علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال دوم، شماره ۱، بهار و تابستان ۹۵، صفحه ۸۸-۷۸

بررسی تأثیر حرارت ورودی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات جوش فولاد هادفیلد در فرآیند SMAW

مسعود سبزی* و رقیه کلانتری‌پور

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۳ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۳۹۵/۰۳/۲۶)

چکیده

در این پژوهش تأثیر حرارت ورودی فرآیند SMAW بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات جوش فولاد هادفیلد مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا ۴ عدد ورق آنیل شده به ضخامت mm ۲ از فولاد هادفیلد تهیه شده و سپس برای جوشکاری از فرآیند SMAW با مقادیر حرارت ورودی ۶/۷۵ و ۱۱/۲۵kJ/mmاستفاده شد. برای بررسی ریزساختار اتصالات جوشکاری از میکروسکوپ نوری و برای بررسی خواص مکانیکی اتصالات از آزمایش‌های کشش، ضربه شارپی و میکروسختی‌سنجی استفاده گردید. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش حرارت ورودی در فرآیند SMAW، ریزساختار دانه‌ریزتر شده، استحکام و میکروسختی افزایش پیدا کرده ولی انرژی ضربه کاهش یافته است.

کلمات کلیدی: فولاد هادفیلد، خواص مکانیکی، اتصالات جوش، حرارت ورودی، ریزساختار.

Investigation on effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of hadfield steel weld joints in SMAW process

M. Sabzi and R. Kalantaripour

Young Researchers and Elite Club, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

(Received 3 March 2016 ; Accepted 15 June 2016)

Abstract

In this investigation, the effect of heat input of SMAW process on the microstructure and mechanical properties of Hadfield steel weld joints was investigated. For this purpose, 4 annealed sheets with thickness 2 mm prepared from Hadfield steel and then welding applied by SMAW process with 6.75 and 11.25 kJ/mm

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی M.Sabzi@iauahvaz.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

heat input values. The evaluation of the microstructures of welding joints was conducted by optical microscopy and the joints mechanical properties were examined by tensile, charpy impact and microhardness measuring tests. The results indicated that by increasing the heat input in the SMAW process, microstructure consisted from smaller grains, and strength and microhardness increased but impact energy was reduced.
Keywords: Hadfield steel, mechanical properties, weld joints, heat input, microstructure.

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 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 [۲و۱]. در موارد خاص و بنا به کاربرد آن، عناصرآلیاژی دیگری نیز به این فولاد اضافه می‌شود. یکی از این عناصر تیتانیم می‌باشد. استفاده از عنصر تیتانیم جهت ریزدانه‌کردن 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 می‌دهد که این عنصر با ایجاد ذرات کاربید تیتانیم، باعث کاهش چقرمگی فولاد مذکور می‌شود[۵]. در همین رابطه، اسری واستاوا و همکارانش[۶]، تأثیر ذرات تقویت کننده‌ی کاربید تیتانیم بر رفتار خوردگی کامپوزیت‌های با زمینه فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد پرداختند. این محققان نشان دادند که با افزایش میزان ذرات تقویت کننده‌ی کاربید تیتانیم، مقاومت خوردگی کامپوزیت مذکور کاهش می‌یابد.

فولاد هادفیلد به دلیل دارا بودن مقدار کربن بالا، ساختار آن در حالت ریختگی، شامل دانه‌های آستنیت و رسوب‌های کاربید مرزدانه‌ای است که در این حالت خواص مکانیکی افت پیدا می‌کند. برای رفع این مشکل حسینی و همکارانش[۸و۷] گزارش نمودند که با سریع سردی فولاد هادفیلد در حمام آب نمک پس از عملیات حرارتی آستنیته، می‌توان از تشکیل بیش از حد ذرات کاربیدی در ریزساختار این فولاد جلوگیری نمود. بررسی‌ها نشان داده است که پارامترهای فرآیند جوشکاری تأثیر زیادی بر رفتار خوردگی و ریزساختار اتصالات جوشکاری فولادها دارد[۱۰و۹]. یکی از این پارامترها میزان حرارت ورودی است که در حین فرآیند جوشکاری به قطعات وارد می‌شود[۱۱]. در تحقیقاتی که توسط آقای سبزی و همکارانش صورت گرفته[۱۲]، گزارش شده است که افزایش حرارت 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 حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری بیان نموده‌اند. در تحقیقات دیگری که توسط آقای ترحم‌نژاد و همکارانش انجام شده [۱۳]، گزارش شده است که افزایش حرارت 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 حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری توجیه نموده‌اند.

