



بررسی جوش پذیری اتصال چند پاسه محیطی در لوله فولادی ترمومکانیکال

سید حجت هاشمی^{۱*}، مجید سبک روح^۲، محمد رضا فراهانی^۳

۱- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
۲- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
۳- استادیار، دانشکده مکانیک، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران
* shhashemi@birjand.ac.ir ، ۹۷۱۱۷۵-۶۱۵ صندوق پستی

چکیده- اطمینان از یک پارچگی اتصالات جوشی (از نوع محیطی یا سر به سر) در صنعت انتقال گاز طبیعی بوسیله لوله‌های قطور فولادی مستلزم تعیین تجربی خصوصیات فولاد پایه و ویژگی‌های درز جوش بوسیله آزمون‌های مخرب و غیر مخرب است. در این مقاله خصوصیات جوش چند پاسه محیطی، ناحیه متأثر از حرارت و فلز پایه در لوله فولادی از نوع درز جوش ماریچ (با قطر خارجی ۵۶ و ضخامت دیواره ۰/۷۸۰ اینچ) به منظور مشخصه‌سازی خواص متالورژیکی و مکانیکی فولاد به وسیله آزمایش‌های کوانتومتری، متالوگرافی، کشش، ضربه و سختی‌سنجی مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر حاصل از آزمون متالوگرافی نشان می‌دهد که نواحی مختلف جوش از نظر فاز و ریز ساختار کاملاً با هم متفاوت می‌باشند. وجود ترکیب شیمیایی متفاوت در پاس‌های مختلف و فازهای سخت همچون مارتنزیت (که نتیجه عملیات حرارتی غیر کنترل شده می‌باشد) اثر قابل توجهی بر خواص مکانیکی درز جوش و منطقه متأثر از حرارت آن دارد. نتایج آزمون سختی‌سنجی کمترین و بیشترین میزان سختی را به ترتیب در منطقه متأثر از حرارت و مرکز منطقه درز جوش محیطی (که کمترین سطح انرژی شاری را نیز دارا می‌باشد) ارزیابی می‌کند.

کلیدواژگان: جوش محیطی، فولاد ترمومکانیکال، لوله فولادی، انتقال گاز طبیعی، API X70.

Investigation of weldability in multi-pass girth welding of thermomechanical steel pipe

S. H. Hashemi^{1*}, M. Sabokrouh², M. R. Farahani³

1- Assoc. Prof., Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran.
2- PhD. Student, Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran.
3- Assis. Prof., Mech. Eng., Tehran Univ., Tehran, Iran.
* P. O. B. 971175/615 Birjand, Iran. shhashemi@birjand.ac.ir

Abstract- The structural integrity of welded joints in natural gas transportation through large diameter steel pipes requires the experimental determination of material mechanical properties in seam weld via destructive and non-destructive tests. In this paper, the metallurgical and mechanical characteristics of multi-pass girth weld in seam weld, heat affected zone (HAZ), and base metal of a pipe with 56 inch outside diameter, 0.780 inch wall thickness is determined. To do this, chemical analysis, standard metallography, tensile and impact tests and hardness experiments were conducted. The metallographic results demonstrated that different sub-zones in welded joint had different microstructure. The existence of different chemical contents in different weld passes and the presence of hard phases (such as martensite due to uncontrolled heat cycles) had direct effects on mechanical properties of the seam weld and HAZ. From the hardness test result, it was found that HAZ and centerline of the seam weld had the minimum and maximum hardness levels, respectively. Furthermore, the minimum Charpy impact energy was found in the seam weld centerline.

Keywords: Girth Weld, Thermomechanical Steel, Steel Pipe, Natural Gas Transmission, API X70.

۱- مقدمه

با کربن و نیتروژن موجود در فولاد دارند و باعث تشکیل ذرات ریز کاربید، نیتريد و کربونیتريد می‌شوند. این عناصر همراه با جوش‌پذیری مناسب به طور مؤثری استحکام فولاد پایه را افزایش می‌دهند [۸]. البته جهت رسیدن به یک ساختار بهینه باید توزیع مناسبی از این عناصر میکروآلیاژی در زمینه به وجود آید. معمولاً فولادهای میکروآلیاژی بعد از فرایندهای کارگرم دارای ساختار ظریف فریتی پرلیتی بوده و در مقایسه با فولاد کوئینچ و تمپر شده از خواص مکانیکی بالاتری برخوردار می‌باشند [۹].

وانادیوم در مقدار کم برای کنترل شرایط نرمالیزینگ، کوئینچ و تمپر مؤثر است. فولاد حاصل از ترکیب وانادیم و نیتروژن استحکام بالایی داشته و در دماهای بالا پایداری زیادی از خود نشان می‌دهند. با این وجود قابلیت جوش‌پذیری این ترکیب پایین است. افزایش چقرمگی، شکل‌پذیری و قابلیت جوشکاری از مزایای افزایش نیوبوم به وانادیم است [۱۰]. تیتانیوم با مکانیزم رسوب سختی و به وجود آوردن نیتريد تیتانیم، استحکام فولاد را افزایش داده و تقریباً تمام آن به صورت رسوبات خشن نیتريد تیتانیوم نامحلول در می‌آیند. [۱۱].

۱-۳- پیشینه تحقیق

با وجود توسعه روز افزون سخت‌افزاری و نرم‌افزاری در چند دهه اخیر، هنوز استفاده از روش‌های تجربی در مباحث جوشکاری اولین انتخاب است، زیرا عملیات جوشکاری خود تا حد زیادی بر مبنای اطلاعات به دست آمده از روش‌های آزمون و خطا انجام می‌گیرد. این نتایج در تحلیل رفتارهای مکانیکی و متالورژیکی جوش به ویژه تنش‌های پسماند استفاده می‌شود. با توجه به عوامل تأثیرگذار و هم‌چنین وسعت کاربرد جوش سر به سر لوله، پژوهش‌های متنوعی برای ارزیابی خصوصیات آن صورت گرفته است.

هاموند^۲ و همکارانش با توجه به گستردگی شرایط تأثیرگذار در جوش سر به سر لوله در مطالعه‌ای جامع به بحث و بررسی خصوصیات و شرایط جوش سر به سر خطوط انتقال گاز در سال ۲۰۰۲ پرداختند [۱۲]. این بررسی در مقاله دیگری در همان سال توسط همین تیم، با محوریت هدسون^۳ ادامه یافت

هم اکنون بیش از ۸۰ درصد اتصالات در مونتاژ، بوسیله جوش انجام می‌شود. در صنایع بزرگ به ویژه صنعت انتقال گاز طبیعی، برای احداث خطوط جدید فولادی لزوماً از اتصال جوش (در محل) استفاده می‌شود [۱]. ایران طولانی‌ترین شبکه خطوط لوله انتقال نفت و گاز در منطقه خاورمیانه را در اختیار دارد [۲]. جوشکاری بزرگترین صنعت بومی در اتصال خطوط لوله حین تولید، مونتاژ و تعمیر آن است. جوشکاری بیشترین زمان کل ایجاد یک خط جدید لوله انتقال (حدود ۲۵ درصد زمان) را تشکیل می‌دهد و برای انجام آن نیاز به جوشکار ماهر با بالاترین درجه مهارت می‌باشد [۳].

۱-۱- مشخصات جوش

عیب در جوش معمولاً پس از انجام عملیات بوجود می‌آید، حال آنکه اهمیت موضوع در پیشگیری از بروز عیب قبل از شروع کار می‌باشد. ممکن است جوش بدون عیب باشد ولی بسیاری از عناصر شیمیایی آن سوخته باشد [۴]. بنابراین جوش علاوه بر کیفیت ظاهری باید سالم نیز باشد. به این علت علاوه بر آزمون‌های غیرمخرب نیاز به تأیید سلامت به وسیله آزمون‌های مخرب مکانیکی (کشش، ضربه و سختی‌سنجی) و بررسی ریز ساختارهای متالورژیکی (کوانتومتری و متالوگرافی) نیز می‌باشد [۵]. این مطلب با توجه به ویژگی و حساسیت فولادهای کم کربن پر استحکام که در خطوط لوله انتقال گاز طبیعی استفاده می‌شود، اهمیت بیشتری می‌یابد.

