

ارزیابی مقاومت به خوردگی فلز جوش در اتصالات فولاد میکرو آلیاژ API-5L X90 با فرآیند GTAW

جاسم سواری^{۱*}، رضا دهملایی^۲، محمد رضا توکلی شوشتری^۳

^۱ کارشناسی ارشد، ^{۲،۳} استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

* نویسنده مسئول: savaryj1@gmail.com

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۰

چکیده

در این پژوهش مقاومت به خوردگی فلز جوش در اتصالات فولاد میکرو آلیاژ API-5L X90 بررسی گردید. جوشکاری با استفاده از فلزات پرکننده ER100 S-G، ER120 S-G و ER90S-B3 توسط فرآیند GTAW انجام شد. بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM انجام گردید. مطالعات ریزساختاری نشان داد که ریز ساختار فلز پایه شامل فریت و بینیت دانه‌ای می باشد. و فلزات جوش مختلف تماماً شامل مقادیر مختلفی از فریت‌های سوزنی، چند وجهی و جزایر مارتنزیت / آستنیت (MA) می باشند. بیشترین میزان فریت سوزنی در فلز جوش ER120 S-G مشاهده گردید. نتایج آزمون خوردگی نشان داد که فلز جوش ER120 S-G و فلز پایه از کمترین میزان چگالی جریان و نرخ خوردگی برخوردار هستند و بیشترین میزان نرخ خوردگی برای فلز جوش ER100 S-G بدست آمد.

کلیدواژه: API-5L X90، فلز جوش، ریز ساختار، خوردگی پلاریزاسیون

Evaluation of Corrosion Resistance of Weld Metal in x90 API-5L Micro Alloy Steel Joints with GTAW Process

J. Savari^{1*}, R. Dehmalaei², M. R. Tavakoli Shoushtari³

¹ M.Sc, ^{2,3} Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

* Corresponding Author: savaryj1@gmail.com

Submission: 2022, 03, 11 Acceptance: 2022, 06, 10

Abstract

In this research, the corrosion resistance of weld metal in API-5L X90 micro-alloy steel joints was investigated. Welding was performed using filler metals ER120S-G, ER100S-G and ER90S-B3 by GTAW process. Microstructural studies were performed using light microscope and SEM scanning electron microscope. Microstructural studies showed that the base metal microstructure consists of ferrite and granular bentite. It was found that different weld metals all contain different amounts of accular Ferrite, polygonal ferrites and martensite / austenite (MA) islands. The highest amount of accular Ferrite was observed in ER 120 SG welding metal. The results of corrosion test showed that ER120SG welding metal and base metal had the lowest flow density and corrosion rate. And the highest corrosion rate was obtained for ER100SG welding metal.

Keywords: API-5L X90, weld metal, microstructure, polarization corrosion

۱- مقدمه

امروزه از فولادهای کم آلیاژ با استحکام بالا (HSLA) به دلیل داشتن استحکام بالا همراه با چقرمگی مناسب، جهت حمل و نقل در خطوط لوله نفت، گاز، پتروشیمی و کشتی رانی استفاده می شوند [۱]. این نوع فولادها ابتدا با توجه به اینکه از استحکام بالا برخوردار بودن ولی دارای چقرمگی پایینی داشتند. با توجه به توسعه و نیاز صنعت این یک ضعف محسوب می شد. بعد از جنگ جهانی اول با استفاده از روش نورد گرم کنترل شده و همزمان با عملیات حرارت موسوم به ترمکانیکال (TMCP) توانستند علاوه بر استحکام بالا، چقرمگی مناسبی را ایجاد کنند. این ویژگی ها باعث توسعه این فولادها از دهه هفتاد میلاد جهت استفاده در صنایع مختلف به خصوص در خطوط لوله های نفت و گاز گردیده شد. بکارگیری فولادها در خطوط لوله نفت و گاز باید براساس استاندارد API (American Petroleum Institute) باشند. استاندارد API فولادها را در بخش API-5L و در دو سطح PSL1 و PSL2 دسته بندی می کند [۲ و ۳]. فولاد میکرو آلیاژی X90 از جمله فولادهای HSLA می باشد که بر اساس استاندارد API-5L در سطح فولادهای API 2 قرار می گیرد. از جمله عناصر موجود در این فولاد می توان به کروم، نیوبوم، مولیبدن، نیکل و وانادیوم اشاره نمود [۴]. فولاد API-5L X90 از سال ۱۹۸۵ با فرآیند ترمودینامیکی طراحی و تولید شده و دارای استحکام تسلیم ۶۲۵ مگاپاسکال و استحکام کششی ۶۹۵ مگاپاسکال می باشد. این فولاد علاوه بر دارای استحکام بالا و چقرمگی مناسب از مزیت های دیگری همچون جوش پذیری خوب به دلیل میزان کربن کم، مقاومت به خستگی بالا، دمای انتقال شکست نرم به ترد پایین را اشاره نمود. امروزه با توجه به کاهش ضخامت و افزایش قطر داخلی لوله ها جهت کاهش هزینه و افزایش راندمان تولید لوله های مورد استفاده در خطوط انتقال نفت و گاز در مناطق سردسیر، مرطوب، خشک و دریا از این فولاد استفاده می شود [۴، ۵ و ۶]. بررسی رفتار خوردگی فولادهای مورد استفاده در صنعت به ویژه لوله های بکارگیر شده در انتقال نفت و گاز از اهمیت بالایی برخوردار هستند. به گونه ای که بیشتر آسیب های وارده بر این نوع فولادهای ناشی از واکنش های خوردگی می باشد.

