

بررسی تاثیر عملیات حرارتی بازپخت بر میزان حساسیت به خوردگی ناحیه جوش فولاد ساده کربنی

اسمعیل اکبری نژاد^{۱*}، محمدرمضان یارندی^۲، علی وفادار^۳، انسیه رمضان^۴

^{۱*}دانشیار، گروه پژوهش پوشش، پژوهشکده حفاظت صنعتی، پژوهشگاه صنعت نفت
^۲کارشناس مکانیک، گروه پژوهش خوردگی، پژوهشکده حفاظت صنعتی، پژوهشگاه صنعت نفت
^۳کارشناس ارشد خوردگی، گروه پژوهش پوشش، پژوهشکده حفاظت صنعتی، پژوهشگاه صنعت نفت
^۴کارشناس ارشد مواد شیمیایی و پوشش ها، امور استانداردها، مدیریت پژوهش و فناوری شرکت ملی گاز

*نویسنده مسئول: akbarinezhade@ripi.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

چکیده

با توجه به مشاهده‌ی موارد متعددی از جدایش پوشش در نواحی جوش در برخی از پالایشگاه‌های کشور، در این پژوهش تاثیر عملیات حرارتی به عنوان یکی از فرآیندهای آماده سازی جوش پیش از اعمال پوشش مد نظر قرار گرفت. جهت بررسی تاثیر نوع فرآیند آماده سازی، ابتدا نمونه‌ها تحت پنج حالت بدون آماده سازی، سندبلاست، سندبلاست + عملیات حرارتی بازپخت، عملیات حرارتی بازپخت + سندبلاست و عملیات حرارتی بازپخت در آزمون رطوبت ۱۰۰ درصد به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفته که تفاوت چندانی در ظاهر نمونه‌ها از نظر خوردگی مشاهده نگردید. جهت بررسی دقیق تر، متالوگرافی از نمونه‌ها پیش و پس از عملیات حرارتی توسط میکروسکوپ نوری انجام گرفت. مشاهدات تصاویر مذکور در ناحیه جوش نشان داد که فاز فریت با ساختار ویدمن اشتاتن با ساختاری حاوی فریت‌های سوزنی و صفحات موازی پرلیت پس از عملیات حرارتی به ساختار فریت سوزنی با دانه‌های بزرگتر و تقریباً فاقد صفحات پرلیت‌های بین دانه‌ای تبدیل شد. در ناحیه فلز پایه تغییر ساختاری چندانی پس از عملیات حرارتی مشاهده نشد. به روش تکنیک پروب کلوین روبشی تفاوت اندک اختلاف پتانسیل بین ناحیه جوش با فلز پایه بررسی شد. جهت بررسی کمی خواص خوردگی با استفاده از آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در محلول سدیم کلرید ۳ درصد وزنی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد پس از گذشت ۳ ساعت مشخص شد که پس از عملیات حرارتی بازپخت حساسیت به خوردگی در ناحیه فصل مشترک از بین رفته و رفتار خوردگی این ناحیه مشابه فلز پایه شده است. اما نرخ خوردگی ناحیه جوش همچنان بالاتر از فلز پایه نشان داده شد. نهایتاً آزمون پلاریزاسیون تافل در محلول سدیم کلرید ۳ درصد در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد پس از مدت زمان ۴ ساعت غوطه‌وری نشان داد که با انجام عملیات حرارتی نرخ خوردگی فلز پایه کاهش یافته و نرخ خوردگی در ناحیه فصل مشترک و ناحیه جوش تقریباً یکنواخت شده است.

کلیدواژه: فولاد ساده کربنی - رفتار خوردگی جوش - عملیات حرارتی بازپخت، ارزیابی الکتروشیمیایی

Studying the Effect of Tempering Heat Treatment on the Corrosion Susceptibility of Carbon Steel Weld Zone

E.Akbarinezhad^{*1}, M.R Yarandi², A. Vafadar³, E .Ramezani⁴

¹*Associate Professor, Coatings Research Group, Industrial Protection Research Division, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)

² B.Sc in Mechanical Engineering, Corrosion Research Group, Industrial Protection Research Division, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)

³ MSc in Corrosion Engineering, Coatings Research Group, Industrial Protection Research Division, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)

⁴ MSc in Chemical Materials and Coatings, Standards Affairs, Research and Technology Management, National Iranian Gas Company (NIGC)

* Corresponding Author: akbarinezhade@ripi.ir

Submission: 2024, 09, 11 Acceptance: 2025, 03, 19

Abstract

Due to the observation of numerous cases of coating failure in weld areas in some refineries in the country, the effect of heat treatment as one of the weld preparation processes before coating application was considered in this study. To investigate the effect of the type of preparation process, the samples were first subjected to five conditions: no preparation, sandblasting, sandblasting + Tempering heat treatment, Tempering heat treatment + sandblasting, and Tempering heat treatment in a 100% humidity test for 24 hours, and no significant difference was observed in the appearance of the samples in terms of corrosion. For a more detailed examination, metallography of the samples before and after heat treatment was performed using an optical microscope. Observations of the aforementioned images in the weld zone showed that the ferrite phase with a Widmann-Stätten structure containing needle-shaped ferrites and parallel pearlite plates transformed after heat treatment into a needle-shaped ferrite structure with larger grains and almost no intergranular pearlite plates. Using the scanning Kelvin probe technique, the small difference in potential difference between the weld zone and the base metal was investigated. To quantitatively investigate the corrosion properties, electrochemical impedance spectroscopy was used in a 3% by weight sodium chloride solution at 25°C for 3 hours. It was found that after tempering heat treatment, the corrosion susceptibility in the joint area was eliminated and the corrosion behavior of this area became similar to that of the base metal. However, the corrosion rate of the weld area was still higher than that of the base metal. Finally, the Tafel polarization test in a 3% sodium chloride solution at 25°C after 4 hours of immersion showed that the corrosion rate of the base metal was reduced by heat treatment and the corrosion rate in the interface and weld areas became almost uniform.

Keywords: Plain carbon steel - Weld corrosion behavior - Tempering heat treatment, electrochemical evaluation

