

بررسی نقش آلومینیوم در استعداد به خوردگی موضعی میکروگالوانیکی منطقه ذوب در اتصالات جوش فولاد هادفیلد

مسعود سبزی*
مربی، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
زهره بلک
استادیار، گروه مواد و متالورژی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

چکیده

در این پژوهش، تأثیر آلومینیوم بر مقاومت خوردگی منطقه ذوب اتصالات جوش فولاد هادفیلد مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا ۴ عدد ورق آستنیت شده (دو ورق بدون آلومینیوم و دو ورق حاوی ۱/۷ درصد وزنی آلومینیوم) به ضخامت ۲mm از فولاد هادفیلد تهیه شده و سپس برای جوشکاری از فرآیند SMAW استفاده گردید. سپس برای بررسی رفتار خوردگی منطقه ذوب هردو اتصال جوشکاری شده از روش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم استفاده شد. همچنین برای بررسی ریزساختار فلز جوش در اتصالات جوشکاری شده از میکروسکوپ نوری و برای تعیین مکانیسم خوردگی از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. نتایج آزمایش‌های خوردگی نشان داد که منطقه ذوب اتصال جوشکاری ورق‌های حاوی آلومینیوم، مقاومت خوردگی بیشتری دارند. زیرا آلومینیوم باعث افزایش حلالیت کربن در فاز آستنیت شده بود و عوامل تشدید کننده خوردگی موضعی میکروگالوانیکی نظیر کاربیدها و مرزدهانه‌ها را کاهش داده بود. اما براساس آنچه که به وضوح در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی قابل مشاهده بود، به کارگیری طرح اتصال حاوی آلومینیوم نسبت به طرح اتصال بدون آلومینیوم منجر به تبدیل مکانیسم خوردگی فلز جوش از خوردگی یکنواخت به خوردگی موضعی میکروگالوانیکی در اتصالات جوش فولاد هادفیلد گردیده است. **واژه‌های کلیدی:** فولاد هادفیلد، رفتار خوردگی، اتصالات جوشکاری، فلز جوش، ریزساختار.

Investigation on Role of Aluminum on the Susceptibility to Localized Micro-Galvanic Corrosion of Fusion Zone in the Hadfield Steel Weld Joints

M. Sabzi
Z. Balak
Young Researchers and Elite Club, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran
Department of Materials and Metallurgical, College of Technical, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Abstract

In this study, the effect of Al on the corrosion resistance of Hadfield steel weld joints' fusion zone was investigated. For this purpose, 4 austenitized sheets (two sheets without Al and two sheets containing 1.7wt. %Al) with thickness 2mm prepared from Hadfield steel and then SMAW process was used for welding. Then potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy methods were used to evaluate corrosion behavior of welded joints' fusion zone in the 3.5wt. %NaCl solution. The evaluation of the microstructures of weld metal in welding joints were conducted by optical microscopy and the corrosion mechanism were determined by scanning electron microscopy examination. The result of corrosion tests indicated that welded joints' fusion zone of Al containing plates were more corrosion resistant. Because Al addition increased the solubility of carbon in austenite phase and as a result factors enhancing localized micro-galvanic corrosion such as grain boundaries and carbides were reduced. However as clearly was visible in scanning electron microscopy images, using joints design containing Al in comparison with joints design without Al led to changed weld metal corrosion mechanism from uniform corrosion to localized micro-galvanic corrosion in the Hadfield steel weld joints.

Keywords: Hadfield steel, corrosion behavior, welding joints, weld metal, microstructure.

۱- مقدمه

سختی در این فولاد نتایج بسیار مثبتی به جای گذاشته است [۳]. اگرچه این عنصر با ایجاد کاربیدهای پایدار، باعث افزایش سختی و بهبود مقاومت سایشی فولاد هادفیلد شده [۵ و ۴] ولی از طرفی هم با ایجاد کاربیدهای TiC، باعث کاهش انعطاف‌پذیری آن می‌شود [۶]. در تحقیقات دیگری اسری و استاوا و داس^۲ [۷]، گزارش نمودند که با طراحی کامپوزیت‌های شامل زمینه‌ای از فولاد هادفیلد و ذرات تقویت کننده کاربید تیتانیم، می‌توان مقاومت به سایش فولاد هادفیلد را بهبود بخشید. در همین زمینه، اسری و استاوا و همکارانش [۸]، به بررسی تأثیر ذرات کاربید تیتانیم بر رفتار خوردگی کامپوزیت‌های با زمینه فولاد هادفیلد پرداختند. این محققان نشان دادند که با افزایش میزان کاربید تیتانیم، مقاومت خوردگی کامپوزیت مذکور کاهش می‌یابد. یکی از دلایل عمده استفاده از عنصر آلومینیوم در فولادها، اثر اکسیژن‌زدایی این عنصر می‌باشد. مجیدی و همکارانش [۹] به بررسی

اولین فولاد آستنیتی منگنزداری که دارای حدود ۱/۲ درصد وزنی کربن و ۱۲ درصد وزنی منگنز بود، توسط رابرت هادفیلد^۱ در سال ۱۸۸۲ میلادی تهیه شد. فولاد هادفیلد یک آلیاژ غیرمغناطیسی تشکیل شده از آهن، کربن ۱/۴-۱ درصد وزنی و منگنز ۱۴-۱۰ درصد وزنی می‌باشد که از قابلیت کارسختی بالایی برخوردار بوده و دارای مقاومت بسیار خوبی در برابر سایش است. این فولاد با استحکام بالا، انعطاف‌پذیری خوب و مقاومت عالی در برابر سایش بصورت گسترده در صنایع مختلف نظیر صنایع سیمان، معدن، راهسازی و راه‌آهن بکار گرفته می‌شود [۲-۱]. در موارد خاص بنا به کاربرد آن، عناصر آلیاژی دیگری نیز به این فولاد اضافه می‌شود. یکی از این عناصر تیتانیم می‌باشد. استفاده از عنصر تیتانیم جهت ریزدانه‌کردن ساختار و افزایش

² Srivastava and Das

¹ Robert Hadfield
* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mas.metallurg88@gmail.com

