

بررسی تاثیر دمای پیشگرم بر روی چقرمگی جوش فولاد API 5L X65

پرویز صابریپور*، ایمان گل شکوه

ایده، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ایذه، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۰۹؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۲۷)

چکیده

از آنجایی که در صنایع پالایشگاه های نفت و گاز کشور از فولاد میکروآلیاژی API 5L X65 PSL2 بطور گسترده استفاده می گردد، در این پژوهش تلاش شد تاثیر دمای پیشگرم بر روی چقرمگی جوش فولاد مذکور مورد بررسی قرار گیرد. در این تحقیق دو قطعه لوله ۴۶ اینچ با ضخامت ۳۶/۵ میلی متر با فرایند ترکیبی، جوشکاری قوس الکتروود تنگستنی با گاز محافظ خنثی و جوشکاری قوس الکتروود دستی و با استفاده از پرکننده فلز ER 80S-G و الکتروود E8018-G جوشکاری شدند و پیش از عملیات جوشکاری، نمونه ها را با دمای حداقل ۱۰۰ درجه سانتیگراد و حداکثر ۲۵۰ درجه سانتیگراد با تجهیزات مناسب پیشگرم شدند، سپس از آزمون ضربه شاریبی در دمای ۳۰- درجه سانتیگراد به منظور بررسی تاثیر دمای پیشگرم بر روی چقرمگی جوش و میزان جذب انرژی فلز جوش استفاده شد و از آزمایش متالوگرافی برای بررسی ماکروسکوپی و میکروساختار این فولاد و نیز از آزمایش سختی سنجی ویکرز به منظور بررسی میزان سختی فلز جوش و منطقه تحت تاثیر حرارت استفاده شد. بر اساس نتایج بدست آمده، دمای پیشگرم کنترل شده بوسیله تجهیزات مناسب بدلیل نرخ سرد شدن ملایم باعث افزایش خواص چقرمگی جوش و ایجاد ساختار فریت سوزنی در فولاد مذکور می شود. بر این اساس می توان نتیجه گرفت که جوش با دمای پیشگرم کنترل شده، در دمای پایین ۳۰- درجه سانتیگراد دارای مقاومت به ضربه و چقرمگی بسیار مناسب می باشد و نسبت به ایجاد ترک های ترد هیدروژنی از حساسیت کمتری برخوردار است.

کلمات کلیدی: فولاد میکروآلیاژی API 5L X65 PSL2، دمای پیشگرم، چقرمگی جوش، نرخ سرد شدن جوش.

An investigation on the effect of preheating temperature on the weld toughness of API 5L X65 steel

P. Saberpour, I. Golshokouh

Islamic Azad University, Izeh Branch, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering

(Received 1 October 2018 ; Accepted 17 January 2019)

Abstract

This Research has been Conducted to Investigate the Effect of Preheating Temperature on the Weld Toughness of API 5L X65 Carbon Steel Material. Since the API 5L X65 PSL2 Micro Alloyed Material Is Widely Used in Oil and Gas Refinery Industries, In This Research, We Tried to Investigate the Effect of Preheated Temperature on the Welding Toughness of the Mentioned Steel. In This Research Two Steel Pipes with a Diameter of 46 Inches and a Thickness of 36.5 mm Were Tested. The Pipes Were Welded With an Arc Welding of Tungsten Electrodes With Neutral Protective Gas (GTAW) and Shield Metal Arc Welding (SMAW) Combination Process Using a Filler Metal ER 80S-G and Electrode E8018-G. Before the Welding Operation, They Were Preheated at a Minimum Temperature of 100 Degree Celsius and a Maximum Temperature of 250 Degree Celsius and Controlled. Then, Charpy Impact Test Was Used to Investigate the Effect of Preheating Temperature on Toughness and Absorption of Welding Energy and a Metallographic Test Was Used to Investigate the Macroscopic and Microstructure of This Steel. Also in This Research, a Hardness Test Was Used to Determine the Hardness of Weld Metal. Based on the Obtained Result, the Controlled

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: p_saberpour@hotmail.com

Preheated Temperature Due to Mild Cooling Rate Increased the Weld Toughness Properties and The Creation of Coaxial Fine Grains in the Crystalline Structure of the Steel Mentioned and Conversely, Inappropriate and Uncontrolled Preheating Temperature May Increase the Hardness and Strength and Reduce the Amount of Toughness and the Formation of Coarse Grained Columns in the Crystalline Structure Due to the High Cooling Rate. Base on this, it is Concluded That the Weld Metal with a Controlled Preheat Temperature has a Higher Toughness and Resistance to Impact, While Weld Metal with an Uncontrolled Preheat Temperature has Less Toughness and is More Sensitive to Cracking, Especially Hydrogen Cracks..

Keywords: Micro alloy API 5L X65 PSL2 material, Preheating temperature, Weld toughness, Cooling rate.

1- مقدمه

ناشی از ضربه های چکش آبی جلوگیری بعمل آید. ترک هیدروژنی از مخرب ترین نوع ترک هاست که در اثر نفوذ هیدروژن اتمی H در محیط های حاوی گاز ترش بوجود می آید. شکست های ناشی از ترک های هیدروژنی بیشتر بصورت ترک یا تاول هیدروژنی هستند که در ساختار درونی فولاد بوجود می آیند و به صنایع و تاسیسات صنعتی آسیب های جدی وارد می کنند. همچنین وجود عناصر مضرى مانند گوگرد و فسفر در فولاد باعث تشکیل ناخالصی های غیر فلزی مانند سولفور آهن (FeS) و سولفور منگنز (MnS) می شود و این ناخالصی ها نیز محل مناسبی برای حضور اتم های هیدروژن و ایجاد ترک های هیدروژنی هستند. بنابراین برای کاهش عناصر مضر می توان از اضافه نمودن عناصر دیگری مانند منگنز و سیسیم استفاده نمود تا از تشکیل ناخالصی های غیرفلزی جلوگیری شود. از آنجاییکه یکی از مناسب ترین فولادهای مورد استفاده در صنایع پالایشگاه گاز و سرویس های خطوط لوله گاز ترش، لوله فولادی API 5L X65 می باشد، بایستی شرایط ساخت و ترکیبات شیمیایی و خواص مکانیکی این لوله ها با استاندارد NACE MR0175 نیز مطابقت داشته باشند.

بر همین اساس در ساخت و طراحی پالایشگاه های مختلف میدان گازی پارس جنوبی (عسلویه) از لوله های فولادی میکروآلیاژی API 5L X65 PSL2 به دلیل کیفیت بالای تولید و ترکیبات شیمیایی و خواص مکانیکی بسیار مناسب آنها استفاده گسترده ای می شود. این فولاد با دستورالعمل بسیار دقیق و عملیات حرارتی کنترل شده ترمومکانیکال، تولید می شود و با عناصری همچون وانادیوم، تیتانیوم، و نیوبیوم و مقدار بسیار پایین کربن و گوگرد میکروآلیاژی شده است.

کشور ما ایران دارای منابع انرژی عظیمی همچون نفت و گاز می باشد. ایران با دارا بودن ۱۷ درصد از ذخایر گاز طبیعی جهان و ۴۷ درصد از ذخایر منطقه خاورمیانه پس از روسیه به عنوان دومین کشور دارنده ذخایر انباشته شده گاز طبیعی در دنیا می باشد [۱]. یکی از پرکاربردترین فولادهای مورد استفاده در صنایع نفت و گاز، بویژه برای انتقال گاز ترش، فولاد میکروآلیاژی API 5L X65 می باشد. این فولاد به دلیل ترکیبات شیمیایی و خواص مکانیکی و نیز به دلیل رعایت دستورالعمل های بسیار سخت گیرانه در زمان ساخت آن بطور گسترده در خطوط لوله گاز ترش مورد استفاده قرار می گیرد. گاز ترش سیالی است که دارای ترکیبات سولفور هیدروژن (H_2S)، و دی اکسید کربن (CO_2) و مرکاپتان های سبک و سنگین و رطوبت می باشد. مرکاپتان ها نوعی از ترکیبات گوگردی هستند که به همراه گاز ترش در مخازن و میادین گازی وجود دارند. گاز ترش به دلیل وجود ترکیبات ذکر شده بسیار خورنده و سمی و کشنده می باشد و به همین دلیل بایستی در بهره برداری از آن از آلیاژهای خاص و با کیفیت استفاده گردد. میدان گازی پارس جنوبی (به عنوان بزرگترین میدان گازی کشور ما دارای ویژگی های مذکور است و در لایه های مختلف مخزن خود دارای H_2S با میانگین ppm ۵۰۰۰ می باشد، شایان ذکر است استشمام گاز H_2S با غلظت بیشتر از ppm ۱۰۰۰ باعث فلج شدن ریه و مرگ آنی هرگونه موجود زنده ای می گردد [۲]. این میدان گازی با چنین ویژگی هایی مستلزم طراحی و استفاده از آلیاژ انعطاف پذیر و با کیفیت بالاتر است تا از تلفات و خسارت های جانی و مالی ناشی از خوردگی یا ترک های هیدروژنی یا شکست های

جدول ۱- آنالیز شیمیایی لوله X65 NACE

Steel grade	Mass fraction, based upon heat and product analyses									Carbon equivalent ^a	
	% maximum									% maximum	
	C ^b	Si	Mn ^b	P	S	V	Nb	Ti	Other ^{c,d}	CE _{IW}	CE _{Pcm}
Welded pipe											
L450MS or X65MS	0,10	0,45	1,60	0,020	0,002 ^e	0,10	0,08	0,06	g,i,j	—	0,22