۱- مقدمه

در صنایع نفت، گاز و شیمیایی، خوردگی یکی از چالش برانگیزترین مسائل است و فرض بر این است که سالانه ۱۷۰ میلیارد دلار هزینه دارد [۱]. علاوه بر هزینه بالای خوردگی، خطرات بهداشتی و زیست محیطی مرتبط با خرابی های بالقوه صنعت نفت و گاز باعث پیشرفت مواد مقاوم در برابر خوردگی و بهبود استراتژی های کاهش خوردگی در سراسر جهان می شود [۱]. انواع مختلفی از فولادها وجود دارد از جمله فولاد کربنی ساده، فولاد ضد زنگ، فولاد آلیاژی که فولاد کربنی تا حد زیادی پرکاربردترین نوع فولاد است. فولادهای کربنی به عنوان مصالح ساختمانی ترجیحی در بین صنایع بوده و گزینه مقرون به صرفه تری نسبت به آلیاژهای گران قیمت مقاوم در برابر خوردگی در نظر گرفته می شود. فولادهای کربنی معمولاً حاوی کمتر از ۱.۵٪ کربن همراه با مقادیر کمی منگنز، سیلیسیم، فسفر و گوگرد هستند [۱ و ۲]. فولاد کم کربن پر کاربردترین نوع فولاد ساده کربنی، با میزان کربن از ۰.۰۵ تا کمتر از ۰.۳ درصد بوده و کمتر از ۱ درصد میزان کل عناصر آلیاژی آن است. علی رغم مقاومت نسبتاً محدود فولاد کم کربن در برابر خوردگی، استفاده روزافزون از آن در کاربردهای دریایی، فرآیندهای شیمیایی، تولید نفت، پالایشگاه ها، خط لوله، حمل و نقل، ساخت و ساز معدن و تجهیزات پردازش فلز ممکن است به دلیل هزینه کم و جوش پذیری نسبتاً خوب، شکل پذیری خوب و استحکام مناسب آن ها باشد [۳]. جوشکاری یکی از پرکاربردترین روش های ساخت قطعات فولادی است. این اساساً ادغام دو یا چند قطعه فلز با اعمال گرما و گاهی اوقات فشار است. اگرچه شکل فلز یا آلیاژ کار شده در برابر خوردگی در یک محیط خاص مقاوم است، اما مشابه جوش داده شده ی آن اینگونه نیست. مواقعی وجود دارد که جوش به شیوه ای نامنظم رفتار می کند و هم مقاومت و هم حساسیت به حمله ی مواد خوردنده را نشان می دهد. چرخه گرمایش و سرمایش که در طول فرآیند جوشکاری رخ می دهد بر ریزساختار و ترکیب سطح جوش و فلز پایه مجاور تأثیر می گذارد [۳]. خوردگی ترجیحی جوش از لحاظ تاریخی یک مشکل عمده بوده و همچنان یک نگرانی مهم برای صنعت است. اصطلاح خوردگی

ترجیحی جوش حمله انتخابی خود جوش را به جای فلز پایه توصیف می کند [۴].

بافت فولاد همچنین برای سازه های جوش داده شده مهم است زیرا جهت گیری کریستالوگرافی و فصل مشترک کریستالیت ها به شدت با مقاومت در برابر خوردگی مرتبط هستند. تفاوت ریزساختاری در قطعه جوش و ناحیه اطراف آن، به دلیل رسوب، از طریق تولید گرادیان ریزساختاری بر بافت فولاد تأثیر می گذارد. از آنجایی که بسیاری از شکست ها در صنعت مربوط به خوردگی در نواحی جوش داده شده است، درک و بررسی بافت در جوش ها در تحقیقات خوردگی بسیار مطلوب است [۵]. در جوشکاری فولادهای کم کربن، نشان داده شده است که مناطق دانه درشت (GCZ) و متأثر از حرارت (HAZ) بسیار بحرانی هستند زیرا تردی در این مناطق متمرکز است. بسته به مقدار کربن معادل و سرعت خنک شدن، عموماً فریت مرز دانه (GBF)، فریت ویدمن اشتاتن (WF)، فریت سوزنی (AF) و مقداری مارتنزیت به همراه مقدار کمی آستنیت باقیمانده و فازهای پرلیت تفکیک شده در فلز جوش دیده می شوند. شکل گاه به گاه بینیت در ریزساختار نیز گزارش شده است [۶]. این ریزساختارهای متفاوت منجر به تغییرات زیادی در مقادیر استحکام در اتصالات جوش شده و باعث اختلاف پتانسیل الکتروشیمیایی قطعات جداگانه در جوش می شوند. این امر باعث خوردگی بین جفت های فلز پایه-ناحیه جوش در معرض محیط های خوردنده می شود [۷]. در صنعت خطوط لوله، برای حفظ یکپارچگی خطوط لوله ی مدفون از پوشش و حفاظت کاتدی به صورت همزمان استفاده می شود. حفاظت کاتدی ناسازگار و همچنین جدایش پوشش می تواند منجر به تشکیل یک محیط خوردنده موضعی در زیر پوشش شود. به عبارت دیگر، این محل می تواند مکان مناسبی برای خوردگی، به ویژه خوردگی موضعی باشد [۸]. عملیات حرارتی روشی است که برای تغییر خواص فیزیکی و گاهی شیمیایی یک ماده استفاده می شود و یکی از اهداف عملیات حرارتی بهبود ویژگی های مقاومت در برابر خوردگی آنها است [۱]. برای مثال بررسی های ریز ساختاری فولادهای X100 نشان داده است که در منطقه

HAZ این فولادها ناخالصی‌های رسوبی شکل تشکیل می‌گردد که این امر موجب خوردگی بیشتر در منطقه HAZ می‌گردد. این محققین نشان دادند با استفاده از عملیات حرارتی مناسب روی منطقه جوش و HAZ این فولادها می‌توان از میزان ناخالصی‌ها در منطقه HAZ این فولادها و در نتیجه از میزان خوردگی ایجاد شده در این منطقه کاست [۹].

بر اساس بازدیدهای به عمل آمده از برخی پالایشگاه‌های کشور، در برخی از محل‌های جوش پوشش دچار جدایش شده و همین امر منجر به خوردگی موضعی آن خطوط لوله گردیده است. بنابراین در این پژوهش سعی شده تاثیر عملیات حرارتی بازپخت به عنوان یکی از فرآیندهای آماده سازی جوش پیش از اعمال پوشش، بر خواص خوردگی جوش و ناحیه متاثر از آن بررسی شود و تاثیر آن بر میزان حساسیت خوردگی ناحیه جوش مشخص گردد. در مقاله‌ی بعدی نیز تاثیر روش‌های مختلف آماده‌سازی سطح بر خواص پوشش‌های اجرا شده در نواحی جوش بررسی خواهد شد.

۲- مواد و روش تحقیق

جهت انجام فعالیت‌های آزمایشگاهی، نمونه‌هایی از ورقه‌های فولادی با ابعاد ۷۰*۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۰ میلی‌متر تهیه گردید و پس از جوشکاری آنها در شرایط کارگاهی، تاثیر شرایط مختلف آماده‌سازی شامل سند بلاست و عملیات حرارتی بر میزان حساسیت نمونه‌ها به خوردگی مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز شیمیایی ورق‌های استفاده شده در جدول ۱ ارائه شده است.

در شکل ۱ WPS^۱ مربوط به جوشکاری نمونه‌ها نشان داده شده

است. فرآیند جوشکاری روی نمونه‌ها برای لایه اول به روش جوشکاری قوسی تنگستن (GTAW)^۲ با استفاده از فیلر ER70S-6 به قطر ۲/۴ میلی‌متر و برای لایه‌های بعدی از تکنیک جوشکاری قوسی با الکتروود روکش دار (SMAW)^۳ با استفاده از فیلر E7018-6 به قطر ۳/۵ میلی‌متر انجام شد.

از ورقه‌های جوشکاری شده نمونه‌هایی به منظور انجام عملیات متالوگرافی انتخاب گردید.

این نمونه‌ها پس از برشکاری و مانت گرم به روش صیقل کاری مکانیکی پرداخت گردیده و سپس بوسیله محلول اچانت نایتال ۲٪ تحت حکاکی شیمیایی (اچ) قرار گرفته اند. پس از آن تصاویر توسط میکروسکوپ نوری مشاهده گردید.