این واکنش های خوردگی اغلب از طریق واکنش سیال با لایه درونی و یا محیط با لایه خارجی لوله ایجاد گردیده و باعث به وجود آمدن خسارت جانی و مالی زیادی می شوند. علاوه بر واکنش ها خوردگی، جوشکاری جهت اتصال لوله های نیز بر رفتار خوردگی تاثیر می گذارد. بطوری که سیکل های حرارتی ناشی از جوشکاری باعث تغییر ریز ساختار و مورفولوژی دانه ها می شود. نوع ریز ساختار و مورفولوژی دانه ها نیز ارتباط مستقیمی با میزان و نوع خوردگی دارند [۴].

می یانگ و همکارانش؛ به بررسی اثر سرعت تغذیه سیم جوش ER100S-G بر خواص مکانیکی و رفتارهای خوردگی الکتروشیمیایی فولاد X90 جوشکاری شده به روش هیبریدی لیزری (laser-MAG) پرداختند. نتایج نشان داد که ریزساختار فلز جوش شامل فریت سوزنی (AF) و فریت مرزدانه ایی بوده و ریزساختار منطقه متأثر از حرارت (HAZ) عمدتاً از بینیت دانه ای (GB) و فریت سوزنی (AF) تشکیل شده است. با افزایش حرارت ورودی، دانه ها و رسوبات در فلز جوش و HAZ به طور قابل توجهی رشد می کنند. نتایج تست خوردگی پلاریزاسیون نشان داد که فلز پایه دارای بالاترین مقاومت به خوردگی بوده و مقاومت به خوردگی فلز جوش با رشد دانه ها کاهش می یابد [۸]. سیکل های حرارتی ناشی از حرارت ورودی جوشکاری باعث تغییر در ریزساختار و کاهش خواص مکانیکی همچون چقرمگی و استحکام ناحیه اتصال می گردد. ریزساختار فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت درشت دانه (CGHAZ) از مقادیری ترکیبات M/A به صورت بلوکی و رشته ایی (میله مانند) بر روی مرز و درون دانه های وجود دارند و با افزایش حرارت ورودی درشت تر می شوند. می توان گفت که اندازه، شکل و توزیع فاز ثانویه، مارتنزیت / آستنیت (M/A)، در فلز جوش و CGHAZ متفاوت بوده و این تفاوت بر مقاومت به خوردگی تاثیر می گذارد. به گونه ایی که فلز پایه به دلیل داشتن ریزساختار و مورفولوژی مناسب تر از ناحیه CGHAZ، بیشترین مقاومت به خوردگی را دارد و کاهش مقاومت به خوردگی

X90 مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته شد. از سیم جوش‌های میکروآلیاژی ER 120S-G، ER100 S-G و ER 90S-B3 به عنوان فلز پرکننده استفاده گردید.

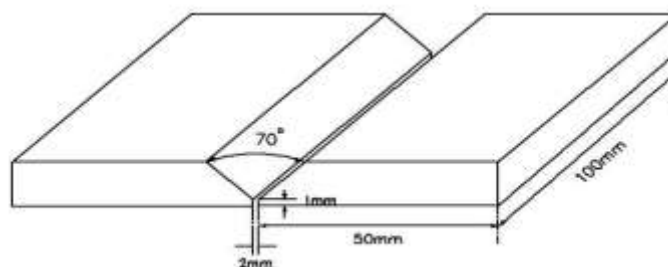
۲- مواد و روش تحقیق:

در این پژوهش از فولاد میکروآلیاژی API X90 با ضخامت ۱۲ میلی‌متر به عنوان فلز پایه و سیم جوش‌های میکروآلیاژی ER120 S-G، ER100 S-G و ER 90S-B3 به عنوان فلز پرکننده استفاده شد. جدول (۱) ترکیبات شیمیایی فلزات پایه و پرکننده بر اساس نتایج کوانتومتری را نشان می‌دهد. طرح اتصال به صورت لب به لب و نیم جناقیک طرفه با زاویه ۷۰ درجه، فاصله ۲ میلی‌متر و ارتفاع ریشه ۱ میلی‌متر با دستگاه فرز آماده‌سازی صورت گردید. شماتیک طرح اتصال در شکل (۱) نشان داده شده است.