تأثیر آلومینیوم بر خواص و ریزساختار فولاد منگنزدار هادفیلد پرداختند و دریافتند که افزودن آلومینیوم به فولاد هادفیلد، منجر به کاهش کاربیدهای مرزانه‌ای در ساختار ریختگی شده و مورفولوژی کاربیدها را از حالت پیوسته خارج کرده و به شکل منقطع تبدیل می‌کند. همچنین بررسی‌ها نشان داده است که افزایش مقدار آلومینیوم در فولادهای منگنزدار، نیروی محرکه لازم برای انجام استحاله آستنیت به مارتزیت را در این فولادها افزایش داده و از طرفی دمای تشکیل مارتزیت را کاهش می‌دهد [۱۰]. یکی از راه‌های افزایش سختی و مقاومت به سایش فولاد هادفیلد، افزایش میزان کربن در ترکیب شیمیایی این فولاد می‌باشد. اما افزایش کربن برابر با افزایش میزان کاربیدهای منگنز در ریزساختار این فولاد است و به تبع آن چقرمگی این فولاد کاهش می‌یابد. یکی از راه‌های افزایش کربن، افزایش حد حلالیت آن در فاز آستنیت است. تحقیقات انجام گرفته بر تأثیر عناصر آلیاژی بر اکتیویته کربن نشان داد که آلومینیوم این امر را محقق می‌سازد [۱۲ و ۱۱].

بررسی‌ها نشان داده است که پارامترهای فرآیند جوشکاری تأثیر زیادی بر رفتار خوردگی و ریزساختار اتصالات جوشکاری فولادها دارد [۱۴ و ۱۳]. یکی از این پارامترها میزان گرمای ورودی است که در حین فرآیند جوشکاری به قطعات وارد می‌شود [۱۵]. در تحقیقاتی که توسط سبزی و همکارانش صورت گرفته [۱۶]، گزارش شده است که افزایش گرمای ورودی در فرآیند جوشکاری ورق‌های فولاد هادفیلد، منجر به کاهش مقاومت خوردگی اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد می‌شود. این محققین دلیل این امر را افزایش تشکیل کاربیدهای پیوسته و خوشه‌ای شکل در اثر افزایش گرمای ورودی در فرآیند جوشکاری بیان نموده‌اند. در تحقیقاتی دیگری که توسط ترجم‌زاد و همکارانش انجام شده [۱۷]، گزارش شده است که افزایش گرمای ورودی در فرآیند جوشکاری ورق‌های فولاد دوفازی ۲۲۰۵ منجر به کاهش مقاومت خوردگی فلز جوش می‌شود. این محققین دلیل این امر را کاهش درصد حجمی فريت فلز جوش در اثر افزایش گرمای ورودی در فرآیند جوشکاری توجیه نموده‌اند.

مهمترین و ابتدایی‌ترین مسئله در جوشکاری فولاد هادفیلد، گرما دادن قطعه یا قطعات کار در حین جوشکاری یا قبل از آن است که برای جلوگیری از تشکیل ذرات کاربیدی باید در حداقل مقدار خود باشد. در هر حال ایجاد فاز کاربید در منطقه جوش قابل قبول بوده و اغلب فلز منطقه جوش بدلیل میزان کاربید بیشتر، استحکام بالاتر و چقرمگی کمتری نسبت به فلز پایه دارد. مرسوم‌ترین روشی که برای جوشکاری فولاد هادفیلد مورد استفاده در خطوط ریلی بکار گرفته می‌شود، روش جوشکاری با الکتروود دستی (SMAW) بوده و برای جوشکاری این فولادها الکترودهای مناسب حاوی منگنز بالا به صورت تجاری موجود هستند [۱۶]. با توجه به حساسیت فولاد هادفیلد به گرما، تحقیقات زیادی در رابطه با جوش پذیری و قابلیت جوشکاری این فولاد با الکترودهای مختلف صورت گرفته است [۱۸]. کوریل-رینا^۲ و همکارانش [۱۹] به بررسی تأثیر نرخ خنک شدن بر ساختار و سختی منطقه‌ای متأثر از گرما پرداختند. این محققان گزارش نمودند که با کاهش نرخ خنک شدن، میزان میکروسختی منطقه‌ای متأثر از گرما

افزایش می‌یابد. در تحقیقات دیگری که در رابطه با جوشکاری فولاد هادفیلد صورت گرفته است، محققان [۲۰] گزارش دادند که کاربیدهای رسوب کرده در منطقه‌ای متأثر از گرما این فولاد از نوع Mn_7C_3 و $Mn_{23}C_6$ می‌باشند. در همین رابطه سبزی و همکارانش [۲۱] به بررسی تأثیر نرخ سرد شدن بر مقاومت خوردگی منطقه ذوب اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد پرداختند و گزارش دادند که افزایش نرخ سرد شدن منجر به افزایش مقاومت خوردگی منطقه ذوب اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد می‌شود.

با توجه 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 آلومینیوم بر مقاومت خوردگی منطقه ذوب اتصالات جوش فولاد هادفیلد پرداخته شود که در پژوهش‌های پیشین به این موضوع پرداخته نشده بود.

۲- روش تحقیق

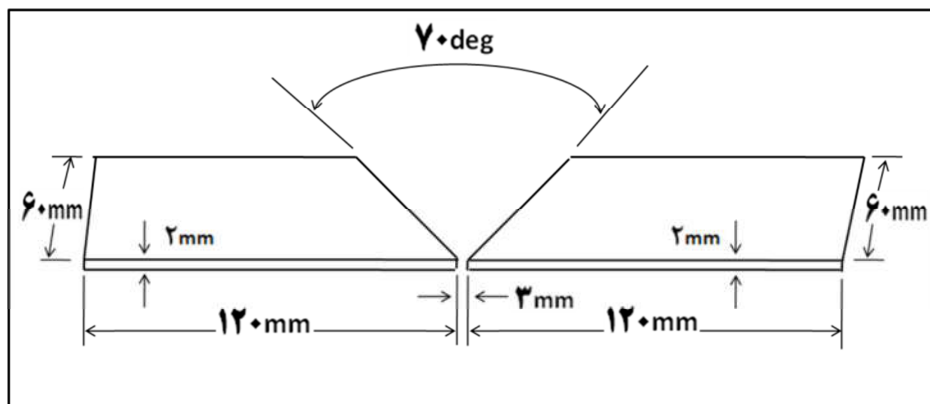
فولاد مورد استفاده در این پژوهش، فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد ASTM A-۱۲۸ [۲۲] بود. برای این منظور، ابتدا ۴ عدد ورق آستنیت شده از فولاد هادفیلد به ضخامت ۲mm تهیه شده و سپس ترکیب شیمیایی آنها توسط دستگاه طیف‌سنجی نشری جرقه‌ای بررسی شد و در جدول ۱ گزارش داده شده است. سپس ورق‌های تهیه شده توسط دستگاه فرز با زاویه ۳۵ درجه پخ زده شدند تا آماده جوشکاری شوند. طرحواره 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 [۲۳] بهره گرفته شد.

