نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال چهارم، شماره 1، بهار و تابستان1397، صفحه 41-29

تأثیر مقدار هیدروژن و شرایط جوشکاری بر ترک هیدروژنی در جوش فولاد API X70

علی طالبی هنزائی[1]، پیروز مرعشی[1]، اسلام رنجبر نوده[*1]، ارژنگ حمداله زاده[2]

۱- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- شرکت مهندسی و توسعه گاز ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۱۴ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۲۰)

چکیده

در این پژوهش ابتدا مقدار هیدروژن نفوذپذیر الکترودهای سلولزی E8010-P1 و کم هیدروژنE8018-Gبه روش جابه‌جایی جیوه طبق استاندارد ISO3690 اندازه‌گیری شد. سپس تأثیر پیش‌گرم و پس‌گرم روی حساسیت به ترک سرد هیدروژنی درجوشکاری فولاد API5L X70 به ضخامت ۱۸ میلی‌متر با این الکترودها طبق استاندارد ISO17642-2 بررسی شد. نتایج آزمون‌های چشمی، مایعات نافذ، متالوگرافی و سختی‌سنجی نشان داد که در صورت استفاده از الکترود سلولزی برای جوشکاری، تنها در صورت استفاده هم‌زمان از هر دو عملیات پیش‌گرم و پس‌گرم می‌توان انتظار داشت که ترک سرد ایجاد نشود، در صورتی که با استفاده از الکترود کم هیدروژن تنها در صورتی که هیچکدام از عملیات پیش‌گرم و پس‌گرم به کار برده نشود، احتمال وقوع ترک سرد وجود دارد.

کلمات کلیدی: ترک سرد هیدروژنی، پیش‌گرم، پس‌گرم، هیدروژن نفوذپذیر، فولاد API X70.

The Effect of Hydrogen Content and Welding Conditions on the Hydrogen Induced Cracking of the API X70 Steel Weld

A. Talebi Hanzaei[1], P. Marashi[1], E. Ranjbarnodeh[1], A. Hamdollahzadeh[2]

1- Department of Mining and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2- Iranian Gas Engineering and Development Co.

(Received 4 May 2017 ; Accepted 11 December 2017)

Abstract

In this study, first,diffusible hydrogen of cellulosic electrode E8010-P1 and low hydrogen electrode E8018-G was measured by mercury displacement method according to ISO3690. Then,the effect of preheating and post-heating on the sensitivity to hydrogen inducedcold cracking in welding of 18mm API5L X70 steel with these electrodes was

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: islam_ranjbar@yahoo.com

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

investigated according to ISO17642-2. The results of visual inspection, penetrant test,metallographic examination, and hardness test showed that welding with cellulosic electrode leads to cracking unless both preheating and post-heating are applied.While in the case of low hydrogen electrode, cracking occurs only if no preheating or post-heating is applied.

Keywords: Hydrogen Inducedcold Cracking, Preheating, Post-heating, Diffusible Hydrogen, API X70 Steel.

1- مقدمه

تردی هیدروژنی فولادها (و دیگر آلیاژهای فلزی) یک چالش فنی بزرگ در صنعت نفت و گاز محسوب می‌شود[۱].با تمرکز اخیر بر اقتصاد هیدروژن و گسترش کاربرد آن در چندین صنعت دیگر، تردی هیدروژنی اخیرا توجه بیش‌تری به خود جلب کرده و دوباره به یک موضوع فعال پژوهشی تبدیل شده است[۲]. به طور کلی پذیرفته شده که هیدروژن اتمی می‌تواند در فولاد نفوذ کند و به نواحی با تمرکز تنش بالا (مثل نوک یک ترک)منتقل و سبب شکست شود[۳].

ساخت خطوط لوله فولادی برای انتقال نفت، گاز و اخیرا هیدروژن مطابق با استاندارد API 5L است[۴و۵]. نیاز به مقاومت مکانیکی بالا همراه با استحکام شکست خوب در دمای پائین و همچنین جوش‌پذیری خوب، استفاده از فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا (HSLA[1]) را ایجاب می‌کند که به وسیله فرآیندهای ترمومکانیکی به دست می‌آیند[۶]. ترک سرد هیدروژنی همواره با جوش فولادهای فریتی همراه بوده است ولی بهبود فرآیندهای فولادسازی موجب شده تا فلزات پایه با استحکام بالا با عناصر آلیاژی کم به دست آیند که حساسیت به ترک سرد هیدروژنی را کاهش می‌دهد. برخلاف آن، ذات ریختگی[2] فلز جوش، امکان کنترل استحاله فازی را فراهم نمی‌کند و بنابراین ریزساختاری به دقت فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا به دست نمی‌آید [۷].

مطالعات قبلی نشان داده‌است که شرایط ایجاد ترک هیدروژنی در جوش فولاد شامل حضور هیدروژن نفوذپذیر، تنش پس‌ماند، ریزساختار مستعد در جوش و درجه حرارت کم‌تر از ۲۰۰°C است[۸]. احتمال داشتن ساختار مستعد در منطقه متأثر از حرارت یافلز جوش،به ترکیب شیمیایی فلزپایه وفلزجوش، حرارت ورودی و پیش‌گرم انتخاب شده برای جوشکاری (که باعث کاهش سرعت سرد شدن می‌شود)، بستگی دارد[۹]. به منظور کاهش سطح هیدروژن از مواد مصرفی کم هیدروژن، پخت مناسب مواد مصرفی برای حذف رطوبت، پیش‌گرم و پس‌گرم مناسب (که زمان بیش‌تری در دمای بالا برای نفوذ هیدروژن به خارج تأمین می‌کند) استفاده می‌شود[۱۰].

اخیرا تعدادی از محققان به ترک سرد هیدروژنی در جوش فولاد X70پرداخته‌اند[۱۱–۱۵]. دیکینسون و رایس[3][۱۶]، مگیودیسواران[4] و همکارانش [۱۷] و چاکرابورتی[5] و همکارانش[۱۰] حساسیت به ترک هیدروژنی در جوش فولاد را با روش کاشت[6]بررسی کرده‌اند. در این روش یک پین با سر رزوه شده داخل سوراخ نمونه قرار گرفته و توسط جوش در جای خود ثابت می‌شود. سپس این پین جوش شده، تحت تنش‌های مختلف قرار می‌گیرد و بیشترین تنشی که منجر به شکست نشود، ثبت می‌شود.دیکینسون و رایس با آزمایش ۳۰ نوع فولاد در شرایط مختلف جوشکاری، مدلی برای تأثیر پارامترهای مختلف از جمله پیش‌گرم، مقدار هیدروژن و حرارت ورودی روی حساسیت به ترک هیدروژنی ارائه کردند. آنها نتایجرا به صورت تابعی ازکربن معادل، دمای شروع تشکیل مارتنزیت، سختی[7]HAZ (ناحیه متأثر از حرارت) و سختی‌پذیری بیان کردند.مگیودیسواران و همکارانش تأثیر جوشکاری با دو نوع الکترود فریتی و آستنیتی را بر حساسیت

1-High Strength Low Alloy
2- As cast

3-Dickinson and Ries
4-Magudeeswaran
5-Chakraborty
6-Implant test
7-Heat Affected Zone

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

به ترک هیدروژنی روی فولاد AISI 4340 مقایسه کردند. آنها نتیجه گرفتند جوشکاری با الکترود آستنیتی باعث افزایش مقاومت به ترک هیدروژنی می‌شود. چاکرابورتی و همکارانش حساسیت به ترک هیدروژنی را در فولاد DMR-249A(یک نوع فولاد HSLA) با جوشکاری به وسیله الکترود E8018-C1 در شرایط مختلف پخت الکترود، بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که بدون پخت الکترود کم هیدروژن که بالاترین مقدار هیدروژن را ایجاد می‌کند (۹/۶ میلی‌لیتر در ۱۰۰ گرم فلز جوش) نیز حساسیت به ترک هیدروژنی وجود ندارد. این عدم حساسیت به ترک هیدروژنی به دلیل وجود ساختار عمدتا فریتی و عدم وجود فازهای ترد مثل بینیت و مارتنزیت در جوش و HAZ می‌باشد.