جدول ۲- خواص مکانیکی لوله X65 PSL2 NACE

Pipe steel grade	Pipe body of SMLS and welded pipes					Weld seam of HFW and SAW pipes	
	Yield strength ^a		Tensile strength ^a		Ratio ^b	Elongation (on 50 mm or 2 in)	Tensile strength ^c
	$R_{10,5}$ MPa (psi)		R_m MPa (psi)		$R_{10,5}/R_m$	A_1 %	R_m MPa (psi)
	minimum	maximum	minimum	maximum	maximum	minimum	minimum
L450MS or X65MS	(65 300)	(87 000)	(77 600)	(110 200)	0,93	^e	(77 600)

جدول ۳- ترکیبات شیمیایی فلز پرکننده ER 80S-G

Product name	Chemical composition (typical values) in %										AWS		ENISO
	C	Mn	Si	Ni	Cu	Cr	Mo	V	Nb	N			
LNT 28	0.10	1.4	0.75	0.8	0.3	-	-	-	-	-	A5.28	ER80S-G	

یکی از مهم ترین مشکلات این فولادها در حین جوشکاری، عدم استفاده از تجهیزات مناسب یا استفاده نامناسب از دمای پیشگرم پیش از شروع جوشکاری توسط جوشکاران می باشد که ممکن است باعث افت شدید مقاومت به ضربه و به عبارت دیگر باعث کاهش چقرمگی جوش در دماهای پایین (معمولاً دماهای منفی) شود. همچنین هرگونه افزایش یا کاهش نامناسب در دمای پیشگرم ممکن است اثرات نامطلوبی بر روی خواص مکانیکی و متالورژی جوش این گونه فولادها ایجاد نماید. براساس استانداردهای معتبر بین المللی جوشکاری از جمله استاندارد ASME Section IX استفاده از دمای پیشگرم در اکثر فرایندهای جوشکاری الزامی و جزء پارامترهای اصلی جوشکاری محسوب می شود، زیرا دمای پیشگرم بر روی میکرو ساختار، نرخ سرد شدن جوش، میزان نفوذ هیدروژن، مقاومت جوش در برابر ضربه، چقرمگی و تافنس جوش و ناحیه متأثر از حرارت (HAZ)، استحکام و انعطاف پذیری جوش تاثیر مستقیم دارد. ممکن است پیشگرم نامناسب خطراتی همچون ترک های هیدروژنی، ترک های ناشی از

از آنجاییکه استفاده از ماده انعطاف پذیر (داکتیل) و با کیفیت API 5L X65 PSL2 در خطوط لوله گاز ترش جهت جلوگیری از شکست و خسارت های جانی و مالی ناشی از خوردگی یا ترک های هیدروژنی به تنهایی کافی نمی باشد بلکه رعایت پارامترهای جوشکاری بویژه دمای پیشگرم نیز نقش بسیار اساسی در جلوگیری از شکست ماده در شرایط دینامیکی و حوادث احتمالی دارد.

در پالایشگاه های گازی پارس جنوبی، گاز پس از ورود به پالایشگاه وارد دو دستگاه سیلابه گیر یا لخته گیر یا لجن گیر می شود که وظیفه اصلی آنها جدا سازی فاز گاز از فازهای آب و فاز هیدروکربن های مایع است و عموماً فولاد API 5L X65 PSL2 در این واحد حساس بکار برده می شود. بنابراین کوچک ترین آسیب یا تخریبی در خطوط لوله این واحد پالایشگاهی ممکن است منجر به وقفه در فرآیند تولید گاز و میلیاردها ریال خسارت اقتصادی ناشی از توقف آن شود و یا حوادثی همچون انفجار و آتش سوزی یا خسارت های جانی بوجود آورد [۳].

در جوشکاری لوله های مورد استفاده در این پژوهش، از فرایندهای ترکیبی جوشکاری قوس الکترو تنگستنی با گاز محافظ خنثی و جوشکاری قوس الکترو دستی استفاده شده است. در این تحقیق حدود 4 میلی متر از ضخامت لوله با جوشکاری TIG و بقیه ضخامت لوله مورد آزمایش با فرایند SMAW جوشکاری گردید. در جوشکاری پاس ریشه از فرایند قوس الکترو تنگستنی با گاز محافظ خنثی و فلزپرکننده ER 80S-G با قطر 2/4 میلی متر استفاده گردید. آنالیز شیمیایی فلزپرکننده مذکور براساس استاندارد AWS A5.28 مطابق با جدول (3) و خواص مکانیکی و نیز خواص ضربه آن بر اساس مدارک ساخت سازنده مطابق با جدول (4) می باشد. همچنین برای جوشکاری پاس پر کنی از فرایند قوس الکترو دستی و الکترو E8018-G با قطر 3/2 میلی متر و برای پاس رواز الکترو

القای هیدروژن یا تردی هیدروژنی، ترد شدن و کاهش چقرمگی و انعطاف پذیری جوش و ناحیه متاثر از حرارت و شکست آنی در مقابل نیروهای دینامیکی و ضربه های چکش آبی سیال را بدنال داشته باشد و در نهایت با توجه به ماهیت شیمیایی گاز ترش منجر به انفجار و تلفات جانی و مالی فراوانی می گردد.

2- روش پژوهش

در این تحقیق از دو قطعه لوله فولادی با مشخصات API 5L X65 PSL2 NACE با قطر 46 اینچ و ضخامت 36/5 میلی متر استفاده شد شکل (1) آنالیز شیمیایی لوله های مذکور و خواص مکانیکی آنها بر اساس مدارک ساخت لوله (MTR) مطابق با جدول های (1) و (2) می باشد.

جدول 4- خواص مکانیکی و ضربه فلز پرکننده ER 80S-G

Yield stress, MPa	540
Tensile strength, MPa	630
Elongation, %	25
Charpy V	
Test temps, °C	Impact values, J
+20	180
-20	130
-40	90
-60	25

جدول 5- آنالیز شیمیایی الکترو E8018-G

Product	Chemical composition (typical values) in %												AWS	EN/ISO		
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Nb	N	P	S				
Conarc 74	0.05	1.5	0.5	0.95	-	-	-	-	-	-	0.010	0.005	A5.5	E8018-G-H4R	ISO 2560-A	E 50 6 MnNi B 3 2 H5

جدول 6- مشخصات مکانیکی الکترو E8018-G

Mechanical properties:			مشخصات مکانیکی فلز جوش:	
Yield strength	Tensile strength	Elongation	Impact strength	
استحکام تسلیم (N/mm ²)	استحکام کششی (N/mm ²)	از دیاد طول A ₅ (%)	مقاومت به ضربه ISO-v(Joule) +20°C -60°C	
>510	590-690	>23	200	60

با قطر ۴ میلی متر استفاده شده است. البته در برخی از لایه‌های جوش در پاس رو از الکتروود با قطر ۳/۲ میلی متر نیز استفاده گردید. این الکتروود از انواع الکتروودهای قلیایی است که برای جوشکاری فولادهای دانه ریز بسیار مناسب می باشد. این الکتروود دارای خواص چقرمگی بالا و بدون ترک و کم هیدروژن می باشد و یک جوش صاف و تمیز تولید می کند. این گروه از الکتروودها از نظر متالورژیکی مهمترین نوع الکتروودها می باشند [۴]. آنالیز شیمیایی الکتروود E8018-G بر اساس استاندارد AWS A5.5 مطابق با جدول (۵) و خواص مکانیکی آن مطابق با جدول (۶) می باشد. در این تحقیق، برای جوشکاری پاس ریشه از قطبیت جریان مستقیم با الکتروود منفی (DCEN) و برای پاس پرکنی و پاس های رو از جریان مستقیم و الکتروود مثبت (DCEP) استفاده شد.



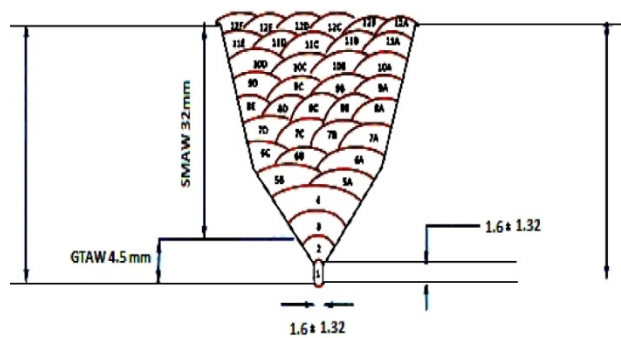
شکل ۳- نحوه ی عملیات پیشگرم با استفاده از نوارهای سرامیکی

با توجه به اینکه قطر لوله تحت آزمایش، ۴۶ اینچ بوده است از دو جوشکار کد و تایید شده ۴ بر اساس استاندارد جوشکاری ASME Section IX استفاده شد و به دلیل اجتناب از تنش‌های پسماند ناشی از حرارت و نیز اعوجاج تلاش گردید ترتیب جوشکاری به صورت ضربدری رعایت شود. در این پژوهش لوله مورد آزمایش مطابق با شکل (۲) بصورت جوش شیاری (V Groove) با زاویه ۶۰ درجه و در حالت سربالاو در موقعیت ۵G جوشکاری گردید و برای رعایت ترتیب جوشکاری، قطر ۳۶۰ درجه لوله بصورت ساعت گرد در نظر گرفته شد. در این پژوهش حداقل دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد به عنوان دمای پیشگرم و حداکثر دمای بین پاسی نیز ۲۵۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد. برای انجام عملیات پیشگرم کنترل شده از نوارهای پهن سرامیکی الکتریکی قابل کاربرد در عملیات حرارتی تنش زدایی مطابق شکل (۳) استفاده شد.

