکل ۲، تصاویر متالوگرافی تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری از فلز جوش اتصالات جوشکاری فولاد آستنیتی منگنزدار مورد استفاده در این پژوهش، تهیه شده با دمای بین پاسی 700°C ، 850°C و 1000°C و پس از سرد شدن در هوا نشان داده شده است. همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود، در هر سه نمونه مورد آزمایش، ریزساختار فلز جوش متشکل از یک زمینه آستنیتی و مقادیر مختلفی از کاربید می‌باشد. حضور کاربید به دلیل حضور کربن زیاد و عناصر کاربیدزایی نظیر منگنز می‌باشد. وجود زمینه آستنیتی هم به دلیل حضور کربن و منگنز زیاد در ترکیب است. پیش از این لی و چوی [۲۱]، گزارش دادند که با افزایش منگنز در آلیاژهای Fe-Mn، دمای شروع مارتنزیت به میزان بسیار زیادی کاهش می‌یابد، به طوری که در آلیاژهای پرمنگنز یک زمینه کاملاً آستنیتی را می‌توان مشاهده نمود. از تصاویر تهیه شده مشاهده می‌شود که با افزایش دمای بین پاسی از 700°C به 1000°C ، اندازه دانه‌های آستنیت در فلز جوش کوچک‌تر شده و همچنین به میزان ذرات کاربیدی در این ناحیه افزوده شده

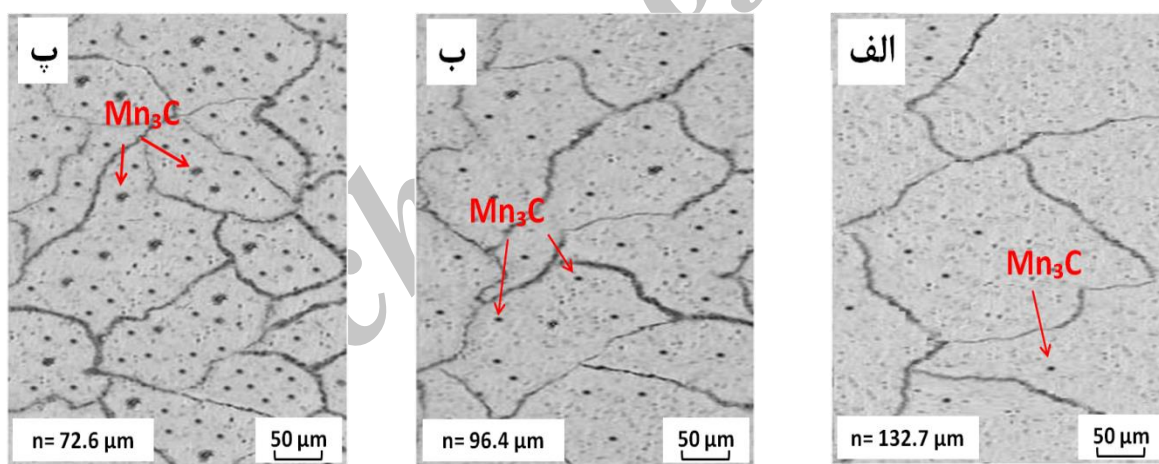
^۱ Scanning Electron Microscopy (SEM)

^۲ lee and choi

^۳ Curriel-Reyna

برای بررسی رسوبات تشکیل شده در فلز جوش اتصالات ایجاد شده با دمای بین پاسی 700°C و 1000°C ، از آنالیز XRD استفاده شده و نتایج آن در شکل ۴ گزارش شده است. از شکل ۴ هم ملاحظه می‌شود که کاربیدهای تشکیل شده در هر دو نمونه، کاربیدهای منگنز از نوع Mn_3C بوده و فاز غالب (فاز زمینه)، آستنیت می‌باشد [۲ - ۱]. همچنین از الگوهای پراش پرتو ایکس ملاحظه می‌گردد که در فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی 1000°C نسبت به فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی 700°C ، ارتفاع پیک مربوط به کاربید Mn_3C افزایش یافته که با مشاهدات میکروسکوپی و اندازه‌گیری رسوبات با نرم‌افزار مطابقت دارد. نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس، وجود $8/67$ درصد حجمی رسوب در فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی 700°C و $24/61$ درصد حجمی رسوب در فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی 1000°C را گزارش نمود که این نتایج تطابق بسیار خوبی با اندازه‌گیری‌های نرم‌افزار Image J دارد.

