نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال چهارم، شماره 1، بهار و تابستان1397، صفحه 76-67

بررسی تأثیر حرارت ورودی فرآیند جوشکاری زیرپودری بر رفتار و سازوکار خوردگی فلز جوش در اتصالات جوشکاری فولاد خط لوله گاز X42

علی محاب[1]، منصور فرزام[*2]، رضا دهملایی[3]

۱-گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

۲- گروه بازرسی فنی، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران.

۳- گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۳ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۰۴)

چکیده

در این پژوهش تأثیر حرارت ورودی فرآیند جوشکاری زیرپودری بر رفتار و سازوکار خوردگی فلز جوش در اتصالات جوشکاری فولاد خط لوله گاز X42 مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا ۶ عدد ورق آنیل شده به ضخامت ۱۵mm از فولاد میکروآلیاژی X42 تهیه شده و سپس برای جوشکاری از فرآیند جوشکاری زیرپودری با مقادیر حرارت ورودی ۳۷/۸، ۱۸/۹ و ۱۲/۶ kJ/mm استفاده شد. 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 و سازوکار خوردگی فلز جوش در اتصالات جوشکاری شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و برای آنالیز فازهای تشکیل شده در ریزساختار فلز جوش از پراش پرتو ایکس استفاده شد. مشاهدات میکروسکوپ الکترونی و الگوهای حاصل از پراش پرتو ایکس نشان داد که افزایش حرارت ورودی منجر به افزایش میزان فریت و افزایش اندازه دانه‌های فریت در ریزساختار فلز جوش اتصالات فولاد خط لوله گاز X42 می‌شود. نتایج آزمایش‌های خوردگی نشان می‌دهد که با افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری، فلز جوش اتصالات فولاد خط لوله گاز X42 مقاومت به خوردگی بیشتری از خود نشان می‌دهد. همچنین با کاهش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری، سازوکار خوردگی فلز جوش بصورت خوردگی حفره‌دار شدن می‌باشد

کلمات کلیدی: فولاد خط لوله گاز X42، فلز جوش، رفتار خوردگی، حرارت ورودی، فرآیند جوشکاری زیرپودری.

Effect of Heat Input of Submerged Arc Welding Process on the Corrosion Behavior of API X42 Gas Pipeline Steel Weld Joint

A. Mahab[1] , M. Farzam[*2], R. Dehmolaei[3]

1- Department of Materials and Metallurgical, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

2- Department of Technical Inspection, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran.

3- Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

(Received 25 July 2017 ; Accepted 25 November 2017)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: farzam@put.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]

Abstract
The effect of heat input of submerged arc welding process on the corrosion bahavior of weld metal of API X42 gas pipeline steel weld joint was investigated. For this purpose, 6 annealed sheets of 15mm thickness were prepared from the X42 microalloyed steel. Submerged arc welding process with varying heat input of 37.8, 18.9 and 12.6 kJ/mm was used for joint welding. Then potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy methods were used to evaluate the corrosion behavior of the welded joints (in 3.5% NaCl solution). The evaluation of the microstructures of the welded metals in the weld joints were conducted using the scanning electron microscopy. X-ray diffraction was used for the analysis of the phases formed in the weld metal microstructure. Scanning electron microscopy observations and patterns obtained from the X-ray diffraction showed that the increase in heat input resulted in the increase in the amount of ferrite. The grain size also increased. Corrosion test results showed that by increasing the heat input of the weld process, the corrosion resistance increased..

Keywords: X42 Gas Pipeline Steel, Weld Metal, Corrosion Behavior, Heat Input, Submerged Arc Welding Process..

1- مقدمه

جوشکاری زیرپودری فرآیند جوشکاری قوسی می باشد که در آن یک یا چند قوس بین الکترود فلزی لخت یا الکترودها (سیم جوش توپر) و حوضچه جوش وجود دارد. قوس و فلز مذاب توسط بستری از روانساز دانه یا پودر جوش روی قطعات کار محافظت می شود. فرآیند بدون فشار و فلز پرکننده تولیدی توسط الکترود (سیم جوش) و گاهی از منبعی ضمیمه (سیم جوش، روانساز یا دانه های فلزی) تأمین می شود. از آنجایی که قوس الکتریکی در این فرآیند جوشکاری، زیر پودر جوش مخفی می باشد، گاهی به این فرآیند جوشکاری، جوشکاری قوس مخفی نیز می گویند [۱ -۴].

پودرهای مورد استفاده در جوشکاری زیرپودری اغلب به صورت دانه های با دانه بندی ویژه و شامل اکسیدهای فلزی از مواد معدنی به صورت طبیعی یا ذوب شده مانند اکسیدهای منگنز، سیلیسیوم، تیتانیوم، آلومینیوم، زیرکونیوم و منیزیم به همراه سایر افزودنی ها مانند فلوراید کلسیم می باشند. این پودرها در حین جوشکاری و به دلیل حرارت بالای ناشی از برقراری قوس الکتریکی ذوب شده و سطح مذاب بدین واسطه پوشانده می شود. در جوشکاری زیر پودری، انتهای سیم جوش یکسره در داخل توده انباشته روانساز، که منطقه یا اتصال مورد جوش را می پوشاند، قرار می گیرد. قوس توسط برخورد الکترود به سطح قطعه کار آغاز می گردد [۵ – ۷].