نوارهای سرامیکی الکتریکی مذکور اغلب در عملیات حرارتی تنش زدایی (PWHT) مورد استفاده قرار می گیرند ولی چون انرژی ضربه در دمای ۳۰- درجه سانتیگراد از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد، در این تحقیق از نوارهای سرامیکی به عنوان یک تجهیز مناسب جهت انجام عملیات پیشگرم استفاده شد، زیرا این نوارهای الکتریکی حرارت را بطور یکنواخت و با نرخ یکسان در قطعه توزیع می کنند و موجب می شود که حرارت در تمام سطح قطعه یکسان و یکنواخت گردد. همچنین این نوارهای الکتریکی در کنترل نرخ سرد شدن جوش بسیار موثر می باشند، بطوریکه موجب می شوند جوش با نرخ یکسان و با سرعت کم سرد گردد تا از ایجاد تردی های



شکل ۱- تصویر لوله مربوط به آزمایش مورد نظر در این تحقیق



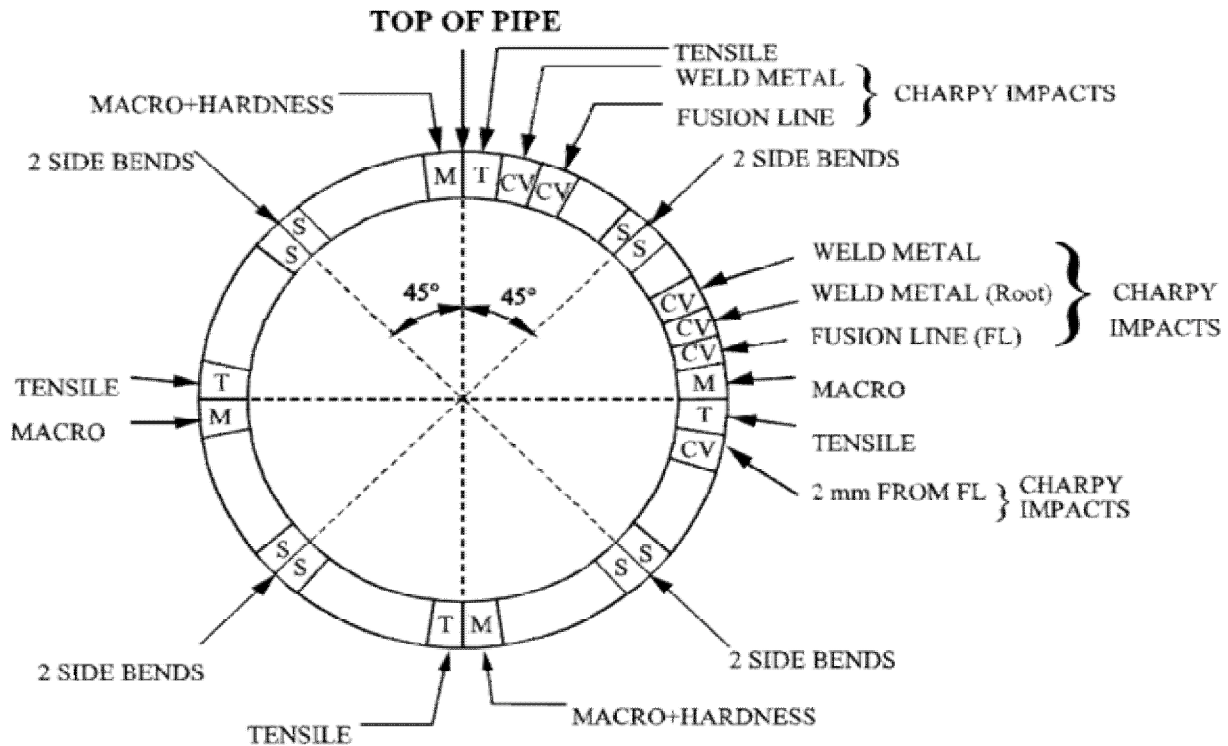
شکل ۲- شماتیک طراحی اتصال جوشکاری مورد نظر در تحقیق

شکل ۳- نحوه ی عملیات پیشگرم با استفاده از نوارهای سرامیکی

Downloaded from jwsti.iut.ac.ir at 10:55 IRST on Monday February 3rd 2020

LOCATION OF TEST SPECIMENS

(O.D. > 12 3/4")



شکل ۴- محل انتخاب نمونه های کشش عرضی

در این تحقیق براساس شکل (۴) تعداد ۴ نمونه از محل های ساعت ۳ و ۶ و ۹ و ساعت ۱۲ از قطر لوله ۴۶ اینچ برای انجام تست کشش انتخاب گردید و ابعاد نمونه ها مطابق با استاندارد ASTM E8 بصورت تسمه ای و در ابعاد ۱ اینچ عرض و ۹ اینچ طول بریده شدند. همه نمونه ها با اره آب برش و دستگاه ماشین تراش به گونه ای با دقت بریده شدند تا از ایجاد مناطق تحت تاثیر حرارت و تغییر احتمالی در میکروساختار متریال جلوگیری شود. هدف از انجام آزمون کشش در این تحقیق، تعیین مناسب بودن الکتروود یا فلزپرکننده مورد استفاده در جوش و بررسی کیفیت فلز رسوب داده شده در موضع اتصال و مقایسه آن با استانداردهای مرجع می باشد. بر اساس جدول (۷) و نیز بر اساس دستورالعمل مورد نظر چون لوله تحت آزمایش در این تحقیق ۴۶ اینچ و ضخامت آن نیز ۳۶/۵ میلی متر می باشد، تعداد ۸ نمونه در موقعیت ۴۵

هیدروژنی اجتناب شود. در این تحقیق بر اساس دستورالعمل تعیین شده و نیز استانداردهای مرجع همچون استاندارد API 1104 پس از اتمام جوشکاری لوله تحت آزمایش، بر روی تمام جوش محیطی آن، آزمون های غیرمخرب انجام شد. آزمون های غیرمخربی که در این پژوهش برای بررسی کیفیت جوش محیطی لوله تحت آزمایش مورد استفاده قرار گرفتند شامل آزمون چشمی، آزمون مایع نافذ، آزمون ذرات مغناطیسی، آزمون اولتراسونیک و آزمون پرتونگاری می باشند. همچنین در این تحقیق، خواص مکانیکی جوش انجام شده در لوله تحت آزمایش بوسیله آزمون های مخربی همچون آزمون کشش، آزمون خمش، و خواص چقرمگی آن بوسیله آزمون ضربه شاریپی و میزان سختی جوش و منطقه متاثر از حرارت بوسیله آزمون سختی سنجی ویکرز و ساختار آن بوسیله آزمایش متالوگرافی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت.

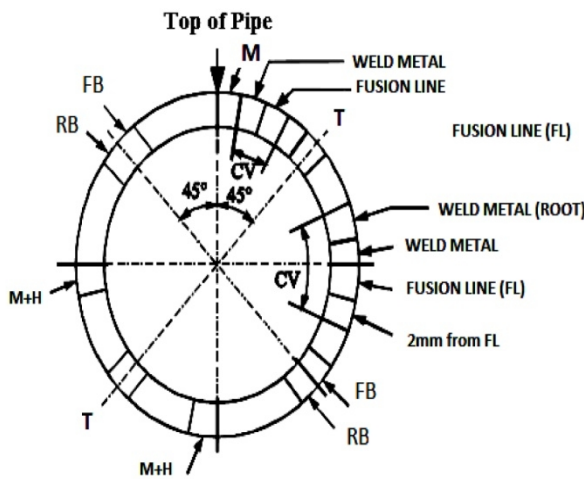
جدول ۷- تعداد نمونه های آزمایش مورد نیاز آزمون خمش براساس استاندارد API 1104

Outside Diameter of Pipe		Number of Specimens					
in.	mm	Tensile Strength	Nick Break	Root Bend	Face Bend	Side Bend	Total
Wall Thickness > 0.500 in. (12.7 mm)							
≤4.500	≤114.3	0 ^b	2	0	0	2	4
>4.500 to 12.750	>114.3 to 323.9	2	2	0	0	4	8
>12.750	>323.9	4	4	0	0	8	16

جدول ۸- نتایج آزمون کشش فلز پایه و مغز فلز جوش

مقایسه نتایج آزمون کشش فلز پایه و مغز فلز جوش (All Weld)					
ردیف	موقعیت	استحکام تسلیم MPa	استحکام نهایی MPa	ازدیاد طول نسبی %	کاهش سطح مقطع %
۱	فلز پایه	۴۷۵	۵۸۷	-	-
۲	مغز جوش	۵۱۳	۶۰۱	۲۵	۷۱

با استاندارد مذکور تهیه شدند. طول نمونه قطعه تست ضربه، ۵۵ میلی متر و سطح مقطع مربع آن ۱۰×۱۰ میلی متر و یک شیار V شکل با زاویه ۴۵ درجه و عمق ۲ میلی متر و شعاع ریشه ۰/۲۵ در آن مطابق با شکل (۷) در نظر گرفته شد.