در روش سندبلاست از دستگاه بلاستینگ آزمایشگاهی مدل AC2424 تحت فشار ۵ بار و ذرات ساینده‌ی ماسه‌ی سیلیس به قطر ۰/۵ تا ۱/۵ میلی‌متر استفاده گردید.

عملیات حرارتی نمونه‌های جوشکاری شده از طریق قرار دادن نمونه‌ها در کوره الکتریکی مدل ATBIN انجام شد. برای این منظور نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و سپس با خاموش کردن کوره طی زمان ۲۴ ساعت به دمای محیط رسیدند.

جهت ارزیابی و مقایسه ظاهری میزان خوردگی، نمونه‌های ارائه شده در جدول ۲ به مدت ۲۴ ساعت مطابق روش استاندارد ASTM D2247 داخل کابین رطوبت نسبی صد درصد مدل Hygrotherm 519 ساخت شرکت اریکسن قرار گرفتند [۱۰].

از تکنیک پروب کلون روبشی (SKP)^۴ جهت تعیین میزان اختلاف پتانسیل تماسی در ناحیه جوش و فلز پایه استفاده شد. آزمون مذکور توسط دستگاه پروب کلون روبشی مدل ۵۰۵۰ ساخت کمپانی KP Technology انجام شد. پارامترهای مربوط به آزمون SKP در جدول ۳ ارائه شده است.

^۱Welding Procedure Specification

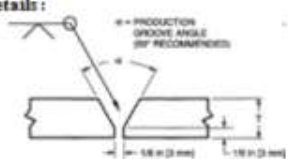
^۲Gas Tungsten Arc Welding

^۳Shielded Metal Arc Welding

^۴Scanning Kelvin Probe

جدول ۱. آنالیز ترکیب شیمیایی ورق‌های فولادی استفاده شده

درصد وزنی عناصر (wt%)						ترکیب شیمیایی
Fe	S	P	Mn	Si	C	
پایه	۰.۰۱۵	۰.۰۱۰	۰.۰۰۱	۰.۱۶۸	۰.۲۲۲	قطعه ورق

 WELDING PROCEDURE SPECIFICATIONS (WPS) 																																
Rev.: 1 WPS No.: PQ2 Application Code: ASME B31.8 Welding Process (es): GTAW & SMAW	Project Name/No. بررسی آزمایشگاهی و میدانی عملیات حرارتی در نقاط جوش و ریخته‌های مختلف فولاد سازی نوعی جوش و لکه رفکار Type: Manual ☒ Semi-Automatic ☐ Machine ☐ Automatic ☐	Page: 1 of Prequalified ☒ Qualified ☐ Supporting PQR (s):																														
JOINTS: (QW-402) Joint Design: Single Groove Back Weld Yes ☐ No ☒ Backing Material: weld backing		POSITIONS: (QW-404) Position (s) of Groove: 1G Welding Progression: Up ☐ Down ☐																														
Joint Details: 		FILLER METAL: (QW-404) <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>1</th> <th>2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Spec. No. (SFA)</td> <td>A5.18</td> <td>A5.1</td> </tr> <tr> <td>AWS No. (Class)</td> <td>ER 70S-6</td> <td>E-7018</td> </tr> <tr> <td>F.No.</td> <td>6</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>A.No.</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Size of Filler Metals</td> <td>2.4 mm</td> <td>3.25 mm</td> </tr> <tr> <td>Trade Name(s)</td> <td>ESAB</td> <td>ESAB</td> </tr> <tr> <td>Electrode - Flux (Class)</td> <td>N.R.</td> <td>N.R.</td> </tr> <tr> <td>Particle size</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>Trade Name</td> <td>---</td> <td>---</td> </tr> </tbody> </table>		1	2	Spec. No. (SFA)	A5.18	A5.1	AWS No. (Class)	ER 70S-6	E-7018	F.No.	6	4	A.No.	1	1	Size of Filler Metals	2.4 mm	3.25 mm	Trade Name(s)	ESAB	ESAB	Electrode - Flux (Class)	N.R.	N.R.	Particle size	---	---	Trade Name	---	---
	1	2																														
Spec. No. (SFA)	A5.18	A5.1																														
AWS No. (Class)	ER 70S-6	E-7018																														
F.No.	6	4																														
A.No.	1	1																														
Size of Filler Metals	2.4 mm	3.25 mm																														
Trade Name(s)	ESAB	ESAB																														
Electrode - Flux (Class)	N.R.	N.R.																														
Particle size	---	---																														
Trade Name	---	---																														
BASE METAL: (QW-403) P-No.: 1 Group No.: 1 To P-No.: 1 Group No.: 1 Specification Type & Grade: Thickness range: 10.0 - 25.0 mm Groove: --- Fillet: --- Diameter range: --- Groove: --- Fillet: ---																																
PREHEAT: (QW-406) Preheat Temp. Min: ambient or 25 °C Inter Pass Temp. Max: Not more than 150 °C		POST WELD HEAT TREATMENT: (QW-407) Temp. Range: acc. purchaser Holding Time: acc. purchaser Heating Rate: --- Cooling Rate: ---																														
ELECTRICAL CHARACTERISTICS: (QW-409) Current: 14 V Polarity: DCEN AMPS: 90-100 A Tungsten Electrode Size: 3.2 mm		GAS: (QW-408) Composition Percent: 99.999 Gas Backing: Ar Flow Rate: 7 (cm³/min)																														
TECHNIQUE: (QW-410) String or Weave Bead: stringer Initial & Inter Pass Cleaning: wire brushing Method of Back Gouging: N.R. Multiple or Single Pass (per side): Multi pass Multiple or Single Electrodes: N.R.		WELDING SEQUENCE Cleaning of Weld Zone Fit-up & Tack Welding Welding of root pass Welding of filling pass Grinding & Brushing																														
WELDING PROCEDURE																																
Weld Layer (s)	Process	Filler Metal Class	Dia	Current Polarity	Amps (A)	Voltage (V)	Travel Speed Range (cm/min)	Heat Input (KJ/cm)	Layers Details																							
1	GTAW	ER 70S-6	2.4 mm	DCEN	90-100	14	By user	---																								
2 to N	SMAW	E-7018	3.25	AC/DCP	85-180	20-24	By user	---																								
Prepared by: YARANDI					Checked by: YARANDI																											
Date: 2016/01/25					Date: 2016/01/31																											

شکل ۱. WPS جوشکاری نمونه ورق‌های فولادی.