لا[1] و همکارانش[۱۸] از روش خمش چهار نقطه برای بررسی حساسیت به ترک هیدروژنی استفاده کرده‌اند.آنها این روش را به دو دلیل روشی مناسب می‌دانند؛ اول اینکه جوش را تحت بیشترین تنش قرار می‌دهد و دوم، بیشترین حجم جوش را تحت تنش قرار می‌دهد و تأثیر فلز پایه و HAZ را کم می‌کند. همچنین آنها معتقدند که استفاده از این روش ساده و صنعتی است.

یک روش استاندارد و نزدیک به شرایط واقعی در جوش خطوط لوله گاز، روش خودمهاری[2][۱۹]است که قبلا در مورد جوش فولاد X70گزارش نشده است. در این پژوهش با استفاده از یک الکترود کم هیدروژن و یک الکترود با هیدروژن بالا (سلولزی)، تأثیر پیش‌گرم و پس‌گرم روی احتمال وقوع ترک سرد هیدروژنی در جوش فولاد X70 به روش خودمهاری بررسی شده است.

2-روش آزمایش

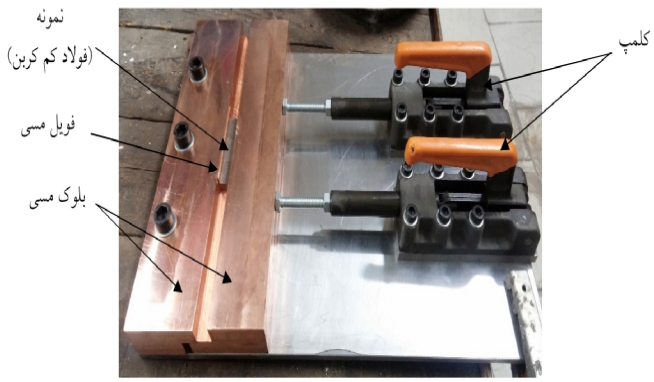
2-1-اندازه‌گیری هیدروژن جوش

برای اندازه‌گیری مقدار هیدروژن نفوذپذیر در جوش، از روش جابه‌جایی جیوه بر اساس استاندارد ISO 3690 استفاده شد[۲۰].

بدین منظور دستگاهی جهت اندازه‌گیری هیدروژن نفوذی طبق استاندارد تهیه شد که شمایی از آن در شکل(۱)مشاهده می‌شود. همچنین فیکسچر جوشکاری بر اساس همین استاندارد ساخته شد(شکل۲). وظیفه فیکسچر، انتقال سریع حرارت به بلوک‌های مسی است تا نمونه بلافاصله بعد از جوشکاری سرد شود و تمام هیدروژن جوش به دام افتد.



شکل 1- شمایی از مونتاژ تهیه شده برای انجام آزمایش اندازه‌گیری هیدروژن جوش



شکل 2- فیکسچر جوشکاری ساخته شده برای ایجاد جوش قبل از اندازه‌گیری هیدروژن

نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش اندازه‌گیری هیدروژن جوش باید از فولاد کم کربن اکسیدزدایی نشده[3] با مقدار کربن کم‌تر از ۰٫۱۸wt% و گوگرد کم‌تر از ۰٫۰۲wt% تهیه شوند. نمونه‌ها با ابعاد ۳۰×۱۵×۱۰ میلی‌متر آماده شدند.ترکیب شیمیایی آن‌ها در جدول(۱) آورده شده است. همچنین طبق دستورالعمل

1-Law
2-Self-restraint test
3 -Plain carbon non-rimming steel

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

جدول 1- ترکیب شیمیایی فولاد استفاده شده در آزمایش اندازه‌گیری هیدروژن جوش بر حسب درصد وزنی

C	Si	Mn	P	S
0.08	0.25	0.68	0.016	0.003

جدول 2-ترکیب شیمیایی فولاد X70 بر حسب درصد وزنی

C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	Al	Cr	Mo	Ni	Cu	As
0.059	0.26	1.63	0.011	0.006	0.053	0.04	0.019	0.022	0.22	0.09	0.08	0.04	0.01

جدول 3- نتایج آزمون کشش از نمونه فولاد X70

	تنش تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	افزایش طول (٪)
موازی با جهت نورد	۴۶۰	۶۵۷	۳۰
عمود بر جهت نورد	۴۸۷	۶۵۹	۲۷

جدول 4- ترکیب شیمیایی الکترودهای استفاده شده بر حسب درصد وزنی (بر اساس گواهینامه الکترود صادر شده توسط شرکت الکترود یزد)

	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V
E8010-P1	0.14	0.76	0.24	0.014	0.005	0.88	0.03	0.02	<0.01
E8018-G	0.06	1.39	0.40	0.016	0.011	0.75	0.043	<0.01	<0.01

استاندارد و اطمینان از عدم وجود هیدروژن در نمونه‌ها قبل از جوشکاری، عملیات حرارتی گاززدایی در دمای ۶۵۰ °C به مدت یک ساعت انجام شد[۲۰].

نمونه‌ای که قبلا جوشکاری و تمیزکاری شده و در نیتروژن مایع غوطه‌ور است، از نیتروژن مایع خارج و بعد از رسیدن دمای آن به نزدیک صفر درجه سانتی‌گراد با استون شسته و با فشار هوا خشک شده و داخل Y-tube قرار گرفت.

سپس با ایجاد خلأ، باقیمانده احتمالی استون یا هوا از Y-tube خارج شده و نمونه توسط آهن‌ربا به زیر ستون مدرج هدایت شد.بعد از گذشت زمان کافی و جمع شدن هیدروژن در ستون مدرج، طول ستون گاز جمع شده و اختلاف سطح جیوه در دو سمت Y-tube اندازه‌گیری شد. همچنین دما و فشار محیط، اندازه‌گیری و ثبت شد. با استفاده از این مقادیر ورابطه(۱) می‌توان حجم هیدروژن جمع شده در شرایط استاندارد (STP) را محاسبه کرد:

$$V_{STP} = \frac{273 \times (p-h)\pi r^2 C}{760 \times (273+T) \times 1000} \quad (۱)$$

برای نشان دادن میزان هیدروژن نفوذپذیر بر حسب میلی لیتر در ۱۰۰ گرم فلز جوش از رابطه(۲) استفاده می‌شود.