دربسیاری ازکاربردها، فولاد هادفیلد نیاز به جوشکاری دارد و این عمل برای اتصال دو قطعه‌ی هادفیلد یا فولاد ساده کربنی به فولاد هادفیلد و یا تعمیر قطعات انجام می‌شود. مهمترین و ابتدایی‌ترین مسئله در جوشکاری فولاد هادفیلد، حرارت‌دادن 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 منطقه‌ی جوش قابل قبول بوده و اغلب فلز منطقه جوش بدلیل میزان کاربید بیشتر، استحکام بالاتر و چقرمگی کمتری نسبت به فلز پایه دارد. به

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

جدول ۱- آنالیز شیمیایی ورق‌های فولاد هادفیلد تهیه شده برحسب 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

دلیل حساس بودن فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد به حرارت، باید جوشکاری آن بادقت کافی صورت گیرد. مرسوم‌ترین روشی که برای جوشکاری فولاد هادفیلد مورد استفاده در خطوط ریلی بکار گرفته می‌شود، روش جوشکاری با الکترود دستی (SMAW) است و برای جوشکاری این فولادها الکترودهای مناسب حاوی منگنز بالا به صورت تجاری موجود هستند[۱۴]. 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[۱۵]. کوریل-رینا و همکارانش [۱۶] 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 منطقه‌ی متأثر از حرارت 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 حرارت 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 حرارت این فولاد از نوع Mn_7C_3 و $Mn_{23}C_6$ می‌باشند. در همین رابطه آقای 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.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 ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد پرداخته شود که در پژوهش‌های پیشین به این موضوع پرداخته نشده بود.

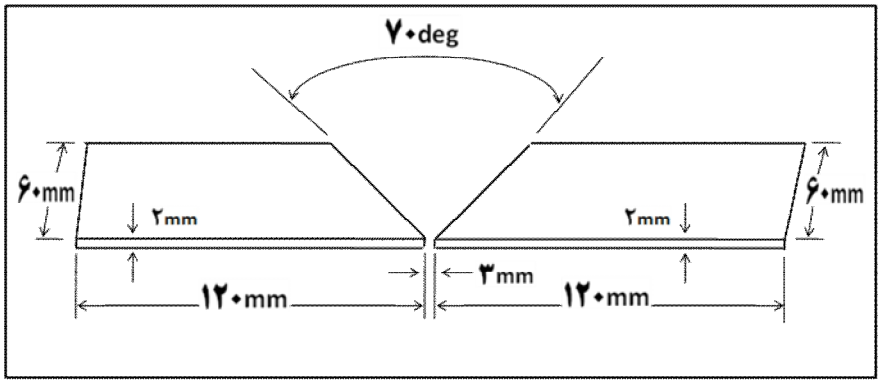
۲- روش تحقیق

فولاد مورد استفاده در این پژوهش، فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد ۱۲۸ -ASTM A [۱۹]بود. برای این منظور، ابتدا ۴ عدد ورق آنیل شده از فولاد هادفیلد به ضخامت ۲ mm 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 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 مقدار حرارت وردی ۶/۷۵ kJ/mm و ۱۱/۲۵ kJ/mmو همچنین از الکترودهای منگنزدار استفاده شد. برای محاسبه ی حرارت ورودی به قطعه کار از رابطه‌ی زیر استفاده گردید[۲۰]:

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

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 میلیمتر، V ولتاژ برحسب ولت، I شدت جریان برحسب آمپر و S سرعت جوشکاری برحسب میلیمتر بر دقیقه می‌باشد. حرارت‌های ورودی محاسبه شده مطابق با فرمول (۱) و کلیه ی پارامترهای جوشکاری در جدول (۲) گزارش شده است. لازم به ذکر است

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل ۱- شماتیکی از طرح اتصال.

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

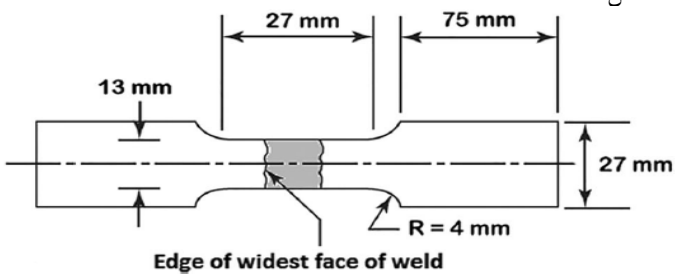
جدول ۳- آنالیز شیمیایی الکترود مورد استفاده بر حسب درصد وزنی.