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های صفحه‌ای با ضخامت ۲۰ میلی‌متر جوشکاری شده در شرایط کارگاهی

ردیف	مشخصات نمونه	کد	شرایط آماده‌سازی
۱	ورق ضخامت ۲۰ میلی‌متر	SS1	بدون آماده‌سازی
۲	ورق ضخامت ۲۰ میلی‌متر	SS2	سندبلاست
۳	ورق ضخامت ۲۰ میلی‌متر	SS3	سندبلاست + عملیات حرارتی
۴	ورق ضخامت ۲۰ میلی‌متر	SS4	عملیات حرارتی + سندبلاست
۵	ورق ضخامت ۲۰ میلی‌متر	SS5	عملیات حرارتی

جدول ۳. مشخصات مربوط به آزمون SKP

مشخصه	نحوه تنظیم
الکتروود کاری	نمونه‌ی فولادی دارای خط جوش
محدوده روبش	سطحی از نمونه با ابعاد ۲۲*۵ میلی‌متر
تعداد نقاط اندازه‌گیری شده	۱۱۰ نقطه با فواصل ۰.۵ میلی‌متر
جنس پروب	فولاد زنگ‌نزن
قطر پروب	۲ میلی‌متر
فاصله پروب تا سطح	۵۰ میکرومتر
فرکانس ارتعاش پروب	۸۱ هرتز
دامنه ارتعاش پروب	۲۰ میکرومتر

از تکنیک‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)^۱ و پلاریزاسیون تافل نیز جهت تعیین نرخ خوردگی در ناحیه جوش و فلز پایه استفاده شد. برای این منظور سطحی از نمونه (فلز پایه،

ناحیه جوش و فصل مشترک فلز پایه/ناحیه جوش) به مساحت ۲ سانتی‌متر مربع انتخاب شده و لوله‌ی شیشه‌ای روی این سطح نصب و درزبندی شد و از این سطح به عنوان الکتروودکاری (WE)^۲ استفاده گردید.

^۱Electrochemical Impedance Spectroscopy

^۲working electrode

انجام عملیات سند بلاست سطح عریان و با انرژی سطح بالا مستقیماً در معرض عوامل خوردنده قرار گرفته و عملیات سند بلاست باعث افزایش سطح در تماس نیز می‌شود [۱۱]. جهت بررسی دقیق‌تر میزان حساسیت به خوردگی ناحیه جوش سایر آزمون‌های خوردگی نیز انجام گرفت.

۳-۲- متالوگرافی

در شکل ۳ تصاویر ریز ساختار فلز پایه از ورق‌های فولادی جوشکاری شده نمایش داده شده است. ساختار میکروسکوپی فریتی-پرلیتی بوده و لایه‌ای بودن پرلیت‌ها بخوبی در شکل ۳ (الف) قابل مشاهده می‌باشد. دانه‌های فریت تقریباً هم محور و چند ضلعی^۴ می‌باشند. شکل ۳ (ب) تصویر فلز پایه این نمونه پس از باز پخت می‌باشد. در مقایسه با تصویر ۳ (الف) تغییر چندانی مشاهده نمی‌شود زیرا این ناحیه از فلز پایه تحت تاثیر تنش‌های پسماند جوشکاری یا حرارت بالای ناشی از عملیات جوشکاری قرار نگرفته و حرارت مربوط به عملیات حرارتی بازپخت نیز به اندازه‌ای بالا یا طولانی نبوده که بتواند در ریزساختار فلز پایه تاثیر قابل ملاحظه‌ای بگذارد. بنابراین ریز ساختار فلز پایه بدون تغییر از بازپخت خارج می‌گردد.

با توجه به شکل ۴ (الف) با افزایش دمای جوشکاری و زمان قرار گیری فلز در این دما تجزیه و خرد شدن پرلیت‌ها بیشتر شده، ناحیه HAZ به صورت ساختار کاملاً یکنواخت فریتی با ذرات کوچک پرلیت و با پراکندگی یکنواخت پرلیت در آمده است.

اندازه دانه‌های فریت متفاوت ولی چند ضلعی می‌باشد. شاید به این علت باشد که در اثر جوشکاری و اعمال پاس‌های متعدد جوشکاری این ناحیه چندین بار تحت تاثیر گرمای زیاد ناشی از جوش تا دمای بالاتر از دمای خط A1 در دیاگرام تعادلی آهن کربن پیش رفته است. در هر بار گرم شدن ناحیه HAZ تا بالاتر از دمای A1، جوانه زنی دانه‌ها در تبلور مجدد و رشد دانه بوجود آمده و به همین علت اندازه دانه‌های فریت متفاوت و خردشدگی دانه‌های پرلیت و پراکنده شدن آن‌ها بیشتر گردیده است.

از گرافیت میله‌ای به عنوان الکترود کمکی^۱(CE) جهت اعمال جریان و از الکترود کالومل اشباع^۲(SCE) به عنوان الکترود مرجع^۳(RE) جهت اندازه‌گیری پتانسیل استفاده شد. از محلول آب نمک ۳ درصد وزنی به عنوان الکترولیت استفاده گردید و کلیه‌ی آزمایش‌های الکتروشیمیایی در دمای 25 ± 2 درجه سانتی‌گراد انجام شد. ارزیابی‌های امپدانس الکتروشیمیایی در محدوده‌ی فرکانس ۱۰۰۰۰ تا ۰/۰۱ هرتز تحت پتانسیل مدار باز و با اعمال جریان متناوب با دامنه پتانسیل ۵ میلی‌ولت و آزمون پلاریزاسیون تافل با اعمال جریان مستقیم در محدوده ± 250 میلی‌ولت نسبت به پتانسیل مدار باز و سرعت روبش ۱ میلی‌ولت بر ثانیه انجام شد. ارزیابی‌ها توسط دستگاه پتانسیو استات مدل PGSTAT 204 ساخت شرکت Autolab انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمون رطوبت صد درصد

نمونه‌های ورق جوشکاری شده مندرج در جدول ۲ جهت بررسی ظاهری و چشمی وضعیت خوردگی، به مدت ۲۴ ساعت در دستگاه رطوبت ۱۰۰ درصد قرار گرفتند. با توجه به مشاهدات انجام شده از نمونه‌ها (شکل ۲) تحت شرایط مختلف آماده‌سازی و تنش‌زدایی، میزان حساسیت به خوردگی در نواحی مختلف یکسان بوده به نحوی که به لحاظ میزان محصولات خوردگی موجود در نواحی مختلف و نیز نوع خوردگی، ۳ ناحیه مختلف (فلز پایه، ناحیه جوش، ناحیه‌ی مرز فازی) کاملاً مشابه یکدیگر عمل کرده‌اند. بنابراین در مورد نمونه‌ها تفاوت از جهت میزان و نوع خوردگی بین ناحیه جوش و فلز پایه به اندازه‌ای نیست که با استفاده از قراردادن نمونه‌ها در کابین رطوبت صد درصد قابل تشخیص باشد. علاوه بر این، عملیات حرارتی نیز باعث تغییری در میزان خوردگی نشده است.

تنها نکته قابل توجه آن است که با انجام عملیات سند بلاست میزان حساسیت به خوردگی افزایش یافته است و نقاط زنگ روی نمونه پس از عملیات سندبلاست بیشتر شده است. زیرا با

¹Counter electrode

²Saturated calomel electrode

³Reference electrode

⁴Polygonal

شکل ۴(ب) تصویر ناحیه HAZ را پس از بازپخت می‌توان مشاهده نمود. عملیات حرارتی بازپخت باعث خرد شدن بیشتر دانه‌های پرلیت شده و پراکندگی پرلیت‌ها کمتر شده و رسوبات کاربید آهن در مرز و درون دانه‌های فریت افزایش یافته است. شکل ۵(الف) ریز ساختار آلیاژ در ناحیه جوش پیش از عملیات حرارتی را نشان می‌دهد. این ساختار به صورت ساختار ویدمن اشتاتن با ساختاری حاوی فریت‌های سوزنی و صفحات موازی پرلیت می‌باشد.