$$H_D = V_{STP} \times \frac{100}{m_2 - m_1} \quad (۲)$$

2-2-آزمایش ترک سرد به روش خودمهاری

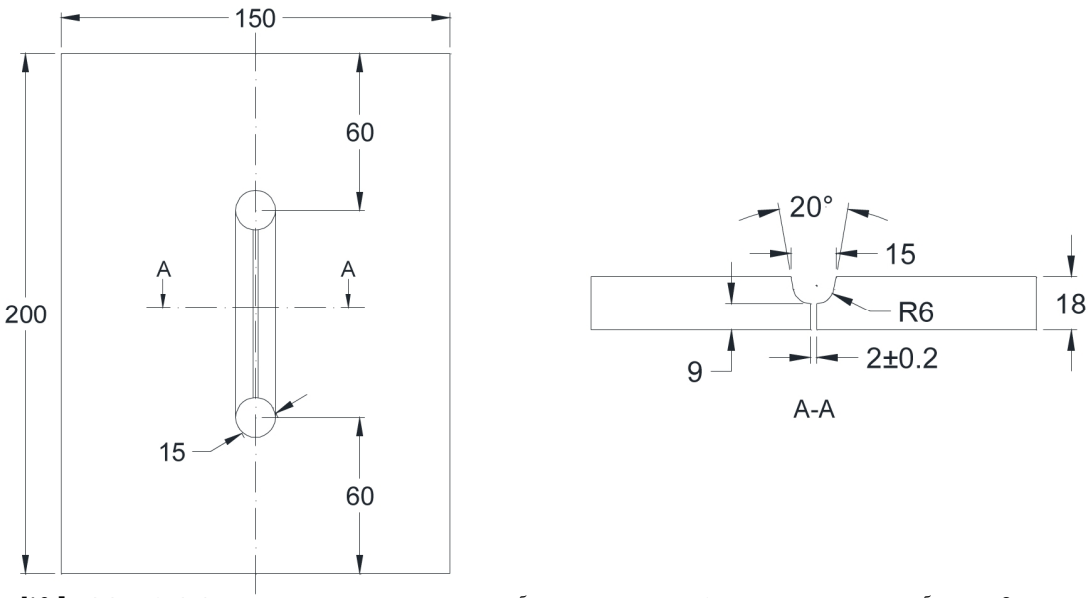
به منظور ایجاد شرایط واقعی، فلز پایه و الکترود از همان تأمین کنندگان اصلی برای خط انتقال، تهیه گردید. بنابراین فولاد API 5L X70 از ورق مورد استفاده برای ساخت لوله از شرکت لوله‌سازی اهواز و الکترودهای مورد استفاده در آزمایش نیز از شرکت الکترود یزد تهیه شد.آنالیز شیمیایی فولاد X70 در جدول(۲) و نتایج آزمون کشش در جهت نورد و عمود بر جهت نورد در جدول(۳) مشاهده می‌شود. برای جوشکاری نمونه‌ها از الکترود سلولزیAWS A5.5 E8010-P1 و الکترود کم هیدروژن AWS A5.5 E8018-G با قطر ۳٫۲ mm، ساخت شرکت الکترود یزد استفاده شد که مشخصات آن در جدول(۴و۵) نشان داده شده است.

جهت بررسی تأثیر نوع الکترود و شرایط جوشکاری روی جوش حاصل و تعیین شرایط منجر به ایجاد ترک سرد، از استاندارد ISO17642-2 استفاده شد [۱۹]. در این روش با ایجاد قید برای جوشکاری و ایجاد جوش با شرایط مشخص، ریشه جوش و HAZ بررسی می‌شود تا وجود ترک یا عدم وجود آن تحت شرایط جوشکاری شده، بررسی شود. طبق این استاندارد تعدادی نمونه با شیار U با ابعاد ۲۰۰×۱۵۰×۱۸ میلیمتر از فولاد X70 تهیه شد(شکل۳). با توجه به استفاده از روش جوشکاری الکترود دستی در خط انتقال گاز جهت اتصال لوله‌ها، از

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

جدول 5- خواص مکانیکی الکترودهای استفاده شده (بر اساس گواهینامه الکترود صادر شده توسط شرکت الکترود یزد)

	تنش تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	افزایش طول (٪)	دمای آزمون ضربه (°C)	متوسط انرژی آزمون ضربه (j)
E8010-P1	۴۷۰	۵۷۱	۲۵	-۳۰	۳۹
E8018-G	۴۶۲	۵۵۹	۴۱	-۴۶	۱۱۴



شکل 3- نمونه آماده شده از جنس فولاد X70 با شیار U برای آزمایش ترک سردبر اساس استاندارد ISO17642-2 [19]
(ابعاد بر حسب میلیمتر هستند)

همین روش جوشکاری در این تحقیق استفاده شد.

شرایط مختلف پیش‌گرم و پس‌گرم با دو الکترود مورد بررسی طبق جدول(۶) روی نمونه‌ها اعمال شد. بر اساس ترکیب شیمیایی، ضخامت نمونه، حرارت ورودی و مقدار هیدروژن الکترود سلولزی مطابق با استاندارد EN 1011-2دمای پیش‌گرم برابر ۱۰۰°C و پس‌گرم ۲۰۰°C به مدت ۲ ساعت در نظر گرفته شد[۲۱].پارامترهای جوشکاری شامل جریان، ولتاژ، سرعت جوشکاری و حرارت ورودی در جدول(۷) آورده شده است.

بعد از ایجاد یک پاس جوش در شکاف نمونه استاندارد و بعد از گذشت ۴۸ ساعت، بازرسی چشمی و آزمون مایعات نافذ روی سطح جوش انجام شد. سپس ۵ برش با فاصله‌های برابر روی نمونه، مطابق شکل(۴) زده شد تا ۱۰ سطح برای بررسی ماکروگرافی و متالوگرافی به دست آید. برش‌کاری توسط فشار آب[1] انجام شد تا فرآیند برش روی گسترش ترک و ساختار متالوگرافی تأثیر نداشته باشد. نمونه‌ها بعد از پولیش با محلول نایتال ۲٪ اچ شده و با میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تشخیص بهتر ریزساختار جوش، نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی[2] نیز بررسی شد.همچنین آزمایش میکروسختی به روش ویکرز با نیروی gf ۵۰، به صورت یک پروفیل از وسط جوش تا فلز پایه با فواصل ۵۰۰میکرومتر روی نمونه‌ها انجام شد.

3- نتایج و بحث

برای هر کدام از الکترودهای مورد استفاده، سه سری نمونه آماده و جوشکاری شده و مقدار هیدروژن آن‌ها اندازه‌گیری شد که مقادیر به دست آمده در جدول(۸و۹) نشان داده شده است.

1-Water jet
2-Scanning Electron Microscope (SEM)

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

جدول 6- شرایط مختلف جوشکاری برای بررسی وقوع ترک سرد

نمونه	نوع الکترود	پیش‌گرم	پس‌گرم
۱	E8010-P1	خیر	خیر
۲	E8010-P1	خیر	بله
۳	E8010-P1	بله	خیر
۴	E8010-P1	بله	بله
۵	E8018-G	خیر	خیر
۶	E8018-G	خیر	بله
۷	E8018-G	بله	خیر
۸	E8018-G	بله	بله

جدول 7- پارامترهای جوشکاری اعمال شده روی نمونه‌ها

نمونه	جریان (A)	ولتاژ (V)	سرعت جوشکاری (cm/min)	حرارت ورودی (kJ/mm)
۱	۹۰	۲۸	۱۵/۹	۰/۸
۲	۹۰	۲۷	۱۴/۴	۰/۸
۳	۸۵	۲۶	۱۵/۷	۰/۷
۴	۸۵	۲۶	۱۶/۶	۰/۶
۵	۱۰۵	۲۳	۱۹/۳	۰/۶
۶	۱۰۵	۲۳	۱۸/۰	۰/۶
۷	۱۰۵	۲۳	۱۸/۳	۰/۶
۸	۱۰۵	۲۳	۱۸/۶	۰/۶

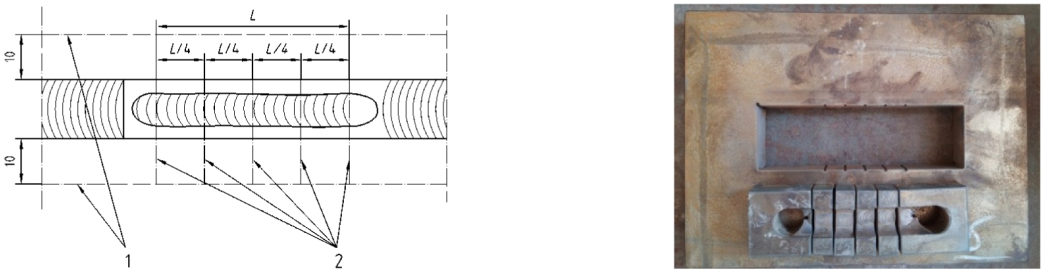
همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج اندازه‌گیری هیدروژن جوش برای هر الکترود اختلاف کمی با هم دارند و می‌توان مقدار هیدروژن هر الکترود را با دقت خوبی بیان کرد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت و شکل(۵) نشان می‌دهد، الکترود کم هیدروژنE8018-G مقدار هیدروژن بسیار کم‌تری نسبت به الکترود سلولزی E8010-P1 دارد (میانگین ۱٫۱ در برابر ۴۳٫۶).