ناحیه CGHAZ به میزان، نحوی توزیع و مورفولوژی فاز M / A مرتبط است [۹ و ۱۰]. نحوه تأثیر ریزساختار بر رفتار خوردگی می‌توان اینگونه بیان کرد که فولادهای با ریزساختار فریت سوزنی، فریت چندوجهی و فاز مارتنزیت / آستنیتی به ترتیب در مقایسه با یکدیگر کمترین نرخ خوردگی را دارند. زیرا نمونه‌هایی با ساختار فریت سوزنی دارای محصولات خوردگی به صورت یکنواخت، متراکم‌تر و فشرده‌تر از دو ریزساختار دیگر می‌باشد. محصولات خوردگی تشکیل شده بر روی فاز مارتنزیت / آستنیت و فریت چندوجهی به دلیل متخلخل بودن نمی‌توانند محافظت خوبی را ایجاد کنند. [۱۱ و ۱۲]. در این پژوهش تأثیر حرارت ورودی فرآیند GTAW بر ریز ساختار و مقاومت به خوردگی فلز جوش فولاد میکروآلیاژ

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فلز پایه و فلز پرکننده (درصد وزنی)

عنصر فلز پایه و جوش	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Nb	Ti	Cu	Al	V	Co	N	S	P	Fe
X90	۰/۰۶	۰/۲۴	۱/۴۷	۰/۱۳۵	۰/۰۹۰	۰/۱۳۵	۰/۰۴۲	۰/۰۱۶	۰/۱۰۵	۰/۰۳۱	۰/۰۲۸	۰/۰۰۳	—	<۰/۰۰۱	۰/۰۱۱	باقی مانده
ER 120 S-G	۰/۰۸	۰/۶	۱/۴۵	—	۰/۵۵	—	۰/۰۴	۰/۰۱	۳/۴	—	—	—	—	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	باقی مانده
ER 100 S-G	۰/۶	۱/۶	۰/۳	۱/۴	۰/۲۵	—	—	—	—	—	۰/۰۵	—	—	—	—	باقی مانده
ER 90S-B3	۰/۱	۰/۵	۰/۷	۲/۴	۱	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	باقی مانده



شکل ۱- شماتیک طراحی اتصال

ER 90S-B3 ، ۱۵ دقیقه بود. از آزمون پلاریزاسیون دینامیکی در محدوده پتانسیل ۴۰۰- میلی‌ولت نسبت به مدار باز تا ۶۰۰ میلی‌ولت با نرخ روبش ۳ میلی‌ولت بر دقیقه استفاده شد. و برای تحلیل نمودارها از نرم‌افزار Nova به‌منظور محاسبه پتانسیل، چگالی جریان خوردگی مقاوت به خوردگی و نرخ خوردگی مورد استفاده قرار گرفته شد.

۳- نتایج و بحث:

۳-۱- ریز ساختار

در شکل (۲) تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی ریزساختار فلز پایه X90 نشان داده شده است. ریز ساختار فلز پایه شامل فریت و بینیت دانه‌ای است. شکل (۳) تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی فلز جوش با فلزات پیرکننده ER 90S-B3 و ER100 S-G ، ER120 S-G آورده شده است ریز ساختار فلزات جوش شامل فریت سوزنی، فریت چند وجهی، فریت مرزدانه‌ای و بینیت دانه‌ای و جزایر مارتنزیتی / آستنیتی (M/A) می‌باشد.

نحوه تشکیل ریزساختار فولادهای میکرو آلیاژی می‌توان گفت که فریت چندوجهی نسبت به فریت سوزنی در بازه دمایی بالاتری و با جوانه‌زنی و رشد فریت از مرزدانه‌های آستنیت اولیه تشکیل می‌گردند. با کاهش دما فریت چندوجهی از شکل منظم خود خارج شده به‌طوری‌که مرزدانه به صورت تیغه‌های نا هموار تبدیل می‌شوند که را آن فریت شبه چند وجهی می‌نامند. در ادامه با سرد شدن تا دمای محیط، فاز فریت سوزنی، بر روی آخال‌های غی فلزی جوانه‌زنی و به صورت در هم تنیده تشکیل می‌شوند [۱۳].

کربن حین تشکیل فریت سوزنی پس زده می‌شود و لایه‌ای غنی از کربن در فصل مشترک فریت و آستنیت ایجاد می‌گردد. سپس ضمن سرد شدن ساختار در دمای محیط، مقداری از آستنیت باقیمانده به مارتنزیت و مابقی به‌صورت آستنیت باقی می‌ماند. به صورت ترکیبات M/A به شکل بلوکی یا رشته‌ای معرفی می‌شود [۱۴].