بررسی‌ها نشان داده است که پارامترهای فرآیند جوشکاری تأثیر زیادی بر تغییرات ریزساختاری و رفتار خوردگی اتصالات جوشکاری فولادها دارد [۸ و ۹]. یکی از این پارامترها میزان حرارت ورودی است که در حین فرآیند جوشکاری به قطعات وارد می‌شود [۱۰]. در تحقیقاتی که توسط ترحم‌نژاد و همکارانش [۱۱] انجام شده، گزارش شده است که افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری ورقهای فولاد دوفازی ۲۲۰۵ منجر به کاهش مقاومت خوردگی فلز جوش می شود. این محققین دلیل این امر را کاهش درصد حجمی فریت فلز جوش در اثر افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری توجیه نموده‌اند.

در تحقیقات دیگری که توسط سبزی و همکارانش انجام شده [۱۲]، گزارش شده که افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری منجر به کاهش اندازه دانه های آستنیت و کاهش مقاومت به خوردگی در اتصالات جوش فولاد هادفیلد می شود. همچنین در رابطه با فولادهای میکروآلیاژی، تعدادی از محققین [۱۳] به بررسی تاثیر شدت جریان فرآیند جوشکاری زیرپودری بر تغییرات ریزساختاری و خواص مکانیکی فولادهای میکروآلیاژی پرداختند. نتایج این محققین نشان داد که افزایش شدت جریان منجر به افزایش وسعت ناحیه متاثر از حرارت در اتصالات جوشکاری فولادهای میکروآلیاژی می شود. در

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]

تحقیقات دیگری هان[1] و همکارانش[۱۴] به بررسی تاثیر حرارت ورودی فرآیند جوشکاری بر میزان نفوذ هیدروژن در مناطق مختلف اتصالات جوشکاری پرداختند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش حرارت ورودی میزان نفوذ هیدروژن در مناطق مختلف اتصالات جوشکاری نیز کاهش می یابد. در تحقیقات دیگری که توسط باجیک[2] و همکارانش [۱۵] انجام شده، گزارش داده شده است که با کاهش حرارت ورودی فرآیند جوشکاری می توان اندازه دانه در ناحیه متاثر از حرارت فولاد میکروآلیاژی X65 را کاهش داد. باتوجه به اینکه فولادهای میکروآلیاژی بیشتر در محیطهایی استفاده می شوند که خوردگی مهمترین عامل تخریب است، لذا تانگ[3] و همکارانش [۱۶]، به بررسی رفتار خوردگی فولاد میکروآلیاژی API X42 پرداختند. در تحقیقاتی که توسط تانگ و همکارانش انجام گرفت، مشخص شد که فولاد خط لوله گاز API X42 نسبت به فولادهای پرمنگنز نیز مقاومت به خوردگی بیشتری دارند. این محققین با استفاده از تکنیک های کوپن‌گذاری و روشهای پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نیز به بررسی رفتار خوردگی فولاد خط لوله گاز API X42 پرداختند.

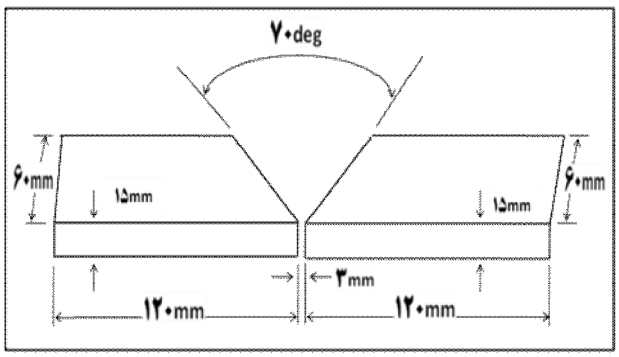
نتایج این محققین نشان داد که با افزایش مدت زمان کوپن‌گذاری، نرخ خوردگی در فولاد میکروآلیاژی API X42 نیز افزایش یافته است. باتوجه به اینکه تخریب قطعات جوشکاری شده از جنس فولاد میکروآلیاژی API X42 در شرایط سرویس‌دهی بسیار پرهزینه است (نظیر اتصالات جوشکاری بکار رفته در خطوط لوله انتقال گاز)، لذا در این پژوهش لازم دیده شد که به بررسی حرارت ورودی فرآیند جوشکاری زیرپودری بر رفتار خوردگی فلز جوش در اتصالات جوشکاری فولاد خط لوله گاز API X42 پرداخته شود که در پژوهش‌های پیشین به این موضوع پرداخته نشده بود.

2- مواد و روش پژوهش

فولاد مورد استفاده در این پژوهش (بعنوان فلز پایه)، فولاد میکروآلیاژی API X42 بود. برای این منظور، ابتدا ۶ عدد ورق آنیل شده از فولاد میکروآلیاژی API X42 به ضخامت ۱۵mm تهیه شده و سپس ترکیب شیمیایی آنها توسط طیف‌سنجی نشری جرقه‌ای بررسی شد و در جدول (۱) گزارش داده شده است. سپس ورق‌های تهیه شده توسط دستگاه فرز با زاویه ۳۵درجه پخ زده شد 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 [۱۷] بهره گرفته شد.

جدول 1- آنالیز شیمیایی ورق‌های فولاد تهیه شده برحسب درصدوزنی.