¹ Shielded Metal Arc Welding

² Curriel-Reyna

جدول ۱- آنالیز شیمیایی ورق‌های فولاد هادفیلد تهیه شده برحسب درصدوزنی

عنصر	کربن	منگنز	فسفر	سیلیسیم	آلومینیوم	آهن
استاندارد ASTM A-۱۲۸	۱٫۰۵ - ۱٫۳۵	۱۰ - ۱۴	۰٫۰۷max	۱max	-	بقیه
ورق‌های بدون آلومینیوم	۱٫۲۵	۱۲٫۷۲	۰٫۰۲۲	۰٫۵۲	-	بقیه
ورق‌های حاوی آلومینیوم	۱٫۲۴	۱۲٫۸۳	۰٫۰۲۳	۰٫۵۱	۱٫۶۸	بقیه



شکل ۱- طرحواره از طرح اتصال

کار برحسب کیلوژول بر میلی‌متر، V ولتاژ برحسب ولت، I شدت جریان برحسب آمپر و S سرعت جوشکاری برحسب میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد. گرمای ورودی محاسبه شده مطابق با فرمول ۱ و کلیه 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 بررسی شده و در جدول ۳ گزارش شده است.

سپس برای جوشکاری ورق‌های تهیه شده از روش جوشکاری با الکترود دستی (SMAW) با مقدار گرمای ورودی ۶۷۵ kJ/mm و همچنین از الکترودهای منگنزدار با کد AWS A5.13 استفاده شد. برای محاسبه گرمای ورودی به قطعه کار از رابطه‌ی زیر استفاده گردید [۲۴]:

$$Q = \eta (60VI / 1000S) \quad (۱)$$

که در این فرمول η ضریب ثابتی بوده و برای روش جوشکاری با الکترود دستی برابر با ۰٫۷۵ است. همچنین Q حرارت ورودی به قطعه

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

فرآیند جوشکاری	سرعت (میلی متر بر دقیقه)	جریان (آمپر)	ولتاژ (ولت)	تعداد پاس	حرارت ورودی (کیلوژول بر میلی متر)
SMAW	۲۰	۱۵۰	۲۰	۴	۶۷۵

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

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

این منطقه از نرم‌افزار Image Analyzer استفاده گردید. همچنین جهت بررسی رسوبات تشکیل شده در فلز جوش هردو اتصال از پراش پرتو ایکس (XRD^1) استفاده گردید.

برای بررسی ریزساختار فلز جوش اتصالات جوشکاری شده، ورق‌های اتصال داده شده با استفاده از سمباده‌های مختلف به روش تر آماده‌سازی شد و سپس برای اچ کردن آنها از محلول نایتال ۲ درصد استفاده گردید و در نهایت ریزساختارهای حاصل توسط میکروسکوپ نوری بررسی شد. به منظور اندازه‌گیری میزان رسوبات در فلز جوش اتصالات جوشکاری از نرم‌افزار Image J و برای بررسی اندازه دانه‌های

¹ X-Ray Diffraction (XRD)

برای تهیه نمونه‌های موردنیاز برای انجام آزمایش‌های خوردگی، نمونه‌ای به ابعاد $18 \times 18 \times 2 \text{ mm}^3$ 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 نمونه‌ی تهیه شده توسط سیم مسی به گیره‌ی دستگاه متصل گردید و طرف دیگر که حاوی فلز جوش بود، به درون محلول $\text{NaCl}/3\%$ فرو برده شد. به منظور ارزیابی رفتار خوردگی منطقه ذوب اتصالات جوش فولاد هادفیلد در محلول $\text{NaCl}/3\%$ ، 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 دامنه‌ی 10 mV در محدوده فرکانسی $10 \text{ Hz} - 10 \text{ kHz}$ انجام شد. سپس آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محدوده $10 \text{ mV} - 400 \text{ mV}$ تا 100 mV نسبت به OCP^۱ و با نرخ روشی 10 V/s انجام شد. برای محاسبه‌ی مقاومت پلاریزاسیون از رابطه‌ی (۲) استفاده شد [۲۵].

$$R_p = (1 \div 2.3 i_{corr}) \cdot [(B_a \cdot B_c) \div (B_a + B_c)] \quad (2)$$

در این رابطه R_p مقاومت پلاریزاسیون، i_{cor} جریان خوردگی، B_a شیب ناحیه آندی و B_c شیب ناحیه کاتدی می‌باشد. همچنین برای اندازه‌گیری نرخ خوردگی فلز جوش از رابطه‌ی (۳) استفاده شد [۲۵].

$$m_{py} = \frac{534 \text{ W}}{D_{AT}} \quad (3)$$

در این رابطه mpy نرخ خوردگی در سال، W تفاوت وزن در قبل و بعد از آزمایش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، D چگالی، A سطح تماس نمونه (الکترو د کار) با محلول و T زمان غوطه‌وری می‌باشد. لازم به ذکر است که آزمایش‌های خوردگی با استفاده از پیل استاندارد سه الکترودی، شامل الکترو د مرجع Ag/AgCl ، الکترو د کمکی پلاتین و همچنین از نمونه‌های تهیه شده از اتصالات جوشکاری شده به عنوان الکترو د کار، انجام شدند و سل مذکور به دستگاه پتانسیواستات - گالوانواستات (Autolab) مدل PGStat ۳۰۲N متصل گردید. هر دو آزمایش خوردگی مورد استفاده، در دمای 25°C انجام شده و برای اطمینان از به دست آمدن نتایج دقیق، هر آزمایش خوردگی سه بار تکرار شد. به منظور بررسی تأثیر آلومینیوم بر استعداد به خوردگی موضعی فلز جوش اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد، پس از پایان آزمایش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، از سطوح خورده شده‌ی فلز جوش هردو اتصال توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM^1) تصاویری تهیه شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشاهدات ریزساختاری

