

بررسی تأثیر هندسه‌ی طرح اتصال بر تحولات متالورژیکی فلز جوش و مودهای شکست در اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد ASTM A-128

مسعود سبزی*
رقيه کلانتری پور
احمد منشی

مربی، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دزفول، ایران
کارشناس، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دزفول، ایران
استاد، گروه مواد و متالورژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران

چکیده

در این پژوهش، به بررسی تأثیر هندسه‌ی طرح اتصال بر تحولات متالورژیکی و مود شکست در اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد پرداخته شده است. برای این منظور، ابتدا ۴ عدد ورق آستنیت‌شده به ضخامت ۲mm از فولاد هادفیلد تهیه شد. سپس طرح اتصال با دو پخ V و X شکل تهیه گردید و برای جوشکاری آنها از فرآیند SMAW استفاده شد. برای بررسی خواص مکانیکی اتصالات از آزمایش‌های کشش تک‌محوره، ضربه شاری و ریزسختی استفاده گردید. همچنین برای بررسی ریزساختار فلز جوش در اتصالات جوش شده از میکروسکوپ نوری و برای تعیین مود شکست از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. بررسی‌ها نشان داد که با به کارگیری طرح اتصال حاوی پخ V شکل نسبت به طرح اتصال حاوی پخ X شکل در اتصالات جوش فولاد هادفیلد، ریزساختار دانه‌ریزتر شده و رسوبات کاربیدی زیاد شده است. بنابراین افزایش ریزسختی، استحکام تسلیم و استحکام کششی ملاحظه گردید. ولی انرژی ضربه و کرنش شکست کاهش یافته است. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی دلالت بر وقوع شکست نرم در هر دو اتصال تهیه شده با پخ X شکل و V شکل داشت. اما براساس آنچه که به وضوح در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی قابل مشاهده بود، به کارگیری طرح اتصال حاوی پخ X شکل نسبت به طرح اتصال حاوی پخ V شکل منجر به وقوع شکستی نرم‌تر در اتصالات جوش فولاد هادفیلد شده است. واژه‌های کلیدی: فولاد هادفیلد، مود شکست، اتصالات جوشکاری، فلز جوش، ریزساختار.

Investigation on Effects of Joints Design Geometry on the Weld Metal Metallurgical Transformations and Fracture Modes in the ASTM A-128 Hadfield Steel Welding Joints

M. Sabzi
R. Kalantaripour
A. Monshi

Young Researchers and Elite Club, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran
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, effects of joints design geometry on the weld metal metallurgical transformations and fracture mode in the Hadfield steel welding joints were investigated. For this purpose, initially 4 austenitized sheets with thickness 2 mm were prepared from Hadfield steel. Then joints design with two chamfered V and X forms were prepared and SMAW process was used for welding. The joints mechanical properties were examined by uniaxial tensile machine, charpy impact test and microhardness measuring test. The evaluation of the microstructures of weld metal in welding joints were conducted by optical microscopy and the fracture modes were determined by scanning electron microscopy examination. The results indicated that with using joints design containing chamfered V-shape in comparison with joints design containing chamfered X-shape in the Hadfield steel welded joints, resulted microstructures consisted from smaller grains and more carbide precipitates. Thus higher microhardness and higher yield and tensile strengths were observed. But impact energy and fracture strain was reduced. Also, scanning electron microscopy images indicated the occurrence of ductile fractures in both joints prepared with X and V-shaped chamfered. However as clearly was visible in scanning electron microscopy images, using joints design containing X-shaped chamfered in comparison with joints design containing V-shaped chamfered led to occurrence of more ductile fractures in the Hadfield steel weld joints.

Keywords: Hadfield steel, fracture mode, welding joints, weld metal, microstructure.

۱- مقدمه

دیگری نیز به این فولاد اضافه می‌شود. یکی از این عناصر تیتانیوم می‌باشد. استفاده از عنصر تیتانیوم جهت ریزدانه‌کردن ساختار و افزایش 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 [۷]، گزارش نمودند که با طراحی کامپوزیت‌های شامل زمینه‌ای از فولاد هادفیلد و ذرات تقویت کننده کاربید تیتانیوم، می‌توان مقاومت به سایش فولاد هادفیلد را بهبود بخشید. در همین زمینه، اسری و استاوا و همکارانش [۸]، به بررسی

اولین فولاد آستنیتی منگنزدار که دارای حدود ۱/۲ درصد وزنی کربن و ۱۲ درصد وزنی منگنز بود، توسط رابرت هادفیلد در سال ۱۸۸۲ میلادی تهیه شد. فولاد هادفیلد یک آلیاژ غیرمغناطیسی تشکیل شده از آهن، کربن ۱-۱/۴ 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

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

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۶/۲۳

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. بررسی‌ها نشان داده است که پارامترهای فرآیند جوشکاری تأثیر زیادی بر رفتار خوردگی و ریزساختار اتصالات جوشکاری فولادها دارد [۱۰ و ۹]. یکی از این پارامترها میزان گرمای ورودی است که در حین فرآیند جوشکاری به قطعات وارد می‌شود [۱۱]. در تحقیقاتی که توسط سبزی و همکارانش صورت گرفته [۱۲]، 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 ترجم‌نژاد و همکارانش انجام شده [۱۳]، 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 فریت فلز جوش در اثر افزایش گرمای ورودی در فرآیند جوشکاری توجیه نموده‌اند.