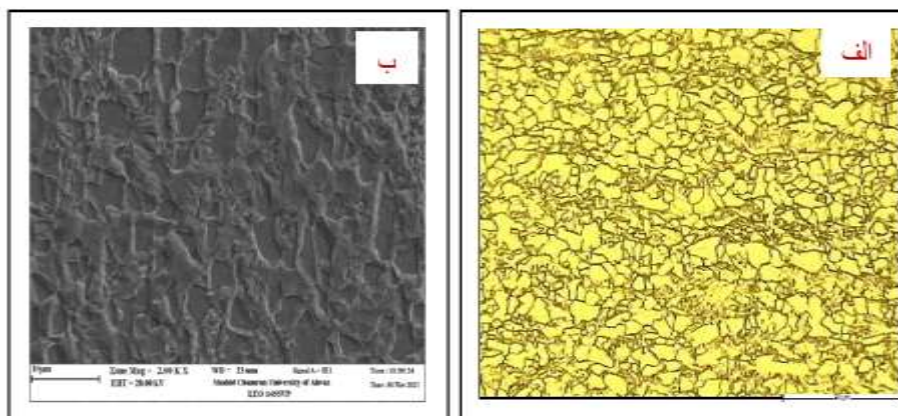
جوشکاری نمونه‌ها با روش GTAW تحت حفاظت گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹ درصد طی ۶ پاس انجام شد. در طی جوشکاری از شدت جریان (I) ۱۵۰ آمپر، ولتاژ (V) ۱۵ ولت و میانگین سرعت (S) ۰/۸۰۶ میلی‌متر بر ثانیه و میانگین حرارت ورودی ۱/۶۷۴ کیلو ژول بر میلی متر انجام شد. میزان حرارت ورودی (Q) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$Q = 0.6 \frac{VI}{S} \quad \text{رابطه (۱)}$$

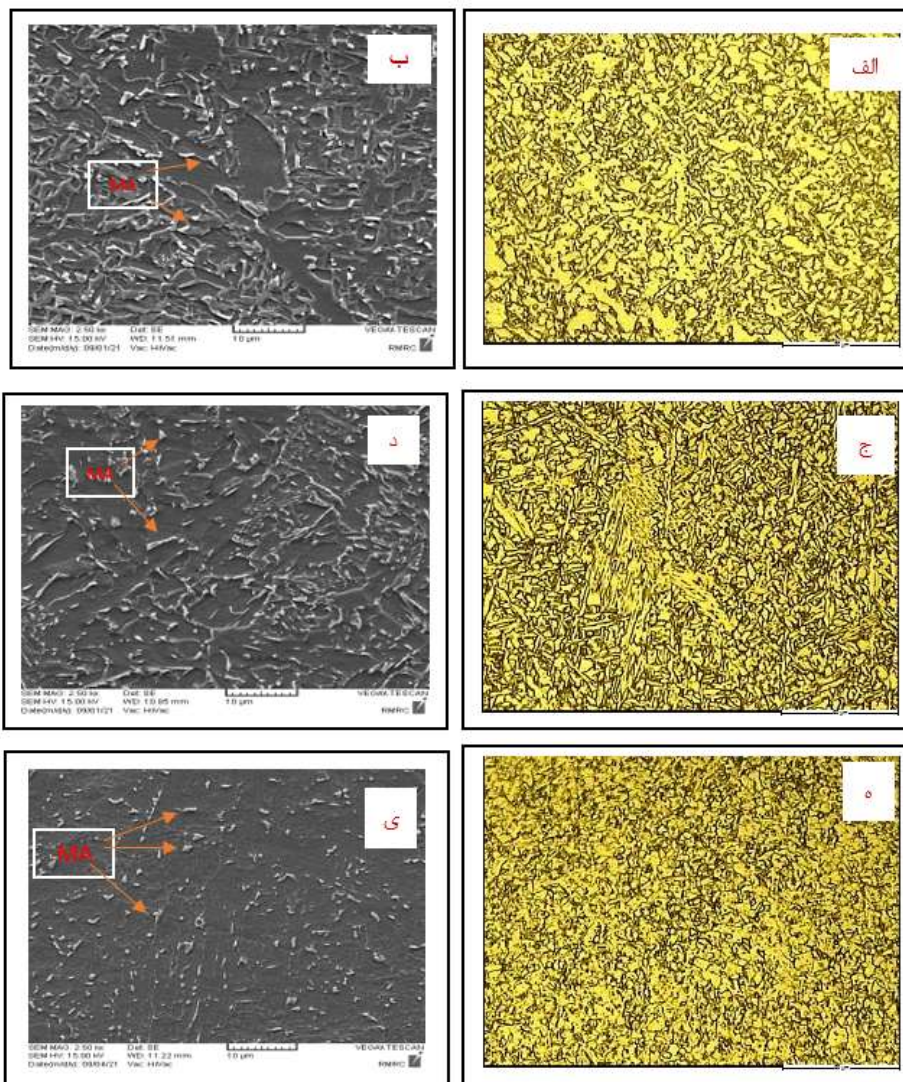
به منظور بررسی ریز ساختار نمونه‌هایی از قطعات جوشکاری شده به ابعاد ۱×۱×۳ سانتی‌متر به‌طوری‌که فلز جوش در وسط آن‌ها قرار داشت جدا گردید. سنباده‌زنی نمونه‌ها از شماره سنباده ۶۰ تا ۲۵۰۰ انجام شد سپس پولیش نمونه‌ها با ترکیب پودر آلومینا ۰/۳ میکرون و آب مقطر انجام گردید. به‌منظور حکاکی نمونه‌ها از محلول نایتال ۲٪ به مدت ۱۰ ثانیه استفاده شد. و ریز ساختار نواحی مختلف جوش و فلز پایه با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسوپ الکترونی روبشی SEM مورد بررسی قرار گرفت.