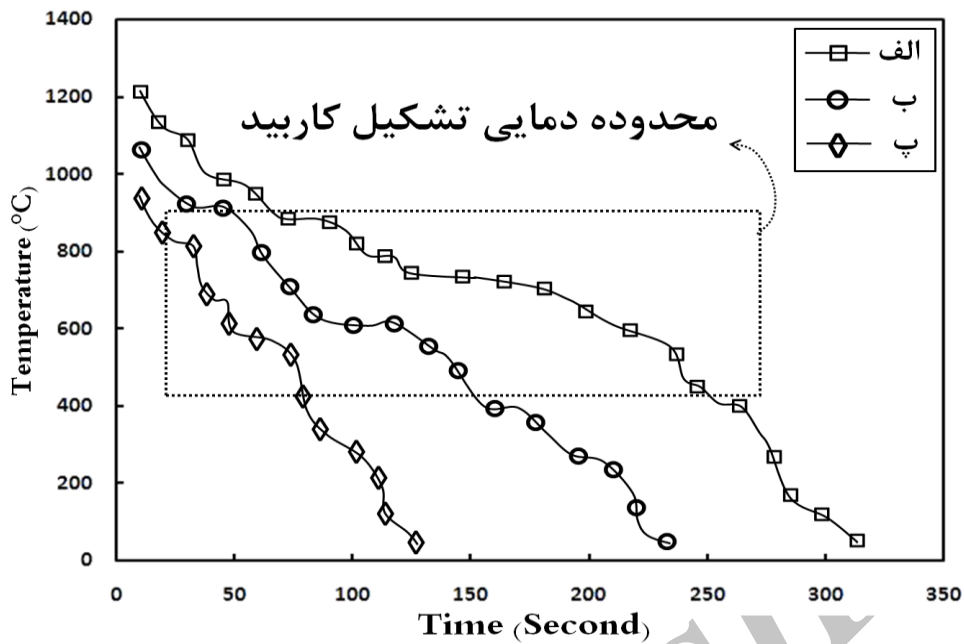
فرآیند جوشکاری، دمای اتصال جوشکاری شده افزایش یافته و فلز جوش پس از پایان فرآیند جوشکاری برای رسیدن به دمای محیط و عبور از محدوده دمایی تشکیل کاربید نیاز به زمان بیشتری دارد (محدوده دمایی تشکیل کاربید برای فولاد هادفیلد با $1/2\%$ از 400°C تا 900°C می‌باشد [۱۲ - ۸]). بنابراین فلز جوش به دلیل طولانی‌تر شدن زمان سرد شدن، به کربن و عنصر کاربیدزایی مثل منگنز فرصت می‌دهد تا با یکدیگر واکنش داده و کاربیدهای منگنز را تشکیل دهند. برای بررسی این موضوع، پس از پایان فرآیند جوشکاری، دمای اتصالات جوشکاری در بازه‌های زمانی مختلف توسط دستگاه پیرومتر غیرتماسی پرتابل اندازه‌گیری شده و در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل ملاحظه می‌گردد که با افزایش دمای بین پاسی در فرآیند جوشکاری، فلز جوش اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد نیاز به زمان بیشتری برای عبور از محدوده دمایی تشکیل کاربید دارد. لذا با افزایش دمای بین پاسی در فرآیند جوشکاری، زمان کافی برای تشکیل کاربیدهای منگنز در فلز جوش فراهم خواهد شد.



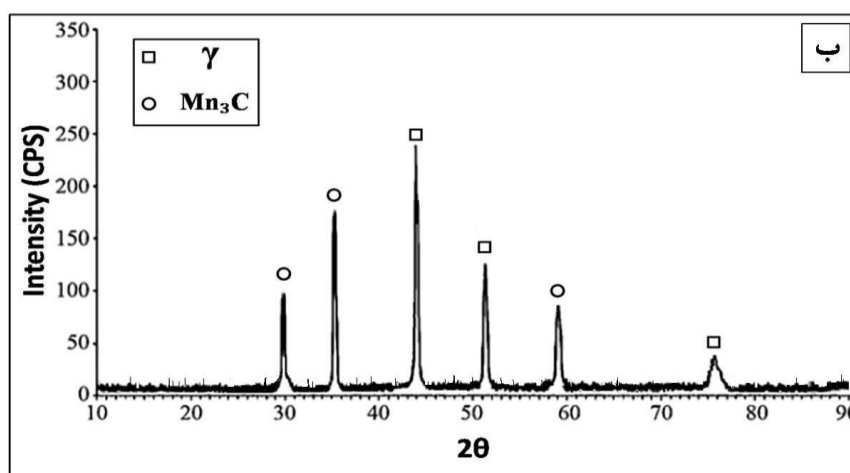
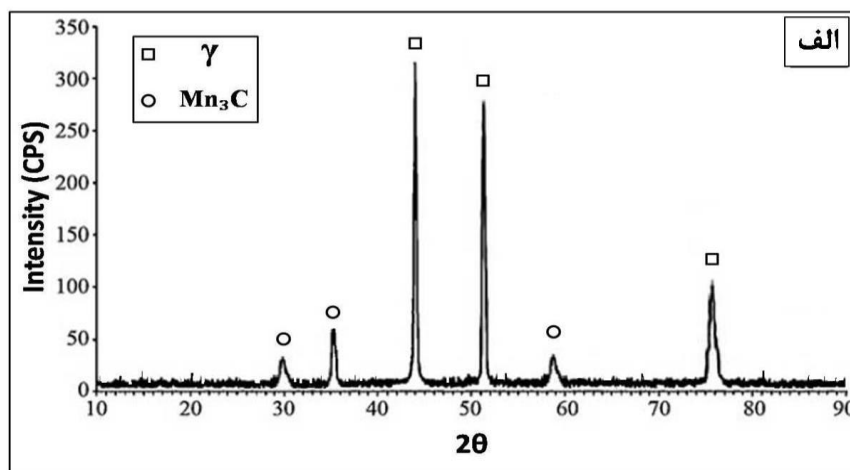
شکل ۲- تصاویر تهیه شده با میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی $100\times$ برای فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی: الف) 700°C ، ب) 850°C ، پ) 1000°C