در بسیاری از کاربردها، فولاد 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 می‌شود. مهمترین و ابتدایی‌ترین مسئله در جوشکاری فولاد هادفیلد، گرم کردن 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. به دلیل حساس بودن فولاد آستنیتی منگن‌دار هادفیلد به گرما، باید جوشکاری آن با دقت کافی صورت گیرد. مرسوم‌ترین روشی که برای جوشکاری فولاد هادفیلد مورد استفاده در خطوط ریلی بکار گرفته می‌شود، روش جوشکاری با الکترودهی دستی (SMAW) بوده و برای جوشکاری این فولادها الکترودهای مناسب حاوی منگنز بالا به صورت تجاری موجود هستند [۱۴]. 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 [۱۵]. کوریل-رینا و همکارانش [۱۶] به بررسی تأثیر نرخ خنک شدن بر ساختار و سختی منطقه‌ی متأثر از گرما پرداختند. این محققان گزارش نمودند که با کاهش نرخ خنک شدن، میزان میکروسختی منطقه‌ی متأثر از گرما افزایش می‌یابد. 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 گرما می‌شود. در تحقیقات دیگری که در رابطه با جوشکاری فولاد هادفیلد صورت گرفته است، محققان [۱۷] گزارش دادند که کاربیدهای رسوب کرده در منطقه‌ی متأثر از گرما این فولاد از نوع $Mn_{23}C_6$ و Mn_7C_3 می‌باشند. در همین رابطه سبزی و همکارانش [۱۸] 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 هندسه‌ی طرح اتصال بر تحولات متالورژیکی فلز جوش و مود شکست در اتصالات جوشکاری 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 منگن‌دار هادفیلد ASTM A-۱۲۸ [۱۹] 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 به دو صورت V و X شکل پخ زده شدند تا آماده جوشکاری شوند. طرحواره هر دو 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 و X شکل، از استاندارد AWS B2.1 [۲۰] بهره گرفته شد.

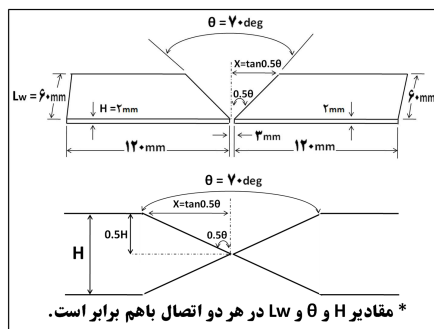
سپس برای جوشکاری ورق‌های تهیه شده از روش جوشکاری با الکترودهی دستی (SMAW) با مقدار حرارت ورودی ۵۴kJ/mm و همچنین از الکترودهای منگن‌دار با کد AWS A5.13 استفاده شد. برای محاسبه‌ی گرمای ورودی به قطعه کار از رابطه‌ی زیر استفاده گردید [۲۱]:

$$Q = \eta (60VI / 1000S) \quad (1)$$

که در این فرمول η ضریب ثابتی بوده و برای روش جوشکاری با الکترودهی دستی برابر با ۰/۷۵ است. همچنین Q گرمای ورودی به قطعه‌کار 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 رابطه (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 بررسی شده و در جدول ۳ گزارش شده است.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی ورق‌های فولاد هادفیلد تهیه شده برحسب در صدوزنی

عنصر	کربن	منگنز	فسفر	سیلیسیم	آهن
استاندارد ASTM A-۱۲۸	۱/۳۵ - ۱/۰۵	۱۴ - ۱۰	۰/۰۷max	۱max	بقیه
ورق‌های تهیه شده	۱/۲۵	۱۲/۷۲	۰/۰۲۲	۰/۵۲	بقیه



شکل ۱- طرحواره از طرح اتصال برای هر دو پخ X و V شکل

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

فرآیند جوشکاری	سرعت (میلی متر بر دقیقه)	جریان (آمپر)	ولتاژ (ولت)	تعداد پاس	گرمای ورودی (کیلوژول بر میلی متر)
SMAW	۲۵	۱۵۰	۲۰	۴	۵/۴