شکل ۲. تصاویر متالوگرافی تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری از منطقه ذوب هر دو اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در هر دو اتصال، منطقه‌ی ذوب شامل زمینه‌ی آستنیتی به همراه مقادیر مختلفی از رسوبات می‌باشند. دلیل

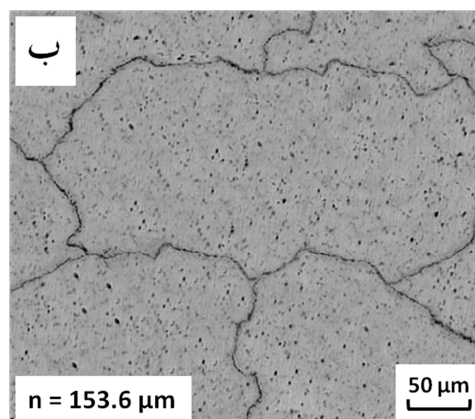
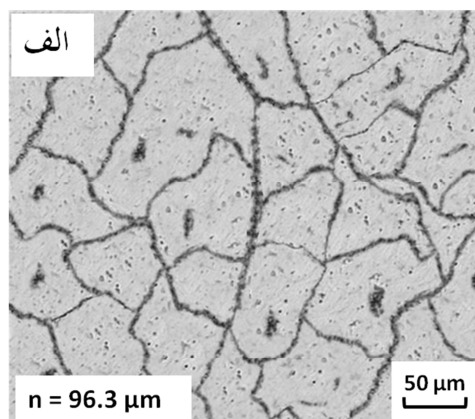
زمینه‌ی آستنیتی را می‌توان به حضور مقادیر بالای کربن و منگنز اثبات نمود. همچنین منگنز از تبدیل آستنیت به مارتنزیت در دماهای پایین جلوگیری می‌کند. لی و چوی^[۲۶]، گزارش نمودند که با افزایش منگنز در آلیاژهای آهن-منگنز، دمای شروع مارتنزیت به میزان بسیار زیادی کاهش می‌یابد، بطوریکه در آلیاژهای پرمنگنز یک زمینه‌ی کاملاً آستنیتی را می‌توان مشاهده نمود. از تصاویر متالوگرافی مشاهده می‌شود که منطقه ذوب اتصال جوشکاری ایجاد شده توسط ورق‌های حاوی آلومینیوم نسبت به منطقه ذوب اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های بدون آلومینیوم دارای میزان رسوبات کمتر و اندازه دانه‌های درشت‌تری می‌باشد. در اتصال جوشکاری ایجاد شده توسط ورق‌های حاوی آلومینیوم، آلومینیوم باعث افزایش حلالیت کربن در فاز آستنیت شده و این امر موجب کاهش تشکیل ذرات کاربیدی و افزایش اندازه‌ی دانه‌ها شده است. نتایج حاصل شده در این پژوهش در اثر افزودن آلومینیوم با نتایج زودیماس^[۱۱]، مجیدی [۹] و همکارانشان مطابقت دارد. زودیماس و همکارانش گزارش نمودند که افزودن آلومینیوم به ترکیب شیمیایی فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد منجر به کاهش ضریب اکتیویته کربن در آستنیت و افزایش حلالیت کربن در زمینه آستنیت این فولاد می‌شود. مجیدی و همکارانش نشان دادند که افزودن ۲/۳ درصدوزنی آلومینیوم به ترکیب شیمیایی فولاد آستنیتی منگنزدار منجر به افزایش اندازه دانه‌های آستنیت شده که اندازه‌ی این دانه‌ها با انجام عملیات آستنیت‌ه هم تغییری نمی‌کند.

برای بررسی میزان کاراییها، میزان ذرات کارایی بوسیله نرم‌افزار Image J برای منطقه ذوب هردو اتصال جوشکاری اندازه‌گیری شده و در جدول ۴ گزارش داده شده است. در این جدول هم مشاهده می‌شود که فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های حاوی آلومینیوم دارای ۸ درصد رسوب می‌باشد درحالیکه فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های بدون آلومینیوم دارای ۲۱ درصد رسوب است.

از طرفی بررسی اندازه دانه‌های فلز جوش هردو اتصال توسط نرم‌افزار Image Analyzer که در شکل ۲ نشان داده شده است، نشان می‌دهد که حضور آلومینیوم در ورق‌های فولاد هادفیلد منجر به افزایش اندازه دانه‌های منطقه ذوب اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد از ۱۳۳/۴ به ۱۷۹/۸ μm شده است.

برای بررسی رسوبات تشکیل شده در فلز جوش هردو اتصال جوشکاری از آنالیز XRD استفاده شده و نتایج آن در شکل ۳ گزارش شده است. از شکل ۳ هم ملاحظه می‌شود که کاربیدهای تشکیل شده در فلز جوش هر دو اتصال، کاربیدهای منگنز از نوع Mn_7C_3 بوده و فاز غالب (فاز زمینه)، آستنیت می‌باشد [۱۳]. همچنین از الگوهای پراش پرتو X ملاحظه می‌گردد که در فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های حاوی آلومینیوم ترکیب بین فلزی Fe_3Al تشکیل شده و شدت پراش مربوط به فاز کاربیدهای منگنز کاهش یافته که نشان از کاهش تشکیل این کاربیدها در این منطقه دارد.