جدول ۴- تعیین توزیع کاربید در فلز جوش توسط نرم افزار Image J

انحراف معیار	میزان رسوبات (درصد)	فلز جوش اتصال جوشکاری
۰,۳۶	۹	ایجاد شده با دمای بین پاسی 700°C
۱,۱۴	۱۶	ایجاد شده با دمای بین پاسی 850°C
۱,۴۷	۲۴	ایجاد شده با دمای بین پاسی 1000°C



شکل ۳- نرخ سرد شدن اتصال جوشکاری (پس از آخرین پاس) در حالت ایجاد شده با دمای بین پاسی: الف) ۱۰۰۰°C، ب) ۸۵۰°C، پ) ۷۰۰°C



شکل ۴- الگوهای حاصل از آنالیز XRD فلز جوش برای اتصال جوشکاری ایجاد شده با دمای بین پاسی: الف) ۷۰۰°C، ب) ۱۰۰۰°C

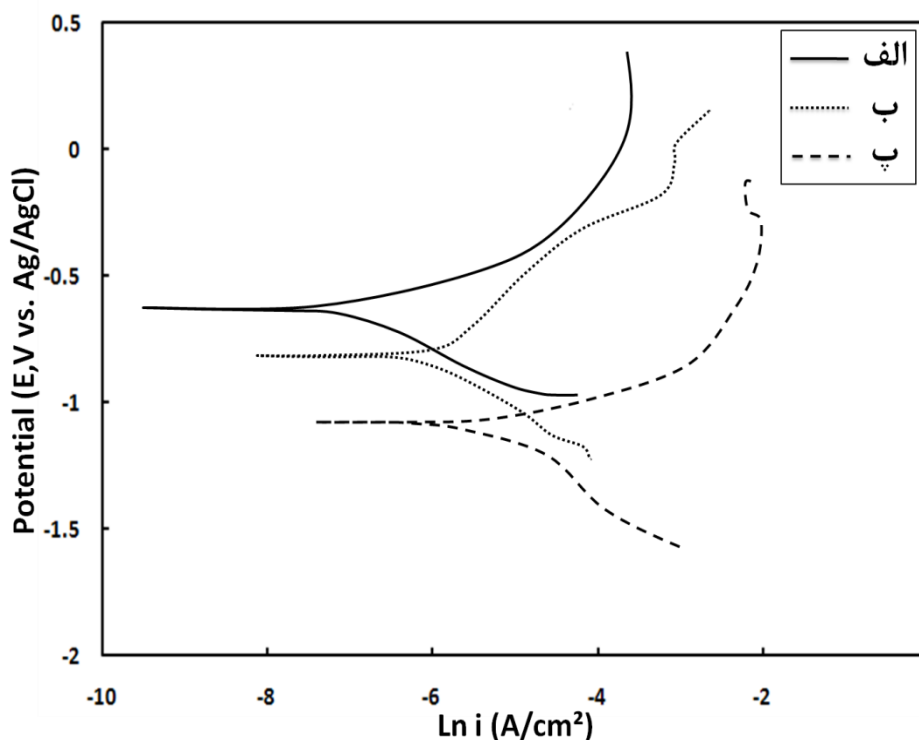
آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک

در شکل ۵ نمودارهای مربوط به آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و در جدول ۵ نتایج مربوط به این آزمایش نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در بین هر ۳ اتصال جوش مورد آزمایش، فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی 700°C از مقاومت خوردگی بالاتر، پتانسیل خوردگی نجیب‌تر، جریان خوردگی و نرخ خوردگی پایین‌تری برخوردار می‌باشد. چون که فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی 700°C دارای میزان کاربید و تعداد مرزدانه‌ی کمتری است. در واقع فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی 1000°C به دلیل داشتن میزان ذرات کاربیدی و تعداد مرزدانه‌های بیش‌تر در بین هر ۳ فلز جوش، صاحب ضعیف‌ترین مقاومت خوردگی می‌باشد. ذرات کاربیدی، ترکیب‌هایی هستند که رفتار نجیبی نسبت به زمینه‌ی آستنیتی در فولاد منگنزدار هادفیلد از خود

نشان می‌دهند [۱۲]. بنابراین زمانی که با افزایش دمای بین پاسی در فرآیند جوشکاری، کاربیدها در فلز جوش اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد به میزان زیادی تشکیل می‌شوند، به ۲ دلیل خوردگی تشدید می‌گردد [۲۰]:

۱- فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی 1000°C به دلیل داشتن میزان کاربید بیش‌تر، دارای اندازه دانه کوچکتری می‌باشد. در نتیجه در این فلز جوش تعداد مرزدانه‌ها بیش‌تر از فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی 700°C خواهد بود و مرزدانه‌ها محل‌های پراثرژی بوده که از نظر شیمیایی فعال‌تر هستند و تمایل به خوردگی را افزایش می‌دهند.

۲- زمانی که ذرات کاربیدی نجیب‌تر در کنار زمینه فعال قرار می‌گیرند (در اثر افزایش دمای بین پاسی فرآیند جوشکاری)، زوج الکتروشیمیایی تشکیل داده و باعث تضعیف شدن مقاومت خوردگی خواهد شد.



شکل ۵- نمودارهای مربوط به آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با حداقل سه بار تکرارپذیری برای فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی: الف) 700°C ، ب) 850°C ، پ) 1000°C

جدول ۵- نتایج آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک

Corr. Rate (mm/year)	R _p (Ω.cm ²)	E _{corr} (mV vs. Ag/AgCl)	i _{corr} (μA/cm ²)	فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با
۰,۴۶۹۱ ± ۰,۰۱	۲۰۶ ± ۵	-۶۹۲ ± ۱۰	۸۲۵ ± ۵	دمای بین پاسی ۷۰۰°C
۰,۹۹۶۷ ± ۰,۰۱	۸۹ ± ۵	-۸۶۸ ± ۱۰	۲۲۴۲ ± ۵	دمای بین پاسی ۸۵۰°C
۱,۶۹۵۸ ± ۰,۰۱	۳۱ ± ۵	-۱۱۶۳ ± ۱۰	۴۰۸۶ ± ۵	دمای بین پاسی ۱۰۰۰°C

در مجموع، نتایج آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک حکایت از این دارد که کاهش دمای بین پاسی فرآیند جوشکاری از ۱۰۰۰°C به ۷۰۰°C، باعث بهبود مقاومت خوردگی در این فولاد می‌گردد. نتایج حاصل شده از آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با نتایج حاصل از پژوهش آلوارز و همکارانش [۲۳] شباهت دارد. پیش از این آلوارز و همکارانش گزارش داده بودند که افزایش دمای بین پاسی در فرآیند جوشکاری زیرپودری فولاد زنگ نزن دوفازی UNS S31803 منجر به کاهش مقاومت خوردگی فلز جوش در اتصالات فولاد مذکور می‌شود.

مستقیمی با تغییرات ریزساختاری فلز جوش دارد. به گونه‌ای که با کاهش دمای بین پاسی در فرآیند جوشکاری فولاد منگنزار هادفیلد، میزان رسوبات کاربیدی و تعداد مرزخانه‌ها کاهش یافته و نهایتاً شرایط برای کاهش خوردگی فراهم شده است. در مجموع با مقایسه‌ی نمودارهای نایکویست هر سه فلز جوش، مشاهده می‌شود که قطر نیم‌دایره نمودارهای نایکویست که نمادی از مقاومت پلاریزاسیون فلزات جوش است [۲۰]، برای فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی ۷۰۰°C که دارای میزان کاربید و تعداد مرزخانه‌ی کمتری نسبت به دیگر فلزات جوش می‌باشد، بیش‌تر است. همچنین نتایج مقاومت خوردگی حاصل شده از آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی با نتایج حاصل از آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک همخوانی دارند.