جهت ارزیابی رفتار خوردگی نواحی مختلف اتصال، ابتدا نمونه‌های به ابعاد ۱۵×۱۲×۵ میلی‌متر مکعب برش داده شد. سپس نمونه‌ها توسط چسب اپوکسی مانت سرد شدند. سپس برای حذف مقدار جزئی چسب اپوکسی و آماده‌سازی سطح نمونه جهت آزمون اقدام به سنباده‌زنی از شماره سنباده ۲۲۰ تا ۲۵۰۰ شد.

برای انجام آزمون خوردگی و اندازه‌گیری نرخ خوردگی از دستگاه پتانسیواستات AutoLab مدل PGSTAT302A و ساخت کشور هلند استفاده شد. در این آزمون از محلول ۳/۵ درصد سدیم کلراید (۳/۵ گرم سدیم کلراید در ۲۵۰ سی سی آب مقطر) به عنوان محلول خورنده و از الکتروده Ag/AgCl به عنوان الکتروده مرجع و الکتروده پلاتینی به عنوان الکتروده شمارنده استفاده شد. مدت زمان نگهداری در محلول به‌منظور پایدار شدن پتانسیل مدار باز برای فلز پایه و فلز جوش با فلز پیرکننده ER100 S-G ، ER120 S-G و



شکل ۲ - تصاویر میکروسکوپی و میکروسکوپی SEM ریز ساختار فلز پایه به ترتیب (الف) و (ب)



شکل ۳ - تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ SEM ریز ساختار به ترتیب نمونه ۱ (الف) و (ب) ER90S-B3، نمونه ۲ (ج) و (د) ER120S-G، نمونه ۳ (ه) و (ی) ER100S-G

بالا، باعث دشوار شدن نفوذ یونها از فلز به محلول الکترولیت می‌شود. و سرعت واکنش آندی کاهش یافته، که منجر به کاهش سرعت واکنش‌های خوردگی می‌گردد.

محصولات خوردگی تشکیل شده بر ریزساختار فریت سوزنی در مقایسه با فریت چند وجهی و فاز M/A فشرده‌تر است. محصولات خوردگی تشکیل شده بر سطح فریت چندوجهی دارای تخلخل و میزان چسبندگی به زمینه کمتر بوده که باعث نفوذ یونها از فلز به محلول شده و موجب افزایش نرخ خوردگی می‌شوند [۱۵]. در نتیجه فریت سوزنی دارای مقاومت به خوردگی بالاتری نسبت به فریت‌های چندوجهی دارد. از پارامترهای تاثیرگذار بر رفتار خوردگی فلزات جوش، میزان کسر حجمی و نحوه توزیع فاز M/A می‌باشد. به طوری که فاز M/A در مقابل زمینه، نقش کاتد را داشته و واکنش‌های کاتدی در آن اتفاق می‌افتد با افزایش اندازه ذرات M/A و توزیع آنها از حالت یکنواخت خارج شوند موجب تغییر در مساحت نواحی کاتدی و آندی شده و نسبت کاتد به آند افزایش می‌یابد. افزایش این نسبت، باعث افزایش سرعت واکنش‌های خوردگی شده که منجر به افزایش جریان و نرخ خوردگی می‌شود [۱۶].

شکل (۳) ریزساختار و اندازه دانه فلزات جوش مختلف را نشان داده شده است. ریزساختار فلزات جوش از ریزساختارهای متفاوتی همچون فریت سوزنی، فریت چندوجهی و جزایر مارتزیتی / آستنیتی (M/A) تشکیل شده است. که میزان، نحوه توزیع و مورفولوژی آنها به حرارت ورودی و میزان رقت (ترکیب سیم جوش و فلز پایه) وابسته است. نمونه (۳) فلز جوش ER120S-G، ریزدانه‌های بیشتری نسبت به سایر فلزات جوش دیگر دارا بوده که باعث افزایش چگالی مرزدانه‌ها افزایش می‌شود. با زیاد شدن چگالی مرز دانه‌ها، مکان‌های ترجیحی برای خوردگی افزایش می‌یابد، که منجر به تشکیل محصولات خوردگی متراکم‌تر می‌شوند. و همچنین به دلیل بیشتر بودن کسر حجمی فاز فریت سوزنی نسبت به فریت چند وجهی، لایه محافظ با تراکم بیشتری بر روی سطح نمونه ایجاد می‌شود که منجر به کاهش جریان خوردگی می‌گردد. اندازه فاز M/A در این نمونه نسبت به