عنصر	C	S	Mn	P	Fe	Si
مقدار	۰/۲۱	۰/۰۲	۱/۰۳	۰/۰۴	بقیه	۰/۴۴



شکل 1- شماتیکی از طرح اتصال.

سپس برای جوشکاری ورق‌های تهیه شده از روش جوشکاری زیرپودری با مقادیر حرارت ورودی ۳۷/۸، ۱۸/۹ و ۱۲/۶ kJ/mm و همچنین الکترودهای S_2MO استفاده شد. برای محاسبه‌ی حرارت ورودی به قطعه کار از رابطه‌ی زیر استفاده گردید [۱۸]:

$$Q= \eta (۶۰VI / ۱۰۰۰S) \quad (۱)$$

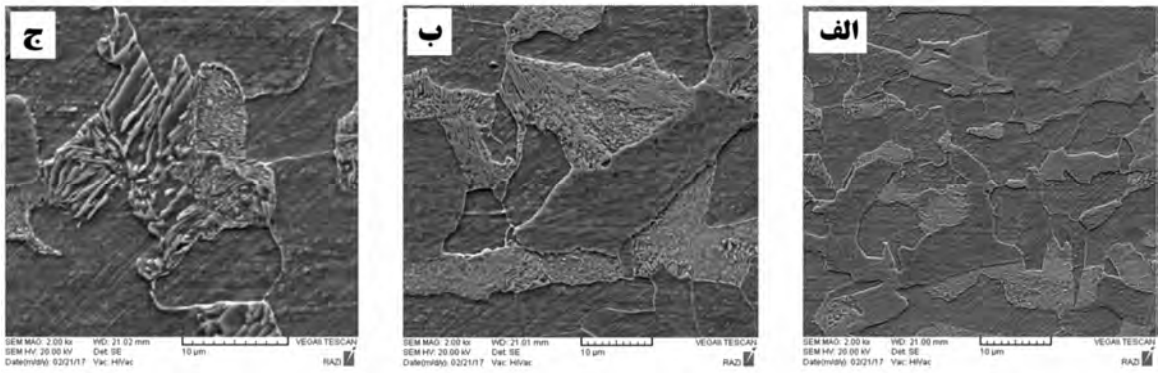
که در این فرمول η ضریب ثابتی بوده و برای روش جوشکاری زیرپودری برابر با ۰/۹ است. همچنین Q حرارت ورودی به قطعه کار برحسب کیلوژول بر میلیمتر، V ولتاژ برحسب ولت،

1 - Han
2 - Bajic
3 - Tong

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]

جدول 2- پارامترهای فرآیند جوشکاری زیرپودری برای جوشکاری ورق‌های فولاد **API X42**.

فرآیند جوشکاری	سرعت(میلی متر بر دقیقه)	جریان(آمپر)	ولتاژ(ولت)	حرارت ورودی (کیلوژول بر میلی متر)	تعداد پاس	دمای بین پاسی (درجه سانتی گراد)
زیرپودری	۳۰	۶۰۰	۳۵	۳۷٫۸	۴	۹۰۰
زیرپودری	۶۰	۶۰۰	۳۵	۱۸٫۹	۴	۹۰۰
زیرپودری	۹۰	۶۰۰	۳۵	۱۲٫۶	۴	۹۰۰



شکل 2- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی:
الف) **12٫6 kJ/mm** ، ب) **18٫9kJ/mm** ، ج) **37٫8kJ/mm**.

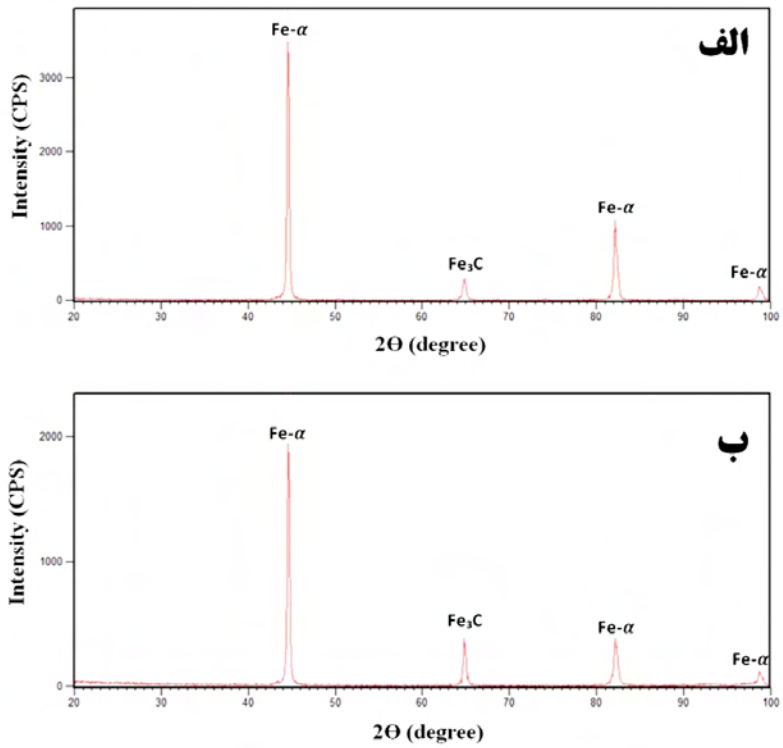
I شدت جریان برحسب آمپر و S سرعت جوشکاری برحسب میلیمتر بر دقیقه می‌باشد. حرارت ورودی محاسبه شده مطابق با فرمول ۱ و کلیه‌ی پارامترهای جوشکاری در جدول (۲) گزارش شده است. لازم به ذکر است که پس از پایان فرآیند جوشکاری، ورق‌های اتصال داده شده در هوا سرد شدند. همچنین ترکیب شیمیایی الکترودهای مورد استفاده در این پژوهش توسط طیف‌سنجی نشری جرقه‌ای برسی شده و در جدول(۳) گزارش شده است.