۱-۲- فولادهای میکروآلیاژی

افزایش رقابت در زمینه‌های کیفیت و قیمت محصول تمام شده باعث افزایش توجه و استفاده روز افزون از فولادهای میکروآلیاژی شده است [۶]. خواص مطلوب فولادهای میکروآلیاژی را می‌توان به صورت کلی در کاهش قیمت تمام شده، قابلیت فرم‌پذیری، قابلیت جوش‌پذیری در حد بسیار خوب به واسطه استفاده کم از عناصر آلیاژی و کاهش مراحل مختلف عملیات حرارتی خلاصه کرد. مکانیزم رسوب سختی از روش‌های اصلی استحکام بخشی در فولادهای میکروآلیاژی می‌باشد [۷]. عناصر میکروآلیاژی تمایل بسیار زیادی به ترکیب

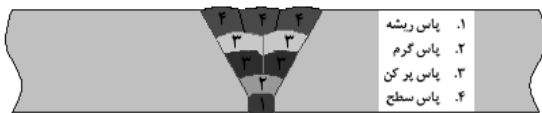
2. Hammond
3. Hudson

1. HSLA (High Strength Low Alloy) Steel

با قطر ۵۶ اینچ و ضخامت ۰/۷۸۰ اینچ بر اساس استاندارد^۱ در ۹ پاس، شامل پاس ریشه، گرم، پرکن و سطح و به ترتیب با سه قطر الکتروود ۳/۲، ۴ و ۵ از ریشه تا سطح، توسط فرایند جوشکاری قوسی الکتروود دستی پوشش دار^۲ صورت گرفت. شکل ۱ طرح‌واره مراحل قرارگیری پاس‌های مختلف را نشان می‌دهد. بر اساس دستورالعمل ویژه جوشکاری^۳ مورد تأیید به وسیله نتایج تعیین کیفیت فرایند^۴، دمای پیشگرم ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای بین پاسی بین ۱۰۰ الی ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد لحاظ شد. با توجه به مجاز نبودن استفاده از مشعل اکسی استیلن، پخ زنی بر اساس استاندارد به وسیله ماشین مخصوص برشکاری سرد لوله^۵ انجام گرفت. پس از بازرسی هرگونه براده و آلودگی درز جوش تمیز شد. به علت قطر بالای لوله‌ها، از ۲ جوشکار با کیفیت بر اساس دستورالعمل ویژه جوشکاری تأیید شده به وسیله نتایج تعیین کیفیت فرایند استفاده شد. موقعیت جوشکاران برای جلوگیری از تنش‌های حرارتی و اعوجاج به صورت متقارن لحاظ گردید. پس از جوشکاری پاس ریشه، تمیزکاری گل جوش توسط سنگ انجام شد و سپس پاس گرم به همین صورت اجرا شد.

جدول ۱ درصد عناصر وزنی موجود در ترکیب شیمیایی لوله فولادی مورد آزمایش [۱۷]

نام عنصر	کربن	سیلیسیم	منگنز	فسفر
درصد وزنی	۰/۰۵۳	۰/۱۹	۱/۶	۰/۰۱۲
نام عنصر	کلسیم	مس	مولیبدن	نیتروژن
درصد وزنی	۰/۰۰۲۳	۰/۰۱	۰/۲۴	۰/۰۰۴۷
نام عنصر	گوگرد	کرم	نیکل	بر
درصد وزنی	۰/۰۰۰۸	۰/۰۱	۰/۱۷	۰/۰۰۰۱
نام عنصر	نیوبیوم	تیتانیوم	وانادیم	آلومینیوم
درصد وزنی	۰/۰۴۳	۰/۰۲۳	۰/۰۴۴	۰/۰۴۲



شکل ۱ محل قرارگیری پاس‌های ریشه، گرم، پرکن و سطح در مقطع درز جوش محیطی لوله

[۱۳]. هاشمی و همکارانش در سال ۲۰۰۹ ارتباط ریز ساختار و مقاومت به ضربه در درز جوش ماریچ فولاد X70 را بررسی کردند [۱۴]. هاشمی و همکارانش در سال ۲۰۱۱ برای اولین بار در ایران از آزمون غیرمخرب مکانیکی برای تعیین خواص مکانیکی جوش محیطی در لوله فولادی X70 استفاده کردند [۱۵]. آنان در این مقاله کیفیت جوش را بر اساس دستورالعمل ویژه جوشکاری خطوط انتقال گاز مورد ارزیابی و تأیید قرار دادند. همچنین هاشمی و محمدیانی در سال ۲۰۱۲ خصوصیات سختی و مقاومت به ضربه جوش ماریچ فولاد X65 را همراه با شناسایی و تحلیل میکرو ساختار ارائه کردند [۱۶]. در این تحقیق افزایش سختی و کاهش مقاومت به ضربه در ناحیه جوش به تفصیل بررسی شده است. با توجه به موضوع تحقیق در مرجع [۱۵] و با عنایت به اهمیت جوش سر به سر لوله‌های فولادی و گسترده‌ی استفاده از نتایج تجربی در بررسی رفتارهای متنوع مکانیکی و متالورژیکی، در این مقاله خصوصیات جوش محیطی و ناحیه متأثر از حرارت همراه با فلز پایه لوله فولادی گرید X70 (با قطر خارجی ۵۶ و ضخامت ۰/۷۸۰ اینچ مورد استفاده در خطوط انتقال گاز طبیعی ایران) به منظور مشخصه‌سازی خواص مکانیکی و متالورژیکی آن و تعیین ارتباط این خواص با یکدیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- معرفی لوله فولادی آزمایش شده

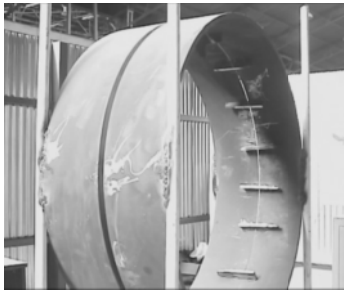
لوله فولادی مورد آزمایش از نوع درز جوش ماریچ (اسپیرال) می‌باشد. فولاد اولیه به شکل کلاف (کوئل) توسط شرکت پوسکوی کره جنوبی تهیه و در شرکت لوله و پروفیل سدید فرم دهی و جوشکاری شده است. نمونه‌های لوله تولید شده هم اکنون در خطوط لوله پرفشار انتقال گاز طبیعی ایران به کار می‌رود. فولاد مربوطه از خانواده کم کربن پر استحکام و دارای مقادیر قابل توجهی عناصر میکروآلیاژی شامل تیتانیوم، وانادیوم و نیوبیوم می‌باشد. جدول ۱ آنالیز شیمیایی عناصر موجود را در لوله API X70 نشان می‌دهد [۱۷].

۳- آماده‌سازی و انجام فرایند جوشکاری

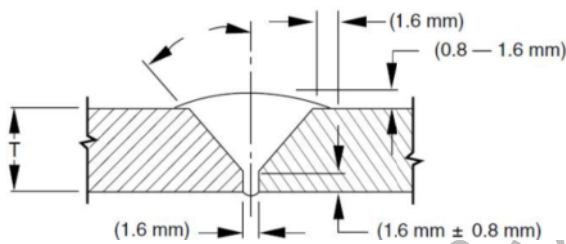
جوشکاری بر روی دو قطعه ۵۰ سانتی‌متری لوله فولادی اسپیرال API X70 از خانواده فولادهای کم کربن استحکام بالا

1. AWS
2. SMAW
3. WPS
4. PQR
5. Pipe Cold Cutter

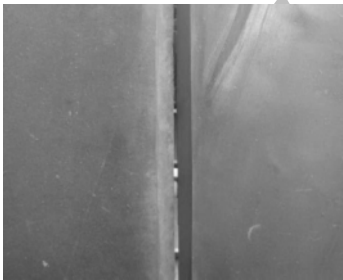
فاصله بین لوله‌ها در شعاع داخلی لوله ۳/۲ میلی‌متر و در شعاع خارجی لوله ۳۶ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۲-الف، ب، پ و ت به ترتیب قید و بند لوله‌ها و تنظیم اتصال جوش سر به سر محیطی، محدوده طراحی یخ را بر اساس استاندارد^۳، شرایط طرح یخ قبل از فرایند جوشکاری محیطی و نحوه شرایط فرایند جوشکاری را نشان می‌دهد.



شکل ۲ الف- قید و بند لوله‌ها و تنظیم اتصال جوش محیطی



شکل ۲ ب- طراحی و آماده سازی اتصال بر اساس استاندارد



شکل ۲ پ- شرایط طرح یخ قبل از فرایند جوشکاری محیطی



شکل ۲ ت- جوشکاری سر به سر لوله

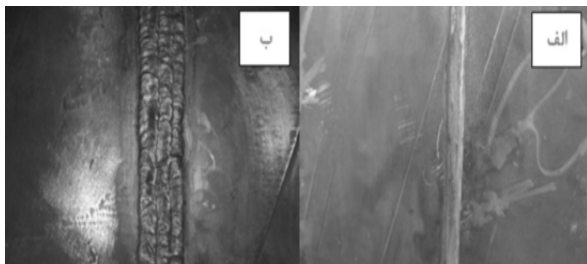
برای پاس‌های بعدی دقت شد که این جریان مذاب کاملاً با سطح یخ ممزوج شود. بر اساس استاندارد مربوطه پاس سطحی و نهایی به صورت محدب به صورت ۳ پاس موازی که ارتفاع پاس در حدود ۱ میلی‌متر بالاتر از سطح لوله است، ایجاد شد. به منظور تطابق با استاندارد از سنگ زدن گرده جوش صرف‌نظر گردید. بر اساس استاندارد عرض این پاس در حدود ۱/۵ میلی‌متر بیشتر از یخ موجود از هر طرف می‌باشد. کل فرایند جوشکاری در کمتر از یک روز کاری انجام شد. پس از جوشکاری بازرسی چشمی در هر پاس به صورت جداگانه صورت گرفت و سپس آزمون‌های نفوذ مایع^۱ و رادیوگرافی^۲ در قسمت سر جوش انجام گردید. هیچ‌گونه شیار جانبی و سطحی مشاهده نشد و میزان عیوب زیر حد استاندارد ارزیابی شد. جدول ۲ مشخصات فرایند جوشکاری در هر پاس را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشخص است الکتروود در پاس ریشه متفاوت بوده و قطر آن از سایر پاس‌ها کمتر است. هم‌چنین قطر الکتروود و شدت جریان پاس‌ها با فاصله گرفتن از پاس ریشه افزایش یافته است.