ریز ساختار فلز جوش پر شده با فلز پرکننده ER120S-G نسبت به سایر فلز پر کننده دیگر دارای ساختاری ریز دانه‌تر و از میزان فریت سوزنی بیشتری برخوردار است. ریز ساختار ER100S-G دارای بیشترین میزان فریت شبه چندوجهی و ویدمن اشتاتین بوده. مقدار و نحوه توزیع فاز M/A فلز جوش پر شده با فلز پرکننده ER120S-G نسبت به دیگر فلزات جوش، ریزتر و به صورت یکنواخت پراکنده شده است. و مقدار و نحوه توزیع فاز M/A فلز پرکننده ER90S-B3 دارای توزیع و پراکندگی یکنواخت‌تری نسبت به فلز جوش پر شده با فلز پرکننده ER100S-G دارد. به گونه‌ای که در فلز جوش ER100S-G، فاز M/A بیشتر روی مرزدانه‌ها به صورت بهم پیوسته تشکیل شده‌اند. تفاوت ریزساختار فلز جوش ER90S-B3 نسبت به فلز جوش ER100S-G وجود بینیت دانه‌ای در فلز جوش ER90S-B3 و فریت مرزدانه‌ای در ER100S-G و نحوی توزیع و پراکندگی فاز M/A می‌باشد.

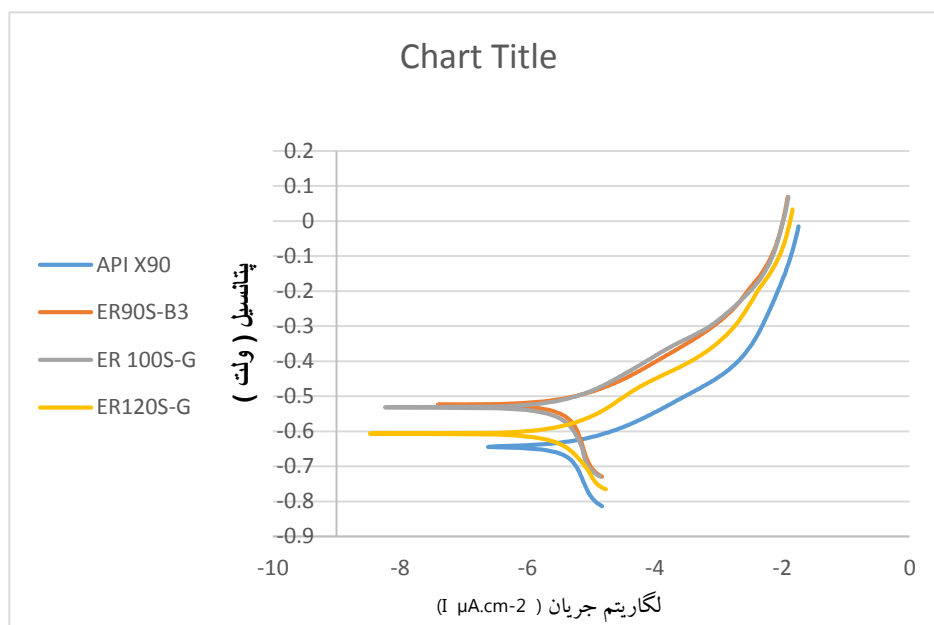
۳-۲- خوردگی

تنوع ریز ساختار، ریزدانه‌گی و توزیع فازهای ثانویه در زمینه بر رفتار خوردگی فلزات جوش تاثیر می‌گذارند. به گونه‌ای که هر ریز ساختاری یک رفتار متفاوت الکتروشیمیایی با ریزساختار دیگر داشته و نوع و میزان تراکم تشکیل محصولات خوردگی به ریزساختار وابسته است. نحوه توزیع و تراکم ریزساختار و رسوبات باعث ایجاد تفاوت واکنش آندی و کاتدی ریزساختاری با هر نوع از ریز ساختار دیگر در یک نمونه با محلول خورنده می‌شود. به طوری که وجود یک فاز یا ذرات در یک زمینه می‌تواند نقش کاتدی را ایجاد کند و باعث به وجود آمدن اختلاف پتانسیل بین ریزساختار مختلف یا ذرات با زمینه گردند. و این اختلاف پتانسیل تعیین کننده میزان و نوع رفتار خوردگی نمونه است. میزان تراکم محصولات خوردگی نیز بر رفتار خوردگی تاثیرگذار است. به گونه‌ای که هر چه اندازه دانه کوچک‌تر باشد، چگالی مرزدانه‌ها افزایش می‌یابد. که باعث افزایش مکان‌های ترجیحی خوردگی شده و محصولات خوردگی متراکم‌تری را ایجاد می‌کنند. با تشکیل محصولات خوردگی با تراکم

سایر نمونه‌ها ریزتر بوده و به صورت یکنواخت پراکنده شده‌اند.