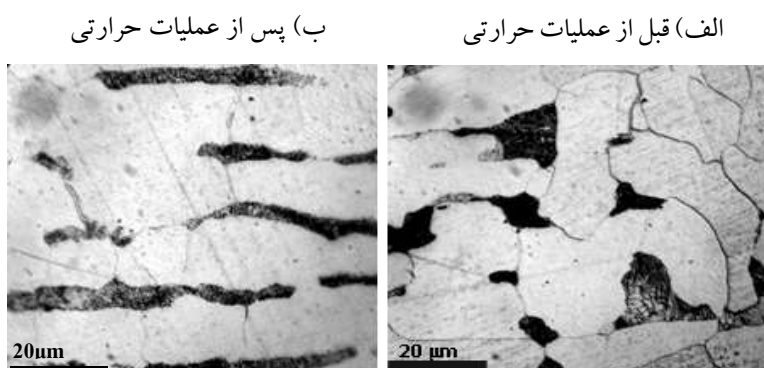
این ساختار به علت ترکیب شیمیایی فلز جوش و نوع فرآیند جوشکاری، کمی حاوی ناخالصی‌ها و حفرات انقباضی می‌باشد که بسته به مهارت جوشکار و کنترل شرایط جوشکاری مقدار این ناخالصی‌ها و پراکندگی آن‌ها در هر پاس جوشکاری متفاوت است. در شکل ۵(ب) به خوبی می‌توان تشخیص داد که پس از عملیات حرارتی دانه‌های فریت سوزنی بزرگتر شده

و تقریباً صفحات پرلیت‌های بین دانه‌ای از بین رفته و به صورت نقاط و ذرات کاربید آهن در مرز دانه و درون دانه‌های فریت رسوب کرده است. ثابت شده است که پرلیت بیش از فریت مستعد خوردگی می‌باشد [۱۲] و با توجه به توضیحات مذکور مربوط به شکل ۵(ب) با توجه به از بین رفتن صفحات پرلیت بین دانه‌ای بنابراین احتمال وقوع خوردگی کاهش یافته است. همچنین بر اساس تحقیقات انجام شده ریزساختار فریت سوزنی مزیت بیشتری نسبت به سایر ریزساختارها دارد [۱۳].

همچنین بر اساس یافته‌های برخی محققین نرخ خوردگی با تبدیل فریت چند ضلعی به فریت سوزنی کاهش می‌یابد [۱۴] زیرا محصولات خوردگی تشکیل شده بر سطح فریت چند وجهی دارای تخلخل و میزان چسبندگی به زمینه کمتر بوده که موجب نفوذ یون‌ها از فلز به محلول الکترولیت می‌شود و موجب افزایش نرخ خوردگی می‌شود [۱۵].

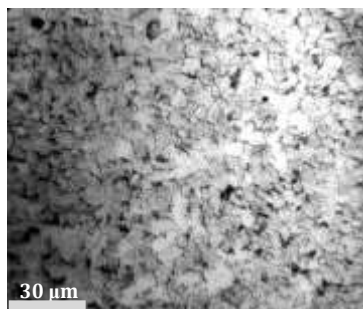


شکل ۲ نمونه‌های ورق جوشکاری و آماده‌سازی شده تحت شرایط مختلف، بعد از ۲۴ ساعت آزمون رطوبت صددردصد.

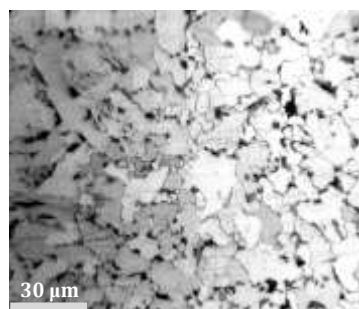


شکل ۳. ریز ساختار ورق فولادی در ناحیه فلز پایه پیش و پس از عملیات حرارتی بازپخت محلول حکاکی: نایتال ۲٪ - بزرگنمایی ۱۵۰۰x.

الف) قبل از عملیات حرارتی

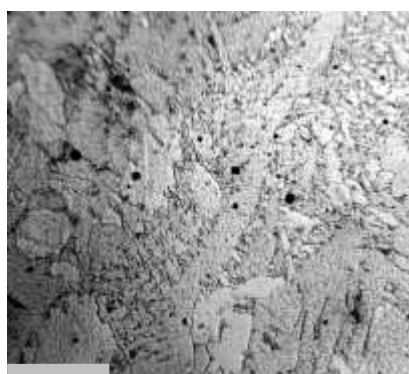


ب) پس از عملیات حرارتی

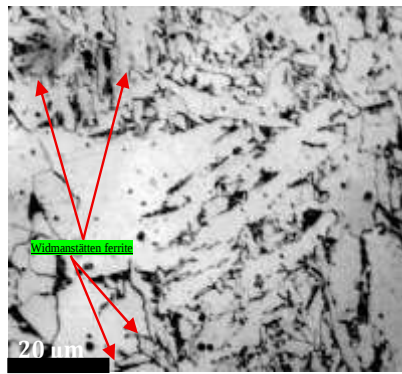


شکل ۴. ریزساختار ناحیه HAZ در ورق‌های فولادی جوشکاری شده پیش و پس از عملیات حرارتی بازپخت محلول حکاکی: نایتال ۲٪ - بزرگنمایی x800.

الف) قبل از عملیات حرارتی



ب) پس از عملیات حرارتی

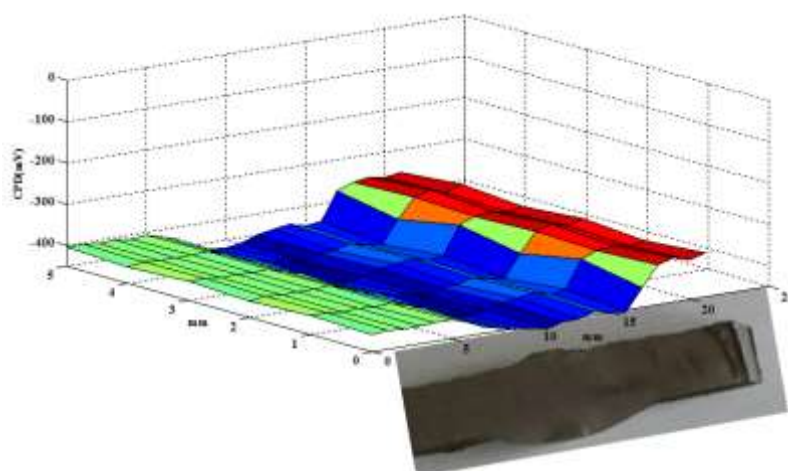


شکل ۵. ریزساختار ناحیه جوش در ورق‌های فولادی پیش و پس از عملیات حرارتی بازپخت محلول حکاکی: نایتال ۲٪ - بزرگنمایی x1500.