نتایج بازرسی چشمی و مایعات نافذ روی سطح جوش نمونه‌هایی که طبق جدول(۶) برای بررسی حساسیت به ترک سرد جوشکاری شده بودند، نشان داد که نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۵ دارای ترک سطحی سرتاسری بودند. برای مشخص شدن عمق ترک و بررسی بیش‌تر به گونه‌ای که در بخش روش آزمایش توضیح داده شد، مقطع نمونه‌ها ماکروگرافی شد. تصاویر ماکروگرافی با شماره مرتبط باهرتصویر مربوط به جدول(۶) در شکل(۶) نشان داده شده است. این تصاویر ترک‌های سطحی مشاهده شده را تأیید می‌کنند و همچنین نشان می‌دهند که ترک‌ها عمقی بوده و از ریشه جوش تا سطح ادامه دارند. از این بررسی‌ها می‌توان نتیجه گرفت که در صورت استفاده از الکترود سلولزی برای جوشکاری، تنها در صورت استفاده هم‌زمان از هر دو عملیات پیش‌گرم وپس‌گرم می‌توان انتظار داشت که ترک سرد ایجاد نشود، در صورتی که با استفاده از الکترود کم هیدروژن تنها در صورتی که هیچکدام از عملیات پیش‌گرم و پس‌گرم به کار برده نشود، احتمال وقوع ترک سرد وجود دارد.

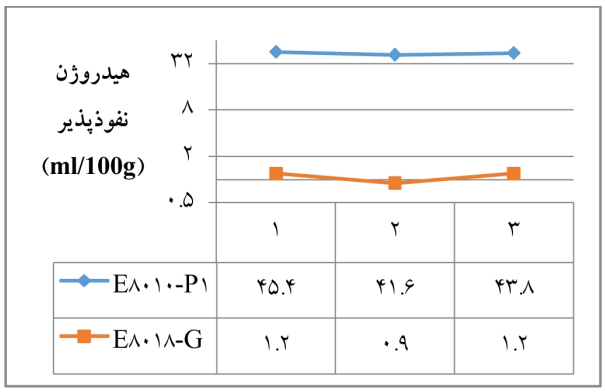
از شکل(۶) می‌توان مشاهده کرد که در نمونه‌های ۱ تا ۳ که با الکترود سلولزی جوشکاری شده‌اند،ترک درفلز جوش ایجادشده ولی ترک ایجاد شده در نمونه ۵ که با الکترود کم هیدروژن جوشکاری شده، در HAZ قرار دارد. عایشه[1] و همکارانش [۵] نشان دادند که با افزایش منگنز در فولاد X70 ضریب نفوذ هیدروژن در این فولاد افزایش می‌یابد. از آن‌جا که مقدار منگنز در الکترود کم هیدروژن E8018-G تقریبا دو برابر

1-Ayesha

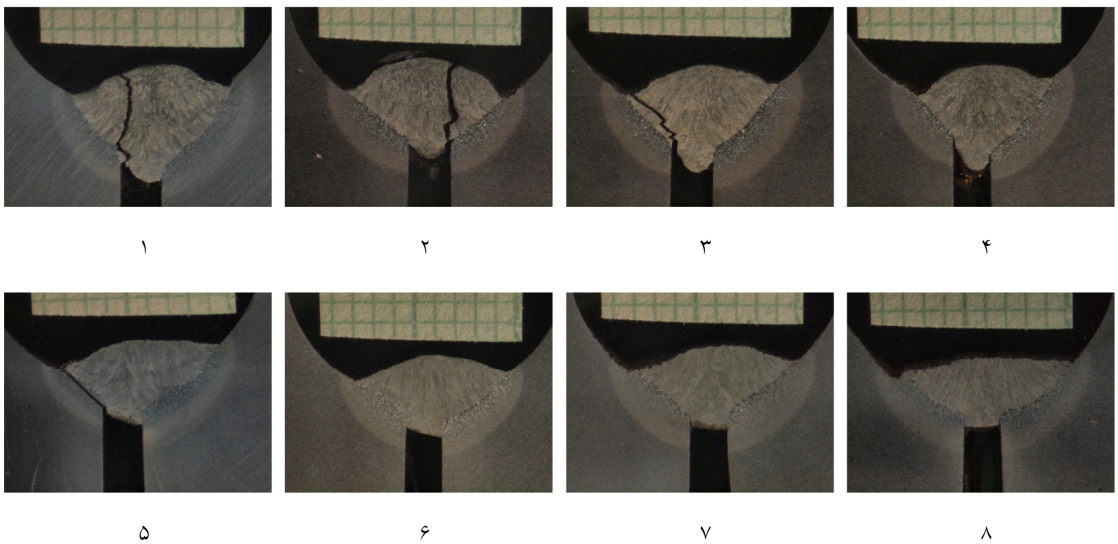
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]



شکل 4- محل برش و بررسی ترک روی نمونه استاندارد جوشکاری شده بر اساس استاندارد**ISO17642-2** [19]



شکل 5- مقایسه مقدار هیدروژن نفوذپذیر در جوش حاصل از دو نوع الکترود



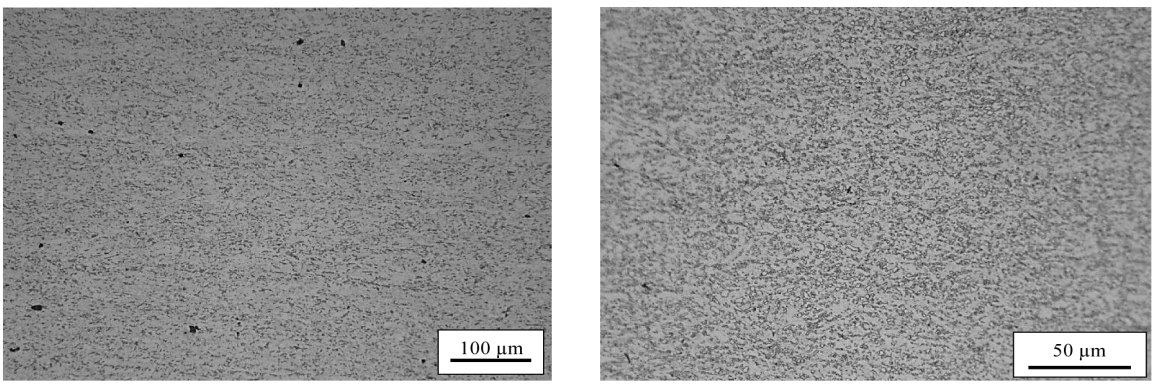
شکل 6- تصاویر ماکروگرافی از آزمایش حساسیت به ترک سرد. (اعداد زیر هر تصویر مربوط به شرایط اعمال شده طبق جدول 6 می‌باشد.)