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

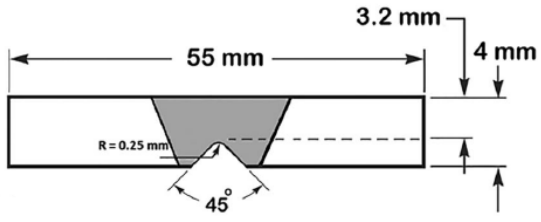
که پس از پایان فرآیند جوشکاری، ورقهای اتصال داده شده در هوا سرد شدند. همچنین ترکیب شیمیایی الکترودهای مورد استفاده در این پژوهش توسط طیف‌سنجی نشری جرقه‌ای برسی شده و در جدول (۳) گزارش شده است.

برای بررسی ریزساختار 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 اتصالات جوش از نرم افزار Image J و برای بررسی اندازه دانه‌های فلز جوش اتصالات از نرم افزار Image Analyzer استفاده گردید.

بعد از پایان فرآیند جوشکاری و هم‌دما شدن اتصالات جوشکاری با دمای محیط، نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش کشش، توسط دستگاه تراش CNC مطابق با استاندارد ASME Sec IX [۲۱] تهیه شدند (شکل۲). همچنین نمونه‌های لازم برای آزمایش ضربه شارپی مطابق با استاندارد AWS B4.0 [۲۲] توسط دستگاه تراش CNC تهیه گردید (شکل۳).

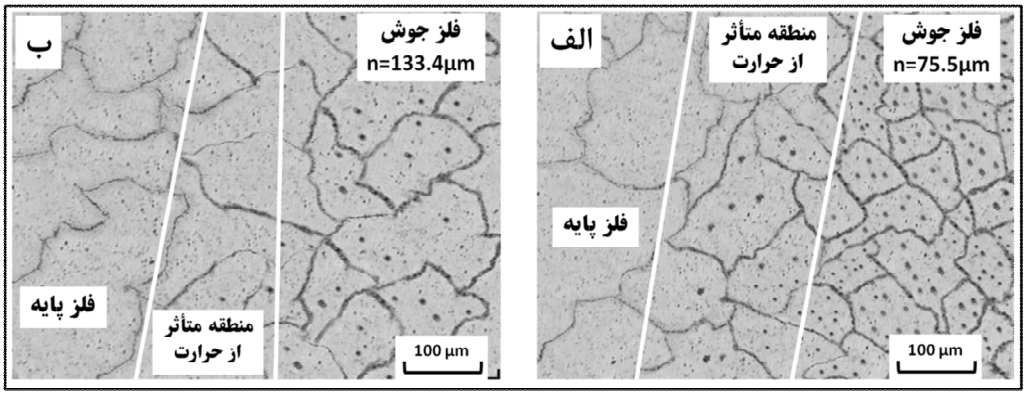


شکل۲- ابعاد نمونه‌ی آزمایش کشش مطابق با استاندارد ASME Sec IX.

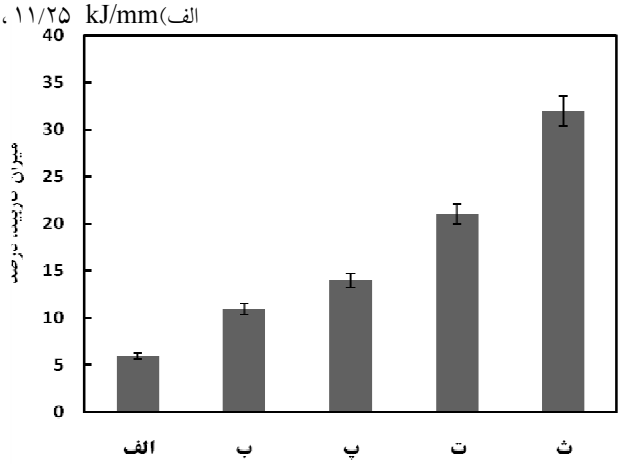


شکل ۳- ابعاد نمونه‌ی آزمایش ضربه مطابق با استاندارد AWS B4.0.

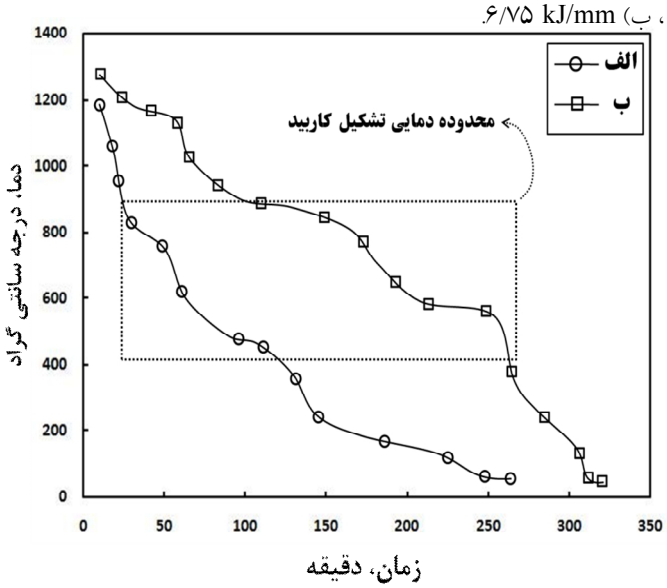
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]