شکل ۶ نمودار نایکویست مربوط به آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی را برای فلز جوش هر سه اتصال نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۶ مشاهده می‌شود، فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی ۷۰۰°C، مقاومت امپدانس واقعی بیشتری نسبت به دیگر فلزات جوش دارد. از آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی مقادیر مقاومت امپدانس واقعی Ω.cm² ۲۹۶ برای فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی ۷۰۰°C، Ω.cm² ۲۱۸ برای فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی ۸۵۰°C و Ω.cm² ۱۲۹ برای فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی ۱۰۰۰°C به دست آمد. نتایج حاصل شده از آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی ارتباط

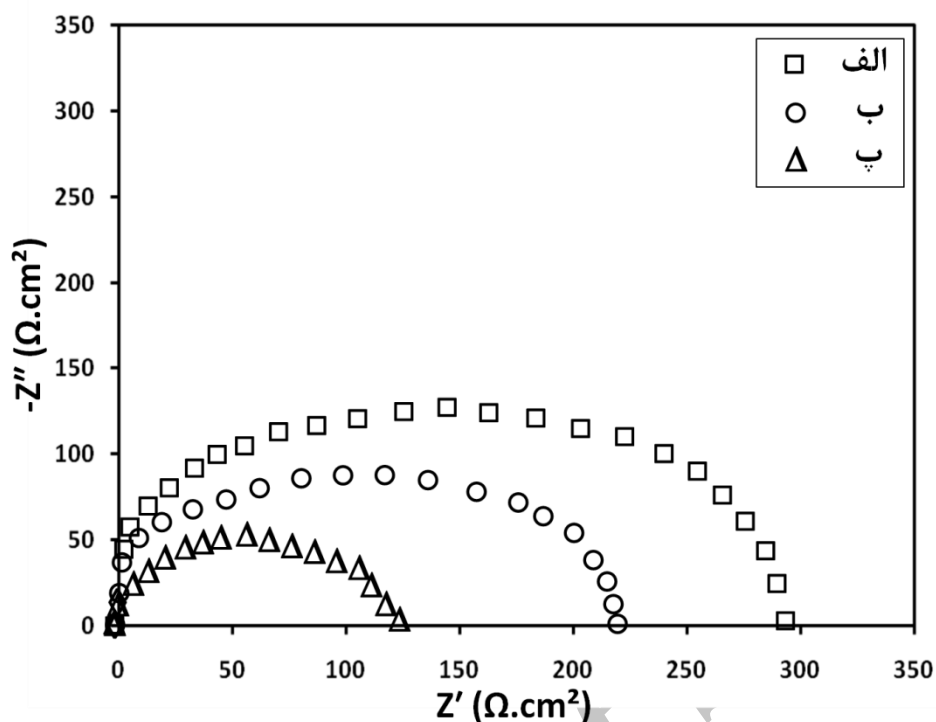
آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

در شکل ۷ مدار معادل مورد استفاده برای محاسبه‌ی پارامترهای طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نشان داده شده است [۲۴]. مدار معادل نشان داده شده متشکل از یک مقاومت محلول (R_s)، المان ثابت فازی (CPE) و مقاومت انتقال بار (R_{ct}) می‌باشد.

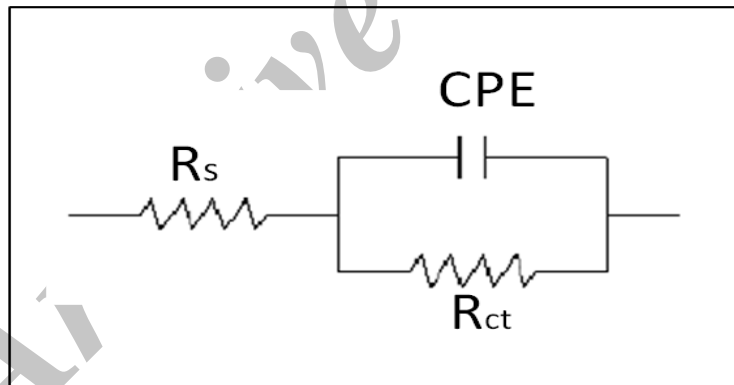
جدول ۶ نتایج EIS را با توجه به مدار معادل نشان داده شده در شکل ۷ نشان می‌دهد. در این جدول هم مشاهده می‌شود که در اثر افزایش دمای بین پاسی در فرآیند جوشکاری فولاد آستنیتی منگنزار هادفیلد، مقاومت امپدانس فلز جوش کاهش یافته است.