الکترود سلولزی E8010-P1است(جدول۴)، ضریب نفوذ هیدروژن در منطقه جوش حاصل از الکترود E8018-G بیش‌تراز الکترود E8010-P1می‌باشد. غلظت اولیه هیدروژن در الکترود E8010-P1 به مراتب بیش‌تر از الکترود E8018-G است ولی با این وجود، غلظت نسبی هیدروژن در فصل مشترک فلز پایه و جوش نسبت به بقیه مناطق در نمونه‌های جوشکاری شده با الکترود E8018-G بیش‌تر از الکترود E8010-P1 می‌باشد. بدین معنا که یکی از عوامل بروز ترک سرد یعنی هیدروژن در

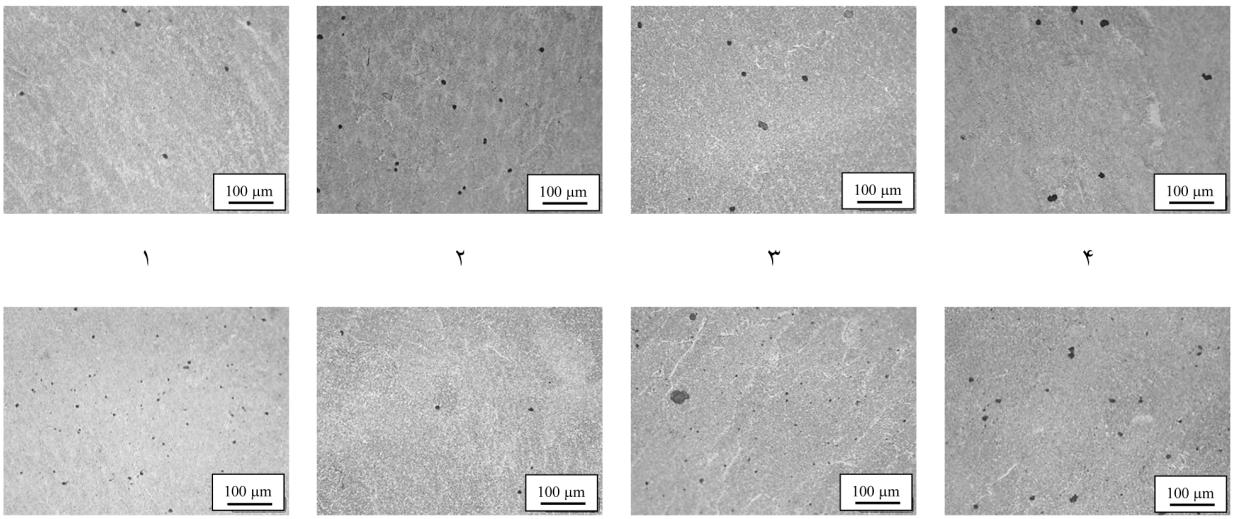
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

این منطقه تقویت شده و در صورت وجود شرایطی که منجر به ترک سرد هیدروژنی شود، این منطقه نسبت به مناطق دیگر حساس‌تر است و وجود ترک در HAZ نمونه ۵ می‌تواند به این دلیل باشد.

شکل(۷) ریزساختار فلز پایه را نشان می‌دهد. در این تصویر می‌توان ساختار فریتی با دانه‌های ریز هم محور که ذرات ریز پرلیت به صورت پراکنده در بین آن‌ها وجود دارد را مشاهده کرد. این ساختار ناشی از عملیات ترمومکانیکی در فرآیند تولید فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا است [۲۲].شکل(۸و۹) به ترتیب تصاویر میکروسکوپی نوری والکترونی روبشی از فلز جوش نمونه هایی که با شرایط جدول(۶) جوشکاری شده‌اند رانشان می‌دهند. از مقایسه تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی و با کمک نرم افزار ImageJ و مقایسه سختی، فازهای موجود در ریزساختار جوش نمونه‌ها و درصد تقریبی آن‌ها مشخص شد که نتایج آن به طور خلاصه در جدول(۱۰) آورده شده است.از آن‌جا که ساختار فریت سوزنی[1]یک ساختار در هم قفل شده متشکل از بینیت یا فریت ویدمن‌اشتاتن[2] است که روی ناخالصی‌های داخل دانه‌های آستنیت اولیه جوانه زده‌اند، در این‌جا فریت سوزنی به عنوان یک ریزساختار مستقل در نظر گرفته نمی‌شود[۲۳]. با توجه به اینکه فاز غالب در ریزساختار همه نمونه‌ها بینیت است، فازهای دیگر با درصد کمتر مثل انواع فریت و مارتنزیت در شکل(۹) با پیکان



شکل 7- تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار فلز پایه در دو بزرگنمایی متفاوت (اچ شده با محلول نایتال 2%)



شکل 8 - تصاویر میکروسکوپی نوری با بزرگنمایی برابر از ریزساختار منطقه جوش حاصل از جوشکاری. اعداد زیر هر تصویر مربوط به شرایط اعمال شده طبق جدول 6 می‌باشد. (اچ شده با محلول نایتال 2%)

1-Acicular ferrite
2-Widmanstatten ferrite

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

جدول 8- مقدار هیدروژن نفوذپذیر در جوش حاصل از الکترود سلولزی E8010-P1

نمونه	حجم هیدروژن در شرایط استاندارد بر حسب میلی‌لیتر (V_{STP})	جرم اولیه بر حسب گرم (m_1)	جرم نهایی بر حسب گرم (m_2)	هیدروژن نفوذپذیر بر حسب میلی‌لیتر بر ۱۰۰ گرم فلز جوش (H_D)	متوسط هیدروژن نفوذپذیر بر حسب میلی‌لیتر بر ۱۰۰ گرم فلز جوش (H_D)
a	۱/۴۷	۳۵/۰۷	۳۸/۳۰	۴۵/۴۳	۴۳/۶۲
b	۱/۵۶	۳۵/۰۶	۳۸/۸۲	۴۱/۵۸	
c	۱/۳۲	۳۵/۰۸	۳۸/۱۰	۴۳/۸۵	

جدول 9- مقدار هیدروژن نفوذپذیر در جوش حاصل از الکترود کم هیدروژن E8018-G

نمونه	حجم هیدروژن در شرایط استاندارد بر حسب میلی‌لیتر (V_{STP})	جرم اولیه بر حسب گرم (m_1)	جرم نهایی بر حسب گرم (m_2)	هیدروژن نفوذپذیر بر حسب میلی‌لیتر بر ۱۰۰ گرم فلز جوش (H_D)	متوسط هیدروژن نفوذپذیر بر حسب میلی‌لیتر بر ۱۰۰ گرم فلز جوش (H_D)
d	۰/۰۴	۳۵/۱۵	۳۸/۶۶	۱/۱۷	۱/۱۰
e	۰/۰۳	۳۵/۱۸	۳۸/۲۳	۰/۹۴	
f	۰/۰۴	۳۵/۱۸	۳۸/۶۵	۱/۱۹	

جدول 10- درصد فازهای موجود در منطقه جوش نمونه‌ها

نمونه	فریت ویدمن‌اشتاتن	فریت مرزدانه‌ای	فریت چندوجهی	بینیت	مارتنزیت
۱	٪۱۰	–	–	٪۷۰	٪۲۰
۲	–	٪۱۰	–	٪۸۰	٪۱۰
۳	–	–	٪۲۰	٪۸۰	–
۴	–	–	٪۱۰	٪۹۰	–
۵	–	٪۱۰	–	٪۸۰	٪۱۰
۶	٪۱۰	–	–	٪۹۰	–
۷	–	٪۲۰	٪۲۰	٪۶۰	–
۸	–	–	٪۱۰	٪۹۰	–

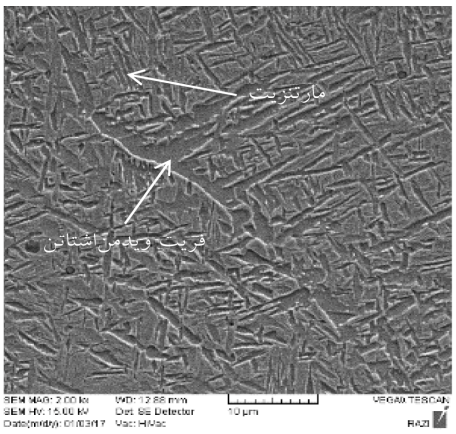
مشخص شده‌اند.در نمونه‌هایی که تحت پیش‌گرم قرار گرفته‌اند (نمونه‌های شماره ۳، ۴، ۷ و ۸ درجدول۶)، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد فریت چندوجهی[1] دیده می‌شود که به دلیل کاهش سرعت سرد شدن ناشی از پیش‌گرم، شرایط برای تشکیل این فاز در مرز دانه‌های آستنیت اولیه به وجود آمده است. همچنین در نمونه‌هایی که بدون پیش‌گرم جوشکاری شده‌اند (۱، ۲، ۵ و ۶)، فریت ویدمن‌اشتاتن و مارتنزیت مشاهده می‌شود که ناشی از سرعت سرد شدن بالاتر بعد از جوشکاری است و نتایج میکروسختی که در ادامه آورده شده‌اند گواهی بر وجود این فازهای ترد هستند. درصد کمی فریت مرزدانه‌ای[2] نیز در نمونه‌های ۲ و ۵ مشاهده می‌شود.درصد فازهای ترد در نمونه ۲ نسبت به ۱ و در نمونه ۶ نسبت به ۵ کاهش یافته که می‌تواند به دلیل اعمال پس‌گرم باشد.

