

تشخیص آلرژن های غذایی نظیر گلوتن با استفاده از روش واکنش زنجیره ای پلیمرز در زمان واقعی

تقویت شبکه آزمایشگاهی با تقویت روابط و همکاری آزمایشگاهها در استانها

بهره‌مندی مراکز عضو شبکه آزمایشگاهی از اعتبار مالیاتی



مدیریت کارایی دارایی‌های آزمایشگاه



تخمین عمر باقیمانده لوله‌های فولادی به کار گرفته شده در صنایع پالایشگاهی



بررسی و شبیه‌سازی آنالیز تخریب زانویی ۹۰ درجه



معرفی دستگاه طیف‌سنج جرمی نسبت ایزوتوپی و کاربرد ایزوتوپ‌های پایدار در ردیابی و کنترل اصالت مواد غذایی



تعیین مقدار کمی ترکیبات هیدروکربن مایع: مقایسه بین کروماتوگرافی گازی - طیف‌سنجی فرابنفش خلاء و کروماتوگرافی گازی دو بعدی

نویسندگان

حسین محمدی^{*۱}بنیامین پیری^۱، مازیار نادر اصلی^۲

۱. کارشناس خوردگی شرکت آزمون فولاد

۲. مدیر بازرسی فنی شرکت آزمون فولاد

* Hosseinmohammadi528@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۵

واژه‌های کلیدی

آنالیز تخریب، تنش‌های پسماند، فرآیند جوشکاری، اتصالات زانویی.

بررسی و شبیه‌سازی آنالیز تخریب زانویی ۹۰ درجه

چکیده

در این تحقیق، تخریب زانویی یک خط لوله گاز طبیعی در ایستگاه تقلیل فشار به زاویه ۹۰ درجه مورد مطالعه قرار گرفت. این قطعه، با وجود اینکه در شرایط عملیاتی قرار نگرفته اما پس از عملیات جوشکاری، ترک طولی در قطعه ایجاد شده‌است. به‌منظور شناسایی عوامل تخریب زانویی، آزمایش‌هایی از قبیل شکست‌نگاری و بررسی ساختار ماکروسکوپی ترک، تحلیل ترکیب شیمیایی با استفاده از آزمون کوانتومتری، میکروسکوپ نوری^۱، میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲، طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^۳، آزمون ماکروسختی و همچنین آزمون کشش در دمای محیط انجام شد. براساس تحلیل نتایج و مدل‌سازی‌های انجام شده بر زانویی، عامل اساسی ایجاد ترک، مربوط به مشکلات مراحل ساخت و تنش‌های پسماند ناشی از عملیات جوشکاری است. افزایش میزان سختی در نزدیکی ترک، نشان‌دهنده تأثیر تنش‌های پسماند بر ریزساختار قطعه در طی عملیات جوشکاری است. همچنین این امر موجب کاهش استحکام مکانیکی به‌صورت موضعی شده‌است. بر همین اساس، آخال‌ها، نقاط ضعف ریزساختاری و ترک‌های میکروسکوپی در تصاویر حاصل از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی مشاهده شد. در نتیجه می‌توان گفت، قطعه مورد بررسی، در اثر فرآیند جوشکاری حساس شده و در معرض تنش‌های پسماند قرار گرفته است.