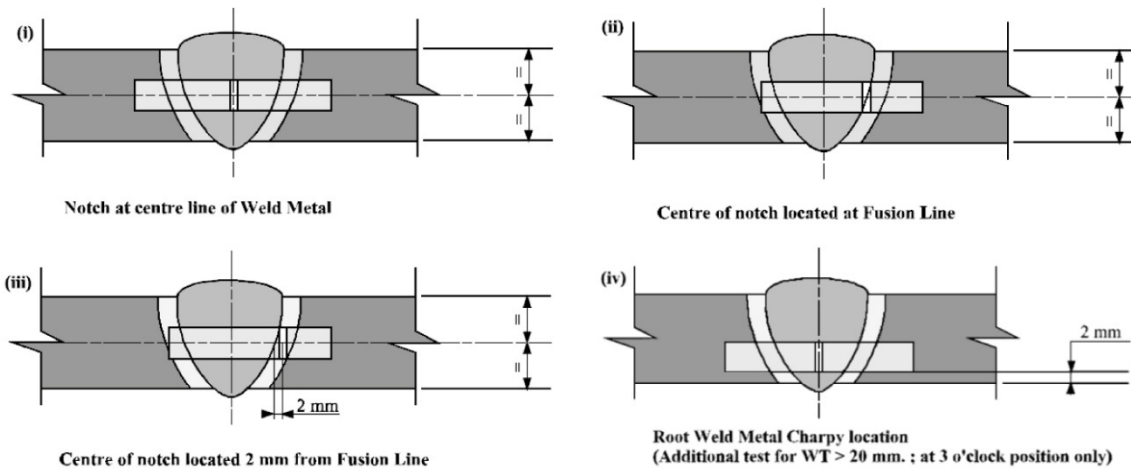
شکل ۵- موقعیت و محل انتخاب نمونه های تست ضربه شاریپی مربوط به این تحقیق

آزمون ضربه در این تحقیق در دمای ۳۰- درجه سانتیگراد انجام گردید. مقدار انرژی قابل قبول برای هر نمونه تکی ۳۷/۵ ژول و میانگین قابل قبول برای هر ست (مجموع سه نمونه)، مقدار ۴۵ ژول در نظر گرفته شد و انتظار این است که با توجه

درجه از جوش و فلز پایه لوله مذکور با سطح مقطع مستطیلی برای آزمایش خمش جانبی انتخاب شد و تحت آزمایش خمش قرار گرفت. در این تحقیق نمونه های تحت آزمایش را برای پیدا نمودن عیوب احتمالی پس از آزمون خمش مورد بازرسی تست های غیرمخرب همچون آزمون چشمی و آزمون مایع نافذ قرار گرفت تا از عدم وجود عیوب احتمالی اطمینان حاصل شود. همچنین در این تحقیق، ۳۰ نمونه مربوط به آزمون انرژی ضربه شاریپی بر اساس موقعیت های مشخص شده در شکل (۵) انتخاب شد.

در این پژوهش سعی بر این بود که نمونه های تست مربوط به آزمون ضربه از محل هایی انتخاب شوند که بیشترین انرژی جوش به آنها وارد شده باشد. به همین دلیل نمونه های مذکور مطابق با شکل فوق بین ساعت های ۳ و ۱۲ انتخاب شدند زیرا در این موقعیت ها بیشترین انرژی حرارتی ایجاد شده است.

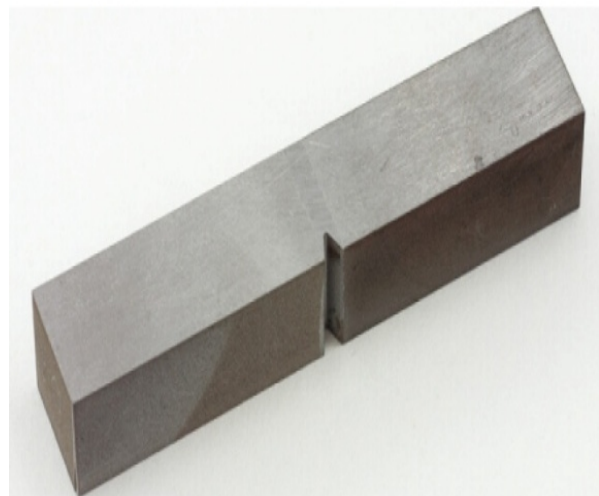
مراحل تست ضربه از جمله آماده سازی قطعات تست چارپی مطابق با استاندارد ASTM A370 انجام گردید. در شکل (۶) نحوه ی انتخاب نمونه تست ضربه شاریپی از فلز جوش و منطقه متاثر از حرارت نشان داده شده است. در این پژوهش، ابعاد نمونه های آزمون ضربه به صورت اندازه بزرگ و مطابق



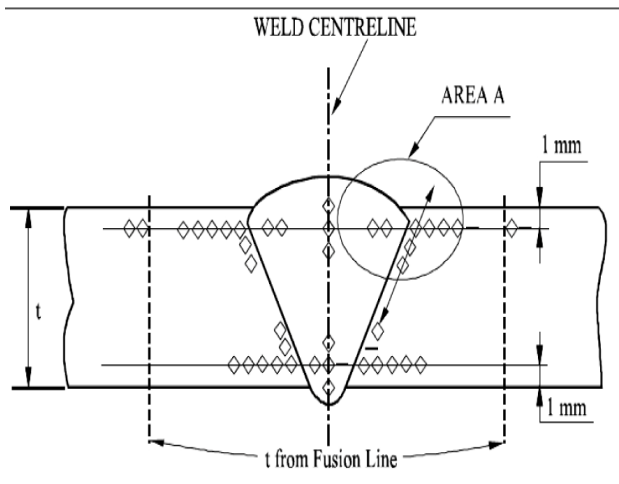
شکل ۶- نحوه انتخاب نمونه تست ضربه شاریبی از جوش و منطقه متاثر از حرارت

ضربه بادقت بسیار بالایی انجام شد، زیرا تغییرات بسیار اندک در مقطع و شعاع شیار یا آثار حاصل از ابزار ماشینکاری در انتهای شیار می تواند نتایج نادرست یا اطلاعات گمراه کننده ای ارائه نماید. در شکل (۸) محل دقیق قرار گرفتن شیار در نمونه های تست ضربه شاریبی نشان داده شده است. در این تحقیق، آزمایش سختی سنجی ماکرو مطابق با استاندارد ASTM E92 و با استفاده از فرو رونده یا هرم الماسه با نیروی ۵ کیلوگرم انجام شد. با توجه به شرایط و نتیجه مد نظر، پیش بینی می شود مقدار سختی سنجی از HV ۲۴۸ بیشتر نگردد.

به پارامترهای جوشکاری لحاظ شده در این تحقیق و نیز رعایت مناسب عملیات پیشگرم به این نتایج نائل شود.



شکل ۷- نمونه قطعه تست آزمون ضربه شاریبی



شکل ۸- نقاط تعیین شده برای انجام تست سختی سنجی ماکرو ویکرز در جوش، منطقه تحت تاثیر حرارت و فلز پایه

در این پژوهش، آزمایش سختی سنجی در ناحیه جوش پاس رو، منطقه تحت تاثیر حرارت (HAZ) و ۱۰ میلی متر در کنار

در این پژوهش، نمونه سازی قطعات آزمون ضربه مطابق با استاندارد ASTM A370 انجام شد و پس از انجام مراحل برشکاری، ماشینکاری و سنگ زنی، در نمونه ها یک شیار ۴۵ درجه ایجاد گردید. شیارها توسط دستگاه مخصوص شیارزن شاریبی به روش خان کشی روی ۳۰ نمونه ایجاد شد. چون دمای تست ضربه در این آزمون، ۳۰- درجه سانتیگراد بود نمونه ها به مدت ۵ دقیقه در نیتروژن مایع قرار گرفت تا دمای نمونه های تست به دمای ۳۰- درجه برسند. همچنین انبر جابجا کننده نمونه ها نیز در دمای تست مورد نظر قرار گرفت تا بر روی درجه حرارت شیار نمونه ها تاثیر نگذارد. در این تحقیق، عملیات ماشین کاری بر روی نمونه های تست انرژی

جدول ۹- نتایج آزمون خمش جانبی

آزمون خمش کناری (Side Bend)					
ردیف	موقعیت یا محل نمونه برداری	عرض (mm)	قطر ماندردل (mm)	زاویه خمش	نتیجه آزمون
1	خمش کناری ۲و۱	۱۳	۹۰	۱۸۰	هیچ گونه عیبی مشاهده نشد.
2	خمش کناری ۲و۱	۱۳	۹۰	۱۸۰	هیچ گونه عیبی مشاهده نشد.
3	خمش کناری ۵و۴	۱۳	۹۰	۱۸۰	هیچ گونه عیبی مشاهده نشد.
4	خمش کناری ۵و۴	۱۳	۹۰	۱۸۰	هیچ گونه عیبی مشاهده نشد.
5	خمش کناری ۸و۷	۱۳	۹۰	۱۸۰	هیچ گونه عیبی مشاهده نشد.
6	خمش کناری ۸و۷	۱۳	۹۰	۱۸۰	هیچ گونه عیبی مشاهده نشد.
7	خمش کناری ۱۱و۱۰	۱۳	۹۰	۱۸۰	هیچ گونه عیبی مشاهده نشد.
8	خمش کناری ۱۱و۱۰	۱۳	۹۰	۱۸۰	هیچ گونه عیبی مشاهده نشد.