شکل ۴- تصاویر متالوگرافی از مناطق مختلف اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد با حرارت ورودی:
الف) ۱۱/۲۵ kJ/mm ، ب) ۶/۷۵ kJ/mm.



شکل ۵- تعیین توزیع کاربید توسط نرم‌افزار Image J : الف) فلز پایه، ب) منطقه متأثر از حرارت ایجاد شده با حرارت ورودی 6.75kJ/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 ۱۱/۲۵ kJ/mm.



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

آزمایش کشش تک محوره توسط دستگاه SANTAM مدل ASTM-۴۰۰ در دمای اتاق و با نرخ کرنش $10^{-2}S^{-1}$ انجام شد. همچنین آزمایش ضربه شارپی توسط دستگاه SANTAM با ظرفیت ۲۰۰ ژول در دمای محیط انجام شد.جهت بررسی مود شکست در آزمایش کشش، پس از پایان آزمایش کشش، از سطح شکست هر دو اتصال، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تصاویری تهیه گردید.از طرفی برای بررسی میکروسختی اتصالات جوشکاری شده و رسم پروفیل سختی آنها، پس از پایان فرآیند جوشکاری، از هر سه منطقه‌ی فلز پایه، منطقه‌ی متأثر از حرارت و فلز جوش اتصالات به روش ویکرز، سختی اندازه‌گیری گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشاهدات ریزساختاری

شکل (۴)، تصاویر متالوگرافی تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری از مناطق مختلف اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد با مقادیر حرارت ورودی مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در هر دو حالت حرارت ورودی، هر سه ناحیه‌ی فلز پایه، منطقه‌ی متأثر از حرارت و فلز جوش شامل زمینه‌ی آستنیتی به همراه مقادیر مختلفی از کاربید 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 [۱۸] ، گزارش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

نمودند که با افزایش منگنز در آلیاژهای Fe-Mn، دمای شروع مارتنزیت به میزان بسیار زیادی کاهش می‌یابد، بطوریکه در آلیاژهای پرمنگنز یک زمینه ی کاملاً آستنیتی را می‌توان مشاهده نمود. از تصاویر میکروسکوپ نوری مشاهده می‌شود که با افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری SMAW، میزان کاربیدها در هر دو ناحیه ی فلز جوش و منطقه‌ی متأثر از حرارت افزایش می‌یابد. چراکه بطورکلی نرخ انتقال حرارت در فولاد هادفیلد بسیار پایین بوده و از طرفی هم فولاد هادفیلد یک فولاد پرکربن است[۱۲]. همچنین مشاهدات میکروسکوپ نوری با نتایج حاصل از پژوهش آقای سبزی و همکارانش[۱۲] در رابطه با تأثر حرارت ورودی فرآیند جوشکاری 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 اندازه‌گیری شده و در شکل (۵) نشان داده شده است.

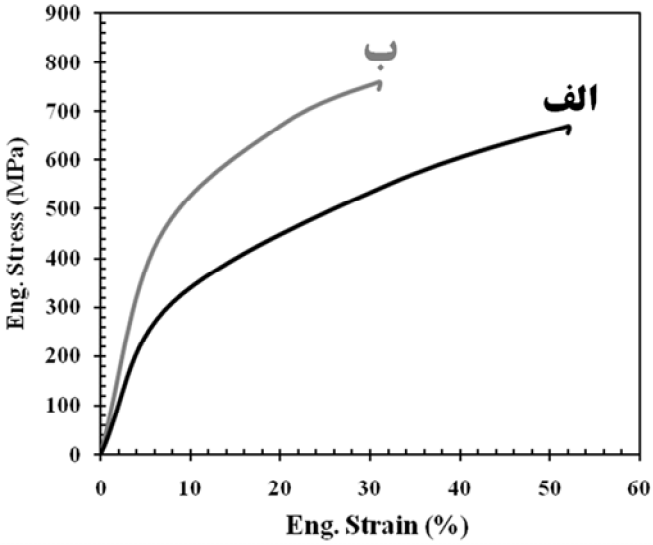
در این شکل هم مشاهده می‌شود که فلز جوش اتصال جوشکاری شده با حرارت ورودی ۱۱/۲۵ kJ/mmدارای ۳۱ درصد کاربید می‌باشد درحالیکه فلز جوش اتصال جوشکاری شده با حرارت ورودی ۶/۷۵ kJ/mm دارای ۲۱ درصد کاربید است. همچنین منطقه‌ی متأثر از حرارت اتصال جوشکاری شده با حرارت ورودی ۱۱/۲۵ kJ/mm دارای ۱۴ درصد کاربید بوده درحالیکه منطقه متأثر از حرارت اتصال جوشکاری شده با حرارت ورودی ۶/۷۵ kJ/mm دارای 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 برخوردار می‌باشند.