جوشکاری، به‌عنوان یکی از روش‌های گسترده برای اتصال انواع مختلف مواد از اهمیت بالایی برخوردار است. اتصالات جوشکاری لوله و اتصالات لوله - پره در انواع مختلفی از کاربردهای فنی از قبیل نیروگاه‌های حرارتی، تأسیسات شیمیایی و صنایع نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱ تا ۳]. عملیات حرارتی پیش و پس از جوشکاری، ترکیب شیمیایی، توزیع اندازه دانه‌ها و عوامل گوناگون فرآیند جوشکاری، به‌عنوان عوامل کلیدی در جوشکاری شناخته می‌شوند که اثرات قابل توجهی بر کیفیت جوشکاری دارند [۴ و ۵]. مهم‌ترین روش‌های جوشکاری شامل جوشکاری قوسی با گاز محافظ^۴ یا جوشکاری با استفاده از گاز محافظ بی‌اثر^۵، جوشکاری قوسی فلز پوشش‌دار^۶، جوشکاری قوس تنگستن^۷ که به‌عنوان جوشکاری گاز تنگستن^۸ نیز شناخته می‌شود، جوشکاری قوس زیرپودری^۹، جوش سربار الکتریکی^{۱۰}، جوشکاری قوس الکتریکی با سیم توپودری مصرفی^{۱۱}، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^{۱۲} و جوشکاری اکسی - استیلن^{۱۳} هستند [۶ تا ۸]. در صنایع نفت و گاز، به‌منظور اتصال لوله‌های بلند، از قطعاتی چون زانویی‌ها یا فلنج‌ها بهره می‌برند [۹ و ۱۰]. بدین منظور، استفاده از فولادهای کربنی به دلیل هزینه کم، دسترسی و استحکام قابل قبول به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۱ و ۱۲]. در دهه‌های اخیر، ترک‌های شکننده در اتصالات و فلنج‌ها، در صنایع قدیمی و تازه تأسیس گزارش شده‌است [۱۳]. در این راستا، مطالعات مختلفی به‌منظور بررسی علل اصلی تخریب اتصالات یک سیستم لوله‌کشی مانند اتصالات بین لوله‌ها و زانویی یا فلنج‌ها، صورت گرفته است. الحمید و همکاران

[۱۴] به بررسی علت شکست بین فولاد کربنی و زانویی فولاد زنگ‌نزن AISI 304 پرداختند. براساس نتایج حاصل شده، علت شکست، تشکیل یک ساختار مارتنزیتی موضعی با سختی بالا در ریزساختار است، در حالی که وجود یک لایه کربوره شده غنی از هیدروژن، تشکیل ترک و اشاعه آن را تسهیل می‌کند. جیانگ و همکاران [۱۵] علت نشستی ناحیه جوش بین زانویی و لوله‌های مستقیم اتصال ورودی پمپ خلأ با مخزن را مورد ارزیابی قرار دادند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، اندازه دانه در لوله مستقیم به‌طور قابل توجهی کمتر از اندازه دانه در سمت زانویی است. براساس پیشنهادهای ارائه شده، عدم تطابق اندازه دانه، منجر به تشکیل ترک و اشاعه آن و در نهایت، شکست در سمت زانویی می‌شود. تنش‌های پسماند و تشکیل آخال‌ها [۱۶ و ۱۷]، خوردگی حفره‌ای/اسایشی [۱۸ و ۱۹]، شکست هیدروژن [۲۰]، ترک خوردگی ناشی از خوردگی تنش‌سولفیدی [۲۱]، خوردگی موضعی [۲۲] و خستگی [۲۳ و ۲۴] از علل اصلی تخریب در اتصالات لوله و دیگر اتصالات است. اجزایی که در معرض فرآیند جوشکاری هستند، دارای تنش‌های باقیمانده بوده که ناشی از انقباض‌های غیریکنواختی است که به دلیل انجماد ناهمگن فلز جوش در دمای محیط ایجاد می‌شوند [۲۵ و ۲۶]. عواملی چون ویژگی ماده پرکننده و پایه شامل خواص مکانیکی و فیزیکی و عوامل جوشکاری شامل هندسه، ضخامت و نوع اتصال، بر تنش‌های باقیمانده تأثیر به‌سزایی دارند. علاوه بر این، عوامل مؤثر بر فرآیندهای جوشکاری مانند حرارت ورودی، سرعت حرکت قوس، جریان جوشکاری و ولتاژ، بر تنش‌های باقیمانده موجود تأثیرگذاری بالایی دارند [۲۷ تا ۲۹]. تنش‌های باقیمانده باید در بررسی سازه‌ها، برای اجزای مهمی چون اتصالات جوشکاری مدنظر قرار گیرند. به‌عبارت دیگر، ارزیابی و تخمین تنش‌های باقیمانده جوشکاری، امری بسیار حیاتی در سازه‌ها است [۳۰ و ۳۱]. با پیشرفت شبیه‌سازی کامپیوتری، روش‌های مدل‌سازی عددی بر مبنای روش عنصر محدود^{۱۴} برای پیش‌بینی تنش‌های باقیمانده جوشکاری از اهمیت بالایی برخوردار هستند [۳۲ تا ۳۴]. بسیاری از مطالعات، به دلیل پیشرفت‌های قابل توجه در محاسبات نرم‌افزارهای تجاری مانند ای‌بی‌ای کیواس^{۱۵}، آنسیس^{۱۶} و سیس‌ولد^{۱۷}، برای ارزیابی تنش‌های باقیمانده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳۴ تا ۳۶].