نمونه (۱) فلز جوش ER90S-B3، دارای ریز ساختار فریت سوزنی، چندوجهی و بینیت دانه‌ای می‌باشد. اندازه دانه‌ها و فاز M/A نسبت به نمونه فلز جوش ER120S-G بزرگ‌تر بوده که با افزایش اندازه دانه‌ها، چگالی مرز دانه‌های کاهش می‌یابد. بلوک‌های M/A، درشت‌تر و به صورت میله مانند (رشته‌ای) در زمینه به صورت غیر یکنواخت پراکنده شده‌اند. این تغییر، موجب تغییر در مساحت نواحی کاتدی و آندی می‌شود؛ و نسبت کاتد به آند افزایش می‌یابد. افزایش این نسبت، منجر به افزایش سرعت واکنش‌های خوردگی شده و به دنبال آن، افزایش جریان و نرخ خوردگی می‌شود. نمونه (۲) فلز جوش ER100S-G، دارای ریز ساختاری همچون فریت سوزنی، چند وجهی و فریت مرزدانه‌ای می‌باشد. در این نمونه میزان فریت چندوجهی نسبت به فریت سوزنی بیشتر بوده و فازهای M/A بیشتر بر روی مرز دانه‌ها به صورت کشیده و بهم پیوسته می‌باشند. نمونه (۲) بر خلاف نمونه (۳)، به جای آنکه مرز دانه‌های باعث افزایش مکان‌های ترجیحی برای خوردگی و محصول خوردگی متراکم‌تر را ایجاد کنند. با وجود فاز M/A بر روی مرزدانه‌ها باعث تشکیل محصول خوردگی غیرمتراکم شده و نسبت کاتد به آند نیز افزایش می‌یابد. و نهایتاً باعث افزایش چگالی جریان خوردگی می‌شود.

شکل (۴)، منحنی پلاریزاسیون دینامیکی فلز پایه و فلزات جوش با فلزات پرکننده ER120 S-G، ER100 S-G و ER90S-B3 را نشان می‌دهد. نتایج آزمون خوردگی مربوط به فلزات جوش از قبیل جریان خوردگی، چگالی جریان، پتانسیل و نرخ خوردگی که توسط نرم افزار Nova و به روش برون‌یابی شیب خطوط تافل منحنی‌های آند و کاتدی محاسبه گردید، در جدول (۲) آورده شده است. و با بررسی نتایج بدست آمده، مشخص گردید که فلزات جوش ER120S-G و ER100S-G، به ترتیب دارای کم‌ترین و بیشترین چگالی جریان خوردگی را دارند و لذا، بالاترین و پایین‌ترین میزان مقاومت به خوردگی را دارند. تغییر در رفتار خوردگی فلزات جوش را می‌توان به تنوع ریز ساختار و توزیع فازهای موجود مرتبط دانست. با توجه به بحث‌های ریز ساختاری انجام شده و از آنجایی که عمده ریز ساختار فلز جوش ER120S-G از فریت سوزنی تشکیل گردیده است، می‌توان گفت که تفاوت فعالیت شیمیایی فازها در زمینه ناچیز است. میزان و نحوه توزیع فاز M/A فلز جوش ER100S-G بیشتر در مرزدانه و به هم پیوسته‌تر بوده که باعث افزایش سرعت واکنش‌های خوردگی شده. که در نهایت جریان و نرخ خوردگی افزایش می‌یابد. فلز پایه نسبت به نمونه ER90S-B3 و ER100S-G به ترتیب کمترین چگالی جریان و نرخ خوردگی را دارد. نتایج بدست آمده از جدول با مباحث ریز ساختاری تطابق دارد.



شکل ۴ - منحنی پلاریزاسیون دینامیکی فولاد X90 و فلز جوش ER 120 S-G ، ER 100 S-G و ER 90S-B3 در حرارت ورودی یکسان

جدول ۲ - نتایج حاصل از خوردگی پلاریزاسیون دینامیکی فلز پایه و فلز جوش ER 120 S-G ، ER 100 S-G و ER 90S-B3

نمونه	پتانسیل مدار باز (ocp)	پتانسیل خوردگی (mv)	چگالی جریان خوردگی ($\mu\text{A.cm}^{-2}$)	شیب آندی (Ba) (mv/dec)	شیب کاتدی (Bc) (mv/dec)	نرخ خوردگی (mm/year)
X90	۰/۶۱۶ -	-۶۴۳/۷۷	۱۴/۰۲۱۰	۴۰۳/۴۵	۹۳/۶۷	۰/۱۶۲۹
ER90S-B3	۰/۵۳۲ -	-۵۰۶/۲۲	۲۹/۴۱	۵۳۰/۸۴۰	۸۸/۰۶۰	۰/۳۴۱۷
ER100S-G	-۰/۵۰۷	-۵۰۶/۲۴۰	۴۱/۷۴۴	۲۹۰/۰۲	۱۰۵/۹۱	۰/۴۸۵۰
ER120S-G	-۰/۵۶۸	-۶۰۶/۶۷	۱۲/۷۷	۲۰۰/۳۳	۹۲/۸۳۴	۰/۱۴۸۳