از طرفی بررسی اندازه دانه‌های فلز جوش هردو اتصال توسط نرم افزار Image Analyzer که در شکل (۴) نشان داده شده است، نشان می‌دهد که با افزایش حرارت ورودی به قطعه کار از ۶/۷۵ kJ/mm به ۱۱/۲۵ kJ/mm، اندازه‌ی دانه‌ها از ۱۳۳/۴ به 75.5mμ کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل (۴) ملاحظه می‌گردد که با افزایش حرارت ورودی، پهنای منطقه‌ی متأثر از حرارت افزایش یافته است که این مشاهدات با مشاهدات آقای سبزی و همکارانش[۱۲] در ارتباط با تأثیر حرارت ورودی بر پهنای منطقه‌ی متأثر از حرارت اتصالات جوش فولاد هادفیلد شباهت دارد. از طرفی دیگر با افزایش حرارت ورودی، فلز جوش یک ساختار ریزدانه و حاوی مقادیر بالایی از کاربید را شامل می‌شود. 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 1.2%C% از ۴۰۰ تا ۹۰۰°Cمی‌باشد[۱۸]). بنابراین فلز جوش 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(۶) 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. از طرفی دیگر هم رسوبات کاربیدی ترکیبات سختی هستند که جلوی حرکت مرزدانه‌ها را گرفته و منجر به کوچک شدن دانه‌های آستنیت در فلز جوش اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد شده‌اند[۱۲].

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 حرارت ورودی ۱۱/۲۵ kJ/mm نسبت به اتصال جوشکاری ایجاد شده با حرارت ورودی ۶/۷۵ kJ/mm ، از استحکام تسلیم و کششی بالاتر و همچنین کرنش شکست کمتری برخوردار است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

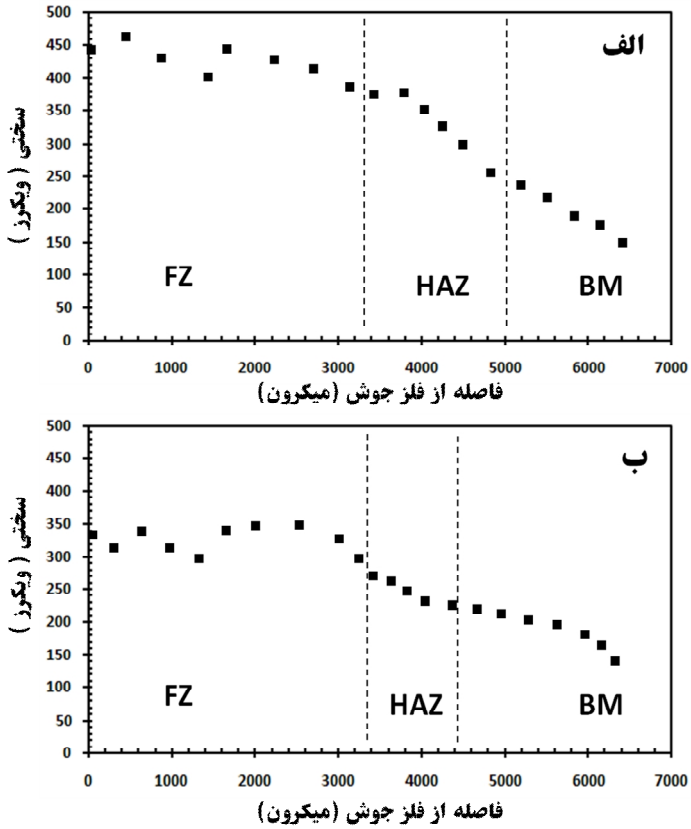


شکل ۷- نمودار تنش – کرنش مهندسی اتصال جوشکاری ایجاد شده با حرارت ورودی: الف)kJ/mm ۶/۷۵ ، ب) kJ/mm ۱۱/۲۵.