برای بررسی ریزساختار فلز جوش اتصالات جوشکاری شده، ورق‌های اتصال داده شده با استفاده از سنبادەهای 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 الکترونی روبشی بررسی شد. همچنین جهت بررسی فازهای تشکیل شده در فلز جوش هر سه اتصال از پراش پرتو ایکس (XRD[1]) استفاده گردید.

برای تهیه‌ی نمونه‌های موردنیاز برای انجام آزمایش‌های خوردگی، نمونه‌ای به ابعاد $15mm^3$× ۱۸× ۱۸ از خط اتصال هر اتصال جوشکاری شده بریده شد و پس از اتصال سیم مسی به آنها، بصورت سرد مانت شدند. سپس نمونه‌های تهیه شده با سنبادەهای مختلف به روش تر و پولیش پرداخت شده تا سطحی بدون آلودگی بدست آید. در این مرحله یک طرف نمونه‌ی تهیه شده توسط سیم مسی به گیره‌ی دستگاه متصل گردید و طرف دیگر که حاوی فلز جوش بود، به درون محلول ۳٫۵٪NaCl فرو برده شد. به منظور ارزیابی رفتار خوردگی فلز جوش اتصالات جوشکاری فولاد میکروآلیاژی API X42 در محلول ۳٫۵٪NaCl، پس از آماده سازی نمونه‌های موردنیاز برای آزمایش‌های خوردگی، ابتدا هر نمونه در 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 ۱۰mV در محدوده فرکانسی ۱۰۰kHz – ۱۰mHz انجام شد. سپس آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محدوده ۵۰۰mV– تا ۵۰۰mV+ نسبت به پتانسیل مدار باز و با نرخ روبش ۰٫۰۰۱V/s انجام شد.

1- X-Ray Diffraction

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]



شکل 3- الگوهای حاصل از آنالیز XRD فلز جوش برای اتصال جوشکاری ایجاد شده با حرارت ورودی:
الف) 37/8 kJ/mm، ب) 12/6 kJ/mm .

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 ۲۵°C انجام شده و برای اطمینان از به دست آمدن نتایج دقیق، هر آزمایش خوردگی سه‌بار تکرار شد.

همچنین به منظور بررسی تأثیر حرارت ورودی فرآیند جوشکاری زیرپودری بر سازوکاری خوردگی فلز جوش در اتصالات جوشکاری فولاد خط لوله گاز X42، پس از پایان آزمایش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، از سطوح خورده شده‌ی فلز جوشی که در مقادیر حرارت ورودی ۱۲٫۶ و ۳۷٫۸kJ/mm بوجود آمده بودند، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM[1]) تصاویری تهیه شد.

جدول 3- آنالیز شیمیایی الکترود مورد استفاده برحسب درصد وزنی.

عنصر	C	Mn	Mo	Fe	Si
میزان	۰/۱	۱	۰/۵	بقیه	۰/۱۵

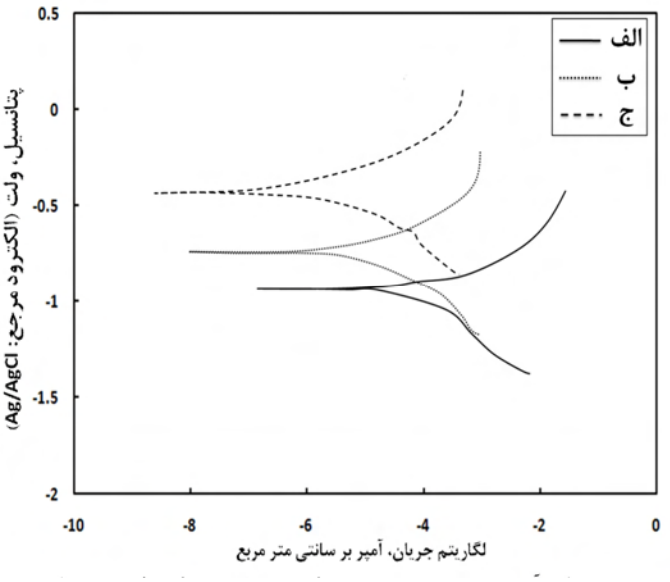
3- نتایج و بحث

3-1- مشاهدات ریزساختاری و آنالیز فازی

در شکل(۲)، تصاویر ریزساختاری تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از فلز جوش اتصالات جوشکاری فولاد میکروآلیاژی API X42 مورد استفاده در این پژوهش، نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود، در هر سه نمونه‌ی مورد آزمایش، ریزساختار فلز جوش شامل ریزساختار فریتی – پرلیتی می باشند. در واقع به دلیل درصد کربن پایین در فلز پایه و سیم جوش مورد استفاده، شرایطی فرآهم شده تا فاز فریت در ریزساختار نیز فاز غالب باشد. مشاهدات ریزساختاری نیز با مشاهدات دیگر محققین همخوانی دارد.