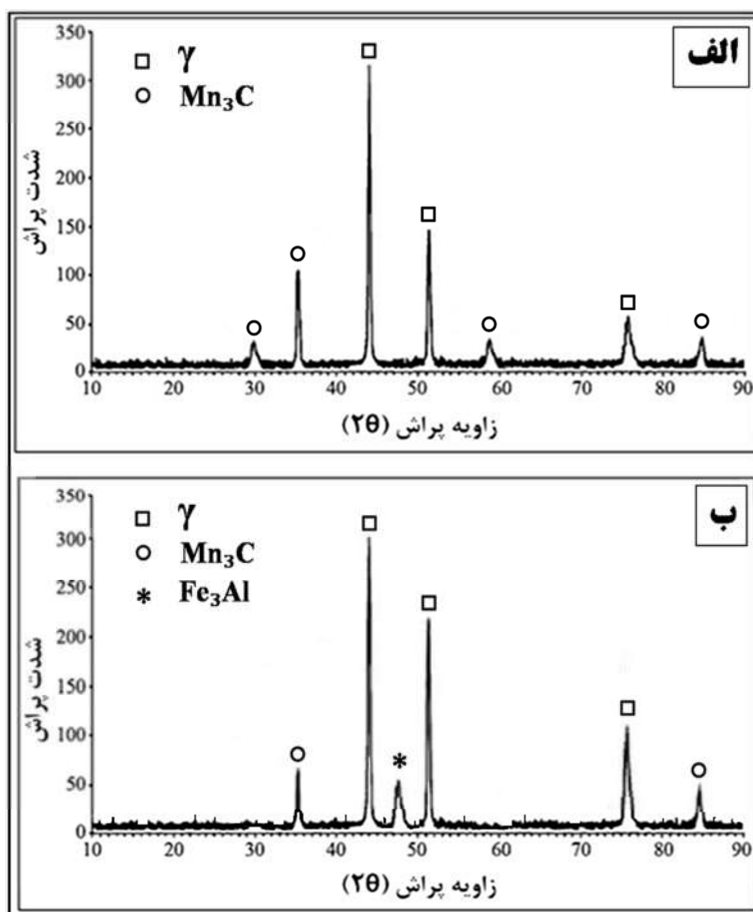
³ Lee and Choi⁴ Zuidema¹ Open circuit potential² Scanning Electron Microscopy (SEM)



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی ۱۰۰: الف) منطقه ذوب اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های بدون آلومینیوم، ب) منطقه ذوب اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های حاوی آلومینیوم

جدول ۴- توزیع کاربید در مناطق ذوب تعیین شده توسط نرم افزار Image J

منطقه ذوب اتصال جوشکاری	میزان رسوبات، درصد	انحراف معیار
ایجاد شده با ورق‌های حاوی آلومینیوم	۸	۰/۴۱
ایجاد شده با ورق‌های بدون آلومینیوم	۲۱	۱/۰۸



شکل ۳- الگوهای XRD از فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با: (الف) ورق‌های بدون آلومینیوم، (ب) ورق‌های حاوی آلومینیوم

۳-۲- آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک

در شکل ۴ نمودارهای مربوط به آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و در جدول ۵ نتایج مربوط به این آزمایش نشان داده شده است. از این شکل مشاهده می‌شود که منطقه ذوب اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های حاوی آلومینیوم نسبت به منطقه ذوب اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های بدون آلومینیوم از مقاومت خوردگی بالاتر، پتانسیل خوردگی نجیب‌تر و نرخ خوردگی کمتری برخوردار است. زیرا همانطور که از تصاویر متالوگرافی مشاهده گردید (شکل ۲)، افزودن ۱۷ درصدوزنی آلومینیوم به ترکیب شیمیایی ورق‌های فولاد هادفیلد منجر به کاهش تشکیل میزان رسوبات کربیدی و تعداد مرزدهانه‌ها در فلز جوش اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد شده بود. درواقع نتایج حاصل شده از آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک ارتباط مستقیمی با تغییرات ریزساختاری (اندازه دانه و میزان ذرات کربیدی) ایجاد شده در فلز جوش در اثر افزودن آلومینیوم به ورق‌های فولاد هادفیلد دارد.

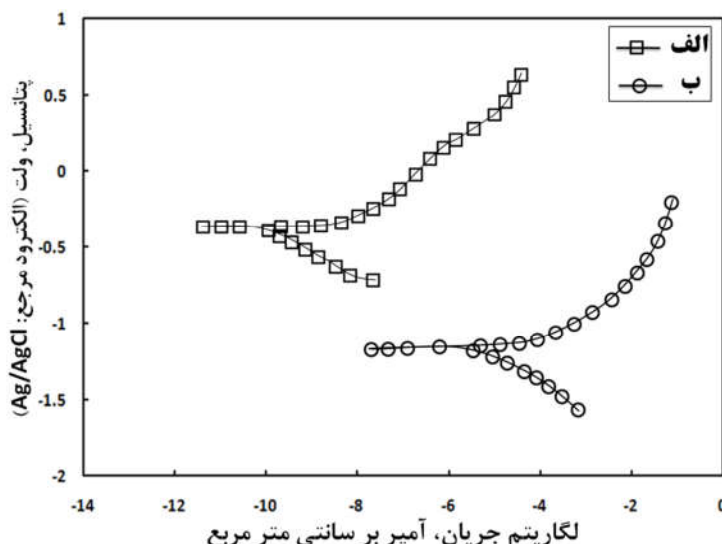
بنابراین زمانی که بدلیل افزودن آلومینیوم به ورق‌های فولاد هادفیلد، تشکیل کربیدها و مرزدهانه‌ها محدود می‌شود، به ۲ دلیل

استعداد به خوردگی موضعی در منطقه ذوب اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد کاهش می‌یابد [۲۵]:

۱- مرزدهانه‌ها محل‌های پراثری بوده که از نظر شیمیایی فعال‌تر هستند و تمایل به خوردگی موضعی را افزایش می‌دهند.

۲- زمانی که ذرات کربیدی نجیب‌تر در کنار زمینه فعال قرار می‌گیرند، زوج الکتروشیمیایی تشکیل داده و باعث تضعیف شدن مقاومت خوردگی خواهد شد.

در مجموع، نتایج آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک حکایت از این دارد که افزودن آلومینیوم به ترکیب شیمیایی ورق‌های فولاد هادفیلد استعداد به خوردگی موضعی را در منطقه ذوب اتصال جوش این فولاد را کاهش می‌دهد. نتایج حاصل شده از آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با نتایج حاصل از پژوهش آقای سبزی و همکارانش [۲۱ و ۱۶] شباهت دارد. سبزی و همکارانش پیش از این گزارش داده بودند که حضور شبکه پیوسته‌ی کربید منگنز در مرزدهانه‌های فلز جوش اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد منجر به کاهش مقاومت خوردگی اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد می‌شود.