همانطورکه از تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری ملاحظه گردید (شکل۴)، با افزایش حرارت ورودی 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 فلز جوش منجر به افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی شده [۲۳] و افزایش میزان ذرات کاربیدی منجر به کاهش انعطاف پذیری و کرنش شکست می‌گردد [۲۴]. درواقع با افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری ورق‌های فولاد هادفیلد، اندازه‌ی دانه‌ها کوچکتر و تعداد مرزدانه‌ها بیشتر شده است. مرزدانه‌ها محل‌های پرانرژی بوده و نابجایی‌های متحرک در هنگام رسیدن به این مکان‌های پرانرژی متوقف شده و در پشت مرزدانه‌ها تجمع می‌کنند و همین امر منجر به افزایش استحکام می‌گردد[۲۴]. بنابریان افزایش حرارت ورودی فرآیند جوشکاری با افزایش تعداد مرزدانه‌ها منجر به افزایش استحکام و با افزایش میزان کاربیدها منجر به کاهش کرنش شکست اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد گردیده است.

۳-۳- آزمایش میکروسختی

در شکل (۸) پروفیل سختی برای هر دو اتصال جوشکاری مورد آزمایش نشان داده شده است. همانطور که از این شکل ملاحظه می‌گردد با افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری، فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد سختی بیشتری از خود نشان می‌دهند. زیرا همانطور که از اندازه‌گیری‌های نرم‌افزار Image Analyzer و تصاویر متالوگرافی مشاهده گردید، با افزایش حرارت ورودی، میزان کاربیدها در فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت افزایش می‌یابد و کاربیدها هم ذرات سختی هستند که منجر به افزایش سختی می‌شوند[۲۵].



شکل ۸- پروفیل سختی حاصل از آزمایش میکروسختی‌سنجی برای اتصال جوشکاری ایجاد شده با حرارت ورودی:
الف) kJ/mm ۱۱/۲۵ ، ب) kJ/mm ۶/۷۵

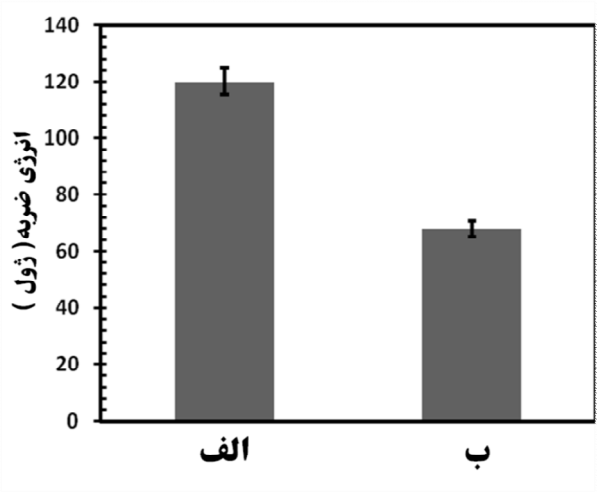
از طرفی دیگر هم نتایج آزمایش کشش دلالت بر افزایش استحکام تسلیم اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد در اثر افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری داشتند. لذا عامل دیگری که منجر به افزایش سختی اتصالات جوشکاری در اثر افزایش حرارت ورودی فرآیند جوشکاری شده است، استحکام تسلیم

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

است[۲۵]. درواقع افزایش حرارت ورودی از ۶/۷۵ kJ/mm به ۱۱/۲۵ kJ/mm، با دو پدیده‌ی افزایش کاربیدها و افزایش استحکام تسلیم منجر به افزایش سختی در فلز جوش و منطقه‌ی متأثر از حرارت اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد شده است.