به منظور مهار لوله‌ها و شبیه‌سازی شرایط جوشکاری واقعی از ستون‌های فلزی استفاده شد. به این ترتیب که ابتدا و انتهای لوله‌ها به این ستون‌ها جوش شد. بر اساس استاندارد برای تنظیم از هیچ‌گونه خال جوشی استفاده نگردید. طرح یخ و آماده‌سازی لوله‌ها با زاویه یخ ۳۰ درجه و پیشانی یخ ۱/۶ میلی‌متر مطابق استاندارد انجام شد.

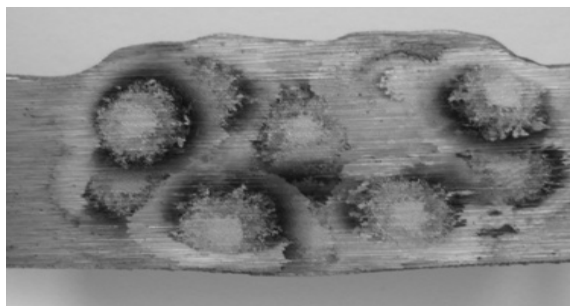
جدول ۲ مشخصات فرایند جوشکاری در هر پاس

نوع پاس	کلاس الکتروود	قطر الکتروود (mm)	نوع جریان
ریشه	۶۰۱۰	۳/۲	مستقیم
گرم	۸۰۱۰	۴	مستقیم
پرکن	۸۰۱۰	۴	مستقیم
سطح	۸۰۱۰	۵	مستقیم
نوع پاس	مقدار جریان (A)	مقدار ولتاژ (V)	سرعت جوشکاری (mm/min)
ریشه	۸۰	۲۳/۲	۱۲۰
گرم	۱۰۰	۲۴	۱۳۰
پرکن	۱۲۰	۲۴/۸	۱۵۰
سطح	۱۵۰	۲۶	۱۸۰

1. PT
2. RT



شکل ۳ الف- شرایط اتصال در پاس‌های ابتدایی جوشکاری
ب- شرایط اتصال در پایان جوشکاری



شکل ۴ کوانتومتری در مناطق مختلف جوش

۲-۴-۲- متالوگرافی

برای آماده‌سازی نمونه‌های متالوگرافی بر اساس استاندارد^۳ ابتدا از سمباده ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ استفاده شد و سپس با استفاده از خمیر الماسه ۹ میکرون و پودر آلومینا ۵ صدم میکرون پولیش کاری انجام شد. برای مشخص کردن نواحی مختلف از محلول حکاکی نایتال ۳٪ بر اساس استاندارد^۴ استفاده گردید. در شکل ۵ نواحی مختلف جوشی به خوبی قابل رویت است.

همان‌طور که در شکل ۲- الف مشخص است مهار مناسب، دو لوله را در فاصله ثابتی نگه داشته است که شرایط انجام فرایند مناسب جوشکاری را ایجاد می‌کند. پس از تمیزکاری در هر پاس، با استفاده از آزمون غیرمخرب مایع نفوذ کننده، نبود ترک‌های سطحی مورد تأیید قرار گرفت. پس از پاس نهایی برای آگاهی از سلامت جوش از عیوب حجمی، آزمایش رادیوگرافی اجرا گردید. نتایج میزان عیوب را زیر حد استاندارد ارزیابی می‌کند. شکل ۳ خوابیدن پاس‌های مختلف جوش را نشان می‌دهد.

۴- تشریح آزمون‌های مخرب

۴-۱- کوانتومتری

برای بررسی خواص شیمیایی در هر پاس و منطقه متأثر از حرارت^۱، آنالیز شیمیایی در هر منطقه توسط دستگاه کوانتومتر بر اساس استاندارد^۲ بدست آمد. قبل از آزمایش سطح مورد آزمایش بر اساس استاندارد با سمباده ۶۰ آماده‌سازی شد. شکل ۴ مناطق مورد آزمایش را نشان می‌دهد. آنالیز شیمیایی از میانگین ناحیه نقره‌ای رنگ درون منطقه جرقه ایجاد شده است. این منطقه دایره‌ای شکل دارای قطری در حدود ۴ میلی‌متر است. جدول ۳ نتایج آزمایش کوانتومتر را در نواحی مختلف جوش نشان می‌دهد. این جدول از پاس ریشه به سوی پاس نهایی مرتب شده است. جالب توجه است که درصد عناصر میکروآلیاژی به ویژه وانادیم با افزایش تعداد پاس‌ها و فاصله از شعاع داخلی کاهش می‌یابد.

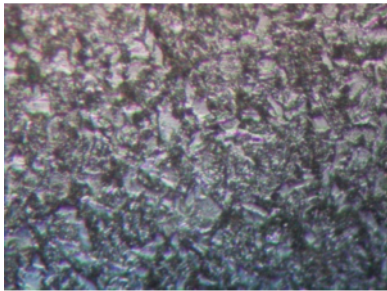
جدول ۳ آنالیز شیمیایی مناطق مختلف جوش و متأثر از حرارت^۳

فاصله از ابتدای پاس ریشه (mm)														
کربن	سیلیسیم	گوگرد	فسفر	منگنز	وانادیم	مس	تیتانیم	قلع	کبالت	نیکل	کرم	مولیبدن	آلومینیوم	روی
۰/۱۵	۰/۲	۰/۰۰۴	۰/۰۰۶	۰/۹	۰/۰۲	۰/۱۱	۰/۱۱۳	۰/۰۰۶	۰/۰۱۴	۰/۱	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۰۹	۰/۰۰۴
۰/۱۵	۰/۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۷	۰/۹	۰/۰۲	۰/۱	۰/۱۱۹	۰/۰۰۵	۰/۰۰۹	۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۰۲
۰/۱۵	۰/۲۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۸	۱	۰/۰۱۹	۰/۰۷	۰/۱۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۱۴	۰/۴۷	۰/۰۵	۰/۲	۰/۰۲۱	۰/۰۰۵
۰/۱۷	۰/۲۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۸	۰/۹۴	۰/۰۱۹	۰/۰۷	۰/۱۰۹	۰/۰۰۴	۰/۰۱۲	۰/۳۸	۰/۰۶	۰/۱۷	۰/۰۱۹	۰/۰۰۲۶
۰/۱۶	۰/۳	۰/۰۰۷	۰/۰۱	۱/۷	۰/۰۱۷	۰/۰۴	۰/۱۰۵	۰/۰۰۳	۰/۰۱۱	۰/۷۶	۰/۰۴	۰/۳۵	۰/۰۳۲	۰/۰۰۳۷
۰/۱۶	۰/۲۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۹	۰/۹	۰/۰۱۵	۰/۰۴	۰/۰۰۹	۰/۰۰۲	۰/۰۱۴	۰/۸	۰/۰۴	۰/۳۶	۰/۰۳۲	۰/۰۰۱۹
۰/۱۶	۰/۲۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۹	۰/۹۴	۰/۰۱۶	۰/۰۴	۰/۰۰۹	۰/۰۰۲	۰/۰۱۴	۰/۷۹	۰/۰۴	۰/۳۷	۰/۰۳۳	۰/۰۰۱۶
۰/۱۵	۰/۲۲	۰/۰۰۶	۰/۰۱	۰/۹۲	۰/۰۱۶	۰/۰۴	۰/۰۰۹	۰/۰۰۲	۰/۰۱۲	۰/۷۳	۰/۰۴	۰/۳۸	۰/۰۳۳	۰/۰۰۱۹

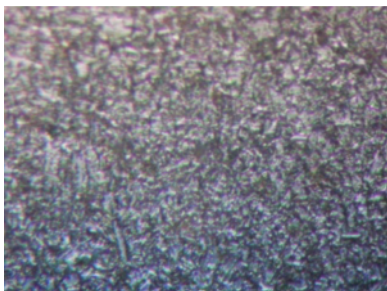
1. HAZ
2. ASTM A415-08
3. ASTM E 3
4. ASTM E 407

مرز و تغییر ساختار جوش به ساختار فلز پایه در تصاویر ب، به ویژه در منطقه پاس ریشه کاملاً مشهود است. هم چنین برای بررسی ریز ساختار و تعیین اندازه دانه از کتاب راهنما^۲ استفاده شده است. به منظور تحلیل دقیق تر متالوگرافی در تصاویر شکل ۷ از میکروسکپ نوری با بزرگنمایی ۵۰۰ استفاده شده است.