شکل ۴- نمودار های مربوط به آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در حداقل سه بار تکرار پذیری: الف) منطقه ذوب اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق های حاوی آلومینیوم، ب) منطقه ذوب اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق های بدون آلومینیوم

جدول ۵- نتایج آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در حداقل سه بار تکرار پذیری

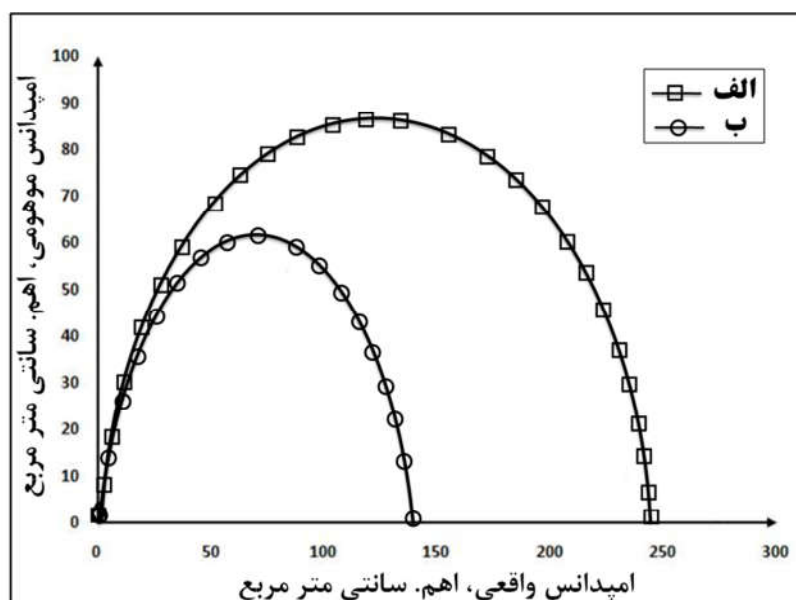
منطقه ذوب اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق های حاوی آلومینیوم	جریان خوردگی (میکروآمپر بر سانتی متر مربع)	پتانسیل خوردگی (میلی ولت: الکترو د مرجع Ag/AgCl)	مقاومت پلاریزاسیون (اهم، سانتی متر مربع)	نرخ خوردگی (میلی متر بر سال)
ورق های حاوی آلومینیوم	58 ± 5	-483 ± 10	221 ± 5	0.3701 ± 0.01
ورق های بدون آلومینیوم	4517 ± 5	-1288 ± 10	39 ± 5	0.9683 ± 0.01

۳-۳- آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

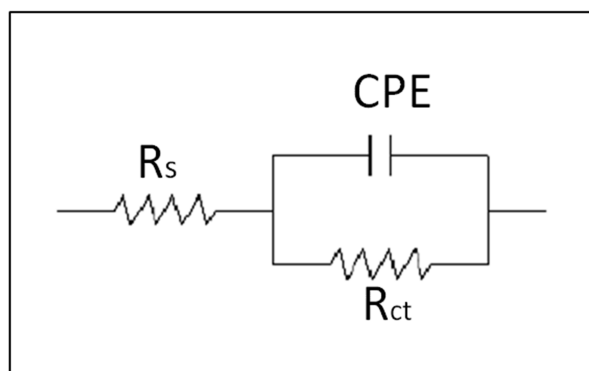
شکل ۵ نمودارهای نایکویست مربوط به آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در محلول ۳.۵٪ NaCl را نشان می دهد. همانطور که از این شکل ملاحظه می شود، فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق های حاوی آلومینیوم نسبت به فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق های بدون آلومینیوم، مقاومت امپدانس واقعی بیشتری دارد. در مجموع با مقایسه نمودارهای نایکویست در شکل ۵، مشاهده می شود که قطر نیم دایره نمودارهای نایکویست که نمادی از مقاومت پلاریزاسیون است، برای فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق های حاوی آلومینیوم بیشتر است. همچنین نتایج مقاومت خوردگی حاصل شده از آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی با نتایج آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک همخوانی دارند.

در شکل ۶ مدار معادل مورد استفاده برای محاسبه پارامترهای طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نشان داده شده است [۲۷]. مدار معادل نشان داده شده متشکل از یک مقاومت محلول (R_s)، المان ثابت فازی (CPE) و مقاومت انتقال بار (R_{ct}) می باشد.

جدول ۶ نتایج EIS را با توجه به مدار معادل نشان داده شده در شکل ۶ نشان می دهد. در این جدول هم مشاهده می شود که فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق های حاوی آلومینیوم نسبت به فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق های بدون آلومینیوم، مقاومت خوردگی بالاتری دارد. دلیل این امر آن است که با افزودن آلومینیوم به ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد و به تبع آن کاهش تشکیل رسوبات و مرزدانه ها، شرایط برای بهبود مقاومت خوردگی منطقه ذوب اتصالات جوشکاری شده فولاد هادفیلد مهیا شده است (باتوجه به کاهش عوامل تشدید کننده خوردگی موضعی). تشدید خوردگی موضعی در فلز جوش اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد بدلیل افزایش میزان کاربیدها و تعداد مرزدانه ها با نتایج حاصل از پژوهش سبزی و همکارانش شباهت دارد [۲۱ و ۱۶]. سبزی و همکارانش پیش از این گزارش داده بودند که افزایش گرمای ورودی در فرآیند جوشکاری ورق های فولاد هادفیلد منجر به کاهش مقاومت خوردگی منطقه ذوب اتصال مذکور می شود. این محققین دلیل این رخداد را افزایش تشکیل میزان رسوبات منطقه ذوب در اثر افزایش گرمای ورودی اثبات نمودند.