جدول ۱۰- نتایج آنالیز ترکیب شیمیایی

ترکیب شیمیایی فلز جوش										
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu
0.063	0.42	1.25	0.018	0.011	0.02	0.03	0.55	0.016	0.008	0.36
Nb	Ti	V	W	Sn	B	As	Zr	Fe		
<0.002	0.017	0.019	<0.014	0.007	*	<0.005	<0.003	Base		

سنباده ۲۵۰۰ سنباده زنی شدند و در مرحله بعدی با خمیر الماسه با اندازه ۶μm و ۱μm پولیش و صیقل کاری شدند و در نهایت در محلول نایتال ۲٪ (۲ میلی لیتر اسید نیتریک و ۹۸ میلی لیتر متانول) اچ شدند. زمان عملیات اچ کردن بین دو تا پنج ثانیه طول کشید. در این پژوهش برای مشخص نمودن ریزساختار جوش و منطقه متاثر از حرارت از میکروسکوپ نوری با بزرگ نمایی ۱۰۰۰ برابر استفاده شد. همچنین در این تحقیق برای آنالیز شیمیایی جوش نمونه ها از دستگاه اسپکترومتر نشری استفاده شد.

3- نتایج و بحث

در این تحقیق همه آزمون های غیرمخرب چشمی، مایع نافذ، ذرات مغناطیسی، اولتراسونیک و آزمایش پرتونگاری توسط اپراتورهای دارای صلاحیت انجام شد و نتایج کلیه تست های غیرمخرب انجام شده در محدوده معیار پذیرش استاندارد های مرجع و مورد پذیرش بوده است و هیچ گونه عیب خطی یا

منطقه HAZ از هر دو طرف جوش محیطی و در ساعت های ۶ و ۱۲ و تقاطع دو جوش انجام شد. همچنین در این پژوهش، در هر موقعیت، ۴۰ نقطه سختی سنجی انجام شد. در شکل (۸) نقاط تعیین شده برای انجام تست سختی سنجی ماکرو نشان داده شده است. در این تحقیق، آماده سازی نمونه های آزمایش ماکروگرافی بر اساس استاندارد API 1104 در موقعیت های ساعت ۳، ۶، ۹ و ۱۲ و با محلول نایتال ۱۰٪ برای درشت ساختار مناطق مختلف درز جوش انجام شد. در این آزمایش ابتدا نمونه ها سنباده زنی و سپس پولیش و در نهایت اچ گردیدند تا منطقه جوش و درشت ساختار منطقه تحت تاثیر حرارت به خوبی نشان داده شود. سپس ماکروگرافی با لنز با بزرگنمایی ۵X انجام گردید و انتظار این بود که جوش سالم و فاقد هرگونه عیبی همچون نفوذ ناقص یا ذوب ناقص مشاهده شود و در نهایت به بررسی های میکروسکوپی جوش پرداخته شد. در این تحقیق، برای بررسی میکروسکوپی، نمونه های انتخاب شده ابتدا با کاغذ سنباده ۲۴۰ سیلیکون کاربید و سپس با کاغذ

استحکام کششی و ازدیاد درصد نسبی طول در منطقه جوش لوله تحت آزمایش ناشی از انجام عملیات پیشگرمی، شدت جریان الکتریکی، میزان حرارت ورودی و نیز متفاوت بودن ترکیب شیمیایی و استحکام کششی الکتروود بدلیل میزان رقت جوش بوده است. همچنین با انجام عملیات پیشگرمی مناسب و یکنواخت و کنترل سرعت سرد کردن جوش، برخی از عناصر آلیاژی و عناصر گازی که در افزایش سختی نقش داشته اند، سوخته یا از حوضچه جوش خارج شده اند و این واکنش موجب کاهش سختی فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت شده است. با مقایسه آنالیز شیمیایی فلز پایه مندرج در جدول (۱) و آنالیز شیمیایی اسپیکترمتری نشری مندرج در جدول (۱۱) این موضوع نشان داده شده است. به طوریکه مقدار کربن فلز پایه اولیه ۰/۱۰٪ بوده و مقدار کربن در فلز جوش ۰/۰۶۳٪ می باشد و این کاهش مقدار کربن تاثیر مهمی در کاهش سختی و نیز افزایش چقرمگی فلز جوش و در نهایت جلوگیری از ایجاد ساختار مارتنزیت داشته است.

جدول ۱۱- مقایسه مقدار عناصر آلیاژی در فلز پایه اولیه و فلز جوش تحت آزمایش

مقایسه ترکیب شیمیایی فلز پایه اولیه و فلز جوش				
C: 0.10%	Mn: 1.60%	V: 0.10%	Nb: 0.08%	فلز پایه اولیه
C: 0.063%	Mn: 1.25	V: 0.09%	Nb: 0.002%	فلز جوش

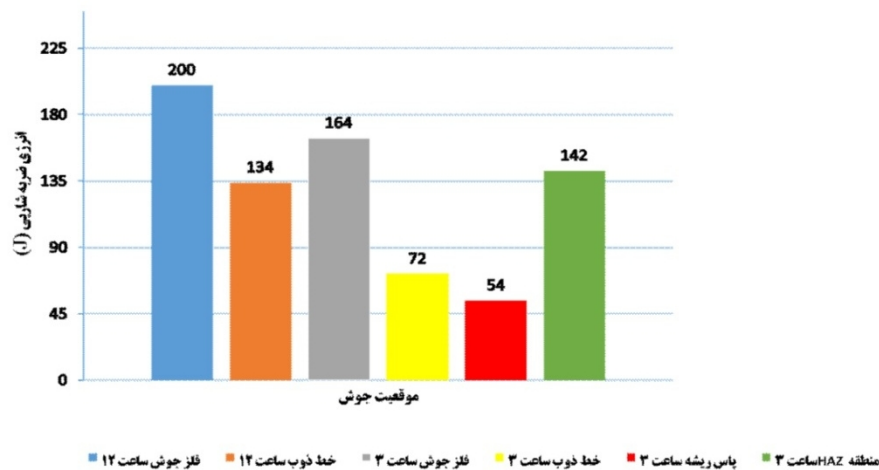
جدول ۱۲- میانگین نتایج سختی سنجی و بکرز

نتایج سختی سنجی و بکرز (میانگین)			
ردیف	موقعیت سختی سنجی	نیروی اعمالی (Kgf)	عدد سختی (HV)
۱	۶ ساعت	۵	۱۹۵
۲	۹ ساعت	۵	۱۸۸
۳	۱۲ ساعت	۵	۱۸۰

در جدول (۱۲) مقایسه درصد عناصر آلیاژی در فلز پایه و فلز جوش تحت آزمایش نشان داده شده است. بر اساس جدول مذکور همه عناصر آلیاژی که موجب استحکام و سختی فلز پایه بوده اند در فلز جوش کاهش یافته اند. بر اساس نتایج این

مدور در سطح و نزدیک به سطح جوش یا در تمام ضخامت جوش انجام شده، مشاهده نشد. آزمون کشش در دمای محیط ۲۵ درجه سانتیگراد و رطوبت ۴۱٪ و بوسیله دستگاه کشش ۶۰ تنی یونیورسال مدل Instron STM-600 و مطابق با استاندارد ASTM A370 انجام گردید.

سرعت نرخ کرنش در این آزمایش ۱۰ میلی متر در دقیقه در نظر گرفته شد. در این آزمایش به بررسی سطح مقطع، استحکام تسلیم، استحکام نهایی و محل شکست نمونه ها پرداخته شده است. در طی آزمایش کشش همه شکست ها در فلز پایه رخ داد. نتایج آزمون کشش و آزمون یک قطعه که بصورت گرد صرفاً از مغز جوش نمونه سازی شد که در جدول (۸) نشان داده شده است. آزمایش خمش نیز در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و رطوبت ۴۱٪ و با دستگاه خمش آلاگام آفرید BEN-02-۵۴۰ با زاویه خمش ۱۸۰ درجه انجام گردید. در این تحقیق، نوع آزمون بصورت خمش جانبی و مقطع نمونه بصورت ضخامت کامل در نظر گرفته شد و نتایج آن مطابق با جدول (۱۰) بدست آمد و در حین انجام خمش هیچگونه عیبی در جوش تحت آزمایش مشاهده نشد. همچنین آزمایش آنالیز ترکیب شیمیایی فلز جوش مطابق با استاندارد مرجع ASTM E415 در دمای ۲۴ درجه سانتیگراد و رطوبت ۴۲٪ انجام شد. در این آزمایش نمونه های تست ابتدا برشکاری و سنگ زنی شدند سپس بوسیله دستگاه WAS به روش اسپیکترمتری نشری آنالیز ترکیب شیمیایی شدند و نتایج مطلوبی بدست آمد که در جدول (۱۱) نشان داده شده است. با توجه به مقایسه مقدار استحکام کششی فلز پایه و نتایج آزمون کششی مغز جوش مندرج در جدول (۸) مشاهده گردید استحکام کششی مغز جوش لوله جوشکاری شده افزایش یافته است، بطوریکه استحکام نهایی فلز پایه بطور میانگین در حدود ۵۷۵ مگاپاسکال اندازه گیری شد، در حالیکه استحکام نهایی مغز جوش لوله جوشکاری شده ۶۰۱ مگاپاسکال بوده است. همانطور که از نتایج آزمون کشش مشاهده می شود تمام شکست ها در منطقه فلز پایه رخ داده است و این بیانگر بالابودن استحکام فلز جوش نسبت به فلز پایه می باشد. افزایش



شکل ۹- نمودار مربوط به میانگین نتایج آزمون ضربه شاری در مناطق مختلف جوش



شکل ۱۱- تصویر ماکروسکوپی از مقطع آماده سازی شده نمونه Intersection در بزرگنمایی بالاتر



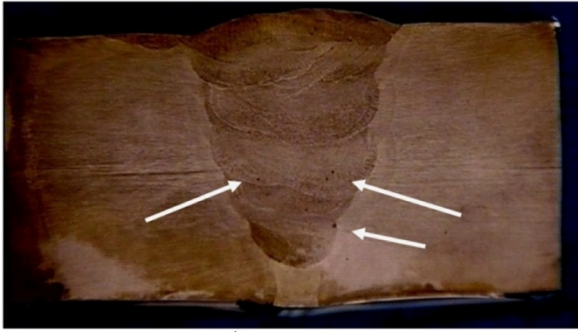
شکل ۱۰- تصویر ماکروسکوپی از مقطع آماده سازی شده نمونه Intersection

ورودی، نوع الکترود، نوع اتصال و پارامترهای موثر دیگر نتایج دلخواه و مطلوب را بدست آورده است، زیرا هشت نمونه تست خمش در خمش های ۱۸۰ درجه دچار هیچ گونه شکستی نشد و این بیانگر انعطاف پذیری مناسب جوش و نیز عدم وجود عیوب و ناپیوستگی های تاثیر گذار در فلز جوش بوده است.