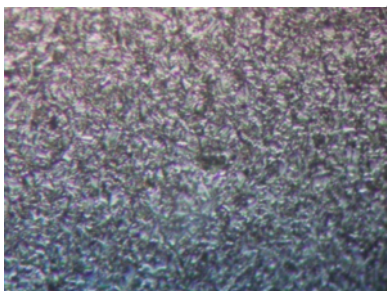
به منظور تشخیص انواع فازها و مقدار آن و تعیین اندازه دانه در مناطق مختلف جوش و منطقه متأثر از حرارت از میکروسکپ نوری^۱ با بزرگنمایی ۱۰۰۰ استفاده شد. شکل ۶ از بالا به پایین پاس‌های ریشه، گرم، پرکن و سطح را مشخص می‌کند. تصاویر الف، فلز جوش و تصاویر ب، فلز جوش را در سمت چپ و منطقه متأثر از حرارت را در سمت راست اتصال با بزرگنمایی ۱۰۰ نشان می‌دهد.



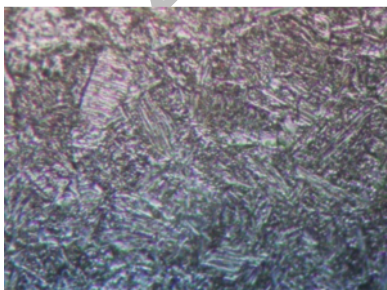
الف- پاس ریشه



ب- پاس گرم

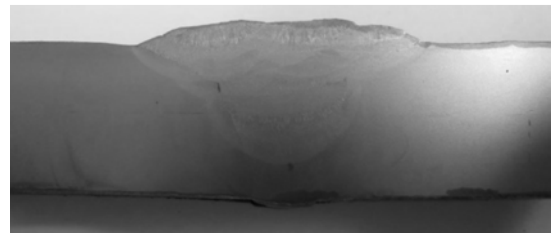


پ- پاس پرکن



ت- پاس سطح

شکل ۷ متالوگرافی مناطق جوش با بزرگنمایی ۵۰۰

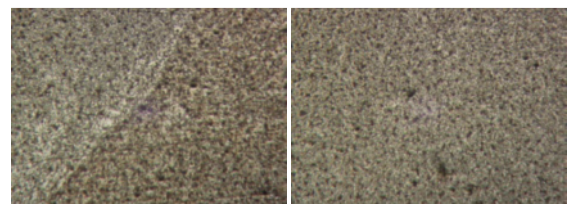


شکل ۵ حکاکی مناطق مختلف جوش به منظور مشخص کردن مناطق مختلف جوشی



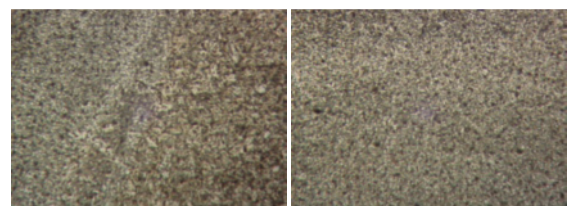
ب (۱)

الف (۱)



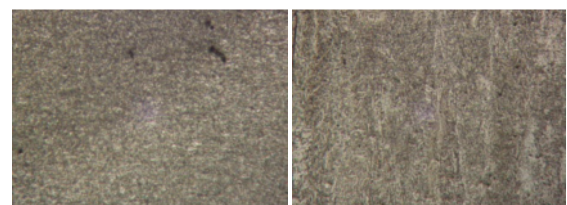
ب (۲)

الف (۲)



ب (۳)

الف (۳)



ب (۴)

الف (۴)

شکل ۶ مناطق مختلف جوشی در پاس‌های مختلف

۴-۴- آزمون ضربه شاری

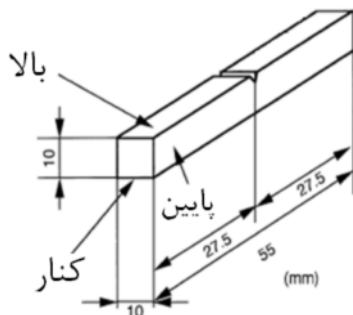
برای تعیین مقاومت فولاد در برابر ضربه، آزمون شاری با ضخامت کامل ۱۰ میلی‌متر در سه ناحیه جوش، متأثر از حرارت و فلز پایه توسط ماشین آزمایشگاهی^۳ با ظرفیت ۴۵۰ ژول در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد مطابق با استاندارد^۴ انجام شد. مطابق با استاندارد انرژی شاری از ۴۰ ژول بیشتر است. شکل ۹ ابعاد نمونه استاندارد آزمون ضربه شاری و سطح شکست نمونه استخراج شده از درز جوش را نشان می‌دهند. نتایج آزمون‌های ضربه در جدول ۵ آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که با حرکت از سمت فلز پایه به سوی مرکز درز جوش، انرژی شاری کاهش یافته است.

۴-۵- سختی سنجی

در مقطع عمود بر درز جوش با استفاده از روش برینل و با استفاده از دستگاه پرتابل^۵، سختی سنجی انجام شد.

جدول ۴ نتایج آزمون کشش

نمونه	استحکام تسلیم (MPa)	تغییر نسبی طول	نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی
نمونه تخت عمود بر درز جوش محیطی	۶۳۳	۲۰	۰/۸۹
نمونه گرد از درز جوش سر به سر	۵۰۵	۱۳	۰/۸۴

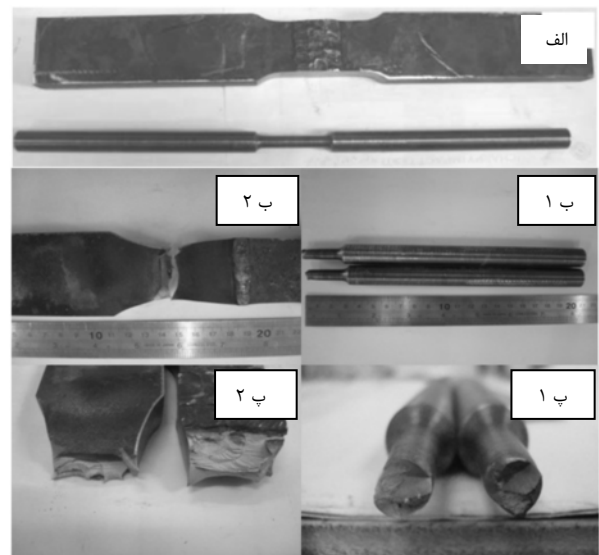


شکل ۹- تصویر شماتیک نمونه آزمون ضربه شاری ماشین کاری شده در جهت محیطی لوله (شمار در جهت طولی لوله)

تصاویر نشان‌دهنده میکروساختارهای متفاوت در مناطق مختلف جوشی است.

۴-۳- آزمون کشش

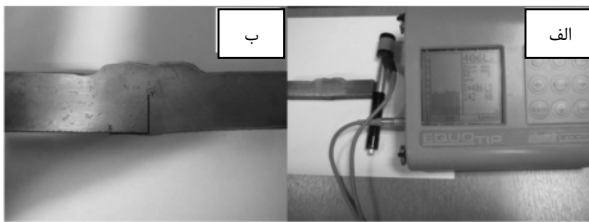
برای تعیین خواص مکانیکی فولاد، آزمون کشش بر روی نمونه تخت عمود بر درز جوش محیطی (در راستای طولی لوله) و نمونه گرد از درز جوش سر به سر (در راستای محیطی) با استفاده از ماشین آزمایشگاهی زوئیک^۱ با ظرفیت ۶۰۰ کیلو نیوتن و با سرعت کشش ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه بر اساس استاندارد^۲ انجام شد. مطابق استاندارد نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی کمتر از ۰/۹ است. همچنین گسست در منطقه درز جوش اتفاق نیفتاده است. شکل ۸ نمونه‌ها را قبل و بعد از آزمایش کشش و سطح شکست‌شان را نشان می‌دهد. نتایج آزمون‌های کشش در جدول ۴ آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که فلز جوش دارای استحکام تسلیم و استحکام کششی بیشتر و تغییر طول نسبی کمتری نسبت به منطقه متأثر از حرارت است.



