علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال اول، شماره ۱، پاییز و زمستان ۹۴، صفحه ۲۳-۱۳

بررسی تأثیر حرارت ورودی بر رفتار خوردگی اتصالات جوش فولاد هادفیلد در فرآیند SMAW

مسعود سبزی[*1] ، صادق معینی فر[2]، ابراهیم نجفی بیرگانی[3]

۱- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
۲- گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شوشتر، شوشتر، ایران
۳- گروه مواد و متالورژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران
پست الکترونیکی: mas.metallurg88@gmail.com

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۱۷ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۳۹۴/۰۷/۲۰)

چکیده

در این پژوهش تأثیر حرارت ورودی فرآیند SMAW بر رفتار خوردگی اتصالات جوش فولاد هادفیلد مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا ۴ عدد ورق آنیل شده به ضخامت mm ۲۵ از فولاد هادفیلد تهیه شده و سپس برای جوشکاری از فرآیند SMAW با مقادیر حرارت ورودی ۶/۷۵ و ۱۱/۲۵ kJ/mm استفاده شد. برای بررسی رفتار خوردگی مناطق فلز جوش و فلز پایه از روشهای پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در محلول NaCl ۳/۵٪ استفاده گردید. نتایج آزمایش‌های خوردگی نشان داد که با افزایش حرارت ورودی در فرآیند SMAW، مقاومت خوردگی در فلز جوش کاهش یافته است. همچنین مشخص شد که در هر دو مقدار حرارت ورودی، فلز پایه نسبت به فلز جوش مقاومت خوردگی بیشتری دارد.

کلمات کلیدی: فولاد هادفیلد، رفتار خوردگی، اتصالات جوش، حرارت ورودی، فرآیند SMAW.

Investigation on Effect of Heat Input on the Corrosion Behavior of Hadfield Steel Weld Joints in SMAW Process

M. Sabzi[*1], S. Moeni far[2], E. Najafi Birgani[3]

1-Young Researchers and Elite Club, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran
2-Department of Mechanic, Shooshtar Branch, Islamic Azad University, Shooshtar, Iran
3-Department of Materials and Metallurgical, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

(Received 8 September 2015 ; Accepted 12 October 2015)

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

Abstract

In this investigation, the effect of heat input of SMAW process on the corrosion behavior of Hadfield steel weld joints was investigated. For this purpose, 4 annealed sheets with thickness 25 mm prepared from Hadfield steel and then welding applied by SMAW process with 6.75 and 11.25 kJ/mm heat input values. For corrosion behavior evaluation of base metal and weld metal areas, potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy methods were used in the 3.5% NaCl solution. The result of corrosion tests indicated that by increasing the heat input in the SMAW process, the corrosion resistance in the weld metal were reduced. It was also found that in both heat input values, base metal had more corrosion resistance compared to weld metal.

Keywords: Hadfield steel, corrosion behavior, weld joints, heat input, SMAW process.

۱- مقدمه

اولین آلیاژ آستنیتی منگنزداری که دارای حدود ۱/۲ درصد کربن و ۱۲ درصد منگنز بود، توسط رابرت هادفیلد در سال ۱۸۸۲ میلادی تهیه شد. فولاد هادفیلد یک آلیاژ غیر مغناطیسی تشکیل شده از آهن، کربن ۱/۴-۱ درصد وزنی و منگنز ۱۴-۱۰ درصد وزنی می باشد که از قابلیت کارسختی بالایی برخوردار بوده و دارای مقاومت بسیار خوبی در برابر سایش است. این فولاد با استحکام بالا، انعطاف پذیری خوب و مقاومت عالی در برابر سایش بصورت گسترده در صنایع مختلف نظیر صنایع سیمان، معدن، راهسازی و راه آهن بکار گرفته می شود[۱و۲] . در موارد خاص و بنا به کاربرد آن، عناصرآلیاژی دیگری نیز به این فولاد اضافه می شود. یکی از این عناصر تیتانیم می باشد. استفاده از عنصر تیتانیم جهت ریزدانه کردن ساختار و افزایش سختی در این فولاد نتایج بسیار مثبتی به جای گذاشته است[۴و۳] . اگرچه عنصر تیتانیم باعث افزایش سختی شده بود، اما مطالعه ریزساختار فولاد هادفیلد نشان می دهد که این عنصر با ایجاد ذرات کاربید تیتانیم، باعث کاهش چقرمگی فولاد مذکور می شود [۵]. در همین رابطه، اسری واستاوا[1] و همکارانش [۶]، تأثیر ذرات تقویت کننده‌ی کاربید تیتانیم بر رفتار خوردگی کامپوزیت‌های با زمینه فولاد آستنیتی هادفیلد پرداختند. این محققان نشان دادند که با افزایش میزان ذرات تقویت کننده‌ی کاربید تیتانیم، مقاومت خوردگی کامپوزیت مذکور کاهش می یابد. بطور کلی بررسی‌های انجام شده بروی فولادهای آستنیتی پرمنگنز نشان داده است که این فولادها مقاومت خوردگی پایینی در محلول H_2SO_4 دارند. با بررسی دو نوع فولاد پرمنگنز، نشان داده شده حضور لایه های مارتنزیتی که در اثر تغییر شکل پلاستیک در این فولادها ایجاد شده‌اند، منجر به افزایش میزان وزن از دست رفته در آزمونهای الکتروشیمیایی در محلولH_2SO_4 می‌شود[۷] . گزارشات آقای سبزی و معینی‌فر[۲] نشان می‌دهد که عناصر آلیاژی آلومینیوم و کروم بترتیب باعث افزایش و کاهش مقاومت خوردگی در فولاد هادفیلد می‌شوند. این محققین دلیل این امر را افزایش میزان ذرات کاربیدی در اثر افزایش میزان کروم در ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد گزارش داده‌اند.