1 - Scanning Electron Microscopy

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]



شکل 4- نمودارهای مربوط به آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با حداقل سه‌بار تکرارپذیری برای فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی: الف) 12/6 kJ/mm ، ب) 18/9 kJ/mm ، ج) 37/8 kJ/mm.

جدول4- مقدار فازهای تشکیل شده.

فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با حرارت ورودی	مقدار فاز Fe-α (%)	مقدار فاز Fe_3C (%)
۱۲۶ kJ/mm	۹۱،۱	۸،۹
۳۷،۸ kJ/mm	۹۳،۸	۶،۲

آنال[1] و همکارانش [۱۹] که به بررسی رفتار شکست فولاد خط لوله گاز API X42 پرداخته بودند، گزارش دادند که ریزساختار این فولاد نیز فریتی – پرلیتی می باشد. همچنین از شکل(۲) نیز مشاهده می شود که با افزایش حرارت ورودی فرآیند جوشکاری زیرپودری، اندازه دانه های فریت نیز افزایش پیدا کرده است. دلیل این امر آن است که با افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری زیرپودری، دمای خط جوش نیز افزایش یافته است. در واقع در مقادیر بالای حرارت ورودی در جوشکاری زیرپودری چون میزان حرارت اتصال خیلی زیاد است، لذا پس از پایان فرآیند جوشکاری نیز ریزساختار درشت دانه شده است. در واقع زمانی که ذرات کاربیدی نجیبتر در کنار زمینه فعال قرار می گیرند زوج الکتروشیمیایی تشکیل داده و باعث تضعیف مقاومت به خوردگی می شود که هرچه ریزساختار درشت دانه تر باشد مرزدانه کمتری برای تشکیل پیل‌های خوردگی بوجود خواهد آمد. پیش از این سبزی و همکارانش [۱۲] نشان دادند که حرارت ورودی به قطعات جوشکاری تاثیر زیادی بر ریزساختار فولادها دارد.

برای بررسی فازهای تشکیل شده در فلز جوش اتصالات ایجاد شده با حرارت ورودی ۳۷،۸ kJ/mm و ۱۲،۶ kJ/mm، از آنالیز XRD استفاده شده و نتایج آن در شکل(۳) گزارش شده است. از شکل(۳) هم ملاحظه می‌شود که فاز غالب تشکیل شده در هر دو نمونه، فاز فریت می‌باشد [۱ – ۲]. در کنار فاز فریت، فاز کاربید سمنتیت دیده می شود که بیانگر تشکیل فاز پرلیت (فریت + کاربید سمنتیت) در ریزساختار می باشد. همچنین از الگوهای پراش پرتو ایکس ملاحظه می‌گردد که در فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۳۷،۸ kJ/mm نسبت به فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۱۲،۶۸ kJ/mm، ارتفاع پیک مربوط به فاز فریت افزایش یافته که با مشاهدات میکروسکوپی نیز مطابقت دارد. همچنین مقدار فازهای تشکیل‌شده در ریزساختار از طریق الگوهای XRD محاسبه شده و در جدول(۴) نیز گزارش شده اند، مشاهده می شود که فلز جوش اتصال جوشکاری شده با حرارت ورودی ۱۲/۶ kJ/mm دارای ۸/۹ درصد کاربید می باشد در حالی که فلز جوش اتصال جوشکاری شده با حرارت ورودی ۳۷/۸ kJ/mm دارای ۶/۲ درصد کاربید می باشد که با نتایج به دست آمده از الگوهای پراش اشعه ایکس مطابقت می کند.

3-2- آزمایش‌های خوردگی

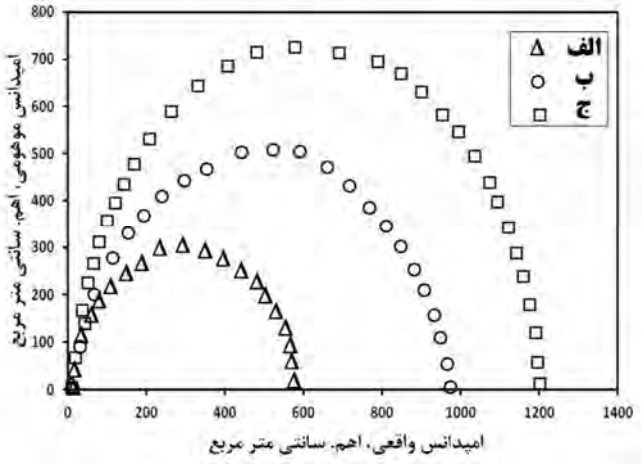
در شکل(۵) نمودارهای مربوط به آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و در جدول(۵) نتایج مربوط به این آزمایش نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در بین هر ۳ اتصال جوش مورد آزمایش، فلز جوش ایجاد شده با بیشترین حرارت ورودی (۳۷،۸ kJ/mm)، از مقاومت خوردگی بالاتر، پتانسیل خوردگی نجیب‌تر، جریان خوردگی و نرخ خوردگی پایین‌تری برخوردار می‌باشد. چون که فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۳۷،۸ kJ/mm، دارای میـزان کـــاربید و تعداد مرزدانه‌ی

1 - Unal

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]

جدول5- نتایج آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک.