در این مطالعه به بررسی علل ریشه‌ای شکست زودرس در اتصالات جوشکاری بین لوله ASTM A106 و زانویی ASTM A105 پرداخته شده است. به همین منظور، ریزساختار، خواص مکانیکی، مورفولوژی شکست و منطقه‌ای که ترک در آن شکل گرفته و گسترش پیدا کرده، مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است. همچنین، توزیع تنش‌های باقیمانده در منطقه اتصال، با شبیه‌سازی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. با در نظر گرفتن این موضوع که تعمیر و تعویض اتصالات تخریب شده، زمان‌بر و پرهزینه است، شناخت دقیق علل این نوع تخریب در یک سیستم لوله‌کشی، امری حیاتی برشمرده می‌شود. همچنین درک علل تخریب، می‌تواند منجر به پیشگیری از وقوع شکست‌های مشابه در صنایع گوناگون شود.

مواد و روش‌ها

حاصل در جدول (۱)، با ترکیب شیمیایی استاندارد این نوع فولاد، مقایسه شده است. خواص مکانیکی زانویی، با توجه به استاندارد مربوط، در جدول (۲) ارائه شده است. در ابتدا از دو ناحیه مختلف زانویی تخریب شده، ناحیه تخریب شده و ناحیه مجاور، نمونه‌هایی به ابعاد $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ برش داده شد و سپس به‌منظور بررسی سطح مقطع، طبق استاندارد ASTM E3-11، عملیات سنباده‌زنی و پولیش انجام شد.

در این پژوهش به‌منظور بررسی سازوکار تخریب موجود در زانویی، از آزمون‌های متالورژیکی استفاده شد. زانویی مورد مطالعه از جنس فولاد ASTM A105 است که تعیین ترکیب شیمیایی با استفاده از آزمون کوانتومتری صورت گرفت و نتایج

جدول (۱): نتایج آزمون کشش در دمای محیط برای نمونه P.1.

عناصر	کربن	سیلیسیم	منگنز	فسفر	گوگرد	کروم	مولیبدن	نیکل
درصد وزنی %	۰/۱۵۷	۰/۲۸۵	۰/۷	۰/۰۲۲۸	۰/۰۱۶۰	۰/۰۸۵۲	۰/۰۰۹۹	۰/۰۶۲۵
عناصر	آلومینیوم	تنگستن	مس	نیوبیوم	تیتانیوم	وانادیوم	کبالت	آهن
درصد وزنی %	۰/۰۱۰۶	۰/۰۳۲۱	۰/۰۴۲۳	۰/۰۱۸۵	۰/۰۰۲	۰/۰۱۲۰	۰/۰۰۷۶	باقیمانده

جدول (۲): خواص مکانیکی مواد ASTM A105.

psi ۷۰۰۰۰	استحکام نهایی (psi) دقیقه
psi ۳۶۰۰۰	تنش تسلیم (psi) دقیقه
۲۲ درصد	(درصد) ازدیاد طول در ۲ دقیقه
۳۰ درصد	(درصد) کاهش سطح مقطع دقیقه
۱۸۷	سختی برینل (BHN)

بررسی‌های ریزساختاری

(p): چگالی (گرم بر میلی‌متر مکعب)، (cp): ظرفیت گرمایی خاص (ژول بر گرم بر کیلوگرم بر کلین)، (λ): هدایت حرارتی (ژول بر میلی‌متر بر ثانیه بر کلین)، (T): دما (کلین)، (t): زمان (ثانیه)، (∇): عملکرد گرادیان و (qarc): چگالی انرژی منبع حرارتی (ژول بر میلی‌متر مکعب) است.