بررسی‌ها نشان داده است که پارامترهای فرآیند جوشکاری تأثیر زیادی بر رفتار خوردگی اتصالات جوشکاری فولادها دارد[۸و۹]. یکی از این پارامترها میزان حرارت ورودی است که در حین فرآیند جوشکاری به قطعات وارد می‌شود[۱۰] . در تحقیقاتی که توسط آقای ترحم‌نژاد و همکارانش انجام شده [۱۱]، 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

1 Srivastava

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری توجیه نموده‌اند.

دربسیاری ازکاربردها، فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد نیاز به جوشکاری دارد و این عمل برای اتصال دو قطعه هادفیلد یا فولاد ساده کربنی به فولاد هادفیلد و یا تعمیر قطعات انجام می شود. مهمترین و ابتدایی ترین مسئله در جوشکاری فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد، حرارت دادن قطعه یا قطعات کار در حین جوشکاری یا قبل از آن است که برای جلوگیری از تشکیل ذرات کاربید باید در حداقل مقدار خود باشد. در هر حال ایجاد فاز کاربید در منطقه جوش قابل قبول بوده و اغلب فلز منطقه جوش استحکام بالاتر و چقرمگی کمتری نسبت به فلز پایه دارد. به دلیل حساس بودن فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد به حرارت، باید جوشکاری آن بادقت کافی صورت گیرد. بهترین روش برای جوشکاری این فولاد، روش جوشکاری با الکترود دستی (SMAW[1]) است و برای جوشکاری این فولادها الکترودهای مناسب حاوی منگنز بالا به صورت تجاری موجود هستند[۲و۱۲] . با توجه به حساسیت فولاد هادفیلد به حرارت، تحقیقات زیادی در رابطه با جوش پذیری و قابلیت جوشکاری این فولاد با الکترودهای مختلف صورت گرفته است [۱۳] . کوریل-رینا[2] و همکارانش[۱۴] به بررسی تأثیر نرخ خنک شدن بر ساختار و سختی منطقه‌ی متأثر از حرارت پرداختند. این محققان گزارش نمودند که با کاهش نرخ خنک شدن، میزان میکروسختی منطقه ی متأثر از حرارت افزایش می یابد. همچنین این محققان نشان دادند که کاهش نرخ خنک شدن پس از جوشکاری (سرد شدن در هوا)، باعث افزایش اندازه حفرات و افزایش میزان کاربیدهای رسوب کرده در منطقه‌ی متأثر از حرارت می شود. در تحقیقات دیگری که در رابطه با جوشکاری فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد صورت گرفته است، محققان [۱۵] گزارش نمودند که کاربیدهای رسوب کرده در منطقه‌ی متأثر از حرارت این فولاد از نوع Mn_7C_3 و $Mn_{23}C_6$ می باشند.

باتوجه به اینکه تخریب قطعات جوشکاری شده از جنس فولاد هادفیلد در شرایط سرویس‌دهی بسیار پرهزینه است (نظیر اتصالات جوشکاری بکار رفته در خطوط ریلی)، لذا در این پژوهش لازم دیده شد که به بررسی تأثیر حرارت ورودی فرآیند SMAW بر مقاومت خوردگی فلز جوش اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد پرداخته شود که در پژوهش‌های پیشین به این موضوع پرداخته نشده بود.

۲- مواد و روش پژوهش

فولاد مورد استفاده در این پژوهش (بعنوان فلز پایه)، فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد ASTM A- ۱۲۸ [۱۶] بود. برای این منظور، ابتدا ۴ عدد ورق آنیل شده از فولاد هادفیلد به ضخامت ۲۵ mm تهیه شده و سپس ترکیب شیمیایی آنها توسط طیف‌سنجی نشری جرقه‌ای بررسی شد و در جدول (۱) نشان داده شده است. سپس ورق‌های تهیه شده توسط دستگاه فرز با زاویه ۳۵ درجه پخ زده شد تا آماده جوشکاری شوند. شماتیک طرح اتصال در شکل (۱) نشان داده شده است. برای جوشکاری ورق‌های تهیه شده از روش جوشکاری با الکترود دستی (SMAW) با مقادیر حرارت وردی ۶/۷۵ و ۱۱/۲۵ kJ/mmو همچنین الکترودهای منگنز - نیکل استفاده شد. برای محاسبه ی حرارت ورودی به قطعه کار از رابطه‌ی زیر استفاده گردید[۱۷] :

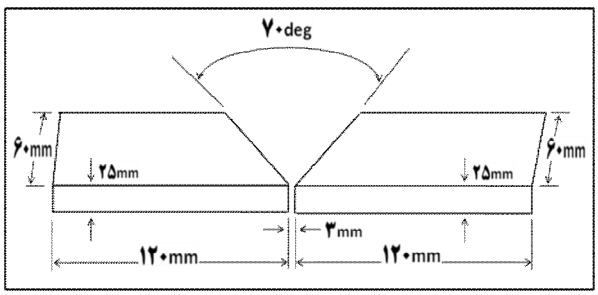
$$Q= \eta \ (۶۰VI / ۱۰۰۰S) \qquad (۱)$$

که در این فرمول η ضریب ثابتی بوده و برای روش جوشکاری با الکترود دستی (SMAW) برابر با ۰/۷۵ است. همچنین Q حرارت ورودی به قطعه کار برحسب کیلوژول بر میلی متر، V ولتاژ برحسب ولت، I شدت جریان برحسب آمپر و S سرعت جوشکاری بر حسب میلی متر بر دقیقه می باشد. حرارت‌های ورودی محاسبه شده مطابق با فرمول (۱) و کلیه ی پارامترهای جوشکاری در جدول (۲) گزارش شده است. لازم به ذکر است که پس از پایان فرآیند جوشکاری در هر دو مقادیر حرارت ورودی، 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 داده شده است. قابل ذکر است که برای بررسی نرخ