هرچند در قسمت هایی از حوضچه جوش، عیوبی همچون حفره های گازی یا ناخالصی هایی همچون فلاکس روپوش الکترود مشاهده شد، ولی چون اندازه عیوب مذکور در محدوده مجاز معیار پذیرش استاندارد مرجع API 1104 بوده اند، موجب شکست نمونه های تحت بارگذاری نشدند. در حین خمش ۱۸۰ درجه هیچ گونه شکستی در قطعه تحت بارگذاری ایجاد نشده است. آزمون ضربه شاری نیز مطابق با استاندارد ASTM E23 در دمای ۳۰- درجه سانتی گراد و با دستگاه ۳۰۰ ژولسی Denison- 6705CA

آزمایش، مهمترین دلیلی که منجر به عدم شکست فلز جوش در آزمایش کشش شده است. افزایش همزمان استحکام و ازدیاد درصد نسبی طول جوش بوده است که آن می تواند ناشی از کاهش یافتن عناصر آلیاژی همچون کربن، وانادیوم و نیوبیوم باشد.

بنابراین از این مطلب نتیجه گرفته می شود که فلز جوش بطور همزمان استحکام و انرژی ضربه بالا و مطلوب را بدست آورده است. از آنجایی که دمای پیشگرم بیشترین تاثیر را بر روی تنش تسلیم دارد، در این تحقیق دمای پیشگرم حداقل ۱۰۰ و حداکثر ۲۵۰ درجه سانتیگراد و ملایم نمودن سرعت سرد کردن موجب افزایش درصد ازدیاد طول جوش گردیده است که این بیانگر چقرمه بودن جوش و مطلوب بودن نتایج حاصل از آزمایش می باشد. با بررسی نتایج آزمون خمش مشخص گردید لوله جوشکاری شده با پارامترهای جوشکاری در نظر گرفته شده در این تحقیق، همچون دمای پیشگرم، حرارت



شکل ۱۳- تصویر ماکروسکوپی از مقطع آماده سازی شده ساعت ۶



شکل ۱۲- تصویر ماکروسکوپی از مقطع آماده سازی شده نمونه ساعت ۳



شکل ۱۵- تصویر ماکروسکوپی از مقطع آماده سازی شده ساعت ۱۲

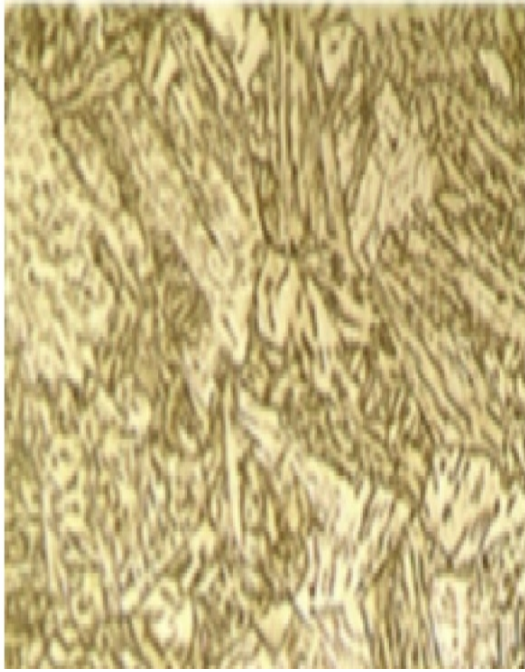


شکل ۱۴- تصویر ماکروسکوپی از مقطع آماده سازی شده ساعت ۹

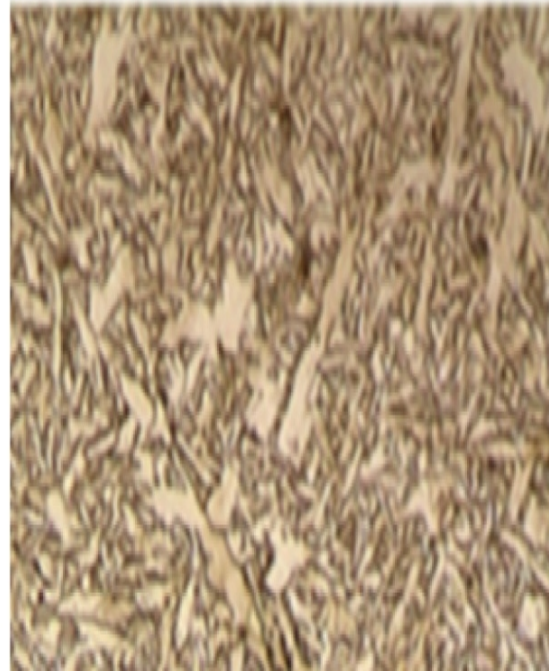
در نظر گرفته شد. این در حالی است که در این تحقیق تعداد سی نمونه تست ضربه شاری در منطقه جوش و منطقه متاثر از حرارت انجام شد و کمترین میزان انرژی ضربه بدست آمده، ۵۴ ژول بوده است که عددی بسیار مطلوب و مناسب و بیانگر چقرمه و نرم بودن جوش مورد نظر می باشد. در این تحقیق، بیشترین انرژی ضربه مربوط به خط ذوب ساعت ۱۲ با مقدار ۲۹۵ ژول و کمترین انرژی ضربه مربوط به فلز جوش پاس ریشه ساعت ۳ بوده است.

با توجه به اینکه همه نمونه های تحت آزمایش در شرایط یکسان، پیشگرم شده بودند و نیز در یک محیط یکسان آزمایشگاهی تحت آزمایش قرار گرفته اند، می توان نتیجه گرفت که این اختلاف مقدار انرژی ضربه می تواند ناشی از وجود تنش های پسماند موضعی همچون تنش های حرارتی یا مکانیکی باشد، زیرا با توجه به اینکه بیشترین انرژی حرارتی جوش بدلیل وجود نیروی ثقل و نیروی کشش سطحی در وضعیت جوشکاری سربالا در بین ساعت ۶ تا ۳ ایجاد می شود، سختی جوش این موقعیت کمی بیشتر شده و در نهایت چقرمگی آن کاهش یافته است.

انجام شد. از آن جایی که دمای تست این آزمون ۳۰- درجه سانتیگراد بوده، نمونه های تست را به مدت پنج دقیقه در نیتروژن مایع قرار داده تا دمای آنها به دمای مورد نظر برسد. پس از انجام آزمایش نتایج مندرج در شکل (۹) بدست آمد. نتایج آزمون انرژی ضربه در این تحقیق نشان داد که انجام عملیات پیشگرم کنترل شده در دمای بین ۱۰۰ تا ۲۵۰ درجه سانتیگراد با تجهیزات مناسب همچون نوار سرامیکی الکتریکی و نیز کنترل نرخ سرد شدن با سرعت ملایم موجب افزایش انرژی ضربه شده است که این بیانگر چقرمگی و انعطاف پذیر بودن یا نرم بودن جوش می باشد. همچنین تمام نتایج انرژی ضربه شاری در این تحقیق بسیار مطلوب و در محدوده مورد پذیرش استاندارد API و نیز دستورالعمل و مشخصات فنی مورد نظر بوده است. بطوریکه در این تحقیق، بر اساس دستورالعمل مورد نظر و با توجه به شرایط محیطی سرویس گاز ترش پالایشگاه ۱۶ و ۱۵ همچون دما، فشار، غلظت هیدروژن و شرایط دینامیکی خطوط لوله، انرژی ضربه بصورت تکی برای هر نمونه ۳۷/۵ ژول و بصورت میانگین برای یک ست که شامل سه نمونه تست می باشد، ۴۵ ژول



شکل ۱۷- تصویر میکروسکوپی ریز ساختار منطقه تحت تاثیر حرارت با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر



شکل ۱۶- تصویر میکروسکوپی ریز ساختار فلز جوش با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر

عملیات حرارتی پیشگرم با استفاده نوار سرامیکی الکتریکی باعث توزیع یکنواخت حرارت در تمام سطح قطعه لوله شده است و کنترل نرخ سرد شدن جوش نیز از ایجاد تردی ناشی از اتم های هیدروژن یا کربن در این منطقه جلوگیری نموده است. یکی از تاثیرات بسیار مثبت عملیات حرارتی پیشگرم و رعایت دمای بین پاسی در این تحقیق، کاهش ریزساختار ستونی و افزایش فاز فریت سوزنی در جوش بوده است، زیرا پاس های زیاد جوشکاری باعث تمپر شدن پاس های قبلی شده و این موجب افزایش چقرمگی و انعطاف پذیری جوش شده است.