همچنین، انتقال حرارت مدل/محیط با استفاده از قوانین انتقال حرارت نیوتن (معادله (۲))، برای انتقال حرارت از طریق همراهی و قوانین اشعه‌ای استفان-بولتزمان (معادله (۳)) توصیف شده‌است.

$$q_c = a_c (T - T_0) \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$q_r = eC_0 (T^4 - T_0^4) \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آنها:

(ac): ضریب انتقال حرارت همراهی (J.mm².s⁻¹.K⁻¹)، (e): امیسیون فولاد، (C₀): ثابت استفان-بولتزمان (J.mm².s⁻¹.K⁻⁴) و (T₀): دمای محیط (K) هستند. تعداد دیگری عوامل و نمادها در متن آورده شده‌اند که می‌توان به ضریب تغییر مجموعه تنش هر نقطه مواد در فرآیند جوشکاری، اشاره کرد. تعدادی از نرخ‌های تغییر کلی تنش در هر نقطه مواد در فرآیند جوشکاری، در رابطه (۴) نشان داده شده‌است.

$$\varepsilon = \varepsilon_{cp} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_e + \varepsilon_{tp} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن:

(εcp): نرخ تغییر پلاستیک کلاسیک، (εth): نرخ تغییر گرمایی، (εe): نرخ تغییر الاستیک و (εtp): نرخ تغییر پلاستیک ناشی از تبدیل است. علاوه بر این، قابل ذکر است، در نرم‌افزار سیس‌ولد، مقاومت تسلیم یک ریزساختار فاز مختلط، به‌عنوان مقدار متوسط فازها، در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۱) مدل FE حاصل از جوش و مش در نزدیکی ناحیه جوش نشان داده شده‌است.

نتایج و بحث

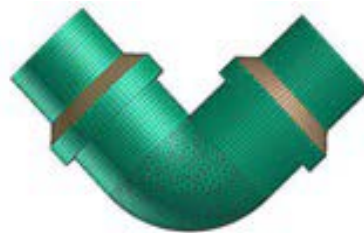
مشاهدات بصری

به‌منظور مشاهدات بصری، شکست‌نگاری^{۲۳} با استفاده از روش استریوگرافی از نمونه مورد مطالعه انجام شد که در شکل (۲) تصاویر حاصل، نشان داده شده‌است. براساس تصاویر گرفته شده، ترک به‌صورت طولی رشد نموده و شیار ایجاد شده در بین ترک، با محصولات خوردگی پوشانده شده‌است. سطح خارجی ترک، دارای ظاهری خشن است که یکی از مشخصه‌های اصلی ترک خوردگی تنش^{۲۴} است. با این وجود، به دلیل عدم بکارگیری قطعه در شرایط سرویس‌دهی و در نتیجه، عدم تماس با محیط خورنده، که یکی از الزامات ترک خوردگی تنش است، در نظر گرفتن این پدیده به‌عنوان سازوکار شکست در زانویی، غیرقابل قبول است. ابتدا و

در ابتدا نمونه‌های جوشکاری شده، برای بررسی‌های ریزساختاری و انجام آزمون سختی‌سنجی، با استفاده از وایرکات، به‌منظور جلوگیری از تغییر ریزساختار، در ابعاد ۱۰ mm × ۱۰ mm برش داده شدند. سپس نمونه‌ها در معرض فرآیند سنباده قرار گرفته و در ادامه، عملیات پولیش کاری روی آنها صورت گرفت. سپس از محلول نایتال دو درصد، به‌منظور عملیات اچ کردن نمونه زانویی ناحیه جوش، برای بررسی‌های ریزساختاری استفاده شد. در راستای مشاهده ریزساختار نمونه‌های اچ شده، از میکروسکوپ نوری مدل Leo Epiphot300 و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Philips XL30 مجهز به EDS silicon Drift 2017 استفاده شد.