شکل(۱۰) نتایج آزمایش میکروسختی به روش ویکرز را به صورت یک پروفیل از وسط جوش تا فلز پایه نشان می‌دهد. تغییرات سختی در همه نمونه‌ها یک روند تقریبا مشابه دارد و از مرکز فلز جوش به سمت فلز پایه،سختی کاهش می‌یابد. در نمونه‌های جوشکاری شده با الکترود سلولزی (۱۰-الف)،

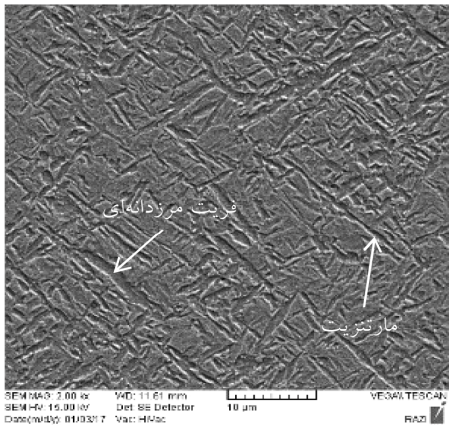
1-Polygonal ferrite

2-Ferrite veins

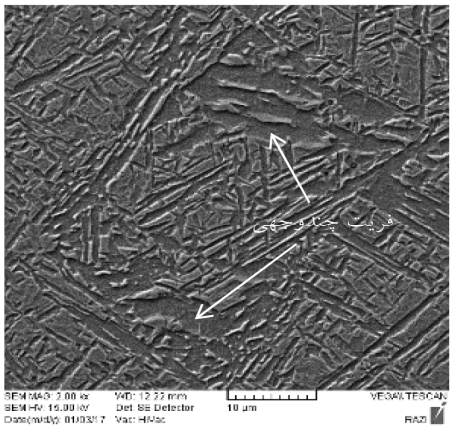
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]