1 Shielded Metal Arc Welding
2 Curiel-Reyna

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

سرد شدن فلز جوش، دمای این منطقه در بازه‌های زمانی مختلف بوسیله دستگاه پیرومتر غیرتماسی پرتابل اندازه گیری گردید. برای بررسی ریزساختار مناطق مختلف جوش، ورقهای اتصال داده شده با استفاده از سمباده‌های مختلف به روش تر آماده سازی شده و برای اچ کردن آنها از محلول نایتال ۲ درصد استفاده شده و در نهایت ریزساختارهای حاصل توسط میکروسکوپ نوری بررسی شد. به منظور اندازه گیری میزان کاربیدها در مناطق مختلف جوش از نرم افزار Image J و برای بررسی اندازه دانه‌های این مناطق از نرم افزار Image Analyzer استفاده شد. همچنین جهت بررسی رسوبات تشکیل شده در فلز جوش هردو اتصال از پراش پرتو ایکس (XRD[1]) استفاده گردید. برای تهیه‌ی نمونه‌های موردنیاز برای انجام آزمایش‌های خوردگی، نمونه‌ای به ابعاد $18\times18\times18mm^3$ از هر اتصال جوشکاری شده بریده شد و پس از اتصال سیم مسی به آنها، بصورت سرد مانت شدند. سپس نمونه‌های تهیه شده با سمباده‌های مختلف به روش تر و پولیش پرداخت شده تا سطحی بدون آلودگی بدست آید. در این مرحله یک طرف نمونه ی تهیه شده توسط سیم مسی به گیره ی دستگاه متصل گردید و طرف دیگر که حاوی مناطق مختلف جوش بود، به درون محلول NaCl ۳/۵٪ فرو برده شد. لازم به ذکر است که برای انجام آزمایش‌های خوردگی بروی هرکدام از مناطق مختلف جوش، مناطق دیگر اتصال جوشکاری با چسب پوشش داده می شد.



شکل ۱- شماتیکی از طرح اتصال

به منظور ارزیابی رفتار خوردگی اتصالات جوش فولاد هادفیلد در محلول NaCl ۳/۵٪، 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 ی ۱۰mV در محدوده فرکانسی ۱۰۰ kHz- ۱۰mHz انجام شد. سپس آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محدوده 400 mV - تا 1000 mV + نسبت به OCP و با نرخ روبش ۰/۰۰۱ V/s انجام شد. . برای محاسبه‌ی مقاومت پلاریزاسیون از رابطه‌ی (۲) استفاده شد[۱۸].

$$R_p = (1\div 2.3\, i_{corr}) . [(B_a . B_c) \div (B_a + B_c)] \quad (۲)$$

در این رابطه RP مقاومت پلاریزاسیون، icorr جریان خوردگی، Ba شیب ناحیه آندی و Bc شیب ناحیه کاتدی می باشد.

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

عنصر	کربن	منگنز	فسفر	سیلیسیم	آهن
استاندارد ASTM A-۱۲۸	۱/۰۵ - ۱/۳۵	۱۱min	۰/۰۷max	۱max	بقیه
ورق‌های تهیه شده	۱/۲۴	۱۲/۷۳	۰/۰۲۳	۰/۵۲	بقیه

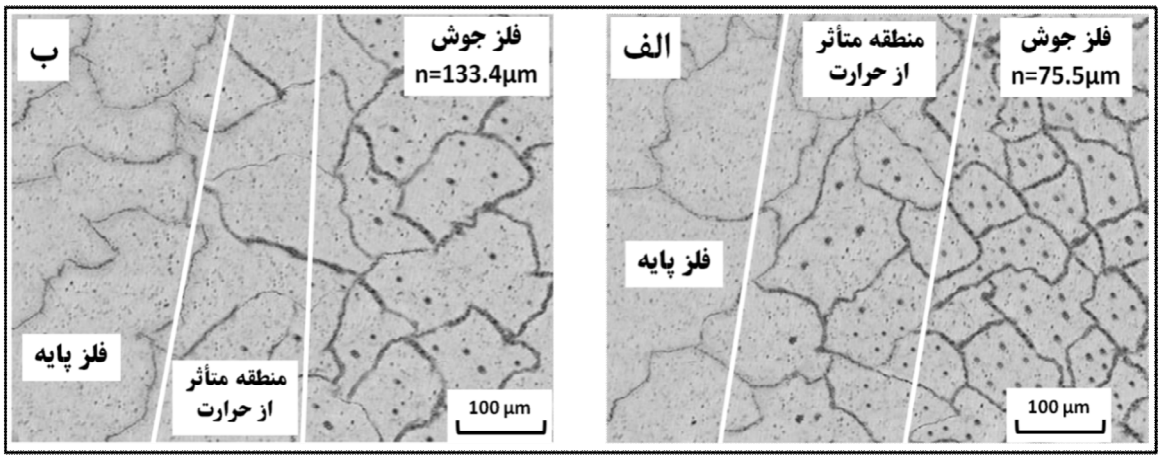
جدول ۲- پارامترهای فرآیند جوشکاری SMAW برای جوشکاری ورقهای فولاد هادفیلد

فرآیند جوشکاری	سرعت، میلی متر بر دقیقه	جریان، آمپر	ولتاژ، ولت	تعدادپاس	حرارت ورودی، کیلوژول بر میلی متر
SMAW	۲۰	۲۵۰	۲۰	۳	۱۱/۲۵
SMAW	۲۰	۱۵۰	۲۰	۳	۶/۷۵

همچنین برای اندازه گیری نرخ خوردگی فلز جوش و فلز پایه از رابطه‌ی (۳) استفاده شد[۱۸] . در این رابطه mpy نرخ خوردگی در سال، W تفاوت وزن در قبل و بعداز آزمونهای پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، D چگالی، A سطح تماس نمونه (الکترود کار) با محلول و T زمان غوطه‌وری می باشد. 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 302N