Corr. Rate (mm/year)	R_p ($\Omega.cm^2$)	E_{corr} (mV vs. Ag/AgCl)	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با حرارت ورودی
۲.۲۳۶۸ ± ۰.۰۱	۱۰۳۷ ± ۵	−۹۲۱ ± ۱۰	۱۱۱۰۸ ± ۵	۱۲۶ kJ/mm
۱.۵۶۹۷ ± ۰.۰۱	۱۴۶۸ ± ۵	−۷۴۶ ± ۱۰	۴۰۸۶ ± ۵	۱۸۹ kJ/mm
۰.۸۶۵۷ ± ۰.۰۱	۲۰۰۶ ± ۵	−۴۲۵ ± ۱۰	۱۲۳۱ ± ۵	۳۷۸ kJ/mm



شکل 5- نمودار نایکویست مربوط به آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی با حداقل سه‌بار تکرارپذیری برای فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی: الف) 12/6 kJ/mm ، ب) 18/9 kJ/mm ، ج) 37/8 kJ/mm.

کمتری است. درواقع براساس تصاویر ریزساختاری و آنالیز فازی، فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۱۲٫۶ kJ/mm بدلیل داشتن میزان ذرات کاربیدی و تعداد مرزدانه‌های بیشتر در بین هر ۳ فلز جوش، صاحب ضعیف‌ترین مقاومت خوردگی می‌باشد. بنابراین زمانی که با کاهش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری زیرپودری، مرزدانه های فریت و کاربیدهای سمنتیت در فلز جوش اتصالات جوشکاری فولاد API X42 به میزان زیادی تشکیل می‌شوند، به ۲ دلیل خوردگی تشدید می‌گردد [۲۰]:

۱- فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۱۲٫۶ kJ/mm بدلیل داشتن اندازه دانه‌های فریت کوچکتر، دارای تعداد مرزدانه‌ی بیشتر از فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۳۷٫۸ kJ/mm خواهد بود و مرزدانه‌ها محل‌های پرانرژی بوده که از نظر شیمیایی فعال‌تر هستند و تمایل به خوردگی را افزایش می‌دهند.

۲- زمانی که ذرات کاربیدی نجیب‌تر در کنار زمینه‌ی فعال قرار می‌گیرند (در اثر کاهش حرارت ورودی فرآیند جوشکاری زیرپودری)، زوج الکتروشیمیایی تشکیل داده و باعث تضعیف شدن مقاومت خوردگی خواهد شد.

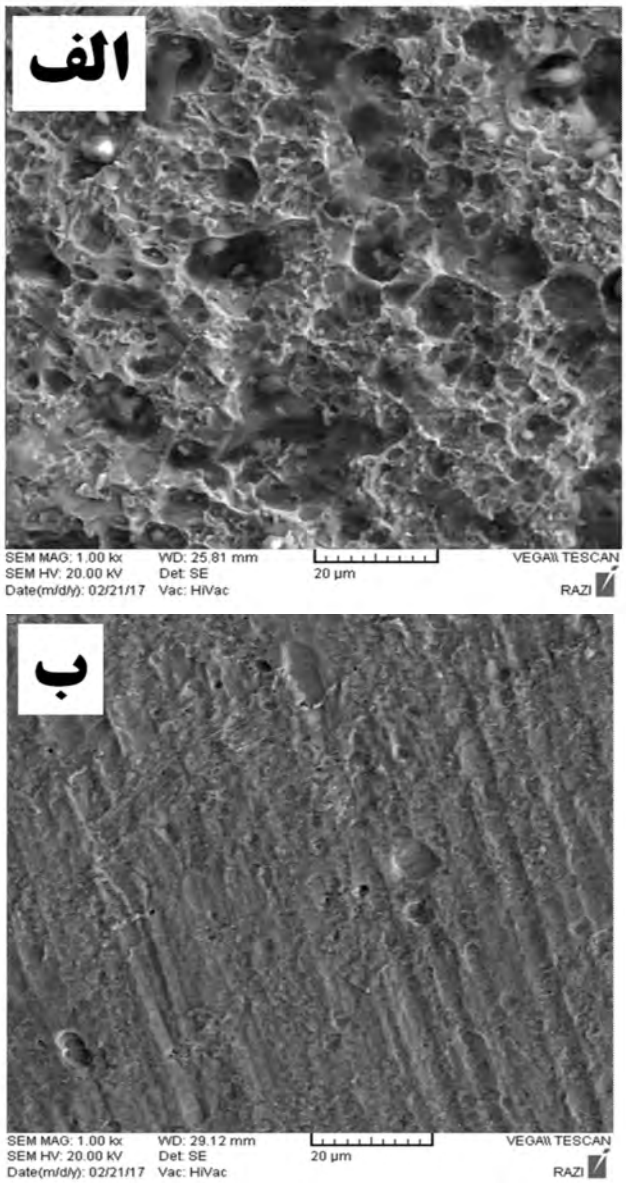
در مجموع، نتایج آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک حکایت از این دارد که افزایش حرارت ورودی فرآیند جوشکاری زیرپودری از ۱۲٫۶ kJ/mm به ۳۷٫۸kJ/mm، باعث بهبود مقاومت خوردگی در این فولاد می‌گردد. نتایج حاصل شده از آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با نتایج حاصل از پژوهش آلوارز[1] و همکارانش [۲۱] شباهت دارد. پیش از این آلوارز و همکارانش گزارش داده بودند که افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری زیرپودری فولاد زنگ نزن دوفازی UNS S31803 منجر به افزایش مقاومت خوردگی فلز جوش در اتصالات فولاد مذکور می‌شود.