شکل ۵- نمودار نایکویست مربوط به آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در حداقل سه بار تکرارپذیری: الف) منطقه ذوب اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های حاوی آلومینیوم، ب) منطقه ذوب اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های بدون آلومینیوم



شکل ۶- مدار معادل مورد استفاده برای محاسبه پارامترهای طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی.
جدول (۶) پارامترهای EIS برای منطقه ذوب هر دو اتصال

منطقه ذوب اتصال جوشکاری ایجاد شده با	مقاومت محلول (اهم، سانتی متر مربع)	ظرفیت خازنی (میکروفارادی بر سانتی متر مربع)	مقاومت انتقال بار (اهم، سانتی متر مربع)
ورق‌های حاوی آلومینیوم	۰٫۰۲۰۷	۴۶٫۵۴۹۱	۲۴۷٫۸۳
ورق‌های بدون آلومینیوم	۰٫۰۲۰۹	۲۹٫۲۴۵۳	۱۴۱٫۲۸

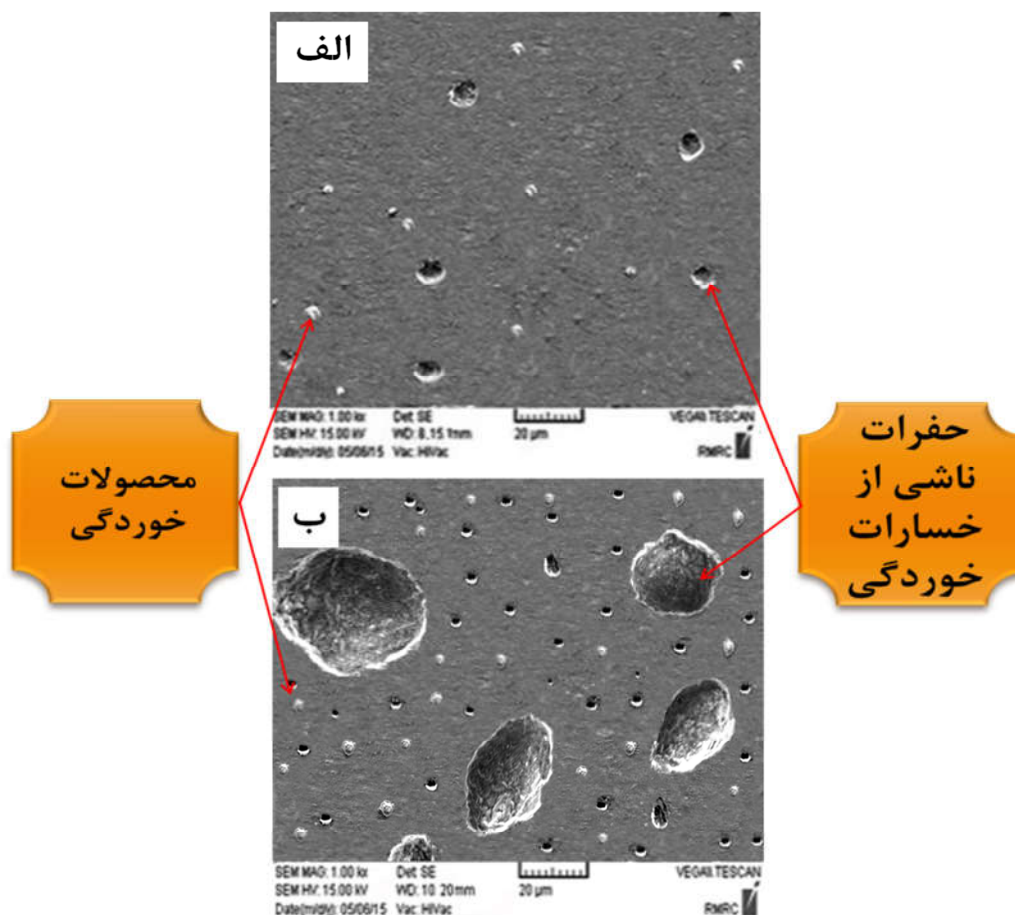
۴-۳- مورفولوژی خوردگی فلز جوش

جهت بررسی تأثیر آلومینیوم بر استعداد به خوردگی موضعی میکروگالوانیکی فلز جوش اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد، پس از پایان آزمایش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک از سطوح خورده شده‌ی فلزات جوش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تصاویری تهیه شده و در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود، در سطح خوردگی فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های بدون آلومینیوم نسبت به سطح خوردگی فلز جوش

اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های حاوی آلومینیوم، یکسری حفرات درشت در سطح مشاهده می‌شود. چون در فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های بدون آلومینیوم، ذرات کاربیدی بصورت شبکه‌ای پیوسته در مرزخانه‌ها تجمع یافته و حالت خوشه‌ای شکل به خود گرفته‌اند و همین کاربیدها از حرکت مرزخانه‌ها جلوگیری کرده و منجر به کوچک شدن دانه‌ها و افزایش تعداد مرزخانه‌ها شده‌اند. لذا حضور شبکه‌ی پیوسته‌ی کاربید و تعداد بالای مرزخانه در فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های بدون آلومینیوم، شرایط را برای تشکیل میکروپیل‌ها و تشدید خوردگی موضعی میکروگالوانیکی فراهم

خوردگی از موضعی به یکنواخت در فلز جوش اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد دارد. در مجموع میزان خوردگی سطح (تعداد و عمق حفره‌های ایجاد شده) در فلز جوش هر دو اتصال جوشکاری، با نتایج مقاومت خوردگی و نرخ خوردگی حاصل شده از آزمایش‌های خوردگی مطابقت دارد.

نموده است. (ذرات کاربیدی نقش کاتد و زمینه‌ی آستنیتی نقش آند را در خوردگی موضعی میکروگالوانیکی ایفا می‌کنند [۲۱]). در طرف دیگر در سطح خورده شده‌ی فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های حاوی آلومینیوم خبری از حفرات درشت نیست و تعدادی حفره کوچک و پراکنده در سطح دیده می‌شود که نشان از تغییر شکل



شکل ۷- تصاویر SEM از سطح خوردگی: الف) منطقه ذوب اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های حاوی آلومینیوم، ب) منطقه ذوب اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های بدون آلومینیوم

۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر به بررسی تأثیر آلومینیوم در استعداد به خوردگی موضعی میکروگالوانیکی منطقه ذوب در اتصالات جوش فولاد هادفیلد پرداخته شد. ابتدا ۴ عدد ورق آستنیت‌شده (دو ورق بدون آلومینیوم و دو ورق حاوی ۱/۷٪Al) به ضخامت ۲mm از فولاد هادفیلد تهیه شد. سپس برای جوشکاری آنها از فرآیند SMAW استفاده گردید. در مرحله‌ی بعد، آزمایش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، مطالعات ریزساختاری و بررسی مورفولوژی خوردگی توسط SEM بر روی فلز جوش هر دو اتصال جوشکاری شده انجام شد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که:

- ۱- مشاهدات میکروسکوپ نوری نشان داد که حضور آلومینیوم در ترکیب شیمیایی ورق‌های فولاد هادفیلد منجر به افزایش حلالیت کربن در فاز آستنیت، کاهش میزان رسوبات و افزایش اندازه دانه‌ها در منطقه ذوب اتصالات جوشکاری می‌گردد.
- ۲- الگوهای حاصل از آنالیز XRD، بیانگر تشکیل فاز آستنیت و کاربیدهای Mn_2C در فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های هادفیلد بدون آلومینیوم و همچنین تشکیل فاز آستنیت، کاربیدهای Mn_2C و ترکیب بین‌فلزی Fe_3Al در فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های هادفیلد حاوی آلومینیوم بودند. همچنین الگوهای XRD، مشاهدات میکروسکوپ نوری در خصوص کاهش تشکیل رسوبات در فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های هادفیلد حاوی آلومینیوم را تأیید نمود.

۳- نتایج آزمایش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی دلالت بر مقاومت خوردگی بالاتر منطقه ذوب اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های حاوی آلومینیوم نسبت به منطقه ذوب اتصال جوشکاری ایجاد شده با ورق‌های بدون آلومینیوم داشت. زیرا آلومینیوم عوامل تشدید کننده‌ی خوردگی را در منطقه ذوب کاهش داده بود.

۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مورفولوژی خوردگی فلز جوش اتصالات جوشکاری شده نشان داد که آلومینیوم، استعداد به خوردگی موضعی میکروگالوانیکی منطقه ذوب اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد را از بین می‌برد.

۵- نمادها

B _a	شیب ناحیه آندی
B _c	شیب ناحیه کاتدی
Q	گرمای ورودی (kJ/mm)
η	ضریب ثابت جوشکاری
V	ولتاژ (V)
I	شدت جریان (A)
S	سرعت جوشکاری (mm/min)
R _p	مقاومت پلاریزاسیون (Ω.cm ²)
i _{corr}	جریان خوردگی (μA/cm ²)

۶- مراجع

- [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, Proc. Conf. of Metal 2012, Brno, Czech Republic, 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, Metall. Res. Technol., Vol. 111, pp. 375 - 382, 2014.
- [5] Magdaluyo E.R. and et al., Gouging Abrasion Resistance of Austenitic Manganese Steel with Varying Titanium, Proc. of the World Congress on Engineering 2015, London, English, pp. 1-4, 2015.
- [۶] نجف آبادی و،. مناجاتی زاده ح. و امینی ک.، بررسی تأثیر تیتانیوم بر بهبود خواص فولاد هادفیلد ASTM A128-C، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۷، شماره اول، صفحات ۵۴ - ۴۵، ۱۳۹۲.
- [7] Srivastava A.K. and Das K., In-situ Synthesis and Characterization of TiC-Reinforced Hadfield Manganese Austenitic Steel Matrix Composite", Iron and Steel Institute of Japan Int., Vol.49, No.9, pp.1372-1377, 2009.
- [8] Srivastava A.K. and et al., Corrosion Behaviour of TiC-Reinforced Hadfield Manganese Austenitic Steel Matrix In-Situ Composites, O. J. Metal, Vol. 5, No. 2, pp. 11-17, 2015.
- [۹] مجیدی س.، خیراندیش ش.، عباسی م.، اثر آلومینیوم بر ریز ساختار و خواص مکانیکی فولاد پرمنگنز آستنیتی Fe-18Mn-0.6C، مجله مهندسی متالورژی و مواد، سال ۲۷، شماره ۲، ۱۳۹۵.
- [10] Tian X. and Zhang Y., Mechanism on the effect of Al upon the γ→ε martensite transformation in the Fe-Mn alloys, J. Mater. Sci. Technol., Vol. 12, No. 5, pp. 369-372, 1996.
- [11] Zuidema B.K., Subramanyam D.K. and Leslie W.C., The effect of Aluminium on the work hardening and wear resistance of Hadfield manganese steel, Metall. Trans. A, Vol. 18A, pp. 1629-1639, 1987.
- [12] Abbasi M. and et al., On the comparison of the abrasive wear behavior of Aluminum alloyed and standard Hadfield steels, Wear, Vol. 268, pp. 202-207, 2010.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [۱۶] 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.
- [۱۷] ترجم‌نژاد م. ع.، دهملائی ر. و معینی‌فر ص.، بررسی تأثیر حرارت ورودی فرآیند GTAW بر خوردگی اتصالات جوش فولاد زنگ نزن دوقازی ۲۲۰۵، مجله مواد نوین، دوره ۵، شماره ۱، ص. ۱۱۰ - ۹۵، ۱۳۹۳.
- [18] Mendez J. and et al., Weldability of austenitic manganese steel, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 153-154, pp. 596-602, 2004.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [۲۱] 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، آذر ۱۳۹۴.
- [22] Annual book of ASTM 128 A / 128 M, Standard specification for steel castings, austenitic manganese, Engineered Casting Solutions Since, Vol. 1, pp. 1-3, 1980.
- [23] Annual book of AWS standards, Standard Welding Procedure Specification, Shielded Metal Arc Welding of Carbon Steel, AWS International, 2005.
- [24] Annual book of AWS standards, Welding Science and Technology, 9th Edition, Vol. 1, 2015.
- [25] Lim M. L. C., Kelly R. G. and Scully J. R., Overview of Intergranular Corrosion Mechanisms, Phenomenological Observations, and Modeling of AA5083, Corrosion, Vol. 72, No. 2, pp. 198-220, 2016.
- [26] Lee Y. K. and Choi C. S., Driving force for γ→ε martensitic transformation and stacking fault energy of γ in Fe-Mn binary system", Metall. Mater. Trans. A, Vol. 31, No. 2, pp. 355-360, 2000.
- [27] Cao F., Shi Z., Song G. L., Liu M., Dargusch M. S., Atrons A., Influence of hot rolling on the corrosion behavior of several Mg-X alloys, Corrosion Science, Vol. 90, pp. 176-191, 2015.