1 X-Ray Diffraction

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل ۲- تصاویر متالوگرافی از مناطق مختلف اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد در بزرگنمایی ۱۰۰ با حرارت ورودی:
الف) ۱۱/۲۵ kJ/mm ، ب) ۶/۷۵ kJ/mm

متصل گردید. هر دو آزمایش خوردگی مورد استفاده، در دمای 25°C انجام شده و برای اطمینان از به دست آمدن نتایج دقیق، هر آزمون خوردگی سه بار تکرار شد. به منظور بررسی تأثیر حرارت ورودی فرآیند جوشکاری SMAW بر نرخ خوردگی اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد، پس از پایان آزمایش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، از سطوح خورده شده‌ی فلز پایه و فلزات جوشی که در مقادیر حرارت ورودی ۶/۷۵ و ۱۱/۲۵kJ/mm بوجود آمده بودند، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM[1]) تصاویری تهیه شد.

$$mpy = \frac{S34\ W}{DAT} \qquad (۳)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱-مشاهدات ریزساختاری

شکل (۲)، تصاویر متالوگرافی تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری از مناطق مختلف اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد با مقادیر حرارت ورودی مختلف را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، در هر دو حالت حرارت ورودی، هر سه ناحیه‌ی فلز پایه، منطقه‌ی متأثر از حرارت و فلز جوش شامل زمینه ی آستنیتی به همراه مقادیر مختلفی از کاربید می باشند. دلیل زمینه‌ی آستنیتی را می‌توان به حضور مقادیر بالای کربن و منگنز اثبات نمود. همچنین منگنز از تبدیل آستنیت به مارتنزیت در دماهای پایین جلوگیری می کند.Lee and Choi [۱۹] ، گزارش نمودند که با افزایش منگنز در آلیاژهای Fe-Mn، دمای شروع مارتنزیت به میزان بسیار زیادی کاهش می یابد، بطوریکه در آلیاژهای پرمنگنز یک زمینه کاملاً آستنیتی را می‌توان مشاهده نمود. از تصاویر متالوگرافی مشاهده می‌شود که با افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری SMAW، میزان کاربیدها در هر دو ناحیه ی فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت افزایش می یابد. چراکه بطورکلی نرخ انتقال حرارت در فولاد هادفیلد بسیار پایین بوده و از طرفی هم فولاد هادفیلد یک فولاد پرکربن است [۱۲و۲]). همچنین مشاهدات میکروسکوپ نوری با نتایج حاصل از پژوهش کوریل-رینا و همکارانش [۱۴] در رابطه با تأثر حرارت بر رسوب کاربید در اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد شباهت دارد.

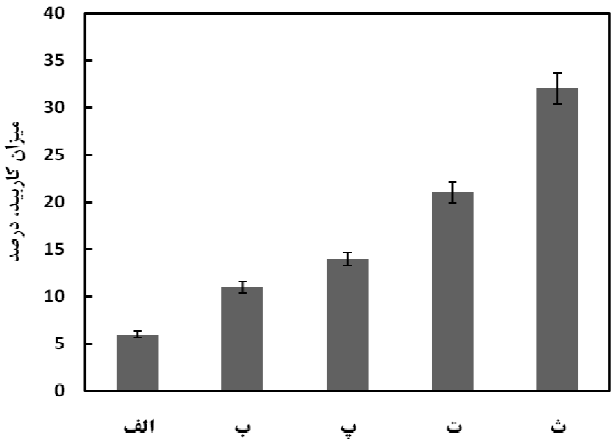
برای بررسی میزان کاربیدها، میزان ذرات کاربیدی بوسیله نرم افزار Image J برای فلز پایه و فلز جوش اتصالات جوشکاری اندازه گیری شده و در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل هم مشاهده می‌شود که فلز جوش اتصال جوشکاری شده با حرارت ورودی۱۱/۲۵ kJ/mmدارای ۳۱ درصد کاربید می باشد درحالیکه فلز جوش اتصال جوشکاری شده با حرارت ورودی ۶/۷۵ kJ/mm دارای ۲۱ درصد کاربید است. همچنین منطقه‌ی متأثر از حرارت اتصال جوشکاری شده با حرارت ورودی ۱۱/۲۵kJ/mmداری ۱۴ درصد کاربید بوده درحالیکه منطقه متأثر از حرارت اتصال جوشکاری شده با

1 Scanning Electron Microscopy

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

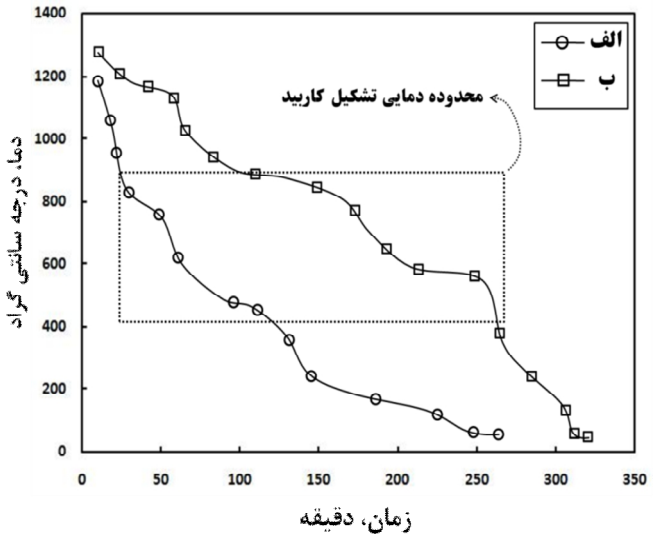
حرارت ورودی ۶/۷۵ kJ/mm داری ۱۰ درصد کاربید است. همچنین در هردو حالت حرارت ورودی، مناطق متأثر از حرارت و فلز جوش، از میزان کاربید بیشتری نسبت به فلز پایه برخوردارمی باشند.