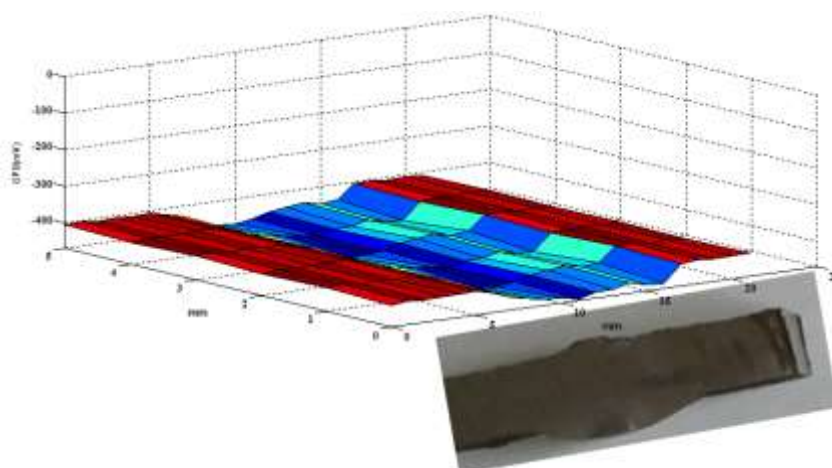
۳-۳- تکنیک پروب کلون روبشی

تماسی اندازه‌گیری شده در ناحیه فلز پایه حدود ۴۱۰- میلی‌ولت و در ناحیه جوش حدود ۴۵۰- میلی‌ولت می‌باشد. با توجه به اینکه اختلاف پتانسیل تماسی مستقیماً با پتانسیل خوردگی رابطه دارد می‌توان انتظار داشت که ناحیه جوش نسبت به فلز پایه دارای حساسیت به خوردگی بالاتری باشد. اما عملیات حرارتی تأثیری بر میزان اختلاف پتانسیل نداشته است و فقط قدری باعث یکنواخت شدن ساختار در ناحیه فصل مشترک شده است.

جهت بررسی دقیق‌تر تفاوت میزان حساسیت به خوردگی نواحی جوش، سعی شد در ادامه از روش‌های الکتروشیمیایی همچون ارزیابی به روش SKP استفاده شود. در شکل‌های ۶ و ۷ نمودارهای روبشی اختلاف پتانسیل مربوط به نمونه دارای خط جوش قبل از عملیات حرارتی و بعد از آن نشان داده شده است. نمودار ارائه شده در شکل ۶ و ۷ تغییر جزئی مقدار اختلاف پتانسیل را بین فلز پایه و ناحیه جوش نشان می‌دهد. چنانکه در این شکل‌ها مشاهده می‌شود مقدار میانگین اختلاف پتانسیل



شکل ۶. نقشه اختلاف پتانسیل تماسی برای نمونه ورق فولادی جوشکاری شده قبل از عملیات حرارتی.



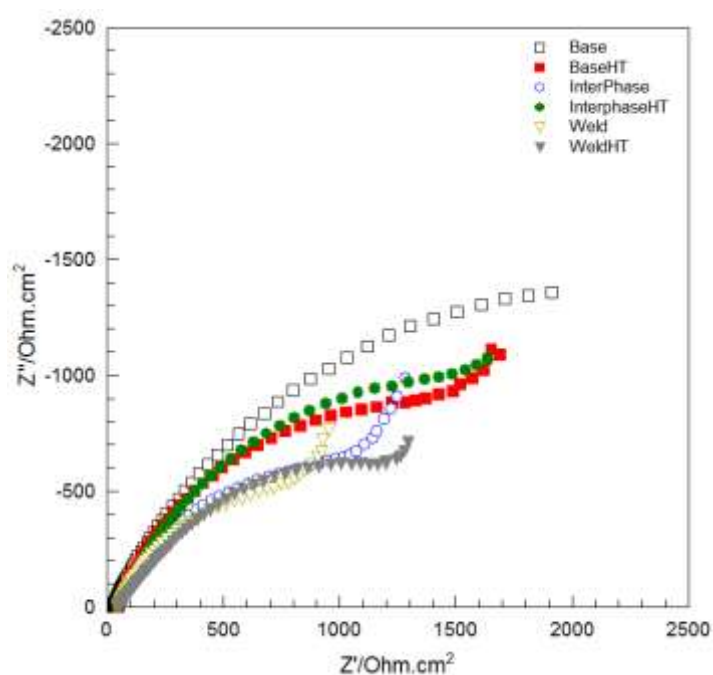
شکل ۷. نقشه اختلاف پتانسیل تماسی برای نمونه ورق فولادی جوشکاری شده بعد از عملیات حرارتی.

۳-۴- امپدانس الکتروشیمیایی

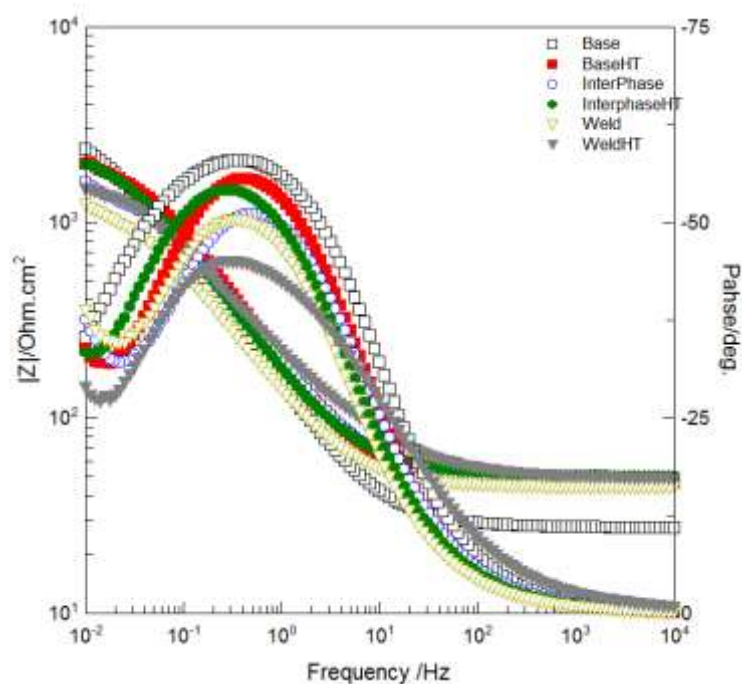
در شکل‌های ۸ و ۹ نمودارهای باد و نایکوئیست نواحی جوش ورق فولادی سندبلاست شده در دو حالت پیش و پس از عملیات حرارتی پس از ۳ ساعت غوطه‌وری در محلول کلرید سدیم ۳٪ در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد ارائه شده است. نمودار نایکوئیست فلز پایه قبل از عملیات حرارتی شامل یک نیم دایره و سایر نمودارها شامل دو نیم دایره می‌باشد. با توجه به این نمودارها، برای تفسیر داده‌های امپدانس الکتروشیمیایی از مدار معادل‌های مناسب در هر حالت استفاده شد و پارامترهای مختلف استخراج گردید. در جدول ۴ نتایج حاصله آزمون امپدانس الکتروشیمیایی ارائه شده است. در نمونه‌های فاقد عملیات حرارتی، مقدار مقاومت پلاریزاسیون و امپدانس در حداقل فرکانس، در مورد فلز پایه به مراتب بزرگتر از ناحیه خط

جوش و فصل مشترک می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت نرخ خوردگی در ناحیه جوش و فصل مشترک بیشتر از ناحیه فلز پایه می‌باشد. از طرفی ظاهر شدن نیم دایره دوم و افزایش زاویه فاز در فرکانس‌های پایین نیز دلیل انجام واکنش‌های خوردگی روی سطح در این نواحی می‌باشد.