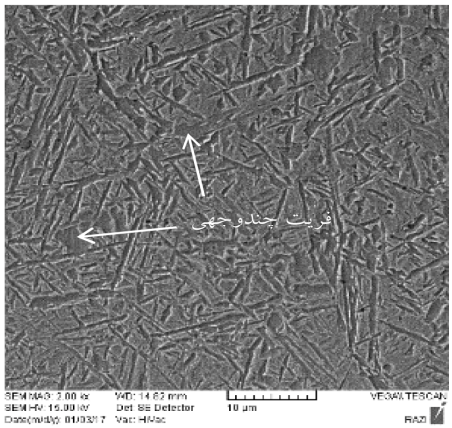
۱



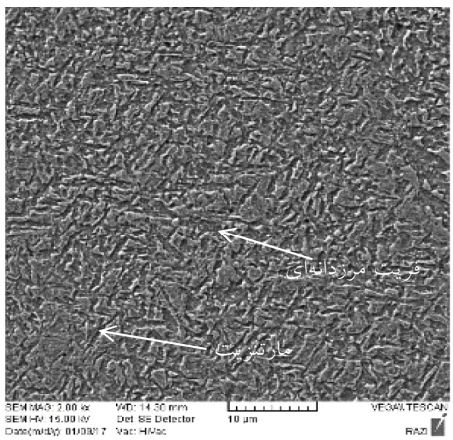
۲



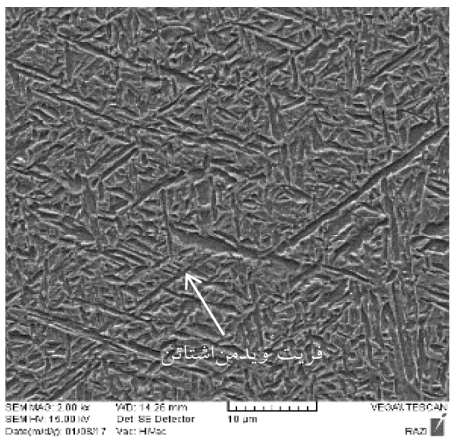
۳



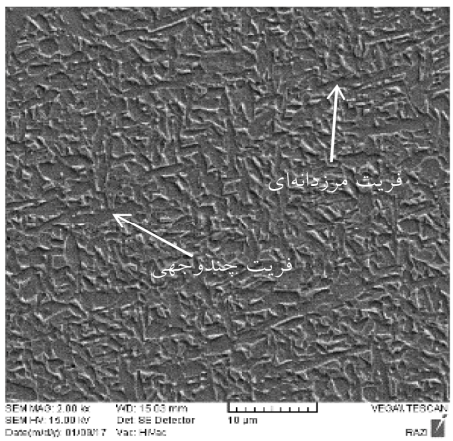
۴



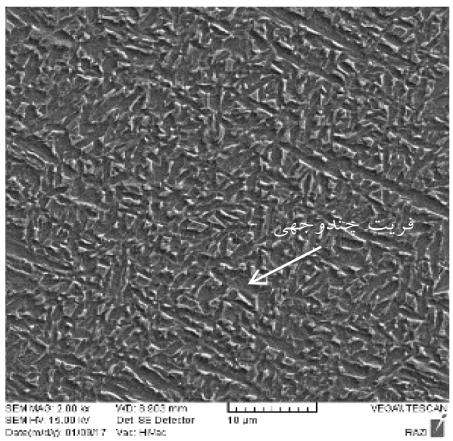
۵



۶



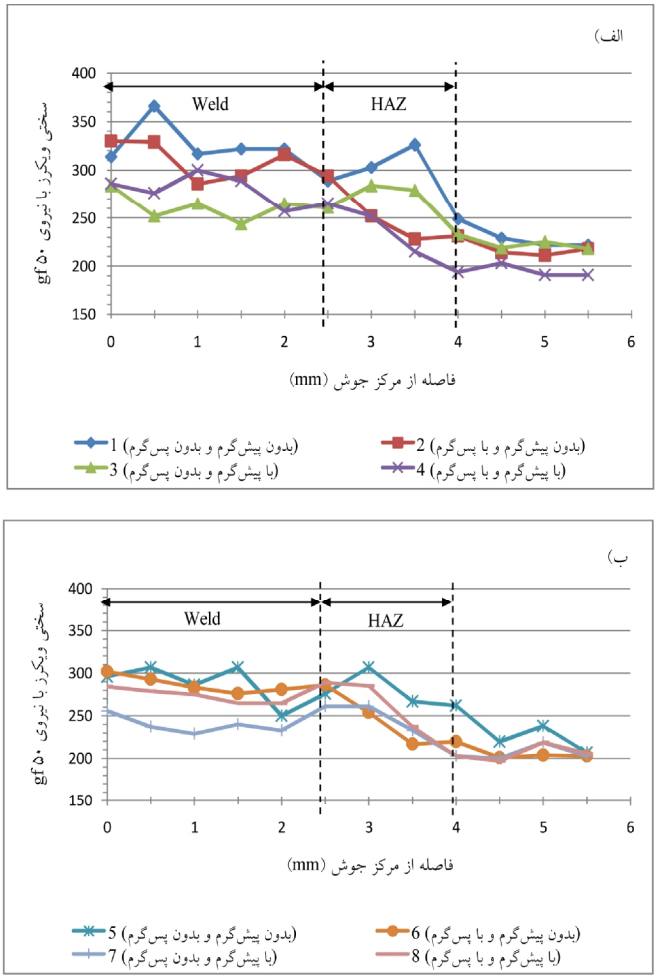
۷



۸

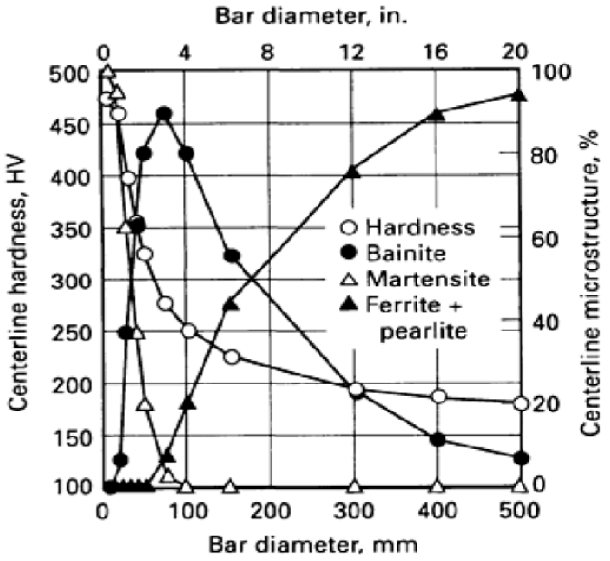
شکل 9 - تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی با بزرگنمایی برابر از ریزساختار منطقه جوش. اعداد زیر هر تصویر مربوط به شرایط اعمال شده طبق جدول 6 می‌باشد. (اچ شده با محلول نایتال 2%)

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]



شکل 10- نتایج آزمایش میکروسختی به روش ویکرز با نیروی gf 50، به صورت یک پروفیل از وسط جوش تا فلز پایه. الف) نمونه‌های جوشکاری شده با الکترود سلولزی E8010-P1، ب) نمونه‌های جوشکاری شده با الکترود کم هیدروژن E8018-G.

نمونه‌های ۱ و ۲ که بدون پیش‌گرم جوشکاری شده‌اند، دارای بالاترین مقدار سختی جوش هستند و بعد از جوشکاری ترک خوردند. حضور هیدروژن زیاد ناشی از الکترود سلولزی همراه با ساختار ترد موجود در این نمونه‌ها موجب ایجاد این ترک شده است.سختی نمونه ۲ در HAZ نسبت به نمونه ۱ کاهش زیادی دارد که می‌تواند به دلیل اعمال پس‌گرم روی آن باشد.جوش نمونه‌های ۳ و ۴ که با پیش‌گرم جوشکاری شدند، سختی کم‌تری نسبت به نمونه‌های ۱ و ۲ دارند. نمونه ۳ نسبت به نمونه ۴ در منطقه جوش سختی کم‌تر و در HAZ سختی بیش‌تری دارد که ناشی از اعمال پس‌گرم روی نمونه ۴ است.



شکل 11- ریزساختار و سختی مرکز شافت فولاد AISI 8620 (0.2% C, 1% Mn, 0.5% Ni, 0.5% Cr, 0.2% Mo) بعد از سرد شدن در آب[24].

وجود ترک در منطقه جوش نمونه ۳ با وجود سختی کم‌تر نسبت به منطقه جوش نمونه ۴، می‌تواند به دلیل وجود غلظت بالاتر هیدروژن در منقطه جوش این نمونه باشد و تأثیر عملیات پس‌گرم روی نمونه ۴ در نفوذ و خروج هیدروژن از منطقه جوش و مقاومت بیش‌تر نسبت به ترک هیدروژنی را نشان می‌دهد.در نمونه‌های جوشکاری شده با الکترود کم هیدروژن(۱۰-ب)، همان‌طور که انتظار می‌رفت نمونه ۵ بالاترین مقدار سختی جوش و HAZرا دارد.

وجود ترک در HAZ نمونه ۵ به دلیل وجود ساختار تردتر نسبت به نمونه‌های ۶ تا ۸ و همچنین غلظت بالاتر هیدروژن به دلیل عدم پیش‌گرم و پس‌گرم می‌باشد.با مقایسه نتایج سختی با ریزساختار فلز جوش می‌توان مشاهده کرد که بسته به شرایط پیش‌گرم و پس‌گرم با کاهش فازهای ترد در ساختار، مقدار سختی نیز کاهش می‌یابد.

شکل(۱۱) ریزساختار و سختی مرکزیک فولاد کم آلیاژ، بعد از سرد شدن در آب را نشان می‌دهد. ریزساختار و سختی ناشی از آن در نمونه‌های جوشکاری شده، با ریزساختار و سختی یک شافت فولادی بعد از عملیات حرارتی مطابقت دارد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

از شکل(۱۰) مشاهده می‌شود که سختی جوش نمونه ۴ از نمونه ۳ و سختی جوش نمونه ۸ از نمونه ۷ بالاتر است. یعنی استفاده هم‌زمان از پیش‌گرم و پس‌گرم، سختی جوش را نسبت به استفاده از فقط پیش‌گرم، افزایش می‌دهد و این افزایش سختی در جوش هر دو نوع الکترود ایجاد شده است. این افزایش سختی ممکن است به دلیل نوعی سختی ثانویه ناشی از پس‌گرم باشد ولی با آزمایشات انجام شده در این پژوهش نمی‌توان علت قطعی این افزایش سختی را بیان کرد. برای بیان علت علمی این پدیده نیاز به آزمایشات و بررسی‌های بیشتر است.

بنابراین به کار بردن پیش‌گرم و پس‌گرم دو تأثیر دارد. اول سرعت نفوذ هیدروژن را افزایش داده و زمان بیش‌تری برای خروج هیدروژن از قطعه ایجاد می‌کند که منجر به کاهش غلظت موضعی هیدروژن در مناطق بحرانی از نظر ساختار و تنش پسماند می‌شود. دوم باعث به وجود آمدن ریزساختاری با تردی نسبتا کم‌تر و مقاوم‌تر به ترک سرد می‌شود. در پژوهشی که دیکینسون و رایس تأثیر پارامترهای مختلف روی حساسیت به ترک هیدروژنی را به روش کاشت بررسی کردند، پیش‌گرم بیشترین تأثیر را در کاهش حساسیت به ترک هیدروژنی داشت[۱۶]. در این مطالعه نیز همانطور که درجدول(۱۰) و شکل(۱۰) مشاهده می‌شود، پیش‌گرم بیشترین تأثیر را روی کاهش فازهای ترد و کاهش سختی جوش دارد.زیرا پیش‌گرم سرعت سرد شدن از دمای ۸۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد را کاهش می‌دهد و طبق نمودارهای سرد شدن پیوسته (CCT[1])، فازهای نرم‌تر مثل فریت با سختی کمتر تشکیل می‌شود[۱۶]. بیشترین تأثیر پس‌گرم روی خروج هیدروژن از سطح نمونه و کاهش غلظت آن در مناطق حساس است.

4- نتیجه‌گیری

تأثیر نوع الکترود، پیش‌گرم و پس‌گرم بر حساسیت به ترک سرد هیدروژنی در جوش فولاد X70به روش خودمهاری بررسی شد. بدین منظور ابتدا مقدار هیدروژن نفوذپذیر موجود در دو نوع الکترود سلولزی و کم هیدروژن به روش جابه‌جایی جیوه اندازه‌گیری شد. مقدار متوسط هیدروژن نفوذپذیر در الکترود سلولزی E8010-P1 و الکترود کم هیدروژن E8018-G به ترتیب ۴۳٫۶ و ۱٫۱ میلی‌لیتر در ۱۰۰ گرم فلز جوش بود. سپس حساسیت به ترک سرد هیدروژنی در حالت خودمهاری و با استفاده از بازرسی چشمی، مایعات نافذ، متالوگرافی و سختی‌سنجی مورد بررسی قرار گرفت ونتایج زیر حاصل شد:

جوشکاری با الکترود سلولزی E8010-P1 به جز اعمال پیش‌گرم و پس‌گرم به طور هم‌زمان در بقیه موارد منجر به ایجاد ترک می‌شود. بنابراین با توجه به مقدار هیدروژن بسیار زیاد در جوش حاصل از جوشکاری با الکترود سلولزی می‌توان با عملیات پیش‌گرم و پس‌گرم مناسب از به وجود آمدن ترک سرد هیدروژنی جلوگیری کرد.