از طرفی بررسی اندازه دانه‌های فلز جوش هردو اتصال توسط نرم افزار Image Analyzer که در شکل (۲) نشان داده شده است، نشان می‌دهد که با افزایش حرارت ورودی به قطعه کار از ۶/۷۵ و ۱۱/۲۵kJ/mm، اندازه ی دانه‌ها از ۱۳۳/۴ به 75.5µm کاهش می یابد. همچنین با توجه به شکل (۲) ملاحظه می گردد که با افزایش حررت ورودی، پهنای منطقه‌ی متأثر از حرارت افزایش یافته است که این مشاهدات با مشاهدات آقای ترحم‌نژاد و همکارانش[۱۱] در ارتباط با تأثیر حرارت ورودی بر پهنای منطقه‌ی متأثر از حرارت فولادهای زنگ نزن شباهت



شکل ۳- تعیین توزیع کاربید توسط نرم افزار Image J : الف) فلز پایه، ب) منطقه متأثر از حرارت ایجاد شده با حرارت ورودی ۶/۷۵ kJ/mm، پ) منطقه متأثر از حرارت ایجاد شده با حرارت ورودی ۱۱/۲۵ kJ/mm ت) فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۶/۷۵ kJ/mm، ث) فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۱۱/۲۵kJ/mm

دارد. از طرفی دیگر با افزایش حرارت ورودی، فلز جوش یک ساختار ریزدانه و حاوی مقادیر بالایی از کاربید را شامل می شود. زیرا در اثر افزایش حرارت ورودی، 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 C٪ ۱/۲ از ۴۰۰ تا ^{o}C ۹۰۰می باشد[۱۲]). بنابراین فلز جوش بدلیل طولانی تر شدن زمان سرد شدن، به کربن و عنصر کاربیدزایی مثل منگنز فرصت می دهد تا با همدیگر واکنش داده و کاربیدهای منگنز را تشکیل دهند. برای بررسی این موضوع، پس از پایان فرآیند جوشکاری، دمای فلز جوش در بازه‌های زمانی مختلف توسط دستگاه پیرومتر غیرتماسی پرتابل اندازه گیری شده و در شکل(۴) نشان داده شده است. در این شکل ملاحظه می‌گردد که با افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری، فلز جوش اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد نیاز به زمان بیشتری برای عبور از محدوده دمایی تشکیل کاربید دارد. لذا با افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری، زمان کافی برای تشکیل کاربیدهای منگنز در فلز جوش فرآهم خواهد شد. برای بررسی رسوبات تشکیل شده در فلز جوش از آنالیز XRD استفاده شده و نتایج آن در شکل (۵) گزارش شده ست. از شکل (۵) هم ملاحظه می شود که کاربیدهای تشکیل شده در فلز جوش، کاربیدهای منگنز از نوع Mn_3C بوده و فاز غالب (فاز زمینه)، آستنیت می باشد [۱۴] .



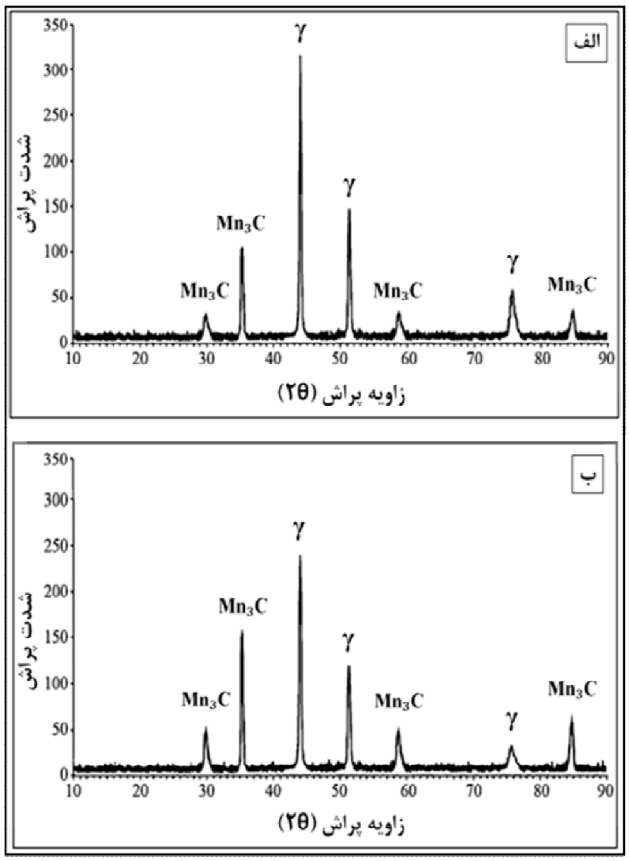
شکل ۴- نرخ سرد شدن فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با حرارت ورودی: الف) ۶/۷۵kJ/mm، ب) ۱۱/۲۵kJ/mm

۳-۲- آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک

در شکل (۶) نمودارهای مربوط به آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و در جدول (۴) نتایج مربوط به این آزمایش

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

نشان داده شده است. مشاهده می شود که در هر دو اتصال جوشکاری ایجاد شده با مقادیر مختلف حرارت ورودی، فلز پایه نسبت به فلز جوش از مقاومت خوردگی بالاتری برخوردار است. همچنین ملاحظه می گردد که بین هردو فلز جوش مورد آزمایش، فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی بیشتر (۱۱/۲۵kJ/mm)، مقاومت خوردگی کمتری دارد. زیرا همانطور که از تصاویر متالوگرافی مشاهده گردید (شکل (۲))، با افزایش حرارت ورودی به قطعه کار، میزان ذرات کاربیدی و تعداد مرزدانه‌ها در فلز جوش اتصال جوشکاری افزایش یافته بود. درواقع نتایج حاصل شده از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک ارتباط مستقیمی با تغییرات ریزساختاری (اندازه دانه و میزان ذرات کاربیدی) ایجاد شده در فلز جوش در اثر حرارت‌های ورودی مختلف به قطعه کار دارد.