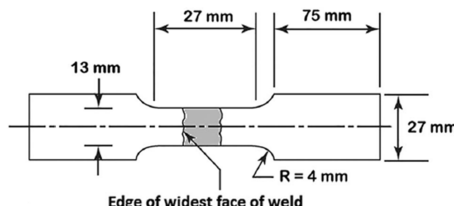
جدول ۳- آنالیز شیمیایی الکتروود مورد استفاده بر حسب درصد وزنی

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

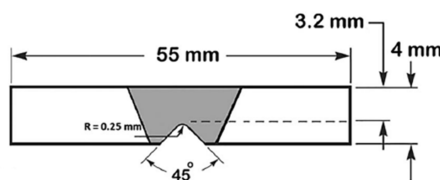
تراش CNC مطابق با استاندارد ASME Sec IX [۲۲] تهیه شدند (شکل ۲). همچنین نمونه‌های لازم برای آزمایش ضربه شاریپی مطابق با استاندارد AWS B4.0 [۲۳] توسط دستگاه تراش CNC تهیه گردید (شکل ۳). آزمایش کشش تک محوره توسط دستگاه SANTAM مدل ASTM-۴۰۰ در دمای اتاق و با نرخ کرنش S^{-1} انجام شد. همچنین آزمایش ضربه شاریپی توسط دستگاه SANTAM با ظرفیت ۲۰۰ ژول در دمای محیط انجام شد. از طرفی برای بررسی میکروسختی فلز جوش اتصالات جوشکاری شده، پس از پایان فرآیند جوشکاری، از فلز جوش اتصالات به روش ویکرز، سختی اندازه‌گیری 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 Analyzer و برای بررسی اندازه دانه‌های این منطقه از نرم‌افزار Image Analyzer استفاده گردید.

بعد از پایان فرآیند جوشکاری و هم‌دم شدن اتصالات جوشکاری با دمای محیط، نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش کشش، توسط دستگاه



شکل ۲- ابعاد نمونه‌ی کشش مطابق با استاندارد ASME Sec IX



شکل ۳- ابعاد نمونه‌ی ضربه مطابق با استاندارد AWS B4.0

جهت بررسی مود شکست در آزمایش کشش و ضربه، پس از پایان آزمایش‌های مذکور، از سطح شکست هر دو اتصال، توسط میکروسکوپ الکترونی روشی^۱ تصاویری تهیه گردید. همچنین جهت بررسی رسوبات تشکیل شده در فلز جوش هردو اتصال از آنالیز پراش پرتو اشعه ایکس (XRD^۲) استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشاهدات ریزساختاری

شکل ۴، تصاویر متالوگرافی تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری از فلز جوش هر دو اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در هر دو اتصال، فلز جوش 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 جوی [۲۴]، گزارش نمودند که با افزایش منگنز در آلیاژهای آهن- منگنز، دمای شروع مارتنزیت به میزان بسیار زیادی کاهش می‌یابد، بطوریکه در آلیاژهای پرمنگنز یک زمینه کاملاً آستنیتی را می‌توان مشاهده نمود. از تصاویر میکروسکوپ نوری مشاهده می‌شود که فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده توسط پخ X شکل نسبت به فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ V شکل، دارای میزان رسوب کمتر و اندازه دانه‌های درشت‌تری می‌باشد. بررسی اندازه دانه‌های فلز جوش هر دو اتصال توسط نرم‌افزار Image Analyzer که در شکل ۴ آورده شده است، نشان می‌دهد که استفاده از اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ V شکل نسبت به اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ X شکل منجر به کاهش اندازه دانه‌های فلز جوش از ۱۰۹٫۷ به ۸۸٫۵ μm شده است. زیرا اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ V شکل دارای میزان رسوب بیشتری بوده و ذرات رسوبی، ترکیبات سختی هستند که جلوی حرکت مرز دانه‌ها را گرفته و از رشد دانه‌های آستنیت جلوگیری می‌کنند.

درواقع در اتصال جوشکاری ایجاد شده توسط پخ X شکل، هندسه‌ی طرح اتصال منجر به کاهش تشکیل ذرات کاربیدی شده است. برای بررسی میزان کاربیدها، میزان ذرات کاربیدی بوسیله نرم‌افزار Image Analyzer برای فلز جوش هر دو 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 توسط پخ X شکل، دارای ۷٫۶ درصد رسوب می‌باشد درحالی‌که فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده توسط پخ V شکل، دارای ۱۹٫۳ درصد رسوب است.