شکل ۸- الف- آماده سازی نمونه تخت (عمود بر درز جوش محیطی) و نمونه گرد (از درز جوش محیطی)، ب- نمونه گرد و نمونه تخت پس از آزمایش کشش، پ- سطح شکست نمونه گرد و نمونه تخت پس از آزمایش کشش

3. Roell/Amsdler pk 450
4. EN 875
5. EQUOtip

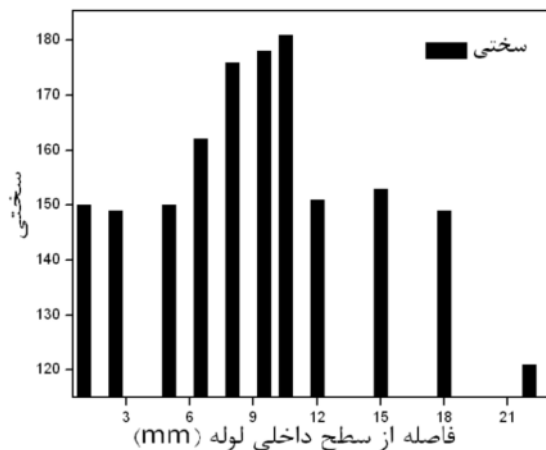
1. Zwick
2. EN 895, ASTM E 8M



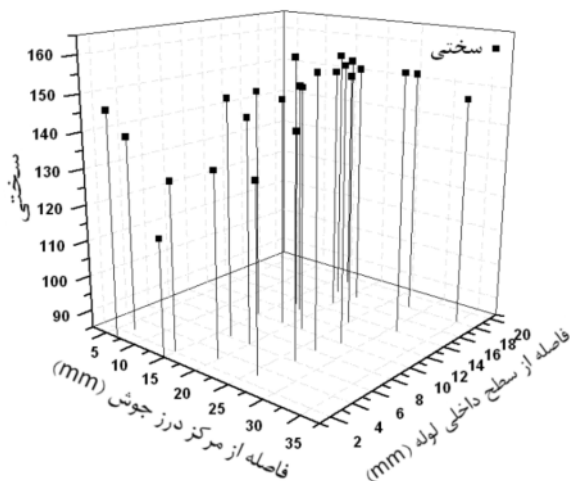
شکل ۱۰ الف- آزمایش سختی سنجی با استفاده از دستگاه پرتابل
ب- مقطع مورد بررسی در آزمایش سختی سنجی



شکل ۹ ب- جزئیات سطح شکست نمونه استخراج شده از درز جوش



شکل ۱۱ نمودار سختی سنجی در مناطق مختلف جوش



شکل ۱۲ نمودار سختی سنجی در مناطق اطراف جوش

در منطقه جوشی نیز آنالیز شیمیایی در پاس‌های مختلف، متفاوت است. این می‌تواند ناشی از آنالیز شیمیایی متفاوت الکتروود در پاس اول نسبت به پاس‌های بعدی باشد. تغییر میزان درصد فلز پایه در مناطق جوشی، در پاس‌های مختلف با توجه به حرارت ورودی ناشی از شدت جریان الکتریکی، سرعت

سپس برای مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده با استاندارد، واحد سختی از برینل به ویکرز تبدیل شد. این آزمایش مطابق با استاندارد سختی جوش را در حد مجاز زیر ۳۴۸ ویکرز نشان می‌دهد. همچنین اختلاف سختی جوش و فلز پایه مطابق با استاندارد کمتر از ۱۰۰ ویکرز است. شکل ۱۰ شرایط نمونه‌گیری و محل قرارگیری نقاط آزمایش را نشان می‌دهد.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب نمودار میزان سختی در نواحی مختلف جوش و متأثر از حرارت را بر حسب معیار سختی ویکرز نشان می‌دهد. مناطق مختلف پاسی توسط آزمایش متالوگرافی تشخیص داده شده است. نتایج کمترین میزان سختی را در پاس نهایی ارزیابی می‌کند.

۵- بحث و بررسی

۵-۱- آزمون کوانتومتری

تفاوت آنالیز شیمیایی در فلز پایه و جوش به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۴ قابل ارزیابی است. بنابراین انتظار خواص مکانیکی و متالورژیکی متفاوت در منطقه جوش نسبت به فلز پایه منطقی است.

جدول ۵ نتایج آزمون ضربه شاریبی

نمونه	آزمون ۱ (J)	آزمون ۲ (J)	آزمون ۳ (J)	میانگین (J)
جوش (در راستای محیطی لوله)	۳۳	۴۸	۵۴	۴۵
جوش (در راستای محوری لوله)	۶۳	۵۱	۳۶	۵۰
متأثر از حرارت فولاد پایه	۱۲۳	۳۷۶	۱۱۴	۳۹۵

1. ASTM E10

می‌شود. هم چنین در زمان جوشکاری پاس‌های بعدی، عناصر آلیاژ محلول در فاز جامد آستنیت همچون کرم، منگنز و مولیبدن از آن خارج شده و با کربن خارج شده از شبکه کریستالی مارتنزیت، تشکیل کاربید کمپلکس می‌دهند. در فرمول شیمیایی کاربید کمپلکس C کربن و M ترکیبی از عناصر ذکر شده است. این کاربیدها به صورت نقاط بسیار ریز و براق مشاهده می‌شوند. تصاویر شکل ۷ با بزرگ‌نمایی ۵۰۰ در تحلیل مناطق استفاده شده است. با استفاده از نرم‌افزار می‌توان ۴۴ درصد فازهای تیره مارتنزیت لایه‌ای تمپر شده همراه با مقدار محدودی پرلیت و ۵۶ درصد فازهای سفید رنگ شامل فریت‌های ناشی از بازپخت و مقدار محدودی کاربیدهای کمپلکس را در این منطقه مشاهده کرد. اندازه دانه بر اساس استاندارد به صورت تعداد دانه در اینچ مربع و در محدوده ۲^{۱۱} ارزیابی شده است. اندازه دانه در این پاس تقریباً برابر ۶۴ است. منطقه متأثر از حرارت جانبی پاس ریشه دارای اندازه دانه تقریبی ۱۲۸ است. همچنین درصد فازهای این منطقه به صورت ۶۰ درصد پرلیت و مارتنزیت لایه‌ای به طور خیلی کم و ۴۰ درصد آستنیت باقی‌مانده و فریت پرویوتکتوئید و مقدار بسیار محدودی کاربیدهای کمپلکس است. این مقدار با منطقه جوشی تا حدودی متفاوت است. باید توجه کرد که الکتروود استفاده شده در پاس ریشه از نوع ۶۰ بوده که یک خانواده از فلز پایه، استحکام کمتر و نرمی بیشتری دارد. همچنین باید به تأثیر حل شدن عناصر مختلف در جوش در اثر حرارت بالای قوس توجه کرد (منطقه متأثر از حرارت تنها تحت اثر سیکل حرارتی قرار گرفته است). تصور می‌شود که به توجه به سرعت بالای سرد شدن، احتمال به وجود آمدن فازهای نفوذی همچون فریت کم باشد، اما باید در نظر داشت با توجه به کم بودن مقدار کربن، سختی پذیری در این فولادها آن چنان زیاد نیست.

۵-۲-۲- ساختار پاس گرم

در منطقه پاس جوشی گرم درصد فازهای تشکیل شده نسبت به پاس ریشه کاملاً متفاوت است. این منطقه دارای مقدار تقریبی ۶۵ درصد مناطق تیره رنگ مارتنزیت تمپر شده به همراه کلنی‌های پرلیت است. هم‌چنین این منطقه دارای ۳۵ درصد مناطق سفید رنگ شامل فریت پرویوتکتوئید و مقداری فریت ویدمن اشتاتن و مقداری آستنیت است. در این منطقه

و نحوه حرکت الکتروود جوشکاری از دیگر عوامل مهم تأثیرگذار در این اختلاف است. هم چنین ممکن است آلودگی‌های سطحی باقی‌مانده بر سطح اتصال و یا تمیز نشدن کامل گل جوش باقی‌مانده از پاس قبلی بر این اختلاف تأثیرگذار باشد. عناصر میکروآلیاژی همچون تیتانیوم و وانادیم از پاس ریشه به طرف پاس نهایی روند کاهشی مشهودی را دنبال می‌کند. کاهش عناصر میکروآلیاژی در فلز جوش نسبت به فلز پایه و کاهش آن در پاس‌های انتهایی دلیل کاهش خواص مکانیکی و متالورژیکی در این مناطق است. این عناصر در اثر سیکل حرارتی شدید سوخته و یا از مناطق جوشی به صورت تبخیر و یا به همراه سرباره خارج شده‌اند. افزایش جریان الکتریکی در پاس‌های بعدی این زاویه دید را تأیید می‌کند. با توجه به اینکه قطر جرقه در حدود ۴ میلی‌متر می‌باشد نمی‌توان عناصر آلیاژی در یک نقطه را ارزیابی کرد، لذا بدست آوردن عناصر آلیاژی در مناطق ذوب جزئی امکان‌پذیر نیست.

۵-۲-۲- متالوگرافی

بررسی‌های ریز ساختار شکل‌های ۶ و ۷ حاصل از آزمایش متالوگرافی نتایج جالبی را نمایان می‌سازد. بررسی ریز ساختار با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی^۱ انجام شده است. روش محاسبه درصد فازی روش نقطه شماری^۲ است.