با انجام عملیات حرارتی نمودارهای باد و نایکوئیست نواحی مختلف به یکدیگر شبیه شده و مقادیر محاسبه شده نیز به یکدیگر نزدیک می‌باشند. با انجام عملیات حرارتی، حساسیت به خوردگی در ناحیه فصل مشترک از بین رفته و رفتار خوردگی این ناحیه مشابه فلز پایه شده است. اما نرخ خوردگی ناحیه جوش باز هم بالاتر از فلز پایه می‌باشد و همین مسئله حساسیت ناحیه جوش و لزوم توجه بیشتر به این ناحیه در مراحل آماده‌سازی و اجرای پوشش را روشن می‌سازد.

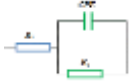


شکل ۸. مقایسه‌ی نمودارهای نایکوئیست مربوط به نمونه ورق‌های سندبلاست شده فاقد عملیات حرارتی و عملیات حرارتی شده (HT) بعد از ۳ ساعت غوطه‌وری در محلول کلرید سدیم ۳ درصد وزنی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد.



شکل ۹. مقایسه‌ی نمودارهای بُد مربوط به نمونه ورق‌های سندبلاست شده فاقد عملیات حرارتی و عملیات حرارتی شده (HT) بعد از ۳ ساعت غوطه‌وری در محلول کلرید سدیم ۳ درصد وزنی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد.

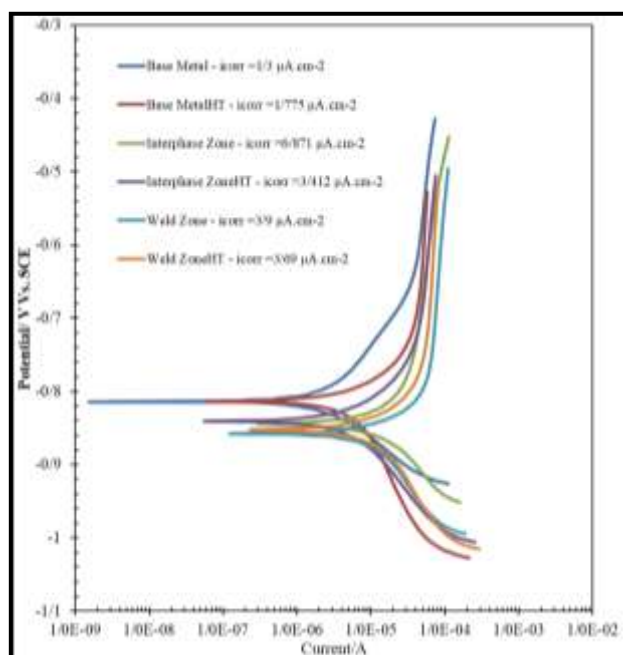
جدول ۴. پارامترهای مختلف استخراج شده از داده‌های امپدانس الکتروشیمیایی نمونه ورق

EEC	$ Z _{at}$ 0.01 ohm.cm ²	C_{dl} F.cm ⁻²	R_{ct} ohm.cm ²	CPE		R_p / R_f ohm.cm ²	نوع عملیات آماده سازی	نمونه
				Y S.sec ⁿ .cm ⁻²	n			
	۲۴۲۳	-	-	۰.۰۰۱۸۹	۰.۷۴۱۵	۳۹۱۵	سندبلاست شده فاقد عملیات حرارتی	فلز پایه
	۱۶۱۸.۶	۰.۰۱۷۸۳	۶۰۱۵	۰.۰۰۱۴	۰.۷۴۷	۱۷۱۴	سندبلاست شده فاقد عملیات	فصل مشترک فلز/جوش
	۱۲۲۳.۹	۰.۰۲۰۸۹	۱۵۳۱۷	۰.۰۰۲۱۸۴	۰.۷۴۹۵	۱۴۱۰	حرارتی	ناحیه جوش
	۱۹۹۱	۰.۰۱۷۴	۵۲۹۱	۰.۰۰۱۳	۰.۷۷۴۴	۲۳۴۷	سندبلاست + عملیات حرارتی	فلز پایه
	۱۹۵۸.۳	۰.۰۲۲۳۷	۵۲۵۰	۰.۰۰۱۶	۰.۷۴۴۲	۲۷۹۰		فصل مشترک فلز/جوش
	۱۴۷۷	۰.۰۴۰۹۹	۵۲۰۰	۰.۰۰۱۵	۰.۶۳۱۸	۲۲۴۵		ناحیه جوش

۳-۵. آزمون پلاریزاسیون تافل

در شکل ۱۰ نتایج آزمون پلاریزاسیون تافل نمونه ورق‌های سند بلاست شده فاقد عملیات حرارتی و نمونه ورق‌های سندبلاست و عملیات حرارتی شده در سه ناحیه فلز پایه، خط جوش و فصل مشترک، بعد از ۴ ساعت غوطه‌وری ارائه شده است. پارامترهای استخراج شده از نمودارهای پلاریزاسیون نیز در جدول ۵ ارائه شده است. چنانکه در جدول ۵ مشاهده می‌شود آزمون پلاریزاسیون تافل نیز تایید کننده نتایج آزمون EIS می‌باشد. در این روش نیز کمترین نرخ خوردگی مربوط به فلز پایه می‌باشد. عملیات حرارتی باعث یکنواخت شدن نرخ خوردگی در نواحی مختلف شده است. در مورد فصل مشترک و ناحیه جوش،

عملیات حرارتی باعث کاهش نرخ خوردگی شده است. با توجه به نتایج متالوگرافی مشخصا در ناحیه HAZ همانطور که قبلا بیان گردید؛ با توجه به خرد شدن بیشتر دانه‌های پرلیت پس از عملیات حرارتی و کمتر شدن پراکندگی پرلیت‌ها کاهش نرخ خوردگی پیشینی می‌شد که نتایج پلاریزاسیون تافل موید آن می‌باشد. همچنین در ناحیه جوش مطابق نتایج متالوگرافی با توجه به از بین رفتن صفحات پرلیت بین دانه‌ای پس از عملیات حرارتی و تبدیل فریت ویدمن اشتاتن به فریت سوزنی، کاهش نرخ خوردگی مورد انتظار بوده که با توجه به نتایج آزمون تافل کاهش اندک نرخ خوردگی پس از عملیات حرارتی قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی نمودارهای پلاریزاسیون تافل مربوط به نمونه ورق‌های سندبلاست شده در دو حالت فاقد عملیات حرارتی و عملیات حرارتی شده (HT) بعد از ۴ ساعت غوطه‌وری در محلول کلرید سدیم ۳ درصد وزنی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد.