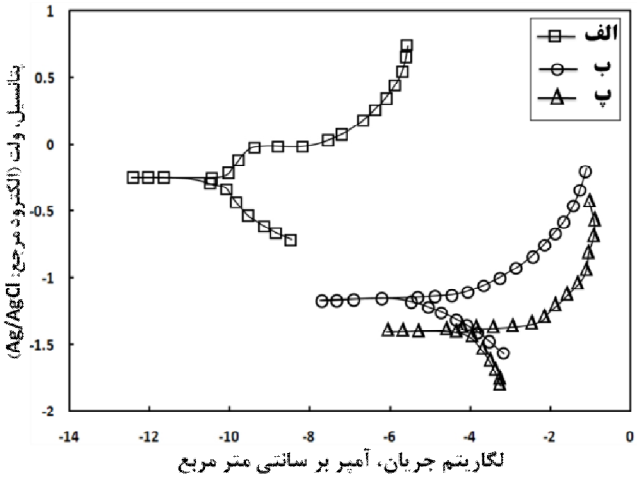


شکل ۵- الگوهای XRD از فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با حرارت ورودی : الف) ۶/۷۵kJ/mm، ب) ۱۱/۲۵kJ/mm

بنابراین زمانی که بدلیل افزایش حرارت ورودی از ۶/۷۵ به ۱۱/۲۵ /mm به قطعه کار در فرآیند جوشکاری، کاربیدها و مرزدانه‌ها به میزان بالایی در فلز جوش اتصال جوشکاری فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد تشکیل می شوند، به ۲ دلیل خوردگی تشدید می شود [۱۸] :

۱- مرزدانه‌ها محل‌های پرانرژی بوده که از نظر شیمیایی فعالتر هستند و تمایل به خوردگی را افزایش می دهند. ۲- زمانی که ذرات کاربیدی نجیب‌تر در کنار زمینه فعال قرار می گیرند، زوج الکترشیمیایی تشکیل داده و باعث تضعیف شدن مقاومت خوردگی خواهد شد.

در مجموع، نتایج آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک حکایت از این دارد که افزایش حرارت ورودی به قطعه کار در فرآیند جوشکاری SAMW می تواند مقاومت خوردگی اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد را کاهش دهد که این نتیجه‌گیری با نتایج حاصل از پژوهش آقای ترحم‌نژاد و همکارانش[۱۱] که بر روی فولادهای زنگ نزن دوفازی انجام دادند، شباهت دارد.



شکل ۶- نمودارهای مربوط به آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی در حداقل سه بار تکرارپذیری : الف) فلز پایه، ب) فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۶/۷۵kJ/mm ، پ) فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۱۱/۲۵ kJ/mm

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

عنصر	کربن	منگنز	نیکل	سیلیسیم	آهن
میزان	۰/۷۳	۱۴/۲۳	۳/۵۱	۰/۹۴	بقیه

۳-۳- آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

در شکل (۷) نمودارهای نایکویست مربوط به آزمایش

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول ۴- **متوسط نتایج آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با حداقل ۳ بار تکرار**

منطقه	جریان خوردگی، میکروآمپر بر سانتی متر مربع	پتانسیل خوردگی، میلی ولت (الکترود مرجع:Ag/AgCl)	مقاومت پلاریزاسیون، اهم. سانتی متر مربع	نرخ خوردگی، میلی متر بر سال
فلز پایه	۳۷ ± ۵	-۲۳۵ ± ۱۰	۲۹۸ ± ۵	۰/۳۶۲۱ ± ۰/۰۱
فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۶/۷۵ kJ/mm	۴۵۱۷ ± ۵	-۱۲۸۸ ± ۱۰	۳۹ ± ۵	۱/۸۳۸۸ ± ۰/۰۱
فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۱۱/۲۵ kJ/mm	۱۶۵۷۳ ± ۵	-۱۴۹۴ ± ۱۰	۲۸ ± ۵	۲/۸۵۴۱ ± ۰/۰۱

طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در محلول NaCl%5/3 را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل ملاحظه می شود، فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با حرارت ورودی ۶/۷۵kJ/mm نسبت به فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با حرارت ورودی۱۱/۲۵ kJ/mm، مقاومت امپدانس واقعی بیشتری دارند. همچنین در هردو مقدار حرارت ورودی ۶/۷۵ kJ/mmو ۱۱/۲۵ kJ/mm، فلز پایه نسبت به فلز جوش، مقاومت امپدانس واقعی بیشتری دارد. در مجموع با مقایسه نمودارهای نایکویست در شکل (۷)، مشاهده می شود که قطر نیم دایره نمودارهای نایکویست که نمادی از مقاومت پلاریزاسیون است، برای فلز پایه نسبت به فلز جوش در هر دو حالت حرارت ورودی بیشتر است. همچنین نتایج مقاومت خوردگی حاصل شده از آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی با نتایج آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک همخوانی دارند.