شبیه‌سازی عددی

توزیع تنش‌های باقیمانده در اتصال جوشکاری به‌صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار سیس‌ولد مورد مطالعه قرار گرفت. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده‌است، یک مدل عنصر محدود سه‌بعدی، براساس ابعاد واقعی اتصال جوشکاری، توسعه داده شد. علاوه بر این، برای اتصال جوشکاری، سه مرتبه جوشکاری با شرایط واقعی در نظر گرفته شد. این مدل شامل ۴۶۰۹۸ عنصر مکعبی و ۵۴۱۷۵ گره ساختاری بود. این امر به این دلیل دارای اهمیت است که عناصر، در مناطق جوشکاری و مناطق نزدیک به آن، به دقت تنظیم شده‌اند تا تعادلی مناسب، بین دقت شبیه‌سازی و کارایی محاسباتی حاصل شود.



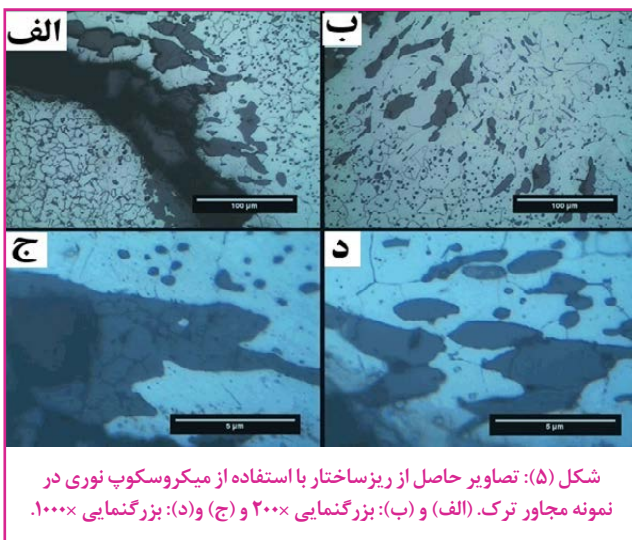
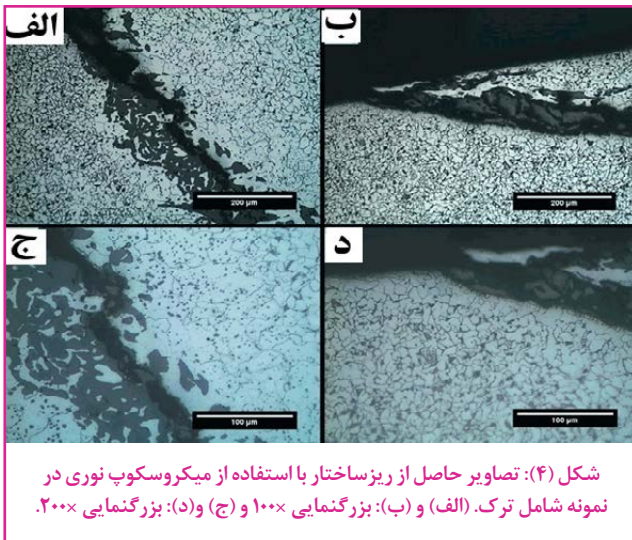
شکل (۱): مدل FE از جوش و مش در نزدیکی ناحیه جوش.