۳-۴- آزمایش ضربه شارپی

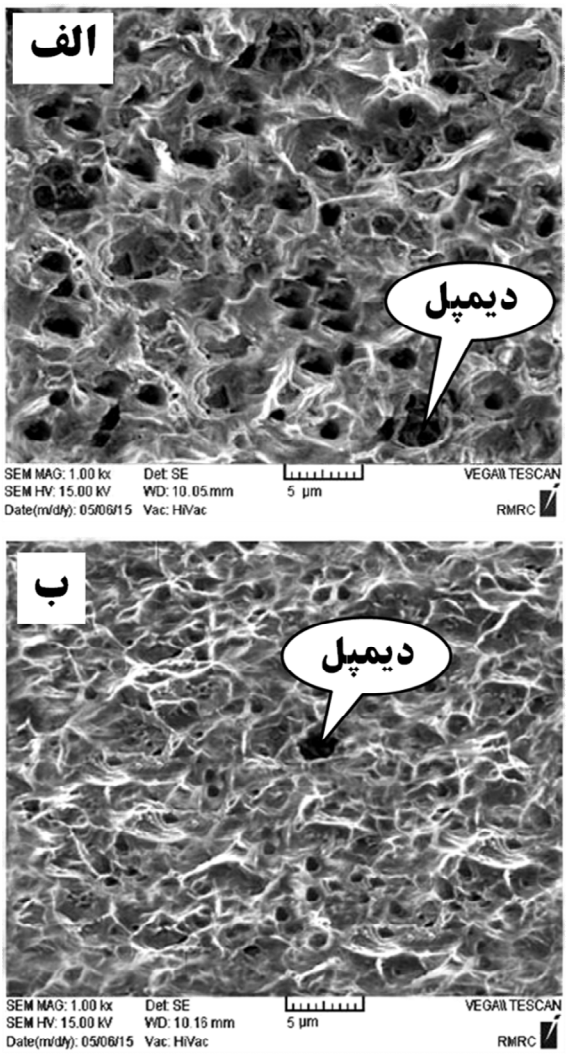
در شکل (۹) نتایج آزمایش ضربه شارپی برای هر دو اتصال جوشکاری مورد آزمایش نشان داده شده است. همانطور که در این شکل هم مشاهده می‌گردد، با افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری، انرژی ضربه اتصال جوش فولاد هادفیلد کاهش یافته است. بگونه‌ای که اتصال جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۶/۷۵ kJ/mm نسبت به اتصال جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۱۱/۲۵ kJ/mm، دارای انرژی شکست حدود دوبرابری است. علت این امر افزایش تشکیل کاربیدها و متعاقباً افزایش سختی در فلز جوش و منطقه‌ی متأثر از حرارت اتصال جوش ایجاد شده با حرارت ورودی ۱۱/۲۵ kJ/mmمی‌باشد 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[۲۴].



شکل ۹- نتایج آزمایش ضربه شارپی برای اتصال جوشکاری ایجاد شده با حرارت ورودی: الف) 6.75kJ/mm، ب) ۱۱/۲۵ kJ/mm.

۳-۵- شکست‌نگاری سطوح شکست 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 (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۰- تصاویر SEM از مقطع شکست اتصالات جوشکاری ایجاد شده با حرارت ورودی: الف)۶/۷۵ kJ/mm ، ب) ۱۱/۲۵ kJ/mm.

همانطور که از این شکل دیده می‌شود، هر دو اتصال جوشکاری شده با حرارت‌های ورودی مختلف دارای مشخصه‌ی شکست نرم (سطح دیمپلی) 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 جوانه‌زنی، رشد و به‌هم پیوستن حفره‌ها است. این نوع شکست که به شکست مخروط - فنجان معروف است، مهمترین مکانیسم در شکست مواد نرم به شمار می‌آید. اما با

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

مقایسه‌ی هر دو تصویر، مشاهده می‌شود که سطح شکست در اتصال جوشکاری ایجاد شده با حرارت ورودی کمتر (۶/۷۵ kJ/mm) نسبت به اتصال جوشکاری ایجاد شده با حرارت ورودی بیشتر (۱۱/۲۵ kJ/mm)، 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 حرارت ورودی کمتر می‌باشد. با توجه به اینکه کاهش کسر حجمی ذرات رسوبی و پراکنده و افزایش فاصله‌ی این ذرات به عنوان یک فرآینده ذاتی در جهت چقرمه‌کردن آلیاژهای مهندسی عمل می‌کند[۲۲] ، حال با مشاهده‌ی سطوح شکست اتصالات جوشکاری شده پس از آزمایش کشش ملاحظه می‌گردد که اتصال جوشکاری ایجاد شده با حرارت ورودی ۶/۷۵ kJ/mm که دارای میزان ذرات رسوبی کمتری نسب به اتصال جوشکاری ایجاد شده با حرارت ورودی ۱۱/۲۵ kJ/mm است، دارای سطح شکستی نرم‌تر و با تعداد دیمپل بیشتر است که نشان از چقرمگی بالاتر اتصال جوشکاری ایجاد شده با حرارت ورودی ۶/۷۵ kJ/mm 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 حرارت ورودی ۶/۷۵ kJ/mm دارد که این مشاهدات با نتایج حاصل از آزمایش کشش همخوانی دارد. همچنین شکست‌نگاری اتصالات پس از آزمایش کشش نشان می‌دهد که میکردیمپل‌های ثانویه در فضای بین دیمپل‌های اولیه حضور دارند که می‌توانند شکست را به تأخیر بیاندازند. این میکرودیمپل‌ها در اثر برهمکنش و برخورد لایه‌های میکرودوقلویی و نیز ایجاد نانورسوبات کاربیدی در اثر پیرسازی کرنشی دینامکی می‌توانند ایجاد شوند [۲۶].