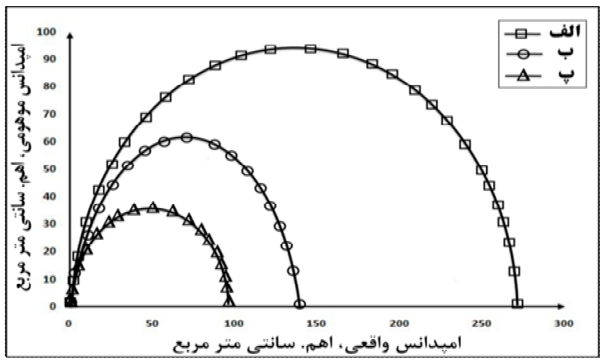
در شکل (۸) مدار معادل مورد استفاده برای محاسبه‌ی پارامترهای طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نشان داده شده است[۲۰] . مدار معادل نشان داده شده متشکل از یک مقاومت محلول (Rs)، المان ثابت فازی (CPE) و مقاومت انتقال بار (Rct) می‌باشد. جدول (۵) نتایج EIS را با توجه به مدار معادل نشان داده شده در شکل (۸) نشان می‌دهد. در این جدول هم مشاهده می‌شود که در هردو حالت جوشکاری با حرارت ورودی ۶/۷۵ kJ/mmو ۱۱/۲۵ kJ/mm، فلز پایه نسبت به فلز جوش مقاومت خوردگی بالاتری دارد. همچنین از این جدول ملاحظه می‌شود که با افزایش حرارت ورودی از ۶/۷۵ به ۱۱/۲۵ kJ/mm، مقاومت خوردگی فلز جوش اتصال جوشکاری کاهش یافته است. دلیل این امر آن است که با افزایش حرارت ورودی به قطعه کار که منجر به ریزدانگی، افزایش تعداد مرزدانه ها و میزان کاربیدها شده بود، شرایط برای تشدید خوردگی موضعی فرآهم شده است. تشدید خوردگی موضعی در فلز جوش اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد بدلیل افزایش میزان کاربیدها و تعداد مرزدانه‌ها با نتایج حاصل از پژوهش آقای سبزی و معینی‌فر شباهت دارد[۲] . آقای سبزی و معینی‌فر پیش از این گزارش داده بودند که افزودن کروم به ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد بدلیل افزایش دادن میزان کاربیدهای کمپلکس و به تبع آن افزایش تعداد مرزدانه‌ها منجر به تشدید کردن خوردگی موضعی در این فولاد می شود.

۳-۴- مورفولوژی خوردگی نمونه‌ها

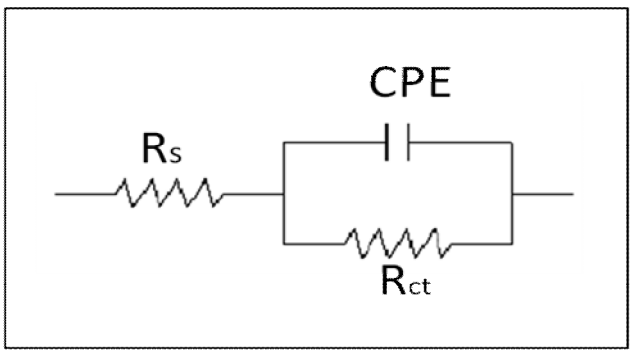
جهت بررسی تأثیر حرارت ورودی فرآیند جوشکاری SMAW بر مقاومت خوردگی اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد، پس از پایان آزمایش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک از سطوح خورده شده‌ی فلزات جوش و فلز پایه توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تصاویری تهیه شده و در شکل (۹) نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود، در سطح خوردگی فلز جوش اتصال جوشکاری شده با حرارت ورودی

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

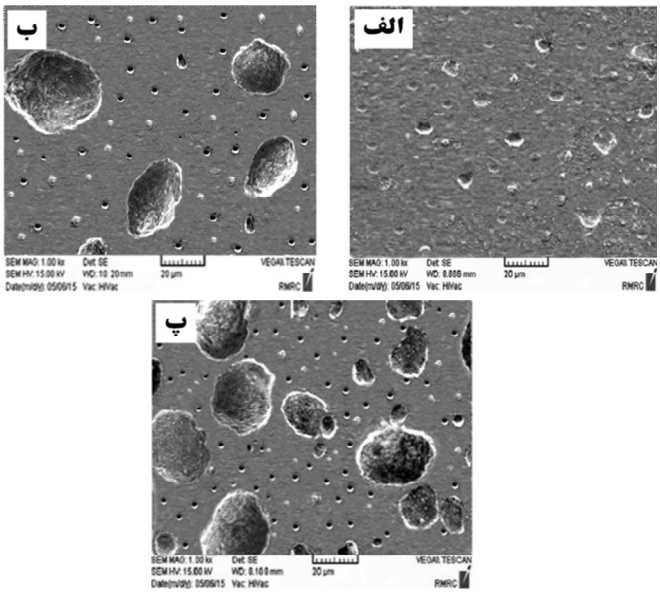
۱۱/۲۵ kJ/mm نسبت به سطح خوردگی فلز جوش اتصال جوشکاری شده با حرارت ورودی ۶/۷۵ kJ/mm یکسری حفرات درشت در سطح مشاهده می شود. چون با افزایش حرارت ورودی به قطعه کار در فرآیند جوشکاری، مقدار ذرات کاربیدی و تعداد مرزدانه‌ها در فلز جوش بیشتر شده و حضور مقادیر بالای ذرات کاربیدی به تشکیل میکروپیل‌ها و تشدید خوردگی موضعی میکروگالوانیکی کمک کرده است. (ذرات کاربیدی نقش کاتد و زمینه‌ی آستنیتی نقش آند را در خوردگی موضعی میکروگالوانیکی ایفا می کنند[۱۸و۲۱]). 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.