برای بررسی این موضوع به محاسبه‌ی حجم فلز جوش در هر دو اتصال مورد آزمایش می‌پردازیم:

$$(V_{WM})_{V\text{-shaped chamfer}} = L_w \times H \times H \tan \frac{\theta}{2} = 60 \times 2 \times 2 \tan 35^\circ = 168 \text{mm}^3$$

$$(V_{WM})_{X\text{-shaped chamfer}} = 2 [L_w \times 0.5H \times 0.5H \tan \frac{\theta}{2}] = 2[60 \times 1 \times 1 \tan 35^\circ] = 84 \text{mm}^3$$

$$(V_{WM})_{X\text{-shaped chamfer}} \div (V_{WM})_{V\text{-shaped chamfer}} = 0.5$$

$$(V_{WM})_{V\text{-shaped chamfer}} = 2 (V_{WM})_{X\text{-shaped chamfer}}$$

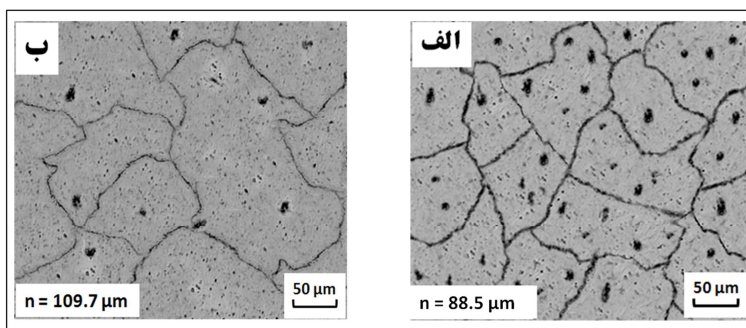
باتوجه به محاسبه‌ی حجم فلز جوش، مشاهده می‌گردد که حجم فلز جوش در اتصال جوشکاری ایجاد شده توسط پخ V شکل حدود ۲ برابر حجم فلز جوش در اتصال جوشکاری ایجاد شده توسط پخ X شکل است. لذا انتظار است که الکتروود مصرفی برای ایجاد اتصال با پخ V شکل نیز بیشتر باشد. درنتیجه هرچقدر ماده مصرفی برای ایجاد اتصال بیشتر باشد، دمای اتصال هم افزایش یافته و این امر منجر به افزایش تشکیل رسوبات کاربیدی در اتصالات جوش فولادهای پرکربن نظیر فولاد هادفیلد می‌شود [۱۸ و ۱۲].

بنابراین در اثر افزایش دمای اتصال جوش فولاد هادفیلد (بدلیل استفاده از طرح اتصال با پخ V شکل)، 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 ۱/۳٪C از ۴۰۰ تا ۹۰۰°C می‌باشد [۱۲]). بنابراین فلز جوش در اتصال ایجاد شده با پخ V شکل، بدلیل طولانی‌تر شدن زمان سرد شدن، به کربن و عنصر کاربیدزایی مثل منگنز فرصت می‌دهد 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 اندازه‌گیری شده و در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل ملاحظه می‌گردد که فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ V شکل نسبت به فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده توسط پخ X شکل، محدوده دمایی تشکیل کاربید را در مدت زمان بیشتری سپری می‌کند. درنتیجه در فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده توسط پخ V شکل، زمان بیشتری به عناصر کاربیدزا جهت تشکیل رسوبات کاربیدی و متعاقباً کاهش اندازه دانه‌های آستنیت داده شده است.

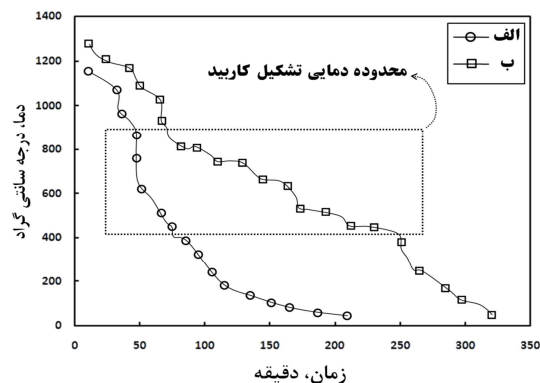
در مجموع تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری حکایت از این دارد که در اتصال جوشکاری تهیه شده توسط پخ X شکل نسبت به اتصال ایجاد شده با پخ V شکل، فلز جوش بدلیل کمتر بودن حجم جوش، دارای میزان کاربید کمتر و همچنین دارای اندازه دانه‌های آستنیت بزرگتری است.

1 Scanning Electron Microscopy (SEM)

2 X-Ray Diffraction (XRD)



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی ۱۰۰ از فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ: الف) شکل V، ب) شکل X