۵-۲-۱- ساختار پاس ریشه

تصویر منطقه پاس ریشه جوش، ساختار مارتنزیت لایه‌ای تمپر شده و هم چنین کاربیدهای کمپلکس^۳ را نشان می‌دهد. با توجه به سرعت سرد شدن بالا در پاس ریشه همیشه باید انتظار داشت که مقداری از این فاز تبدیل به مارتنزیت شود. مارتنزیت دارای ساختار کریستالی مکعبی مرکزدار با یک یال کشیده شده^۴ است. این ساختار مشابه با ساختار مکعبی مرکزدار^۵ با این تفاوت که بسته به میزان کربن یک یال آن کشیده شده است. این مارتنزیت با خروج کربن آن در اثر عملیات حرارتی ناشی از جوشکاری پاس گرم و پاس‌های بعدی به فازی با تصویر پیچیده و ناهمگن به نام مارتنزیت تمپر شده تبدیل

1. ANALYSIS, CLEMEX
2. Point Count
3. M7C3
4. BCT
5. BCC

حرارتی متنوع‌تری است. این منطقه هم متأثر از حرارت جوشکاری پاس قبلی است و هم تحت تاثیر حرارت منطقه پاس جانبی و بعدی است. بنابراین تعداد سیکل‌های حرارتی بیشتری در این منطقه فعالیت دارد. توجه شود که علاوه بر تغییر حرارت ورودی، با توجه به این که در هر خوابیدن پاس جوشی هندسه اتصال تغییر می‌کند، شرایط فروکشی حرارتی و سرعت سرد شدن به صورت واضح تغییر می‌کند. به این موارد می‌توان تفاوت خصوصیات فلز پایه در منطقه میانی نسبت مناطق نزدیک به سطح در اثر عملیات ترمومکانیکال و نورد به منظور تولید را اضافه کرد. اندازه دانه در جوش و منطقه متأثر از حرارت این منطقه و مناطق بعدی مشابه به منطقه پاس گرم است.

۵-۲-۴- ساختار پاس سطح

در منطقه پاس نهایی ۷۵ درصد مناطق تیره مارتنزیت لایه‌ای و ۲۵ درصد مناطق سفید رنگ شامل آستنیت مادر و مقداری کمی کاربیدهای کمپلکس است. افزایش چشمگیر مارتنزیت و ناپدید شدن منطقه پرلیت را می‌توان در شرایط حرارتی سنگین این منطقه ارزیابی کرد. این منطقه از ۳ پاس موازی با سرعت جوشکاری پایین و با بزرگترین قطر الکتروود و شدت جریان بالا تشکیل شده است. با توجه به وجود سه پاس موازی، پهنای پاس محدود بوده و بنابراین از میزان ولتاژ نسبی کمتری استفاده شده است در نتیجه میزان شدت جریان باز هم افزایش یافته است. به این موارد باید نرخ سرعت سرد شدن سریع را نیز اضافه کرد. این منطقه با توجه به عمق اتصال تقریباً کامل، بیشترین فروکشی حرارتی را دارا می‌باشد و با توجه به نهایی بودن پاس، پاس بعدی وجود ندارد که در نقش عملیات حرارتی و تمپرینگ ظاهر شود. منطقه متأثر حرارت جانبی پاس نهایی دارای مقدار تقریبی ۵۹ درصد مناطق سیاه رنگ شامل کلنی‌های پرلیت و مارتنزیت لایه‌ای و ۴۱ درصد فریت پروتکتوئید، آستنیت باقی‌مانده و مقداری کاربیدهای کمپلکس است. با توجه به سیکل حرارتی شدید این منطقه نسبت به منطقه متأثر از حرارت منطقه جانبی پاس پرکن، افزایش میزان مارتنزیت بدیهی به نظر می‌رسد. افزایش مقدار مارتنزیت با توجه به افزایش حجم می‌تواند تاثیر بسیار زیادی بر مقدار تنش‌های پسماند داشته باشد. برای تحلیل مقادیر دقیق اندازه دانه و فازها در یک رنگ نیاز به

محدوده اندازه دانه ۱۲۸ می‌باشد. باید توجه کرد که برای این پاس از الکتروود سری ۸۰ استفاده شده است که ۲ درجه با الکتروود پاس ریشه تفاوت دارد. هم چنین نرخ حرارت ورودی و فروکش حرارتی به علت افزایش قطر الکتروود و شدت جریان و تغییر سرعت جوشکاری و باز شدن دهانه پخ و هندسه اتصال تغییر کرده است. در این منطقه وجود کلنی‌های پرلیت مشهودتر است. تمپر شدن مارتنزیت مانند حالت پاس ریشه از عملیات حرارتی ناشی از پاس بعدی تشکیل شده است. مقداری از آستنیت باقی‌مانده نیز هم تحت اثر همین حرارت از آستنیت به فریت پروتکتوئید تبدیل شده است. این نتایج می‌تواند نشان‌دهنده وجود سیکل حرارتی ملایم‌تر در این فاز باشد. منطقه متأثر از حرارت جانبی پاس گرم نیز از این روند تبعیت می‌کند. این منطقه دارای ۶۷ درصد مناطق روشن شامل آستنیت، فریت پروتکتوئید و مقداری محدودی کاربیدهای کمپلکس و ۳۳ درصد مناطق تیره رنگ شامل مارتنزیت لایه‌ای و کلنی پرلیت است. اندازه دانه به صورت تقریبی ۶۴ ارزیابی شده است. کاهش مقدار مارتنزیت به احتمال زیاد ناشی از ملایم شدن شیب حرارتی است.

۵-۲-۳- ساختار پاس‌های پرکن

در منطقه پاس‌های پرکن ۶۲ درصد مناطق تیره رنگ شامل مارتنزیت و ۳۸ درصد کلنی‌های پرلیت و مناطق روشن شامل آستنیت باقی‌مانده و مقادیر بسیار کمی کاربیدهای کمپلکس است. این مقادیر تقریباً نزدیک به پاس گرم است و تنها مقداری از درصد نقاط سیاه رنگ نسبت به حالت قبل کاسته شده است و مارتنزیت تمپر نشده است. با توجه به حساسیت کمتر پاس پرکن و پاس‌های بعدی نسبت به سایر پاس‌ها سرعت حرکت الکتروود محدوده بزرگ‌تری دارد، بنابراین دارای حرارت ورودی کمتری است و شاید توانایی تمپرینگ کامل فاز مارتنزیت را نداشته باشد. در منطقه متأثر از حرارت کنار این منطقه جوشی می‌توان ۴۷ درصد مناطق تیره رنگ شامل مارتنزیت لایه‌ای و کلنی‌های پرلیت و ۵۳ درصد مناطق روشن شامل آستنیت باقی‌مانده، فریت پروتکتوئید و مقدار بسیار محدودی کاربیدهای کمپلکس را مشاهده کرد. این قسمت نسبت به منطقه متأثر از حرارت قبلی دارای مناطق سیاه رنگ بیشتری است. برای بررسی و ارزیابی این منطقه نسبت به حالت قبل روند پیچیده‌تری لازم است. این منطقه دارای سیکل

نهایی تشکیل شده است. در مرحله تغییر فرم، ترک سطحی شروع به رشد کرده و در اثر کاهش سطح مقطع در اثر کشش، خطوط متوقف شده و به صورت رگه رگه^۳ قابل رویت است. این ترک با کاهش سطح مقطع، میزان پیشرفت و زاویه آن تغییر کرده است. مرحله نهایی به صورت عمود بر محور اصلی آزمایش کشش و کاملاً ناگهانی رخ داده است و احتمالاً ناشی از افزایش تنش‌ها در اثر کاهش سطح مقطع و ضریب تمرکز تنش ناشی از مرحله تغییر فرم اولیه می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۸ (ب- ۲ و پ- ۲) نشان داده شده است این ترک از سطح خارجی لوله کنار سطح نهایی جوش ایجاد شده است. در این آزمایش تقریباً بیشتر سطح مقطع به صورت تغییر فرم نرم و اندکی به صورت ناگهانی اتفاق افتاده است. مجاور بودن به منطقه جوش را می‌توان در افزایش تنش پسماند در کنار جوش ارزیابی کرد. تنش پسماند در منطقه جوش میزان بالایی است اما باید توجه کرد که از الکترودهای ۸۰ استفاده شده است که از نظر استحکام ذاتی از فلز پایه بیشتر است. هم‌چنین سطح مقطع جوش با توجه به پاشنه و گرده جوش بالاتر است. بنابراین منطقه جوش دارای استحکام ذاتی کششی بیشتری است و میزان تنش کششی کمتری نسبت به مناطق اطراف به آن وارد می‌شود. شروع شکست از سطح را می‌توان ناشی از فرایندهای نورد و ترمومکانیکال ایجاد لوله دانست که باعث افزایش سختی سطحی می‌شود. افزایش استحکام در سطح و افزایش تنشهای پسماند سطحی و ترک‌های میکروسکوپی ناشی از تغییر خواص تریبولوژیکی روی سطوح لوله‌ها، بر آغاز شکست از روی این سطوح حکایت دارد. شروع ترک از روی سطح خارجی لوله را می‌توان ناشی از دو فرایند تولید لوله و جوشکاری آن دانست. در فرایند شکل‌دهی غلتکی لوله بصورت مارپیچ، تنش‌های خمشی کششی در سطح خارجی لوله و فشاری در سطح داخلی لوله به وجود می‌آید. تنش کششی باعث باز شدن ترک‌ها و رشد آن می‌شود. هم‌چنین شروع جوشکاری از پاس ریشه در مجاورت جوش آغاز می‌گردد که با توجه به کوچک بودن قطر الکتروده، جوشکاری این منطقه در شدت جریان ورودی کمتری اتفاق می‌افتد و در نتیجه تنش‌های حرارتی کمتری ایجاد می‌شود. علاوه بر این پاس گرم و پاس‌های بعدی نقش عملیات حرارتی و تمپرینگ را ایفا کرده

آزمایش‌های ثانویه و پراش اشعه ایکس^۱ در مراحل بعدی مطالعاتی است. هم‌چنین برای بدست آوردن سختی فازها، از آزمایش سختی‌سنجی میکرو در مناطق مختلف پاس جوشی و متأثر از حرارت استفاده خواهد شد. آزمایش کوانتومتری به دلیل داشتن قطر آزمون بالایی در حدود ۴ میلی‌متر و عدم توانایی تشخیص برخی از عناصر نمی‌تواند نیاز تشخیص آنالیز شیمیایی در مناطق مختلف به ویژه منطقه ذوب جزئی را برآورده نماید. از سوی دیگر این آزمون تنها میزان درصد عناصر را مشخص کرده و قادر به تشخیص ترکیب، نحوه قرار گرفتن و مورفولوژی در ترکیبات فازها نیست. بنابراین آزمایش پراش اشعه ایکس برای مراحل بعدی در نظر گرفته شده است.