شکل ۷-نمودار نایکویست مربوط به آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در حداقل سه بار تکرارپذیری: الف) فلز پایه، ب) فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۶/۷۵kJ/mm ، پ) فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۱۱/۲۵kJ/mm



شکل ۸-مدار معادل مورد استفاده برای محاسبه پارامترهای طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی



شکل ۹- تصاویر SEM از سطح خوردگی: الف) فلز پایه، ب) فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۶/۷۵ J/mm، پ) فلز جوش ایجادشده با حرارت ورودی ۱۱/۲۵kJ/mm

در واقع با بررسی‌های سطوح خوردگی مشخص شد که خسارات خوردگی در فلز جوش اتصال جوشکاری فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد به شکل حفره‌هایی می باشد که تعداد و عمق این حفره‌ها با افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری SMAW، افزایش یافته است. از طرفی هم با مقایسه‌ی سطح خوردگی فلز پایه با سطح خوردگی هردو فلز جوش، ملاحظه می گردد که سطح فلز پایه دچار خورگی یکنواخت و کمتری شده است که با نتایج حاصل از آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک همخوانی دارد.

۴- نتیجه گیری

با بررسی آزمایش‌های خوردگی، بررسی‌های ریزساختاری، الگوهای XRD و مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌توان نتیجه گرفت که:

- مشاهدات میکروسکوپ نوری و الگوهای XRD دلالت بر افزایش میزان کاربیدهای منگنز (C3Mn) و افزایش تعداد مرزدانه‌ها در فلز جوش اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد در اثر

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول ۵- پارامتر های EIS برای فلز پایه و فلز جوش هردو اتصال

منطقه	مقاومت محلول، اهم. سانتی متر مربع	ظرفیت خازنی، میکروفارادی بر سانتی متر مربع	مقاومت انتقال بار، اهم. سانتی متر مربع
فلز پایه	۰/۰۲۱۴	۵۳ / ۵۱۴۲	۲۷۸/۳
فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۶/۷۵ kJ/mm	۰/۰۲۱۱	۳۴ / ۵۴۱۲	۱۴۲/۴
فلز جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۱۱/۲۵ kJ/mm	۰/۰۲۱۲	۲۹ / ۸۵۱۴	۹۶/۱

افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری داشتند. همچنین در هر حرارت ورودی، ریزساختار متشکل از زمینه‌ی آستنیتی و مقادیر مختلفی از کاربید منگنز بود.

- هرچقدر حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری بیشتر باشد، فلز جوش اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد هم مقاومت خوردگی کمتر و استعداد به خوردگی موضعی میکروگالوانیکی بیشتری را از خود نشان می دهد. زیرا در اثر افزایش حرارت ورودی، عوامل تشدید کننده‌ی خوردگی موضعی (کاربیدها و مرزدانه‌ها) در فلز جوش اتصال جوشکاری افزایش یافته بود.

- در هر حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری، فلز پایه نسبت به فلز جوش اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد مقاومت خوردگی بیشتری داشت.

- با بررسی مورفولوژی خوردگی مشخص شد که خسارات خوردگی در فلز جوش اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد به شکل حفره‌هایی می باشد که تعداد و عمق این حفره‌ها با افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری افزایش یافته بود.

مراجع

1. Subramanya, D.K., Swansiger, A. E. and Avery, H.S., "Austenitic Manganese Steels", ASM Metals Handbook, 10th ed., Vol.1, pp.822-840, 1991.

۲.سبزی، م. و معینی فر، ص.، "بررسی تأثیر عناصر آلیاژی آلومینیوم و کروم بر رفتار الکتروشیمیایی فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد"، مجله علوم و مهندسی خوردگی،دوره ۵، شماره ۵، ص ۲۸-۱۹، ۱۳۹۴.

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 ۴۵ – ۵۴، بهار 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.Grajcar, A., Krukiewicz, W. and Kołodziej, S., "Corrosion behaviour of plastically deformed high-Mn austenitic steels", Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 43, pp. 228 – 235, 2010.

8.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.

9.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.

10.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 .

۱۱.ترحم نژاد، م.ع.، دهملائی، ر. و معینی فر، ص.، "بررسی تأثیر حرارت ورودی فرآیند GTAW بر خوردگی اتصالات جوش فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵"، مجله مواد نوین، دوره ۵، شماره ۱، ص. ۱۱۰– ۹۵، ۱۳۹۳.

۱۲.مرعشی، م.، "متالورژی کاربردی فولادها"، جلد دوم ، چاپ سوم ، انتشارات آزاده ، تهران، ۱۳۸۵.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

13.Mendez, J. and et al., "Weldability of austenitic manganese steel", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 153-154, pp. 596-602, 2004.

14.Curiel-Reyna, E. and et al., "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 .

15.Curiel-Reyna, E. and et al., "Effect of carbide precipitation on the structure and hardness in the heat-affected zone of Hadfield steel after post-cooling treatments", Materials and Manufacturing Processes, Vol. 23, No. 1,pp. 14-20, 2007.

16.Annual book of ASTM standards, "ASTM 128 A / 128 M, Standard specification for steel castings, austenitic manganese", ASTM International, vol. 1, 1980 .

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

۱۸. پیرون، د.، " الکتروشیمی خوردگی"، م.ع. گلعذار (مترجم)، دانشگاه صنعتی اصفهان، مرکز نشر، اصفهان، ۱۳۸۷.

19.Lee, T.K., and Choi, C.S., "Driving Force for $\gamma \rightarrow \varepsilon$ Martensitic Transformation and Stacking Fault Energy of γ in Fe-Mn Binary System", Metallurgical and Material Transaction A, Vol. 31A, pp. 355-360, 2000.

20.Hong, J.H. and et al., "Corrosion behaviour of copper containing low alloy steels in sulphuric acid", Corrosion Science, Vol. 54, pp. 174–182, 2012.

۲۱.فرزام، م.، "مهندسی خوردگی و حفاظت از فلزات"، چاپ اول، موسسه چاپ و انتشارات یادواره کتاب، تهران، ۱۳۷۸.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]