در واقع عملیات پیشگرم و رعایت دمای بین پاسی مناسب و کاهش نرخ سرد شدن جوش موجب ریزتر شدن دانه های فریت شده و به بیانی دیگر از رشد دانه ها جلوگیری نموده است. همانطور که هرگز بزرگ و پیکرینگ در تحقیق خود نشان دادند، افزایش چقرمگی می تواند به دلیل افزایش درصد فریت و کاهش پرلایت در ریز ساختار و نیز کاهش اندازه دانه های فریت باشد [۵]. همچنین با بررسی نمونه های شکسته شده

با بررسی نتایج آزمون انرژی ضربه شاری مشخص شد، کمترین میزان انرژی ضربه در ساعت ۳ بدست آمده است. هر چند عدد بدست آمده در محدوده مجاز چقرمگی می باشد، ولی علت آن می تواند ناشی از انرژی حرارتی بیشتر در آن موقعیت باشد، زیرا حرارت ورودی تا حدی منجر به افزایش چقرمگی می گردد و چنانچه این حرارت بیش از حد مجاز گردد منجر به کاهش چقرمگی و افزایش سختی می شود [۵]. بررسی نتایج انرژی ضربه شاری نشان داد که انرژی ضربه برخی از نقاط فلز جوش نسبت به انرژی ضربه منطقه متاثر از حرارت کمتر است و این بدلیل ریزساختار غیرتعادلی شامل فریت های پرویوتکتوئیدی و فاز بینیت می باشد و از نتایج می توان دریافت که پدیده نرم شدن در منطقه متاثر از حرارت جوش نیز اتفاق افتاده است و این عامل نقش بسیار مهمی در کاهش خطر ترک های هیدروژنی یا تردی هیدروژنی ایفا می کند زیرا همانطوریکه پیشتر بیان گردید خطر تردی هیدروژنی بدلیل وجود اتم های کربن و هیدروژن اضافی بیشتر، در منطقه متاثر از حرارت اتفاق می افتد. ولی در این پژوهش، انجام

موجب می گردد تا جوش در برابر ترک های هیدروژنی یا تردی هیدروژنی مقاومت بهتری از خود نشان دهد.

جدول ۱۳- نتایج آزمایش ماکروگرافی

ردیف	نتایج آزمایش ماکروگرافی
۱	جوش از پروفیل و تحذب قابل قبولی برخوردار می باشد.
۲	ذوب ریشه جوش کافی است.
۳	نفوذ جوش در فلز پایه و در لایه های مختلف جوش مناسب است.
۴	ریشه جوش در بزرگنمایی 5X عاری از ترک می باشد.
۵	فلز جوش و منطقه HAZ عاری از ترک می باشد.
۶	جوش در نمونه های Intersection و ساعت های ۱۲ دارای حفره گازی و ناخالصی سرباره (Slag Inclusion) می باشد که با فلش نشان داده شده است.
۷	در لبه های جوش، بریدگی لبه های جوش (Undercut) مشاهده نشد.

براساس استانداردهای مرجع بین المللی بویژه استاندارد NACE MR0175 مطلوب ترین و مناسب ترین میزان سختی برای فولادهای میکروآلیاژی مورد استفاده در گاز ترش ۲۲HRC راکول سی یا ۲۴۸ HV ویکرز می باشد. در این تحقیق تعداد ۱۲۰ نقطه در منطقه جوش، منطقه متاثر از حرارت و منطقه فلز پایه آزمایش سختی سنجی ویکرز با اعمال بار ۵ کیلوگرم انجام شد و تمام نتایج حاکی از مناسب بودن میزان سختی جوش و مناطق همجوار آن بوده است و تمام اعداد سختی زیر ۲۴۸ ویکرز بوده است. این بیانگر چقرمه بودن جوش ناشی از انجام عملیات حرارتی پیشگرم کنترل شده می باشد. در این تحقیق، با بررسی نتایج سختی سنجی مشخص شد، اعداد سختی منطقه متاثر از حرارت نسبت به منطقه جوش بیشتر بوده است و در واقع بیانگر بالا بودن سختی آن نسبت به فلز جوش می باشد که این دلیل سیکل حرارتی ناشی از عواملی همچون زمان و سرعت جوشکاری، عملیات پیشگرم، آمپراژ و ولتاژ جوشکاری می باشد زیرا انتقال حرارت از جوش به سمت منطقه متاثر از حرارت بالا است. در حین جوشکاری، حرارت جوشکاری از دمای ذوب فلز بیشتر است و به این طریق مذاب تشکیل می گردد. این مذاب نسبت به حلالیت با مقدار قابل توجهی از هیدروژن، نیتروژن و

تحت آزمایش انرژی ضربه مشخص شد. در نتیجه دمای پیشگرم مناسب و یکنواخت همراه با افزایش سرعت سرد شدن ملایم موجب شکست نرم در قطعه شده است و برای شکست نرم نیاز به انرژی ضربه بالاتری می باشد که با توجه به نتایجی که در این تحقیق حاصل شد بیانگر انرژی ضربه بالا و مطلوب بوده است. همان طوری که قبلاً در بررسی نتایج آزمون کشش اشاره شد، درصد ازدیاد طول جوش افزایش داشته است که این عامل می تواند با افزایش چقرمگی جوش ارتباط مستقیمی داشته باشد. زیرا افزایش درصد ازدیاد طول موجب افزایش چقرمگی می شود. آزمون سختی سنجی ماکرو مطابق با استاندارد ASTM E92 و بدون در نظر گرفتن شرایط دما و رطوبت محیط انجام شد. در این آزمون از سختی سنجی ویکرز با فرورونده های الماسی هرمی شکل با زاویه ۱۳۶ درجه و بار اعمالی ۵ کیلوگرم استفاده شد. آزمون سختی سنجی ماکرو ویکرز با دستگاه Wolpert آلمانی بر روی پاس رو جوش، منطقه متاثر از حرارت و ۱۰ میلی متر در کنار منطقه HAZ بعنوان فلز پایه و در سه موقعیت ساعت ۶ و ۱۲ و تقاطع دو جوش انجام شد و برای هر موقعیت ۴۰ نقطه جهت انجام سختی سنجی ماکرو ویکرز در نظر گرفته شد. پس از انجام آزمایش سختی سنجی بر روی ۱۲۰ نقطه از جوش محیطی لوله تحت آزمایش نتایج های مختلفی بدست آمد که در جدول (۱۳) نشان داده شده است. نتایج آزمایش سختی سنجی ماکرو ویکرز نشان داد که جوش لوله تحت آزمایش از سختی بسیار مناسبی برخوردار است. همان طور که پیشتر بیان شد دمای پیشگرم و حرارت ورودی و پارامترهای موثر دیگر باعث خارج نمودن عناصر استحکام زا و نیز عناصر گازی همچون هیدروژن می شوند و این ویژگی موجب کاهش استحکام و سختی می گردد. در این تحقیق با انجام دمای پیشگرم کنترل شده سختی فلز کاهش بسیار مطلوبی داشته است، زیرا این دما به هیدروژن محبوس شده در جوش فرصت کافی داده تا از جوش خارج گردد. همچنین با توجه به مقایسه عناصر شیمیایی فلز جوش و فلز پایه اولیه مندرج در جدول (۱۲)، کاهش مقدار منگنز در فلز جوش نسبت به فلز پایه

مشاهده می باشد. بررسی تصاویر و نتایج ماکروگرافی نیز نشان داد که پارامترهای جوشکاری در نظر گرفته شده در این پژوهش نتایج مطلوبی را بدست آورده است، زیرا هیچ گونه عیب و ناپیوستگی موثر در خواص مکانیکی جوش مشاهده نگردید. البته در برخی نقاط جوش عیوبی همچون حفره های گازی و ناخالصی ناشی از پوشش الکتروود در فرایند جوشکاری قوس الکتروود دستی مشاهده شد، ولی ابعاد و اندازه آنها مطابق با معیار پذیرش استاندارد مرجع بوده است.

در نتایج آزمایش ها همچون آزمون کشش، خمش و انرژی ضربه شاریبی هیچ گونه تاثیری نداشته است. زیرا بر اساس استانداردهای مرجع جوشکاری عیوب و ناپیوستگی هایی که ابعاد و اندازه آنها در محدوده معیار پذیرش می باشند موجب شکست قطعه نمی گردند و در نتایج آزمایش تاثیری ندارند. همچنین در این تحقیق از لوله تحت آزمایش، نمونه هایی جهت بررسی میکروسکوپی ریزساختار آنها انتخاب شد. بررسی تصاویر میکروسکوپی حاکی از آن است که ریزساختار جوش شامل فریت سوزنی و منطقه متاثر از حرارت شامل ریزساختار فریت سوزنی و فریت بینیتی می باشد.

تحقیقات نشان داده است که ریزساختار فریت سوزنی مطلوب ترین ریزساختار برای دستیابی به چقرمگی و استحکام در لوله های مورد استفاده در خطوط انتقال گاز ترش می باشد [7]. ریزساختار فلز جوش معمولاً از طریق ترکیب شیمیایی و کنترل سرعت سرد کردن جوش بوجود می آید. در ریزساختار فریت سوزنی استحاله اولیه در دانه های آستنیتی ایجاد می گردد و بدینصورت درون دانه های آستنیتی اولیه به فریت سوزنی تبدیل می شوند که از نظر چقرمگی ریزساختار بسیار مرغوبی محسوب می شود.