شکل ۶ نمودار نایکویست مربوط به آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی را برای فلز جوش هر سه اتصال نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۶ مشاهده می‌شود، فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی ۷۰۰°C، مقاومت امپدانس واقعی بیشتری نسبت به دیگر فلزات جوش دارد. از آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی مقادیر مقاومت امپدانس واقعی Ω.cm² ۲۹۶ برای فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی ۷۰۰°C، Ω.cm² ۲۱۸ برای فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی ۸۵۰°C و Ω.cm² ۱۲۹ برای فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی ۱۰۰۰°C به دست آمد. نتایج حاصل شده از آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی ارتباط

^۱- Alvarez



شکل ۶- نمودار نایکوئیست مربوط به آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی با حداقل سه بار تکرار پذیری برای فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی: الف) 700°C ، ب) 850°C ، پ) 1000°C



شکل ۷- مدار معادل مورد استفاده برای محاسبه پارامترهای EIS

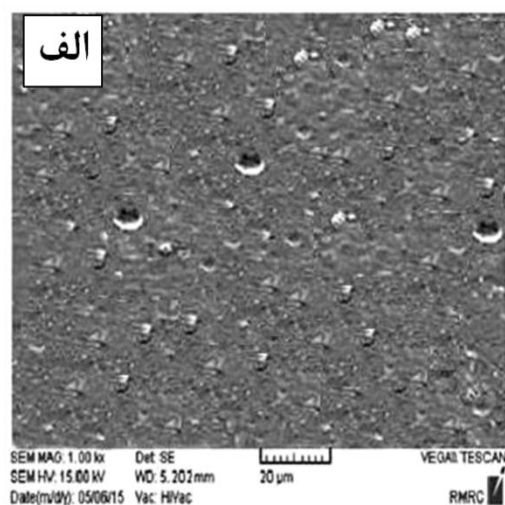
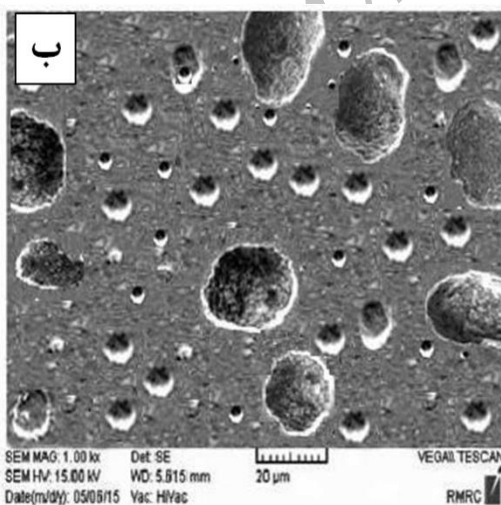
جدول ۶- پارامترهای EIS برای فلز جوش هر سه اتصال

CPE	$R_{ct} (\Omega.cm^2)$	$C_{dl} (\mu F/cm^2)$	$R_s (\Omega.cm^2)$	فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با
0.95 ± 0.01	2966 ± 0.2	216947	0.219	دمای بین پاسی 700°C
0.89 ± 0.01	2181 ± 0.2	379029	0.214	دمای بین پاسی 850°C
0.81 ± 0.01	1295 ± 0.2	526208	0.216	دمای بین پاسی 1000°C

مورفولوژی خوردگی فلز جوش

در هر دو فلز جوش، با نتایج مقاومت خوردگی و نرخ خوردگی حاصل شده از آزمایش‌های خودگی مطابقت دارد. در واقع با بررسی سطوح خوردگی مشخص شد که خسارات خوردگی در فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد به شکل حفره‌هایی می‌باشد که تعداد و عمق این حفره‌ها با افزایش دمای بین پاسی در فرآیند جوشکاری فولاد مذکور، افزایش یافته است. از طرفی هم با مقایسه سطح خوردگی فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی 1000°C با سطح خوردگی فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی 700°C ، ملاحظه می‌گردد که سطح خوردگی فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی 700°C دچار خوردگی یکنواخت و کمتری شده است که با نتایج حاصل از آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک همخوانی دارد. در حقیقت تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بیانگر این موضوع هستند که افزایش دمای بین پاسی در فرآیند جوشکاری از 700°C به 1000°C ، علاوه بر تضعیف مقاومت به خوردگی در فلز جوش اتصالات جوشکاری فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد، باعث تغییر مکانیسم خوردگی از یکنواخت به موضعی میکروگالوانیکی در فولاد مذکور می‌شود.

جهت بررسی تأثیر دمای بین پاسی فرآیند جوشکاری بر مورفولوژی خوردگی فلز جوش اتصالات جوشکاری فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد، پس از پایان آزمایش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک از سطوح خورده شده فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی 700°C و 1000°C ، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تصاویری تهیه گردید و در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود، در سطح خوردگی فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی 1000°C نسبت به سطح خوردگی فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی 700°C ، یکسری حفرات درشت در سطح مشاهده می‌شود؛ چون با افزایش دمای بین پاسی در فرآیند جوشکاری فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد، مقدار ذرات کاربیدی و تعداد مرزدانه‌ها در ریزساختار فلز جوش بیش‌تر شده و حضور مقادیر بالای ذرات کاربیدی به تشکیل میکروپیل‌ها و تشدید خوردگی موضعی میکروگالوانیکی کمک کرده است. (ذرات کاربیدی نقش کاتد و زمینه آستنیتی نقش آنود را در خوردگی موضعی میکروگالوانیکی ایفا می‌کنند [۲۵ و ۲۰]). همچنین میزان خوردگی سطح (تعداد و عمق حفره‌های ایجاد شده)