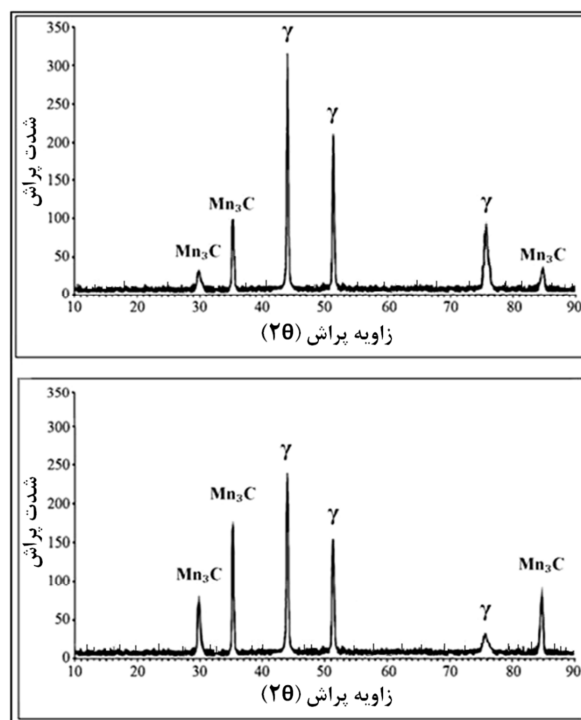
شکل ۵- نرخ سرد شدن فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ: الف) شکل X، ب) شکل V

جدول ۴- تعیین توزیع کاربید در فلز جوش اتصالات جوشکاری توسط نرم افزار Image J

میزان رسوب		فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده توسط
انحراف معیار	درصد	
۰٫۲۹	۷٫۶	پخ X شکل
۱٫۴۱	۱۹٫۳	پخ V شکل

نتایج حاصل شده از مشاهدات ریزساختار و آنالیز فازی در این پژوهش با نتایج کوریل-رینا [۱۷ و ۱۶]، سبزی [۱۸ و ۱۲] و همکارانشان شباهت دارد. این محققین در تحقیقات جداگانه‌ای گزارش دادند که افزایش دمای اتصالات جوشکاری منجر به افزایش میزان رسوبات کاربیدی و کاهش اندازه دانه‌های آستنیت در فلز جوش اتصالات جوشکاری فولاد آستنیتی منگ‌ن‌دار هادفیلد می‌شود.

برای بررسی رسوبات تشکیل شده در فلز جوش هر دو اتصال از آنالیز XRD استفاده شده و نتایج آن در شکل ۶ گزارش شده است. از شکل ۶ هم ملاحظه می‌شود که فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده توسط پخ X شکل نسبت به فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده توسط پخ V شکل، از میزان کاربید کمتری برخوردار است. همچنین کاربیدهای تشکیل شده در هر دو فلز جوش اتصال جوشکاری، کاربیدهای منگنز از نوع Mn_3C بوده و فاز غالب (فاز زمینه)، آستنیت می‌باشد [۱۸ و ۱۲].

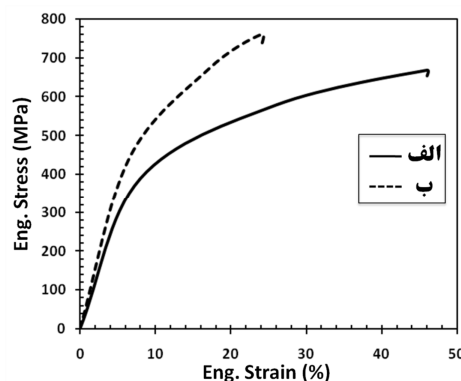


شکل ۶-الگوهای حاصل از آنالیز XRD از فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ: الف (X شکل، ب) V شکل

فلز جوش منجر به افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی شده [۲۵] و افزایش میزان ذرات کاربیدی منجر به کاهش انعطاف پذیری و کرنش شکست می‌گردد [۲۶]. درواقع با بکارگیری طرح اتصال حاوی پخ V شکل در فرآیند جوشکاری ورق‌های فولاد هادفیلد، اندازه‌ی دانه‌ها کوچکتر و تعداد مرزدانه‌ها بیشتر شده است. مرزدانه‌ها محل‌های پرانرژی بوده و نایجایی‌های متحرک در هنگام رسیدن به این مکان‌های پرانرژی متوقف شده و در پشت مرزدانه‌ها تجمع می‌کنند و همین امر منجر به افزایش استحکام می‌گردد [۲۶]. بنابراین بکارگیری طرح اتصال حاوی پخ V شکل در فرآیند جوشکاری با افزایش تعداد مرزدانه‌ها منجر به افزایش استحکام و با افزایش میزان کاربیدها منجر به کاهش کرنش شکست اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد گردیده است.