به‌منظور بررسی اثرات متالورژیک، معادلات کونیتاک^{۱۸} و اکادا^{۱۹} [۳۷]، لبلند-دیوکس^{۲۰} [۳۸] و کوپستینن-ماربرگر^{۲۱} [۳۹] به کار گرفته شدند. علاوه بر این، یک تابع توزیع چگالی توان دوگانه الیپسوییدی، ارائه شده توسط گلداک^{۲۲} و همکاران [۴۰]، برای شبیه‌سازی منبع حرارتی استفاده شد. معادله حاکم بر انتقال گرما در حالت گذرا در رابطه (۱) ارائه شده‌است.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + \frac{\partial q_{arc}}{\partial t} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن:

براساس تصاویر نشان داده شده در شکل‌های (۴) و (۵) که به ریزساختار ترک و ناحیه مجاور آن اشاره می‌کند، ریزساختار شامل فاز فریت (روشن) و پرلیت (تیره) است. ناحیه سیاه رنگ، نشان‌دهنده انتشار ترک در سطح نمونه است که در نواحی اطراف ترک، ریزساختار دکربوره شده و میزان فریت با افزایش روبه‌رو است. نواحی خاکستری رنگ در اطراف ترک نشان‌دهنده رسوبات اکسیدی در نمونه است.



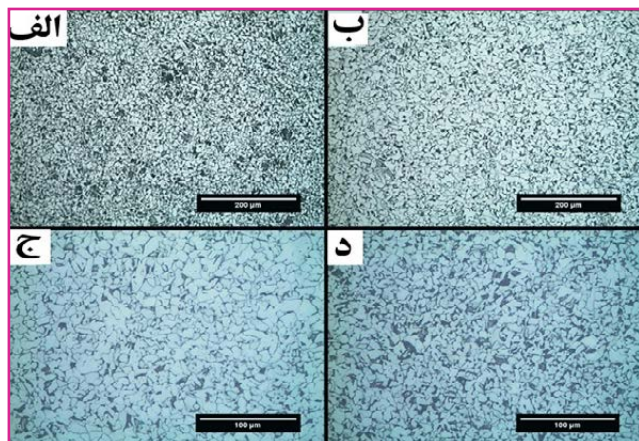
براساس تصاویر موجود، میکرو ترک‌های متعددی در ریزساختار دیده می‌شود که به صورت بین‌دانه‌ای^{۲۷} در بین دانه‌های زمینه رشد کرده‌اند. همچنین انحلال آندی در نوک ترک مشاهده می‌شود؛ به طوری که محصولات خوردگی حاصل از این میکرو پیل گالوانیک تشکیل شده، باعث اشاعه و رشد میکرو ترک‌ها و همچنین منجر به اشاعه ماکرو ترک طولی و تخریب قطعه، شده است. رشد ترک SCC، به طور عمده با انحلال آندی انجام می‌شود. لازم به ذکر است، سطح شکست، دارای لایه‌های ضخیمی از محصولات خوردگی، حفرات و خوردگی انتخابی است. با این وجود، به دلیل عدم وجود محیط خورنده، در نظر گرفتن ترک خوردگی تنشی در نمونه مورد بررسی مناسب نیست.

انتهای ترک ایجاد شده به دهانه‌های البو^{۲۵} اشاعه پیدا کرده است که به طور مشخص نواحی متأثر شده از جوشکاری قطعه بوده است. این موضوع نشان‌دهنده وجود تنش‌های اضافی در قطعه است. این تنش‌ها می‌توانند به صورت اعمالی، ناشی از عملیات جوشکاری و یا فرآیند تولید باشند و یا به صورت باقیمانده در قطعه وجود داشته باشند. بر این اساس می‌توان گفت، در حین عملیات جوشکاری باید دو فرآیند پیش گرم و عملیات حرارتی بعد از جوشکاری^{۲۶} به منظور جلوگیری از تنش‌های حرارتی و یا برطرف کردن آنها روی قطعه صورت گیرد. بدین منظور قبل از فرآیند جوشکاری، نمونه، گرم می‌شود تا افزایش دمای ناگهانی، در نمونه صورت نگیرد و تنش‌های حرارتی در آن ایجاد نشود. در فرآیند عملیات حرارتی بعد از جوشکاری، نمونه به منظور برطرف کردن تنش‌های ایجاد شده در حین فرآیند، عملیات حرارتی می‌شود.