شکل ۸- تصاویر SEM پس از پایان آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک از سطح خوردگی فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی: الف) 700°C ، ب) 1000°C

نتیجه گیری

۱- مشاهدات میکروسکوپ نوری نشان داد که افزایش دمای بین پاسی (از 700°C تا 1000°C) در فرآیند جوشکاری فولاد هادفیلد منجر به کاهش اندازه دانه‌های آستنیت و افزایش میزان رسوبات کاربیدی در فلز جوش می‌شود. همچنین با انتخاب هر دمای بین پاسی در فرآیند جوشکاری، فاز غالب (اصلی) موجود در ریزساختار فلز جوش، آستنیت است.

۲- نتایج آنالیز فازی XRD بیانگر این بود که در فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی مختلف، کاربیدهای منگنز از نوع Mn_2C تشکیل می‌شوند که با افزایش دمای بین پاسی در فرآیند جوشکاری، میزان این کاربیدها نیز افزایش می‌یابد. همچنین در فلز جوش ایجاد شده با هر دمای بین پاسی، فاز غالب (فاز زمینه) آستنیت بود.

۳- آزمایش‌های الکتروشیمیایی دلالت بر کاهش مقاومت خوردگی فلز جوش اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد در اثر افزایش دمای بین پاسی در فرآیند جوشکاری فولاد هادفیلد داشتند؛ زیرا افزایش دمای بین پاسی با تشکیل ذرات نجیب Mn_2C در کنار زمینه آستنیتی و همچنین با افزایش تعداد مرزدانه‌ها، شرایط را برای تشدید خوردگی و افزایش نرخ خوردگی فراهم نموده بود.

۴- با بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مشخص شد که افزایش دمای بین پاسی (از 700°C تا 1000°C) در فرآیند جوشکاری فولاد آستنیتی منگن‌دار هادفیلد، مکانیسم خوردگی فلز جوش را از حالت یکنواخت به حالت موضعی میکروگالوانیکی تغییر می‌دهد. این امر به دلیل توانایی دمای بالای بین پاسی فرآیند جوشکاری در تشکیل پیل‌های میکروگالوانیکی (ذرات نجیب کاربیدی در کنار زمینه‌ی فعال) رخ داده بود.

References:

۱-E.G. Moghaddam, N. Varahram and P. Davami, "On the comparison of microstructural characteristics and mechanical properties of high-vanadium austenitic manganese steels with the Hadfield steel", *Mat. Sci. and Eng. A*, Vol. ۵۳۲, pp. ۲۶۰-۲۶۶, ۲۰۱۱.

۲-S. A. Barannikova, Y. Li, A. Malinovsky and D. Pestsov, "Study of localized plastic deformation of Hadfield steel single crystals using speckle photography technique", *Key Engineering Materials*, Vol. 683, pp. 84-89, 2016.

۳-M.B. Limooei and Sh. Hosseini, "Optimization of properties and structure with addition of titanium in hadfield steels", *Proc. Conf. of Metal 2012, Czech Republic*, Vol. 1, p. 1-6, 2012.

۴- V. N. Najafabadi, K. Amini and M. B. Alamdarlo, "Investigating the effect of

titanium addition on the wear resistance of Hadfield steel", *Metall. Res. Technol.*, Vol. ۱۱۱, pp. ۳۷۵ - ۳۸۲, ۲۰۱۴.

۵- م. سبزی، ص. معینی‌فر، و ا. نجفی‌بیرگانی، " بررسی تأثیر آلومینیوم بر مقاومت خوردگی فولاد منگنزی آستنیتی هادفیلد"، *مجله مواد نوین*، شماره ۲۷، ص ۱۴ - ۱، بهار ۱۳۹۶.

۶- A. K. Srivastava and K. Das, "In-situ synthesis and characterization of tic-reinforced Hadfield manganese austenitic steel matrix composite", *Iron and Steel Institute of Japan Int.*, Vol.49, No.9, pp.1372-1377, 2009.

۷- م. سبزی، ص. معینی‌فر، و ا. نجفی‌بیرگانی، " بررسی تأثیر استفاده از حمام سریع سردی آب نمک بر رفتار خوردگی فولاد منگنزی هادفیلد"، *مجله مواد نوین*، شماره ۲۴، ص ۳۸ - ۲۹، تابستان ۱۳۹۵.