نتیجه گیری

- در این پژوهش تأثیر حرارت ورودی فرآیند GTAW بر ریز ساختار و مقاومت به خوردگی فلز جوش فولاد میکرو آلیاژ X90 مورد بررسی قرار گرفته شد. اهم نتایج بدست آمده از قرار زیر است:
- ریز ساختار فلز پایه شامل فریت و بینیت دانه‌ایی بوده و فلزات جوش شامل فریت سوزنی، فریت چندوجهی و جزایر مارتنزیتی / آستنیتی (M/A) می‌باشد.
 - ریزساختار فریت سوزنی به دلیل تراکم بیشتر دارای مقاومت به خوردگی بهتر نسبت به فریت چند وجهی دارد. و فلز جوش پر شده با فلز پر کننده ER120S-G دارای بیشترین میزان فریت سوزنی می‌باشد.
 - هر چه ریزساختار دارای جزایر مارتنزیتی / آستنیتی (M/A) کوچک‌تر و با توزیع یکنواخت‌تر در زمینه پراکنده شده باشند. مقاومت به خوردگی بیشتری دارد. فلز جوش پر شده با فلز پر کننده ER120S-G دارای M/A ریزتر و با توزیع یکنواخت‌تر در زمینه پراکنده شده است.
 - با بررسی نمودار خوردگی پلاریزاسیون و جدول نتایج خوردگی، کمترین نرخ خوردگی و چگالی جریان را فلز جوش پر شده با فلز پر کننده ER120S-G دارا می‌باشد. سپس فلز پایه نسبت به نمونه ER90S-B3 و ER100S-G به ترتیب کمترین چگالی جریان و نرخ خوردگی را دارا می‌باشد.
 - فاز M/A در ریز ساختار فلز پر کننده ER100S-G، نسبت به دو نمونه دیگر، بیشتر به روی مرز دانه‌ها تشکیل شده است. که باعث کاهش مقاومت به خوردگی آن شده است.

مراجع

- [1] F.F.Eliyan, E.Sadig Mahdi, " Electrochemical evaluation of the corrosion behaviour of API-X100 pipeline steel in aerated bicarbonate solutions", Corrosion Science, 2012
- [2] J.M. Zhang, C.Y. Huo, " NbC-TiN co-precipitation behavior and mechanical properties of X90 pipeline steels by critical-temperature rolling process ", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2018
- [3] A. Yu. Ivanov, R. V. Sulyagin, "Formation of structure in the heat affect zone and properties of welded joint of pipe steels of strength classes X80 and X90", Metal Science and Heat Treatment, Vol. 53, No. 11 – 12, March, 2012
- [4] D. Zhang, L. Gong, X. Chen "Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of API X90 Pipeline Steel Welded Joints", The Indian Institute of Metals - IIM 2019
- [5] B.Guo, J. Xu, " Process, Microstructure and Mechanical Properties of X90 Pipeline Steel" , Materials Science Forum, 2016
- [6] D. Zhang, L.Gong, X. Chen "Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of API X90 Pipeline Steel Welded Joints", The Indian Institute of Metals - IIM 2019
- [7] Y. ARAI, H.NAGAYAMA, " Development of X90-X100 Seamless Line Pipes and Their Application " NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL TECHNICAL REPORT , 2015
- [8] M.Yang, Y.Liu, J. Zhang, " Hybrid Laser-Arc Welding of X90 Pipeline Steel: Effect of Laser Power on Microstructure and Mechanical Properties" METALLURGE AND MATERIEALS ENGINEER - IIM 2018
- [9] L.Yang, Y. Sui, P.Xi, " Microstructure and Properties of Weld CGHAZ under Different Heat Input for X90 Pipeline Steel" Materials Science Forum, 1662-9752, Vol. 850, pp 943-949, 2016
- [10] W.Zhao , Y. Zou, " Corrosion behavior of reheated CGHAZ of X80 pipeline steel in H₂S-containing environments", Materials and Design, 2016
- [11] L.W. Wang , Z.Y. Liu, " In situ corrosion characterization of simulated weld heat affected zone on API X80 pipeline steel", Corrosion Science, 2014
- [12] Y.bGuo, Ch. Li, " Effect of microstructure variation on the corrosion behavior of high-strength low-alloy steel in 3.5wt% NaCl solution", Minerals, Metallurgy and Materials, 2015
- [13] W. Dan , Zh. Shujian , Zh. Qingdong, " The influence of Cr on the microstructure and electrochemical behavior of high strength low-alloy steel", Materials Research Express , 10.1088/2053-1591/ab9ae6, 2020
- [14] N. Huda , A.R.H.Midawi, "Influence of martensite austenite (MA) on impact toughness of X80 line

- pipesteels", Materials Science & Engineering, 2016
- [15] L. Lan, C. Qiu, D. Zhao, X. Gao, L. Du, "Effect of reheat temperature on continuous cooling bainite transformation behavior in low carbon microalloyed steel", Journal of materials science, Vol.40, 2009
- [16] H. Okada, F. Matsuda, K. Ikeuchi, Z. Li. "Decomposition behaviour of M-A constituent and recovery of toughness deterioration of HAZ toughness in 780 and 980 MPa class HSLA steels welded with high heat inputs and its improvement", Welding international, 1995