۳-۲- آزمایش کشش

در شکل ۷ نتایج مربوط به آزمایش کشش برای هر دو اتصال جوشکاری شده نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ V شکل نسبت به اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ X شکل، از استحکام تسلیم و کششی بالاتر و همچنین کرنش شکست کمتری برخوردار است. همانطور که از تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری ملاحظه گردید (شکل ۴)، با بکارگیری طرح اتصال حاوی پخ V شکل در فرآیند جوشکاری ورق‌های فولاد هادفیلد، میزان ذرات کاربیدی و اندازه‌ی دانه‌ها در فلز جوش بترتیب افزایش و کاهش یافته است. کوچک شدن اندازه دانه‌های



شکل ۷- نمودار تنش - کرنش مهندسی اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ: الف (X شکل، ب) V شکل

۳-۵- مود شکست اتصالات جوش در آزمایش کشش

پس از آزمایش کشش، از سطح شکست هر دو اتصال جوشکاری مورد آزمایش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تصاویری تهیه شده و این تصاویر در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل دیده می‌شود، هر دو اتصال جوشکاری ایجاد شده با طرح اتصال حاوی پخ X و V شکل دارای مشخصه‌ی شکست نرم (سطح دیمپلی^۱) می‌باشند. دلیل این امر آن است که زمینه‌ی غالب در هر دو اتصال آستنیت بوده و آستنیت هم یک فاز نرم می‌باشد. مکانیسم شکست نرم در آزمایش کشش مواد نرم، مکانیسم جواهرزنی، رشد و به هم پیوستن حفره‌ها است. این نوع شکست که به شکست مخروط - فنجان^۲ معروف است، مهمترین مکانیسم در شکست مواد نرم به شمار می‌آید. اما با مقایسه‌ی هر دو تصویر، مشاهده می‌شود که سطح شکست در اتصال جوشکاری ایجاد شده با طرح اتصال حاوی پخ X شکل نسبت به سطح شکست در اتصال جوشکاری ایجاد شده با طرح اتصال حاوی پخ V شکل، تعداد دیمپل بیشتری وجود داشته که علاوه بر تعداد بیشتر، دارای عمق بیشتری هم هستند که نشان از نرم‌تر بودن شکست در اتصال جوشکاری ایجاد شده با طرح اتصال حاوی پخ X شکل می‌باشد. با توجه به اینکه کاهش کسر حجمی ذرات رسوبی و پراکنده و افزایش فاصله‌ی این ذرات به عنوان یک فرآیند ذاتی در جهت چقرمه‌کردن آلیاژهای مهندسی عمل می‌کند [۲۷]، حال با مشاهده‌ی سطوح شکست اتصالات جوشکاری شده پس از آزمایش کشش ملاحظه می‌گردد که اتصال جوشکاری ایجاد شده با طرح اتصال حاوی پخ X شکل که دارای میزان ذرات رسوبی کمتری نسبت به اتصال جوشکاری ایجاد شده با طرح اتصال حاوی پخ V شکل است، دارای سطح شکستی نرم‌تر و با تعداد دیمپل بیشتر است که نشان از چقرمگی بالاتر اتصال جوشکاری ایجاد شده با طرح اتصال حاوی پخ X شکل دارد.

در مجموع مشاهدات سطوح شکست اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد پس از آزمایش کشش نشان از چقرمگی و انعطاف پذیری بالاتر اتصال جوشکاری ایجاد شده با طرح اتصال حاوی پخ X شکل دارد که این مشاهدات با نتایج حاصل از تحقیقات آقای کوریل-رینا [۱۷ و ۱۶]، سبزی [۱۸ و ۱۲] و همکارانشان شباهت دارد. همچنین شکست‌نگاری اتصالات پس از آزمایش کشش نشان می‌دهد که میکرو دیمپل‌های ثانویه در فضای بین دیمپل‌های اولیه حضور دارند که می‌توانند شکست را به تأخیر بباندازند. این میکرو دیمپل‌ها در اثر برهمکنش و برخورد لایه‌های میکرو دوقلویی و نیز ایجاد نانورسوبات کاربیدی در اثر پیرسازی کرنشی دینامیکی می‌توانند ایجاد شوند [۳۱].

۳-۳- آزمایش ریزسختی

در جدول ۵ نتایج ریزسختی‌سنجی برای فلز جوش هر دو اتصال جوشکاری مورد آزمایش نشان داده شده است. همانطور که از این جدول ملاحظه می‌گردد، فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ V شکل نسبت به فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ X شکل در اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد نیز سختی بیشتری از خود نشان داده است. زیرا همانطور که از اندازه‌گیری‌های نرم‌افزار Image Analyzer و بررسی تصاویر میکروسکوپ نوری ملاحظه گردید، با بکارگیری طرح اتصال حاوی پخ V شکل نسبت به اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ X شکل، میزان کاربیدها در فلز جوش افزایش می‌یابد و کاربیدها هم ذرات سختی هستند که منجر به افزایش سختی می‌شوند [۲۷]. از طرفی دیگر هم نتایج آزمایش کشش دلالت بر افزایش استحکام تسلیم اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد ایجاد شده با پخ V شکل نسبت به اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد ایجاد شده با پخ X شکل داشتند. لذا عامل دیگری که منجر به افزایش سختی فلز جوش اتصالات جوشکاری در اثر بکارگیری طرح اتصال حاوی پخ V شکل شده است، استحکام تسلیم است [۲۷]. درواقع طرح اتصال حاوی پخ V شکل در مقایسه با طرح اتصال حاوی پخ X شکل، با دو پدیده‌ی افزایش کاربیدها و افزایش استحکام تسلیم منجر به افزایش سختی در فلز جوش اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد شده است.