جدول ۵. پارامترهای استخراج شده از نمودارهای پلاریزاسیون تافلی ورق جوشکاری شده

نمونه	نوع عملیات آماده سازی	β_a mV/dec.	β_c mV/dec.	E_{corr} V vs. SCE	i_{corr} $\mu A.cm^{-2}$	C.R. mm/year	R_p $K\Omega.cm^2$
فلز پایه	سندبلاست شده فاقد عملیات حرارتی	۱۳۲.۱۵	۸۲.۸۷	-۰.۸۱۵	۱.۳	۰.۰۱۵	۱۶۸
فلز پایه	سندبلاست + عملیات حرارتی	۷۱.۵۰۶	۸۹.۶۷۳	-۰.۸۱۴	۱.۷۷۵	۰.۰۲۰	۹۸۴
فصل مشترک فلز/جوش	سندبلاست شده فاقد عملیات حرارتی	۱۸۲.۹۲۰	۱۱۹.۲۷۰	-۰.۸۴۵	۶.۸۷۱	۰.۰۷۹	۴.۵۶
فصل مشترک فلز/جوش	سندبلاست + عملیات حرارتی	۱۳۷.۸۵۰	۱۳۳.۰۸۰	-۰.۸۴۰	۳.۴۱۲	۰.۰۴۶	۸.۶۲
ناحیه جوش	سندبلاست شده فاقد عملیات حرارتی	۸۱.۴۷۳	۹۷.۲۰۸	-۰.۸۵۹	۳.۹	۰.۰۴۵	۴.۲۸
ناحیه جوش	سندبلاست + عملیات حرارتی	۵۵.۸۷۶	۹۲.۰۵۸	-۰.۸۵۲	۳.۶۹	۰.۰۴۳	۴.۹۴

۴- نتیجه گیری

• تصاویر متالوگرافی فلز پایه قبل و پس از عملیات حرارتی بازپخت نشان داد که ساختار به علت فاصله از ناحیه جوش تغییر چندانی نیافته است اما تصاویر متالوگرافی ناحیه جوش نشان داد که فریت ویدمن اشتاتن پس از انجام عملیات حرارتی به فریت سوزنی تبدیل شده است. با اندازه گیری مقدار میانگین پتانسیل تماسی در ناحیه ی فلز پایه و ناحیه ی جوش میزان اختلاف در حد ۴۰ میلی ولت تعیین شد و با توجه به اینکه اختلاف پتانسیل تماسی، مستقیماً با پتانسیل خوردگی رابطه دارد می توان انتظار داشت که ناحیه جوش نسبت به فلز پایه دارای حساسیت به خوردگی بالاتری باشد. اما عملیات حرارتی تأثیری بر میزان میانگین اختلاف پتانسیل نداشته است و فقط قدری باعث یکنواخت شدن ساختار در ناحیه فصل مشترک شده است. با توجه به نتایج بررسی های الکتروشیمیایی میزان حساسیت به خوردگی در ناحیه جوش و فصل مشترک بیشتر از ناحیه فلز پایه می باشد. همچنین با انجام عملیات حرارتی، حساسیت به خوردگی در ناحیه فصل مشترک از بین رفته و رفتار خوردگی این ناحیه مشابه فلز پایه شده است. اما نرخ خوردگی ناحیه جوش باز هم بالاتر از فلز پایه می باشد و همین مسئله حساسیت ناحیه جوش و لزوم توجه بیشتر به این ناحیه در مراحل آماده سازی و اجرای پوشش را روشن می سازد.

تشکر و قدردانی

از امور پژوهش، توسعه و فناوری شرکت ملی گاز ایران به دلیل حمایت مالی از این پژوهش تشکر و قدردانی می گردد.

مراجع

- [1]. Ibrahim Alenezi, Effects of heat treatment on the corrosion behavior of ASTM A-36 steel, Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol. 10, No. 1, 2020, pp. 5320-5324
- [2]. Abdussalam Abdallah Mohammed Gebriel, Nagi Alsahabi Issa Ali, Ali K. M. Al-Zenati Mansour M. Salih, The Evaluation Of Corrosion Rate On Welded Specimen Of Low Carbon Steel, Sirte University Scientific Journal (Applied Sciences), Vol. 12, No.1, June 2022, pp. 122-133
- [3]. Ayodele C.O, Nenuwa O.B., Investigation of the Effects of Heat Treatment on the corrosion behavior of Welded Low Carbon Steel In Different Environments, International Journal of Science and Technology, Vol. 3, No. 8, July-August 2013, pp. 333-340
- [4]. W. Nimmo, A. J. Griffiths, L.Orkney, A. Mensah, A. Turnbull, Evaluation Of Techniques For Measuring Corrosion Activity Of Carbon Steel Welds, British Corrosion Journal, Vol. 37, No. 3, 2002, pp. 182-193
- [5]. Deepak Dwivedi, Kateřina Lepkova, Thomas Becker, Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods, Royal Society of Chemistry, Vol. 7, 2017, pp. 4580-4610
- [6]. A. Gural, B. Bostan, A.T. Ozdemir, Heat treatment in two phase region and its effect on microstructure and mechanical strength after welding of a low carbon steel, Materials and Design, Vol. 28, 2007, pp. 897-903
- [7]. Sang-Jin Ko, Jeong-Hun An, Yong-Sang Kim, Woo-Cheol Kim, Jung-Gu Kim, Effects of Corrosion on Mechanical Properties of Welded Carbon Steel Pipe in District Heating Water, Materials, Vol. 12, 2019, pp. 3682
- [8]. Sajjad Bordbar, Mostafa Alizadeh, Sayyed Hojjat Hashemi, Effects Of Microstructure Alteration on Corrosion Behavior of Welded Joint in API X70 Pipeline Steel, Materials and Design, Vol. 45, 2013, pp. 597-604
- [9]. روزبه اشعری، عبدالمجید اسلامی، مرتضی شمعیان، بررسی خوردگی در فولاد خط لوله جوشکاری شده زیر پوشش جدا شده تحت حفاظت کاتدی، فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، شماره ۱۷، بهار ۱۳۹۷، صفحات ۲۱-۳۳
- [10]. ASTM D2247 -15, Standard Practice For Testing Water Resistance Of Coatings In 100 % Relative Humidity, West Conshohocken, USA, 2020.
- [11]. László TÓTH, Ferenc HARASZTI, Tünde KOVÁCS, Surface Roughness Effect in the Case of Welded Stainless Steel Corrosion Resistance, Acta Materialia Transylvanica Vol. 1, 2018, pp. 53-56
- [12]. Younes Ziat, Maryama Hammi, Zakaryaa Zarhri, Ousama Ifguis, Surface Analysis, Mechanical and Corrosion Behavior of Welded Steel in 1M HCl Corrosive Media with Epoxy/Alumina Coating, Biointerface Research in Applied Chemistry, Vol. 12, 2022, pp. 3559-3571
- [13]. Nur Azhani Abd Razak, And Shing Shian Ng, Investigation Of Effects Of Mig Welding On Corrosion Behavior Of AISI 1010 Carbon Steel, Mechanical Engineering And Sciences, Vol. 7, 2014, pp. 1168-1178
- [14]. S. Senthilkumar, S. Manivannan, R. Venkatesh, M. Karthikeyan, Influence Of Heat Input On The Mechanical Characteristics, Corrosion And Microstructure Of ASTM A36 Steel Welded By GTAW Technique, Heliyon, Vol. 9, 2023, pp. 19708
- [15]. جاسم سواری، رضا دهملایی، محمد رضا توکلی شوشتری، ارزیابی مقاومت به خوردگی فلز جوش در اتصالات فولاد میکروآلیاژ API 5L X90 با فرآیند GTAW، فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، شماره ۳۴، تابستان ۱۴۰۱، صفحات ۴۱-۵۱