جوش حاصل از جوشکاری با الکترود کم هیدروژن E8018-G در شرایطی که پیش‌گرم و پس‌گرم اعمال نشود، ترک خواهد خورد. بنابراین با توجه به ساختار و ضخامت و استحکام نسبتا بالای فلز پایه و با وجود قید ایجاد شده توسط طرح آزمایش، جوشکاری با الکترود کم هیدروژن نیز باعث جلوگیری از وقوع ترک سرد نمی‌شود و اعمال پیش‌گرم یا پس‌گرم برای اطمینان از جلوگیری از ترک سرد هیدروژنی ضروری است.

بررسی ریزساختار نمونه‌های جوشکاری شده در شرایط مختلف با میکروسکوپ نوری و الکترونی نشان داد که فاز غالب در منطقه جوش همه نمونه‌ها بینیت است. در نمونه‌هایی که با پیش‌گرم جوشکاری شده‌اند، ۱۰ تا ۲۰ درصد فریت چندوجهی دیده می‌شود و فازهای ترد مثل مارتنزیت و فریت ویدمن‌اشتاتن در نمونه‌های بدون پیش‌گرم آشکار می‌شوند.

نتایج میکروسختی نشان داد که بالاترین سختی مربوط به نمونه‌ای است که با الکترود سلولزی E8010-P1 بدون پیش‌گرم و پس‌گرم جوشکاری شده است و سختی بالاتر از ۳۲۰HV را ایجاد می‌کند. با اعمال پیش‌گرم، سختی جوش هر دو نوع الکترود سلولزی و کم هیدروژن کاهش می‌یابد. پایین‌ترین سختی جوش مربوط به نمونه‌هایی است که با پیش‌گرم و بدون پس‌گرم جوشکاری شده‌اند.

1-Continues Cooling Transformation

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

در بین نمونه‌های جوشکاری شده با الکترود سلولزی و با پیش‌گرم، جوش نمونه بدون پس‌گرم سختی کم‌تری نسبت به نمونه جوشکاری شده با پس‌گرم دارد. بر خلاف سختی کم‌تر نمونه بدون پس‌گرم ترک خورد که می‌تواند تأثیر پس‌گرم در خروج هیدروژن از جوش و افزایش مقاومت نسبت به ترک سرد هیدروژنی را نشان دهد.ریزساختار مشاهده شده در نمونه‌ها و سختی آن‌ها با ریزساختار و سختی یک شافت فولادی بعد از عملیات حرارتی مطابقت دارد.

قدردانی

از حمایت وپشتیبانی شرکت مهندسی و توسعه گاز ایران قدردانی می‌شود. همچنین از شرکت توربین‌های صنعتی غدیر یزد و شرکت الکترود یزد جهت فراهم کردن امکانات جوشکاری قطعات، تشکر می‌شود.

منابع

1- Perez, T. E., "Corrosion in the Oil and Gas Industry: An Increasing Challenge for Materials," *JOM The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, vol. 65, pp. 1033-1042, 2013.

2- Srinivasan, R. and Neeraj, T., "Hydrogen Embrittlement of Ferritic Steels: Deformation and Failure Mechanisms and Challenges in the Oil and Gas Industry," *JOM The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, vol. 66, pp. 1377-1382, 2014.

3-Hirth, J., "Effects of Hydrogen on the Properties of Iron and Steel," *Metallurgical Transactions A*, vol. 11, pp. 861-890, 1980.

4- Institute, A. P., "Specification for Line Pipe," in ANSI/API Specification 5L, ed. Washington, D.C.: API Publishing Services, 2008.

5- Ayesha J. Haq, K. M., D P. Dunne, A Calka, E V. Pereloma, "Effect of Microstructure and Composition on Hydrogen Permeation in X70 Pipeline Steels," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, pp. 2544-2556, 2013.

6- Godefroid, L. B., Cândido, L. C., Toffolo, R. V. B., and Barbosa, L. H. S., "Microstructure and Mechanical Properties of Two Api Steels for Iron Ore Pipelines," *Materials Research*, vol. 17, pp. 114-120, 2014.

7- Davidson, J. L., "Hydrogen Induced Cracking of Low Carbon - Low Alloy Steel Weldments," *Materials Forum*, vol. 19, pp. 35-51, 1995.

8- VIYANIT, E., "Numerical Simulation of Hydrogen Assisted Cracking in Supermartensitic Stainless Steel Welds," Ph.D., Mechanical, Helmut-Schmidt, Hamburg, 2005.

9-GK, P. and Y, K., "Diffusible Hydrogen in Steel Weldments," Transactions of JWRI, vol. 42, pp. 39-62, 2013.

10- Chakraborty , G., Rejeesh , R. , and Albert , S. K. , "Study on Hydrogen Assisted Cracking Susceptibility of Hsla Steel by Implant Test," *Defence Technology*, p. in press, 2016.

11-Fiore, S. and Boring, M., "Evaluation of Hydrogen Cracking in Weld Metal Deposited Using Cellulosic-Coated Electrodes," EWI: materials joining technology, 2009.

12-Alvaro, A., Olden, V., Macadre, A., and Akselsen, O. M., "Hydrogen Embrittlement Susceptibility of a Weld Simulated X70 Heat Affected Zone under H2 Pressure," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 597, pp. 29-36, 2014.

13-Olden, V., Alvaro, A., and Akselsen, O. M., "Hydrogen Diffusion and Hydrogen Influenced Critical Stress Intensity in an Api X70 Pipeline Steel Welded Joint – Experiments and Fe Simulations," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, pp. 11474-11486, 2012.

14-Alvaro, A., Olden, V., and Akselsen, O. M., "3d Cohesive Modelling of Hydrogen Embrittlement in the Heat Affected Zone of an X70 Pipeline Steel," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 38, pp. 7539-7549, 2013.

15-Alvaro, A., Olden, V., and Akselsen, O. M., "3d Cohesive Modelling of Hydrogen Embrittlement in the Heat Affected Zone of an X70 Pipeline Steel – Part Ii," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, pp. 3528-3541, 2014.

16-Dickinson, D. and Ries, G., "Implant Testing of Medium to High Strength Steel--a Model for Predicting Delayed Cracking Susceptibility," *Welding Journal*, vol. 58, pp. 205-211, 1979.

17-Magudeeswaran, G., Balasubramanian, V., and Madhusudhanreddy, G., "Hydrogen Induced Cold Cracking Studies on Armour Grade High Strength, Quenched and Tempered Steel Weldments," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 33, pp. 1897-1908, 2008.

18-Law, M., Nolan, D., and Holdstock, R., "Method for the Quantitative Assessment of Transverse Weld Metal Hydrogen Cracking," *Materials Characterization*, vol. 59, pp. 991-997, 2008.

19-ISO17642-2, "Destructive Tests on Welds in Metallic Materials - Cold Cracking Tests for Weldments - Arc Welding Processes " in Self-restraint tests, ed, 2005.

20-ISO3690, "Welding and Allied Processes," in Determination of hydrogen content in arc weld metal, ed, 2012.

21-EN1011-2, "Welding - Recommendations for Welding of Metallic Materials," in Arc welding of ferritic steels, ed, 2001.

22-Hillenbrand, H.-G., Graf, M., and Kalwa, C., "Development and Production of High Strength Pipeline

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

Steels," presented at the Niobium 2001 Orlando, Florida, USA, 2001.
23-Thewlis, G., "Classification and Quantification of Microstructures in Steels," *Materials Science and Technology*, vol. 20, pp. 143-160, 2004.
24-Asm Handbook vol. 4: Heat Treating, 1991.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]