- ۸-Sh. Hosseini, M. B. Limooei, M. Hossein Zade, E. Askarnia and Z. Asadi, "Optimization of heat treatment due to austenising temperature, time and quenching solution in Hadfield steels", World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol.7, pp. 1940-1943, ۲۰۱۳.
- ۹-Sh. Hosseini and M.B. Limooei, "Optimization of heat treatment to obtain desired mechanical properties of high carbon Hadfield steels", World Appl. Sci. J., Vol. 15, pp. 1421-1424, 2011.
- ۱۰-M. B. Limooei and SH. Hosseini, "Optimization of heat treatment in manganese steel by taguchi method", Applied Mechanics and Materials, Vol. ۵۹۸, pp. ۴۳-۴۶, ۲۰۱۴.
- ۱۱-I. U. H. Toor, "Effect of Mn content and solution annealing temperature on the corrosion resistance of stainless steel alloys", J. Chem., Vol. 2014, No. 2014, pp. ۱-۸, ۲۰۱۴.
- ۱۲-م. سبزی و ر. کلانتری پور، "بررسی تأثیر حرارت ورودی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات جوش فولاد هادفیلد در فرآیند SMAW"، مجله علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال دوم، شماره ۱، ص ۸۸ - ۷۸، بهار و تابستان ۱۳۹۵.
- ۱۳-M. N. Ervina Efsan, K. Vigram Kovalan and G. Suriati, "A review of welding parameter on corrosion behavior of Aluminum", Int. J. Eng. Appl. Sci., Vol. 1, No.1, pp. 17-22, 2012.
- ۱۴-A. S. Afolabi, "Effect of electric arc welding parameters on corrosion behaviour of austenitic stainless steel in chloride medium", Assumption University: Journal of Technology, Vol. 11, No. 3, pp. 171-180, ۲۰۰۸.
- ۱۵-م. سبزی، ص. معینی فر، و ا. نجفی بیرگانی، "بررسی تأثیر حرارت ورودی بر رفتار خوردگی اتصالات جوش فولاد هادفیلد در فرآیند SMAW"، مجله علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال اول، شماره ۱، ص ۲۳ - ۱۳، پاییز و زمستان ۱۳۹۴.
- ۱۶-P. Paulraj and R. Garg, "Effect of welding parameters on pitting behavior of GTAW of DSS and super DSS weldments", Engineering Science and Technology, an International Journal, International Journal, Vol. 19, No. 2, pp. 1076-1083, 2016.
- ۱۷-Annual book of ASTM standards, "ASTM 128 A / 128 M, Standard specification for steel castings, austenitic manganese", ASTM Int., vol. 1, 2012.
- ۱۸-Annual book of AWS standards, "Standard Welding Procedure Specification, Shielded Metal Arc Welding of Carbon Steel", AWS International, 2005.
- ۱۹-Annual book of AWS standards, "Welding Science and Technology", 9th Edition, Vol. 1, 2015.
- ۲۰-Annual book of AWS standards, "Structural Welding Code Steel", 17th Edition, Vol. 1, 1999.
- ۲۱-Y.K. Lee and C.S. Choi, "Driving force for $\gamma \rightarrow \epsilon$ martensitic transformation and stacking fault energy of γ in Fe-Mn binary system", Metallurgical and Material Transaction A, Vol. 31A, pp. 355-360, ۲۰۰۰.
- ۲۲-E. Curiel-Reyna, A. Herrera, V. M. Castaño and M. E. Rodriguez, "Influence of cooling rate on the structure of heat affected zone after welding a high manganese steel", Materials and Manufacturing Processes, Vol. 20, pp. 813-822, 2005.
- ۲۳-T. R. Alvarez, M. R. C. Pavarino, G. C. D. Souza, J. M. Pardal, S. S. M. Tavares, M. L. R. Ferreira and I. C. Filho, "Influence of interpass temperature on the properties of

duplex stainless steel during welding by submerged arc welding process", *Welding Int.*, Vol. 30, No. 5, pp. 348-358, 2016.

۲۴-F. Cao, Z. Shi, G. L. Song, M. Liu M. S. Dargusch and A. Atrens, "Influence of hot rolling on the corrosion behavior of several Mg-X alloys", *Corrosion Science*, Vol. 90, pp. 176-191, 2015.

۲۵-R. Q. Hou, C. Q. Ye, Ch. D. Chen, Sh Gang Dong Miao-Qiang Lv Shu Zhang Jin-Pan, G. L. Song and Ch. J. Lin, "Localized corrosion of binary Mg-Ca alloy in 0.9 wt% sodium chloride solution", *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, Vol. ۲۹, No. ۱, pp. ۴۶-۵۷, ۲۰۱۶.

Archive of SID