شکل(۵) نمودار نایکویست مربوط به آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی را برای فلز جوش هر سه اتصال نشان می‌دهد. همانطور که از شکل(۵) مشاهده می‌شود، فلز جوش ایجاد شده با دمای بین پاسی حرارت ورودی ۳۷٫۸ kJ/mm، مقاومت امپدانس واقعی بیشتری نسبت به دیگر فلزات جوش دارد. از آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی مقادیر مقاومت امپدانس واقعی $\Omega.cm^2$ ۱۲۰۸ برای فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۳۷٫۸ kJ/mm، $\Omega.cm^2$ ۹۸۳ برای فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۱۸٫۹ kJ/mm و $\Omega.cm^2$ ۵۹۲ برای فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۱۲٫۶kJ/mm بدست آمد. نتایج حاصل شده از آزمایش طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی ارتباط مستقیمی با تغییرات ریزساختاری فلز جوش دارد. بطوریکه با افزایش حرارت

1 - Alvarez

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]

ورودی در فرآیند جوشکاری فولاد میکروآلیاژی API X42، تعداد مرزدانه‌ها کاهش یافته و نهایتاً شرایط برای کاهش خوردگی فراهم شده است.



شکل 6- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سازوکار خوردگی فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی: الف) 12/6kJ/mm ، ب) 37/8 kJ/mm.

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 [۲۲]، برای فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۳۷٫۸ kJ/mm، که دارای میزان کاربید و تعداد مرزدانه‌ی 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.

3-3- بررسی سازوکار فلز جوش

جهت بررسی تأثیر حرارت ورودی فرآیند جوشکاری زیرپودری بر سازوکار خوردگی فلز جوش اتصالات جوشکاری فولاد API X42، پس از پایان آزمایش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک از سطوح خورده شده‌ای که در مقادیر حرارت ورودی ۱۲٫۶ و ۳۷٫۸kJ/mm بوجود آمده بودند، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تصاویری تهیه شد و در شکل(۶) نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود، در سطح خوردگی فلز جوش اتصال جوشکاری شده با حرارت ورودی ۱۲٫۶kJ/mm نسبت به سطح خوردگی فلز جوش اتصال جوشکاری شده با حرارت ورودی ۳۷٫۸kJ/mm یکسری حفرات ریز در سطح مشاهده می شود. چون با افزایش حرارت ورودی به قطعه کار در فرآیند جوشکاری، اندازه دانه‌های فریت و تعداد مرزدانه‌ها در فلز جوش به ترتیب بزرگتر و کمتر شده و حضور مرزدانه‌ها به تشکیل میکروپیل‌ها و تشدید خوردگی موضعی میکروگالوانیکی کمک کرده است [۲۲ و ۲۳]. همچنین میزان خوردگی سطح (تعداد و عمق حفره‌های ایجاد شده) در فلز جوش در هردو حالت حرارت ورودی، با نتایج مقاومت خوردگی و نرخ خوردگی حاصل شده از آزمایش‌های خودگی مطابقت دارد. در واقع با بررسی‌های سطوح خوردگی مشخص شد که خسارات خوردگی در فلز جوش اتصال جوشکاری میکروآلیاژی API X42 به شکل حفره‌هایی می باشد که تعداد و عمق این حفره‌ها با کاهش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری زیرپودری، افزایش یافته است. از طرفی هم با مقایسه‌ی سازوکار خوردگی فلز جوش ایجاد شده با مقادیر حرارت ورودی ۱۲٫۶ و ۳۷٫۸kJ/mm، ملاحظه می گردد که سطح فلز

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]

جوش ایجاد شده با مقدار حرارت ورودی ۳۷٫۸kJ/mm دچار خورگی سایشی و کمتری شده است که با نتایج حاصل از آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک همخوانی دارد.

4- نتیجه گیری

۱- مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که افزایش حرارت ورودی (از ۱۲٫۶ kJ/mm تا ۳۷٫۸ kJ/mm) در فرآیند جوشکاری زیرپودری فولاد خط لوله گاز API X42 منجر به افزایش اندازه دانه‌های فریت در فلز جوش می‌شود. همچنین با انتخاب هر حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری، فاز غالب (اصلی) موجود در ریزساختار فلز جوش فولاد مذکور، فریت است.

۲- نتایج آنالیز فازی XRD بیانگر این بود که در فلز جوش ایجاد شده با مقدار حرارت ورودی مختلف، فاز فریت و کاربید سمنتیت تشکیل می‌شوند که با افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری، میزان فریت فلز جوش هم افزایش می‌یابد.

۳- آزمایش‌های خوردگی دلالت بر کاهش مقاومت خوردگی فلز جوش اتصالات جوشکاری فولاد خط لوله گاز API X42 در اثر کاهش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری فولاد مذکور داشتند. زیرا کاهش حرارت ورودی با کاهش اندازه دانه‌های فریت، شرایط را برای تشدید خوردگی و افزایش نرخ خوردگی فرآهم نموده بود.

منابع

1-Barannikova, S. A., Li, Y., Malinovsky, A., Pestsov, D., "Study of Localized Plastic Deformation of Hadfield Steel Single Crystals Using Speckle Photography Technique", *Key Engineering Materials*, Vol. 683, pp. 84-89, 2016.