جدول ۵- نتایج آزمایش ریزسختی با حداقل سه بار تکرارپذیری

اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ	ریزسختی	
	میزان (برینل)	انحراف معیار
X شکل	۱۹۷	۴,۰۱
V شکل	۲۵۸	۵,۷۲

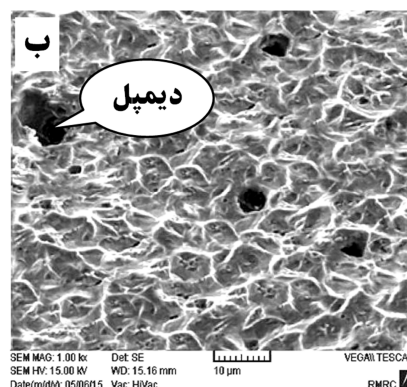
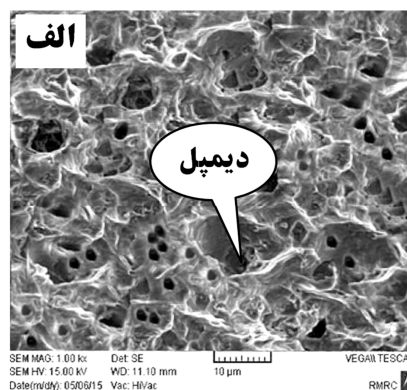
۳-۴- آزمایش ضربه شاریپی

در جدول ۶ نتایج آزمایش ضربه شاریپی برای هر دو اتصال جوشکاری مورد آزمایش نشان داده شده است. همانطور که در این جدول هم مشاهده می‌گردد، با بکارگیری طرح اتصال حاوی پخ V شکل در مقایسه با طرح اتصال حاوی پخ X شکل، انرژی ضربه اتصال جوش فولاد هادفیلد کاهش یافته است. بگونه‌ای که اتصال جوش ایجاد شده با طرح اتصال حاوی پخ X شکل نسبت به اتصال جوش ایجاد شده با طرح اتصال حاوی پخ V شکل، دارای انرژی شکست حدود دو برابری است. علت این امر افزایش تشکیل کاربیدها و متعاقباً افزایش سختی در فلز جوش اتصال جوش ایجاد شده با طرح اتصال حاوی پخ V شکل می‌باشد که در نهایت این عوامل (افزایش تشکیل کاربید و افزایش سختی) منجر به کاهش قابلیت تغییر شکل مومسان زمینه‌ی آستنیت در اتصالات جوش فولاد هادفیلد شده‌اند [۲۷].

جدول ۶- نتایج آزمایش ضربه شاریپی با حداقل سه بار تکرارپذیری

اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ	انرژی جذب شده	
	میزان (ژول)	انحراف معیار
X شکل	۱۱۳	۲,۰۹
V شکل	۶۸	۱,۵۴

1 Dimpled Surface
2 Cup & Cone



شکل ۸- تصاویر SEM از مقطع شکست اتصالات جوشکاری ایجاد شده با پخ: الف) X شکل، ب) V شکل

۳- نتایج آزمایش کشش نشان از اثرگذاری طرح اتصال بر استحکام اتصالات جوش فولاد هادفیلد داشتند. براساس نتایج آزمایش کشش، بکارگیری طرح اتصال حاوی پخ V شکل نسبت به طرح اتصال حاوی پخ X شکل، منجر به افزایش استحکام تسلیم و کششی، و کاهش کرنش شکست و چقرمگی در اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد می‌شود. زیرا بکارگیری طرح اتصال حاوی پخ X شکل منجر به کاهش رسوبات کاربیدی و افزایش اندازه دانه‌های آستنیت در فلز جوش اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد شده بود.

۴- نتایج آزمایش ریزسختی‌سنجی بیانگر افزایش میزان ریزسختی فلز جوش اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد در اثر بکارگیری طرح اتصال حاوی پخ V شکل نسبت به طرح اتصال حاوی پخ X شکل داشت. زیرا فلز جوش حاصل از طرح اتصال حاوی پخ V شکل، هم میزان کاربید بیشتر و هم استحکام تسلیم بیشتری داشت.

۵- با بررسی نتایج آزمایش ضربه شاری برای اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد، مشخص گردید که بکارگیری طرح اتصال حاوی پخ V شکل نسبت به طرح اتصال حاوی پخ X شکل منجر به کاهش انرژی شکست در اتصالات جوش فولاد مذکور می‌شود. زیرا اتصال جوشکاری ایجاد شده با طرح اتصال حاوی پخ V شکل نسبت به اتصال جوشکاری ایجاد شده با طرح اتصال حاوی پخ X شکل دارای میزان کاربید بیشتری در فلز جوش و همچنین قابلیت تغییر شکل مومسان کمتری بود.