۴- نتیجه گیری

با بررسی آزمایش‌های کشش، میکروسختی‌سنجی، ضربه شارپی و مشاهدات میکروسکوپی می‌توان نتیجه گرفت که:

- مشاهدات میکروسکوپ نوری دلالت بر افزایش میزان رسوبات و افزایش تعداد مرزدانه‌ها در فلز جوش و منطقه‌ی متأثر از حرارت اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد در اثر افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری داشتند. همچنین در هر حرارت ورودی، ربزساختار متشکل از زمینه‌ی آستنیتی و مقادیر مختلفی از رسوب بود.
- هرچقدر حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری بیشتر باشد، اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد هم استحکام تسلیم و کششی بیشتر ولی کرنش شکست و چقرمگی کمتری را از خود نشان می‌دهد. زیرا در اثر افزایش حرارت ورودی، میزان رسوبات و تعداد دانه‌ها در اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد افزایش یافته بود.
- نتایج آزمایش میکروسختی‌سنجی بیانگر افزایش میزان سختی فلز جوش و منطقه‌ی متأثر از حرارت اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد در اثر افزایش حرارت ورودی فرآیند جوشکاری بودند. همچنین در هر حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری، فلز جوش نسبت به فلز پایه و منطقه‌ی متأثر از حرارت سختی بیشتری داشت.
- با بررسی نتایج آزمایش ضربه شارپی برای اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد، مشخص گردید که افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری ورق‌های فولاد هادفیلد منجر به کاهش انرژی ضربه آن اتصال می‌شود. زیرا در اثر افزایش حرارت ورودی فرآیند جوشکاری از ۶/۷۵ kJ/mm به ۱۱/۲۵ kJ/mm، میزان رسوبات در اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد افزایش یافته بود و همین امر هم منجر به کاهش قابلیت تغییر شکل مومسان در اتصالات شده بود.
- شکست‌نگاری سطوح شکست در آزمایش کشش دلالت بر این داشت که اولاً در هر دو حرارت ورودی، اتصالات جوش فولاد هادفیلد دارای مشخصه‌ی شکست نرم (سطح دیمپلی) هستند و دوماً با کاهش حرارت ورودی فرآیند جوشکاری از ۱۱/۲۵ kJ/mm به ۶/۷۵ kJ/mm ، شکستی نرم‌تر در اتصالات جوش فولاد هادفیلد اتفاق می‌افتد.

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی با کد ۹۵۱۱۸ تحت عنوان

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

"بررسی تأثیر حرارت ورودی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات جوش فولاد هادفیلد در فرآیند SMAW" می‌باشد که با حمایت مالی باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان واحد دزفول انجام پذیرفت.

منابع

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

۱۲-سبزی، م.، معینی‌فر، ص. و نجفی‌بیرگانی، ا.، " بررسی تأثیر حرارت ورودی بر رفتار خوردگی اتصالات جوش فولاد هادفیلد در فرآیند" SMAW ، مجله علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال اول، شماره ۱، ص ۲۳ – ۱۳، پاییز و زمستان ۱۳۹۴ .

۱۳- ترحم‌نژاد، م.ع.، دهملائی، ر. و معینی‌فر، 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.

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

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

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

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

21--Annual book of ASME standards, "Qualification standard for welding, brazing, and fusing procedures", ASME International, Vol. 9, 2015.

22-Annual book of AWS standards, "Standard Methods for Mechanical Testing ofWelds", AWS International, Vol. 7, 2007.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

23-Astaf'ev, 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.

۲۴- هرتزبرگ، ر.د.، "تغییر شکل و مکانیک شکست مواد و آلیاژهای مهندسی"، اکرامی، ع.ا. (مترجم)، چاپ اول، دانشگاه صنعتی شریف، موسسه انتشارات علمی، ۱۳۸۲.

25-ASM Handbook 1th, "Surface Engineering", Vol. 5, pp. 1354-1357, 2005.

۲۶- عباسی، م.، خیراندیش، ش.، حجازی، ج. و خرازی، ی.، "ارزیابی مکانیزم شکست در فولاد هادفیلد"، مجموعه مقالات ششمین همایش مشترک انجمن مهندسین متالورژی و انجمن علمی ریخه گری ایران، تهران، ص ۹-۱، آبان ۱۳۹۱.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]