در تصاویر میکروسکوپی پرلیت لایه ای نیز مشاهده شد، ولی به دلیل ناچیز بودن آن اصولاً در ریز ساختار جوش، شبکه ای ایجاد نشده است. در واقع عملیات پیشگرم کنترل شده بین دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد تا ۲۵۰ درجه سانتیگراد همانطور که بیشتر اشاره شد موجب کاهش عناصر وانادیوم و نیویوم

اکسیژن موجود در اتمسفر اطراف، مستعد است و موجب تشکیل اکسید های فلزی می شود و طی فرایند سرد شدن، هیدروژن موجود در جوش باعث ایجاد گرادیان غلظتی هیدروژن از طرف جوش به سمت نواحی HAZ می شود و باعث شکل گیری ریزساختار ترد در نواحی متاثر از حرارت می گردد. در نتیجه اتم های هیدروژن اضافی (اتم هایی که فرصت خروج پیدا نکردند) به سمت نواحی مجاور جوش نفوذ کرده و نهایتاً منجر به سختی آن نواحی می گردند. بنابراین بیشترین سختی یا تردی جوش در این منطقه اتفاق می افتد و موجب تشکیل ساختار درشت دانه می گردد و ساختار درشت دانه از سختی بیشتری برخوردار می باشد. همچنین در منطقه متاثر از حرارت (HAZ) کربن با عناصر آلیاژی دیگر حل شده و باعث ایجاد آستنیت دانه درشت می گردد و طی سرد شدن جوش به ریز ساختارهای ترد و خشن مارتنزیتی تبدیل می شوند و نسبت به ترک های هیدروژنی یا تردی هیدروژنی حساس می گردد.

در چنین شرایطی عملیات پیشگرم مناسب نقش موثری در جلوگیری از ایجاد سختی مارتنزیتی در این منطقه ایفا می کند و از ایجاد آن جلوگیری می نماید، زیرا عملیات پیشگرم گرادیان حرارتی جوش و فلز پایه را کاهش می دهد و در نهایت منجر به کاهش سرعت سرد شدن و افزایش چقرمگی می گردد [6].

در آزمایش متالوگرافی ابتدا آزمایش ماکروسکوپی برای تعیین درشت ساختار جوش و منطقه متاثر از حرارت جوش انجام گردید. برای مشخص نمودن درشت ساختار جوش از چهار موقعیت در ساعت های ۳ و ۶ و ۹ و ۱۲ جوش محیطی، نمونه سازی انجام گردید. در شکل های (۱۰ تا ۱۵) تصاویر مربوط به ماکروسکوپی و بررسی درشت ساختار در موقعیت های ۳ و ۶ و ۹ و ۱۲ جوش محیطی لوله تحت آزمایش نشان داده شده است.

در شکل (۱۰) در Intersection جوش دو ناخالصی سرباره قابل مشاهده می باشد همچنین در جوش ساعت ۶ تعداد ۵ حفره گازی و در جوش ساعت ۱۲ یک حفره گازی بوضوح قابل

زیرا سختی آن‌ها مطابق با استاندارد خوردگی NACE MR0175 کمتر از ۲۲ راکول سی یا ۲۴۸ ویکرز است و در برابر ضربات احتمالی موجود در سیال مقاومت مناسبی از خود نشان می‌دهد.

۲- عملیات حرارتی پیشگرم با نوارهای سرامیکی الکتریکی و نرخ سرد شدن جوش بصورت کنترل شده موجب شد فولاد مذکور از نظر چقرمگی و ریزساختار بهبود یابد به طوری که موجب ایجاد ریزساختار فریت سوزنی و کاهش ریزساختار ستونی شد که آن بهترین و مطلوب ترین ساختار جوش برای استفاده در سرویس گاز ترش است.

۳- از مجموع آزمایش های انجام شده در این تحقیق می توان نتیجه گرفت که پیشگرم فلز پایه پارامتر بسیار مهمی است که باعث کاهش سرعت سرد شدن فلز جوش و منطقه متاثر از حرارت آن و نیز موجب ایجاد ریزساختار فریت سوزنی و افزایش چقرمگی و انعطاف پذیری و کاهش میزان سختی در جوش فولادهای مورد استفاده در محیط های ترش حاوی H_2S می شود زیرا به اتم های هیدروژن محبوس شده، فرصت کافی داده تا از فلز جوش خارج گردند و در نهایت از شکست ترد یا تردی هیدروژنی جلوگیری می نماید.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از کلیه همکاران محترم در شرکت نفت و گاز پارس و نیز جناب آقای منوچهر تقوی بابت حمایت و کمک در راستای پیشبرد این پروژه ابراز می نمایند. همچنین تمام آزمایش های مکانیکی و متالوگرافی این مقاله در آزمایشگاه مرکز پژوهش متالورژی رازی انجام گردید که بدینوسیله از تلاش کارکنان و تکنسین های این آزمایشگاه صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایم.

منابع

[۱] هاشمی ح، رخس خورشید م. " کاربرد شبکه های عصبی جهت بررسی اثر ترکیب شیمیایی بر سختی و انرژی ضربه فولاد میکروآلیاژی گرید "API X65" مجله علمی پژوهشی

شده است و کاهش وانادیوم نیز موجب کاهش پرلایت و افزایش فریت در ریزساختار جوش شده است.

بنابراین براساس تحقیقات هرتزبرگ و پیکرینگ افزایش درصد فریت و کاهش درصد پرلایت موجب افزایش چقرمگی و افزایش درصد ازدیاد طول و نیز افزایش سطح زیر منحنی تنش- کرنش که معیاری از انعطاف پذیری جوش می باشد، می گردد.

همچنین اعداد سختی سنجی بدست آمده در این پژوهش در محدوده سختی مربوط به ریزساختار فریت می باشند که مناسب ترین و ایمن ترین میزان سختی و چقرمگی برای جوش مورد مطالعه در این تحقیق جهت استفاده در خطوط لوله گاز ترش واحد لخته گیر پالایشگاه ۱۵ و ۱۶ پارس جنوبی می باشد.

زیرا تحقیقات نشان داده است که در فولادهای X65 میزان سختی در محدوده سختی های بین ۱۸۵ تا ۲۶۰ ویکرز بیانگر ریز ساختار فریتی می باشد [۷]. تصاویر میکروسکوپی در شکل شماره (۱۶) و (۱۷) مربوط به ریز ساختار فلز جوش و منطقه متاثر از حرارت نمونه تحت آزمایش می باشند. با توجه به شکل (۱۶) در ساختار فلز جوش، ریز ساختار فریت سوزنی و در شکل (۱۷) در منطقه متاثر از حرارت (HAZ) ساختار فریتی با تشکیل شده است.

در تصاویر فوق مشخص است که بیشترین ساختار جوش تحت آزمایش، ساختار فریت سوزنی است که این ساختار بهترین و مناسب ترین ریز ساختار برای فولاد API 5L X65 PSL2 می باشد که در سرویس های گاز ترش مورد استفاده قرار می گیرند. در ریز ساختار فوق پرلایت بسیار اندکی وجود دارد ولی چون مقدار آن زیاد نمی باشد تشکیل فاز صورت نگرفته است.

4- نتیجه گیری

۱- مناسب ترین و با کیفیت ترین آلیاژ مورد استفاده در سرویس گاز ترش پالایشگاه های گازی پارس جنوبی، لوله های میکروآلیاژی NACE API 5L X65 PSL2 می باشد

"بررسی اثر دمای پیشگرم، سرعت سرد کردن و تغییر فرم بر خواص مکانیکی و چقرمگی شکست فولاد میکروآلیاژی msV6 ۳۰" سومین همایش مشترک بیست و یکمین سمینار سالانه انجمن علمی ریخته گری ایران و سیزدهمین کنگره سالانه انجمن مهندسين مواد و متالورژی ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۲۷-۲۶ آبان ۱۳۸۸.

[6] Dani S.G, "The Effect of Preheat on the Structure of the HAZ of a Welded Quenched and Temperature Steel Plate." MSc Thesis, University of Wollongong. Australia, 1993.

[۷] هاشمی ح، رخس خورشید م. ۱۳۹۱. " کاربرد شبکه های عصبی جهت بررسی اثر ترکیب شیمیایی بر سختی و انرژی ضربه فولاد میکروآلیاژی گرید "API X65" مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس. دوره ۱۲. شماره ۴. صفحه ۱۵۶-۱۶۳.

مهندسی مکانیک مدرس، ۱۳۹۱، دوره ۱۲. شماره ۴. صفحه ۱۵۶-۱۶۳.

[۲] منوچهر تقوی، " تهیه و تنظیم، کنترل و بررسی WPS, PQR, WQT بر اساس ASME Sec:IX." 1390، چاپ دوم. اهواز: نشر تر آوا، ۶۹۵ صفحه.

[۳] فاطمه السادات موسوی شیرازی، "بررسی شکست و آنالیز تنش انشعابات کوچک واحد لخته گیر پالایشگاه گاز." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد دانشگاه شیراز، ۱۳۹۳.

[۴] امیرحسین کوکبی، "تکنولوژی جوشکاری" (جلد اول: فرایندها). ۱۳۸۷، چاپ دوم. تهران: انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، ۴۸۰ صفحه.

[۵] حامد الداغی، احمد ضابط، مرتضی عابد، حامد ناجی،