2-Lindroos, M. and et al., "The deformation, strain hardening, and wear behavior of chromium-alloyed Hadfield steel in abrasive and impact conditions", *Tribol. Lett.*, Vol. 57, No. 24, pp. 1-11, 2015.

3-Limooei, M.B., and Hosseini, Sh., "Optimization of properties and structure with addition of titanium in hadfield steels", Proceedings of Metal 2012, Czech Republic, Vol. 1, pp. 1- 6, 2012.

4-Najafabadi, V.N., Amini, K. and Alamdarlo, M.B., "Investigating the effect of titanium addition on the wear resistance of Hadfield steel", *Metallurgical Research Technologe*, Vol. 111, pp. 375 - 382, 2014.

۵- نعمتی نجف آبادی، و.، مناجاتی زاده، ح. و امینی، ک.، "بررسی تأثیر تیتانیم بر بهبود خواص فولاد هادفیلد ASTM A128-C "، *فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد*، سال هفتم، شماره اول، ص ۵۴-۴۵، ۱۳۹۲.

6-Srivastava, A. K. and et al., "Corrosion behaviour of TiC-reinforced Hadfield manganese austenitic steel matrix in-situ composites", *Open Journal of Metal*, Vol. 5, pp. 11-17, 2015.

7-Hosseini, SH. and Limooei, M.B., "Optimization of Heat Treatment to Obtain Desired Mechanical Properties of High Carbon Hadfield Steels", *World Applied Sciences Journal*, Vol. 15, pp. 1421-1424, 2011.

8-Hosseini, SH., Limooei, M.B., Hossein Zade, M., Askarnia, E. and Asadi, Z., "Optimization of Heat Treatment Due toAustenising Temperature, Time and Quenching Solution in Hadfield Steels", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol.7, pp. 1940-1943, 2013.

9-Ervina Efzan, M. N., Vigram Kovalan, K. and Suriati, G., "A review of welding parameter on corrosion behavior of Aluminum", *Int. J. Eng. Appl. Sci.*, Vol. 1, No.1, pp. 17-22, 2012.

10-Afolabi, A.S., "Effect of Electric Arc Welding Parameters on Corrosion Behaviour of Austenitic Stainless Steel in Chloride Medium", *AU J.T.*, Vol. 11, No. 3, pp. 171-180, 2008.

11-Gill, T. P. S. and et al., "Effect of Heat Input and Microstructure on Pitting Corrosion in AISI 316L Submerged Arc Welds", *Corrosion Science*, Vol. 44, No. 8,pp. 511-516, 1988.

۱۲- سبزی، م.، معینی‌فر، ص. و نجفی‌بیرگانی، ا.، " 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 .

13-Karabulut, H. and et al., "Effect of Different Current Values on Microstructure and Mechanical Properties of Microalloyed Steels Joined by the Submerged Arc Welding Method", *Metals*, Vol. 6, pp. 1-7 2016.

14-Han, Y.D., Jing, H.Y., Xu, L.Y., "Welding heat input effect on the hydrogen permeation in the X80 steel welded joints", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 132, No. 1, pp. 216-222, 2012.

15-Bajic, N. and et al., "Filler Metal Influence on Weld Metal Structure of Microalloyed Steel", *Welding Journal*, Vol 90, pp. 55-62, 2011.

۱۶- ترحم‌نژاد، م.ع.، دهملائی، ر. و معینی‌فر، ص.، "بررسی تأثیر حرارت ورودی فرآیند GTAW بر خوردگی اتصالات

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]

جوش فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵"، مجله *مواد نوین*، دوره ۵، شماره ۱، ص. ۱۱۰– ۹۵، ۱۳۹۳.

17. Annual book of AWS standards, "Welding Science and Technology", 9th Edition, Vol. 1, 2015.

۱۸–آلتهاوس، ا.د.، " اصول نوین جوشکاری"، سلطان‌بیگی، م.م. (مترجم)، چاپ هفتم، انتشارات صنعت گستر، تهران، ۱۳۷۹ .

19-Unal, H. I. et al., "Characterization of the fracture behaviour of X42 microalloyed pipeline steel", *International Journal of Structural Integrity*, Vol. 6, pp. 567-577, 2015.

۲۰– سبزی، م.، معینی‌فر، ص. و نجفی‌بیرگانی، ا.، "بررسی تأثیر نرخ سرد شدن بر رفتار خوردگی منطقه ذوب اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد"، شانزدهمین کنگره ملی خوردگی، تهران، پژوهشگاه صنعت نفت، ص. ۱۰–۱، ۳ و ۴ آذر ۱۳۹۴ .

21-Alvarez, T.R. and et al., Influence of interpass temperature on the properties of duplex stainless steel during welding by submerged arc welding process, *Welding International*, Vol. 30, No. 5, pp. 348-358, 2016.

22-R. Q. Hou et al., "Localized Corrosion of Binary Mg-Ca Alloy in 0.9 wt% Sodium Chloride Solution", Acta *Metallurgica Sinica(English Letters)*, Vol. 29, pp. 46-57, 2016.

23-Lim, M.L., Kelly, R.G. and Scully, J.R., "Overview of Intergranular Corrosion Mechanisms, Phenomenological Observations, and Modeling of AA5083" , *Corrosion*, Vol. 72, 2016, pp. 198-220.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-02]