۵-۳- آزمون کشش

نتایج بدست آمده در جدول ۴ نسبت تنش تسلیم به استحکام کششی را در درز جوش برابر با ۰/۸۹ نشان می‌دهد که با استانداردهای مربوطه تطابق دارد. سطح شکست مقطع گرد شکل ۸ (ب- ۱ و پ- ۱)، نشان‌دهنده شکست فنجان-مخروط است. در این نوع شکست جدا شدن و ایجاد حفره در حوالی مرکز سطح قطعه ایجاد می‌شود که می‌تواند ناشی از وجود ناخالصی در فلز مورد آزمایش باشد. این شکست معمولاً در ماده‌ای با درصد افزایش طول مناسب^۲ ایجاد می‌شود. در این نمونه میزان مخروط از فنجان بیشتر مشاهده شده و از حفره به عیوب صفحه‌ای و ترک نزدیک می‌شود. در این نمونه تغییر شکل نرم درصد مناسبی از تغییر سطح مقطع شکست را نشان می‌دهد. شکست نهایی به صورت برش لبه‌ای در کنار حفره و صفحه مرکزی تشکیل شده و درصد کمی را به خود اختصاص می‌دهد. این شکست را می‌توان ناشی از کاهش سطح مقطع و افزایش تنش ناشی از وجود عیب حفره و صفحه‌ای نزدیک به مرکز جوش دانست.

مطابق شکل ۸ (ب- ۲ و پ- ۲)، شکست مقطع تخت در فلز پایه اتفاق افتاده است. این آزمون مطابق با نتایج تعیین کیفیت فرایند انجام شده است و با توجه به استانداردهای مربوطه، سلامت مکانیکی جوش را تأیید می‌کند. منطقه شکست در مجاورت پاس نهایی در شعاع خارجی لوله اتفاق افتاده است. این شکست از ۲ مرحله تغییر شکل نرم و شکست

1. XRF
2. Elongation

پایه ارزیابی کرد. کاهش مشهود میزان عناصر میکروآلیاژی در فلز جوش و هم چنین رشد احتمالی این عناصر و قرار گرفتن غیر کنترلی در زمینه میکروساختار فلز جوش اثر مهمی بر خواص مکانیکی دارد. هم چنین در این منطقه افزایش میزان کربن دیده می‌شود که باعث افزایش سختی‌پذیری و درصد فاز مارتزیت می‌شود و اثر قابل توجهی بر چقرمگی و ضربه پذیری فولادها دارد. در منطقه متأثر از حرارت میزان کربن و عناصر آلیاژی تقریباً ثابت است، اما در اثر سیکل‌های حرارتی متنوع و غیر کنترلی ناشی از پاس‌های مختلف جوشکاری، اندازه عناصر میکروآلیاژی و پیوندشان با زمینه تغییر می‌کند. این سیکل حرارتی هم چنین می‌تواند مورفولوژی عناصر محلول در فازها را تغییر دهد. بنابراین کاهش انرژی شاری نسبت به فلز پایه در ناحیه متأثر از حرارت جوش منطقی به نظر می‌رسد.

۵-۵- سختی سنجی

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، میزان سختی از پاس ریشه به طرف پاس‌های بعدی افزایش می‌یابد. این موضوع می‌تواند ناشی از عواملی مانند افزایش قطر الکتروود و شدت جریان الکتریکی، سرعت جوشکار و به صورت مجموع حرارت ورودی باشد. هم چنین با افزایش تعداد پاس‌ها، تعداد جهات و نرخ فروکش حرارتی هم تغییر می‌کند. سختی از نقطه‌ای به فاصله ۵ میلی‌متر از پاس ریشه به نقطه بعدی در فاصله ۶/۵ میلی‌متر، دارای نرخ رشد قابل ملاحظه‌ای است که ناشی از افزایش درجه الکتروود ۶۰۱۰ از پاس اولیه به ۸۰۱۰ در پاس بعدی است. هم چنین در فاصله ۱۲ میلی‌متر از پاس ریشه، افت شدید ۱۷ درصدی در کاهش سختی دیده می‌شود. در این منطقه عرض منطقه امتزاج جوشکاری به صورت ناپیوسته و ناگهانی با افزایش زاویه‌ای در حدود ۳۰ درجه همراه است. با توجه به این که در پاس‌های نهایی از بزرگترین قطر الکتروود استفاده شده و سرعت جوشکاری به علت نهایی بودن پاس متفاوت است؛ تأثیرات عملیات حرارتی و تمپرینگ در این قسمت مشهودتر است. پایین بودن میزان سختی در نقطه آخر را می‌توان به قرار گرفتن آن در منطقه گرده جوش و تفاوت آن در حرارت ورودی و نرخ تغییرات انتقال حرارت نسبت داد. شکل ۱۰- ب مختصات و محل آزمون‌های سختی سنجی و شکل ۱۲ روند تغییرات سختی در منطقه متأثر از حرارت را

و در جهت تنش زدایی و یا متعادل کردن این نوع تنش‌ها اقدام می‌کند در صورتی که پاس نهایی در شدت جریان و حرارت ورودی بالا اتفاق می‌افتد و با توجه به اینکه پاس دیگری بعد از آن وجود ندارد این پاس معمولاً دارای عملیات حرارتی مناسبی نیست. به این موارد باید به استفاده از الکتروود نرمتر ۶۰۱۰ در پاس ریشه نیز اشاره کرد. با توجه به این موارد می‌توان تنش‌های پسماند حرارتی بسیار بالا را انتظار داشت که با جمع شدن با تنش‌های کششی مراحل قبلی باعث رشد و باز شدن ترک‌های سطح خارجی لوله می‌شود.

۵-۴- آزمون ضربه شاری

با توجه به شکل ۹- ب مشخص است که مکانیزم غالب شکست نمونه آزمون ضربه اتصال حفره‌ها بصورت نرم می‌باشد، که با توجه به تغییر ابعادی زیاد در نمونه‌های ضربه نشان از شکست نرم در مقیاس ماکرو و میکرو دارد. هم چنین آثار شکست ترد بصورت براق در بخشی از سطح شکست مشاهده می‌شود که نتیجه بارگذاری دینامیکی درز جوش می‌باشد. جدول ۵ کمترین انرژی شاری در فلز جوش را برابر ۴۵ ژول در راستای محیطی لوله و برابر ۵۰ ژول در راستای طولی لوله نشان می‌دهد که از میانگین مقادیر حداقل داده شده در استاندارد^۱ بیشتر است. این موضوع سلامت جوش را تأیید می‌کند. با توجه به نتایج آزمایش، ضعیف‌ترین مقاومت به ضربه در منطقه جوش به ویژه در راستای محیطی است. در این آزمایش منطقه فلز پایه بیشترین استحکام را نشان می‌دهد. افزایش مقاومت به ضربه از جوش به فلز پایه رفتار غیرخطی را دنبال می‌کند. از منطقه جوش به منطقه متأثر از حرارت رشد استحکام به ضربه دو برابر می‌باشد و افزایش استحکام از منطقه متأثر از حرارت به فلز پایه در حدود ۴۰۰ درصد است. این نتایج نشان می‌دهد که جوشکاری و اثرات حرارتی ناشی از آن می‌تواند به میزان زیاد خواص دینامیکی فولاد پایه را کاهش دهند (بر خلاف آزمون کشش که از نظر استاتیکی ضعیف‌ترین استحکام را در منطقه متأثر از حرارت ارزیابی می‌کرد). این آزمایش از نظر انرژی شاری، جوش را ضعیف‌ترین منطقه معرفی می‌کند. کاهش شدید مقاومت به ضربه در منطقه جوشی را می‌توان در آنالیز شیمیایی متفاوت آن در پاس‌های مختلف نسبت به فلز

استاندارد، کیفیت و سلامت جوش را تأیید می‌کند. با این وجود با بررسی و تحلیل دقیق تر نتایج، خواص متفاوت متالورژیکی و مکانیکی در جوش مشخص می‌شوند. اختلاف‌های مهم مشاهده شده متالورژیکی را می‌توان به این صورت دسته‌بندی کرد.