۶- مشاهدات SEM از سطح شکست اتصالات جوش پس از آزمایش کشش نشان داد که اولاً هر دو اتصال دچار شکست نرم (سطح دیمپلی) شده‌اند و ثانیاً بکارگیری طرح اتصال حاوی پخ X شکل نسبت به طرح اتصال حاوی پخ V شکل منجر به وقوع شکستی نرم‌تر در اتصالات جوش فولاد هادفیلد می‌شود.

۵- سپاس‌گزاری

بدینوسیله نویسندگان این مقاله مراتب سپاسگزاری را از باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان واحد دزفول بدلیل حمایت‌های مالی که از این پروژه داشته است را بجا می‌آورند.

۶- نمادها

تنش مهندسی (MPa)	Eng. Stress
کرنش مهندسی (%)	Eng. Stress
گرمای ورودی (kJ/mm)	Q
ضریب ثابت جوشکاری	η
ولتاژ (V)	V
شدت جریان (A)	I
سرعت جوشکاری (mm/min)	S

۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر به بررسی تأثیر هندسه‌ی طرح اتصال بر تحولات متالورژیکی فلز جوش و مود شکست در اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد ASTM A-128 پرداخته شد. سپس طرح اتصال با دو پخ V و X شکل تهیه گردید و برای جوشکاری آنها از فرآیند SMAW استفاده شد. در مرحله‌ی بعد، آزمایش‌های کشش تک محوره، ریزسختی‌سنجی و ضربه‌ی شاری بر روی هر دو اتصال جوشکاری شده انجام شد. برای بررسی ریزساختار اتصالات جوشکاری از میکروسکوپ نوری و برای بررسی مود شکست از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که: ۱- مشاهدات ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری نشان داد که فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ X شکل نسبت به فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ V شکل، بدلیل داشتن حجم حوضچه جوش کمتر، دارای میزان رسوب کمتر و اندازه دانه‌های آستنیت بزرگتری است.

۲- الگوهای حاصل از آنالیز XRD، بیانگر تشکیل کاربیدهای منگنز Mn_3C در فلز جوش هر دو اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ X و V شکل بودند. همچنین الگوهای حاصل از آنالیز XRD، مشاهدات میکروسکوپ نوری در خصوص افزایش تشکیل کاربید در فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ V شکل نسبت به فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ X شکل را تأیید نمود.

۷-مراجع

- [21] Annual book of AWS standards, Welding Science and Technology, 9th Edition, Vol. 1, 2015.
- [22] Annual book of ASME standards, Qualification standard for welding, brazing, and fusing procedures, ASME International, Vol. 9, 2015.
- [23] Annual book of AWS standards, Standard Methods for Mechanical Testing of Welds, AWS International, Vol. 7, 2007.
- [24] Lee Y. K. and Choi C. S., Driving force for $\gamma \rightarrow \epsilon$ 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.
- [25] Astafev A. A., Effect of Grain Size on the Properties of Manganese Austenite Steel 110G13L, Metal Science and Heat Treatment, Vol. 39, No. 5, pp.198-201, 1997.
- [26] هرتزبرگ ر. د.، اکرامی ع.ا. (مترجم)، تغییر شکل و مکانیک شکست مواد و آلیاژهای مهندسی، چاپ اول، دانشگاه صنعتی شریف، موسسه انتشارات علمی، ۱۳۸۲.
- [27] ASM Handbook 1th, Surface Engineering, Vol. 5, pp. 1354-1357, 2005.
- [28] عباسی م. و همکارانش، ارزیابی مکانیزم شکست در فولاد هادفیلد، مجموعه مقالات ششمین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی و انجمن علمی ریخه گری ایران، تهران، ایران، ص ۹-۱، ۱۳۹۱.
- [1] Barannikova S. A., Li Y., Malinovsky A., Pestov 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.
- [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.، معینی فر ص. و نجفی بیرگانی 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.
- [۱۳] ترجم نژاد م. ع.، دهملانی 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.
- [14] Curiel-Reyna E., Herrera A., Castaño V., Rodríguez M. E., Influences of the precooling treatment in the heat affected zone of the welding in used Hadfield-type steel, Material and Manufacturing Processes, Vol. 21, pp. 562-567, 2006.
- [15] Mendez J. and et al., Weldability of austenitic manganese steel, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 153-154, pp. 596-602, 2004.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [۱۸] سبزی م.، معینی فر ص. و نجفی بیرگانی 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.
- [19] 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.
- [20] Annual book of AWS standards, Standard Welding Procedure Specification, Shielded Metal Arc Welding of Carbon Steel, AWS International, 2005.