۱- کربن در منطقه جوش نسبت به فولاد پایه افزایش یافته است.

۲- عناصر میکروآلیاژی در درز جوش با افزایش تعداد پاس‌ها کاهش یافته است.

۳- افزایش کربن، کاهش استحکام استاتیکی ناشی از کاهش عناصر میکروآلیاژی را تا حدودی جبران نموده است، اما از سوی دیگر باعث کاهش جوش‌پذیری و مقاومت به ضربه شده است.

۴- در نواحی مختلف جوش و متأثر از حرارت ساختارهای متنوع متالورژیکی مشاهده گردید. فاز غیر تعادلی ترد مارتنزیت با درصد بالا در پاس نهایی سبب کاهش شدید مقاومت به ضربه در منطقه جوش شده است.

بنابراین تحلیل نتایج دو آزمون کوانتومتری و متالوگرافی مشخص کننده اختلاف شدید خواص متالورژیکی در جوش و فلز پایه است. اثر این اختلاف در نتایج آزمون‌های مکانیکی به خوبی مشهود است. این آثار عبارتند از:

۵- در آزمون کشش گسست در کنار جوش اتفاق افتاده است. استحکام نهایی این نمونه ۵۹۹ مگاپاسکال می‌باشد.

۶- آزمون ضربه روند کاهش انرژی شاری را با نزدیک شدن به منطقه جوش مشخص می‌کند. میانگین انرژی شاری در راستای محیطی جوش و فولاد پایه به ترتیب ۴۵ و ۳۹۵ می‌باشد.

۷- سخت‌ترین منطقه، جوش (۱۸۱ ویکرز) و نرم‌ترین منطقه، ناحیه متأثر از حرارت (۱۱۷ ویکرز) است که نتایج آزمون کشش و گسست در ناحیه متأثر از حرارت را تأیید می‌کند.

۷- تشکر و قدردانی

از شرکت لوله و تجهیزات سدید به لحاظ همکاری مؤثر در کلیه مراحل جوشکاری محیطی لوله و همکاری در انجام آزمون‌های کشش و ضربه قدردانی می‌شود.

نشان می‌دهد. در منطقه پاس ریشه در ارتفاع Y برابر ۱ میلی‌متر با افزایش فاصله از منطقه جوشی مقدار سختی کاهش می‌یابد. ثبات مقدار سختی در فاصله X برابر ۲۰ و ۲۶ میلی‌متر نشان می‌دهد؛ مقدار سختی منطقه پاس ریشه در فاصله‌ای ۱۵ میلی‌متر از منطقه جوشی در جهت X مقدار تقریباً ثابت و متعادلی پیدا می‌کند. نتایج در منطقه گرم و پرکن نیز همین روند را دنبال می‌کند. دقت در بررسی نتایج سختی‌سنجی فواصل Y برابر ۶ و ۱۰ میلی‌متر این ادعا را تأیید می‌کند. توجه شود تغییر فاصله حداقل و تعادلی X در این نقاط به علت طراحی V شکل طرح اتصال می‌باشد (شکل ۳) و فاصله از منطقه جوشکاری در همان حدود بیان شده برای نقطه Y برابر ۱ میلی‌متر در پاس ریشه است. علت به وجود آمدن این تغییرات سختی را می‌توان در سرعت جوشکاری، جریان و مقدار حرارت ورودی و مهمتر از همه در فروکش حرارتی بررسی کرد. هر کدام از این مناطق تحت تأثیر دو مکانیزم حرارتی اولیه ناشی از جوشکاری در پاس مجاور و ثانویه ناشی از جوشکاری پاس بعدی و عملیات حرارتی پاس قبلی قرار گرفته‌اند.

چنانچه سختی منطقه متأثر از حرارت در مناطق مجاور به پاس‌های مختلف ارزیابی شود مشاهده می‌شود که میزان سختی در مناطق اطراف پاس ریشه دارای محدوده پایین‌تری است. در این منطقه با توجه به فقدان فروکش حرارتی در جهت ضخامت لوله، حرارت فقط می‌تواند مسیر کناری را برای انتقال حرارت انتخاب کند. این میزان حرارت با توجه به سرعت جوشکاری پایین و حرارت ورودی بالا قابل توجه است. هم‌چنین با توجه به اینکه این پاس اولین پاس جوشکاری است، بیشترین تعداد پاس و عملیات حرارتی ناشی از آن روی این منطقه قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد کمترین مقدار سختی در همان منطقه‌ای قرار گرفته که گسست آزمایش کشش در آن اتفاق افتاده است.

۶- نتیجه‌گیری

برای دستیابی به اتصال یک‌پارچه در جوش محیطی لوله‌های قطور انتقال گاز طبیعی، خواص مناطق جوش و فلز پایه (ویژه از منظر رفتارهای مکانیکی و متالورژیکی) باید تا حد ممکن به هم نزدیک باشند. در این مقاله آزمایش‌های مختلف مطابق با

۸- مراجع

- [1] سبک روح مجید، بررسی علل ترک خوردگی جوش در لوله‌های حامل سیال، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه مازندران، ۱۳۸۷، صص ۱۹-۲۳.
- [2] شرکت ملی گاز ایران، مقدمه کتاب خلاصه مقالات چهارمین کنفرانس لوله و خطوط انتقال نفت و گاز، تهران، ۱۳۹۱.
- [3] Construction Industry Institute & Breakthrough Strategy Committee, *New Joining Technology for Metal Pipe in the Construction Industry*, Texas, 2003, pp. 4-6.
- [4] کوکی امیر حسین، تکنولوژی جوشکاری، نشر آزاده، تهران، ۱۳۸۸، صص ۲-۵.
- [5] Lancaster, J.F., *Metallurgy of Welding*, Sixth Edition, William Andrew Publishing, 1999, pp. 45-63.
- [6] Gladman, T., *The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels*, Institute of Materials, London, 1997, pp. 186-205.
- [7] Pickering, F.B., "The Spectrum of Microalloyed High Strength Low Alloy Steels in HSLA Steels Technology and Applications", *International Conference on Technology and Applications of HSLA Steels*, Philadelphia, 1983.
- [8] Bose-Filho, W.W., Carvalho, A.L.M., Strangwood, M., "Effect of Alloying Elements on the Microstructure and Inclusion Formation in HSLA Multipass Welds", *Materials Characterization*, Vol. 58, 2007, pp. 29-39.
- [9] Zhao, M.C., Yang, K., Shan, Y., "The Effects of Thermo-Mechanical Control Process on Microstructures and Mechanical Properties of a Commercial Pipeline Steel", *Materials Science and Engineering*, Vol. 335, 2002, pp. 14-20.
- [10] Sun, W., Lu, C., Tieu, A.K., Jiang, Z., Liu, X., Wang, G., "Influence of Nb, V and Ti on Peak Strain of Deformed Austenite in Mo-Based Micro-Alloyed Steels", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 125-126, 2002, pp. 72-76.
- [11] Beidokhti, B., Koukabi, A.H., Dolati A., "Effect of Titanium Addition on the Microstructure and Inclusion Formation in Submerged Arc Welded HSLA Pipeline Steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, 2009, pp. 4027-4035.
- [12] Hammond, J., Blackman, S. and Hudson, M., "Challenges of Girth Welding X100 Linepipe for Gas Pipelines", *Pipe Dreamer's Conference, Application and Evaluation of High-Grade Linepipes in Hostile Environments*, Yokohama, 2002.
- [13] Hudson, M., Blackman, S., Hammond, J. and Dorling, D., "Girth Welding of X100 Pipeline Steels", *International Pipeline Conference IPC02*, Calgary, 2002.
- [14] Hashemi, S. H., Mohammadyani, D., Pouranvari, M., Mousavizadeh, S. M., "On the Relation of Microstructure and Impact Toughness Characteristics of DSAW Steel of Grade API X70", *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 32, 2009, pp. 33-40.
- [15] هاشمی سید حجت، منصوری سید مهدی، پور کیا نوید، ترشیزی‌هادی، خلیل حیدری ابراهیم، "ارزیابی تست مخرب جوش سر به سر در لوله‌های قطور فولادی انتقال گاز ایران با گرید API X70"، سومین کنفرانس لوله و خطوط انتقال نفت و گاز، تهران، ۱۳۹۰.
- [16] Hashemi, S.H., Mohamaadyani, D. "Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 98, 2012, pp. 8-15.
- [17] فروزان محمد رضا، حیدری علی، گلستانه سید جعفر، "شبیه سازی اجزای محدود فرایند جوشکاری زیرپودری لوله‌های API 5L-X70 با درز جوش مستقیم مورد استفاده در صنایع نفت و گاز"، *مجله استقلال*، اصفهان، سال ۲۸، شماره ۱، ۱۳۸۸، صص ۹۳-۱۱۰.