بررسی ریزساختار

به منظور بررسی ریزساختار، تصاویر حاصل از میکروسکوپ نوری در سه ناحیه سالم (شکل (۳))، ناحیه ترک (شکل (۴)) و ناحیه مجاور ترک (شکل (۵)) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۳)، در ناحیه سالم و عاری از ترک، ریزساختار شامل فاز فریت (روشن) و پرلیت (تیره) در نمونه مورد نظر، است.



آزمون کشش در دمای محیط

مطابق با استاندارد ASTM A370 نمونه آزمون کشش در دمای محیط، تهیه شد که نتایج حاصل از آن و الزامات استاندارد مورد نیاز، در جدول (۴) ارائه شده است. براساس نتایج حاصل شده از آزمون کشش در دمای محیط، خواص کششی نمونه، مطابق با الزامات استاندارد ASTM A105 است.

جدول (۴): نتایج آزمون کشش در دمای محیط برای نمونه مورد بررسی.

شماره نمونه	قطر اولیه (mm)	طول اولیه (mm)	کاهش سطح مقطع ^{۲۹} (درصد)	(تغییر طول نسبی (درصد)	Y.P Mpa نقطه تسلیم	U.T.S. Mpa حد اکثر تنش کششی
No 3	۳/۹۵	۱۵/۸۲	۵۸	۲۲	۴۰۶	۵۸۷
حد استاندارد ASTM A105			حداقل ۳۰	حداقل ۲۲	حداقل ۲۵۰	حداقل ۴۸۵

بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

در راستای بررسی سطح شکست، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، سطوح شکست در نمونه مورد نظر مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۶) آنالیز SEM از سطح مقطع ابتدای ترک، نشان داده شده است. پیکان سفید رنگ در شکل (۶-الف)، نشان دهنده نواحی آغاز میکروترکها در نمونه است که با هم پیوستن این ترکها، ترک اصلی رشد کرده است. زمینه روشن مربوط به فلز پایه و نواحی خاکستری رنگ، نواحی فازهای ثانویه حاصل از محصولات خوردگی پخش شده در زمینه است (شکل ۶-ج). بررسی خط رشد میکرو ترکها نشان دهنده این موضوع است که با افزایش محصولات خوردگی، رشد ترک تسریع پیدا کرده است و مسیر مناسبی برای اشاعه ترک، ایجاد شده است.

عدم وجود و کاهش مقدار پرلیت در اطراف ترک، از دیگر عوامل مؤثر در رشد ترک است. به نظر می رسد، فرآیند جوشکاری در قطعه، منجر به نفوذ کربن شده است. همان طور که مشخص است، اطراف ترک، دانه های فریت بدون وجود پرلیت، در ساختار توزیع شده اند. عدم وجود پرلیت، می تواند به دلیل تجمع کربن در ناحیه ترک و ایجاد مسیر مستعد برای رشد ترک باشد. وجود تنش های حرارتی ناشی از عملیات حرارتی و عدم در نظر گرفتن فرآیند عملیات حرارتی مناسب می تواند منجر به چنین تخریب هایی در نمونه های جوشکاری شده شود.

همان طور که مشاهده می شود، هر چه به ناحیه مجاور ترک نزدیک می شویم، تراکم دانه های پرلیت کاهش چشمگیری داشته و به صورت مشخص این موضوع، بر خواص مکانیکی موضعی این ناحیه تأثیر به سزایی دارد. با توجه به عدم مشاهده این موضوع در ریزساختار ناحیه سالم (شکل (۳))، به نظر می رسد در اثر عملیات جوشکاری و کربن زدایی دانه های پرلیتی، فعل و انفعالات شیمیایی و ایجاد کاربید ناخواسته در ریزساختار صورت گرفته است.

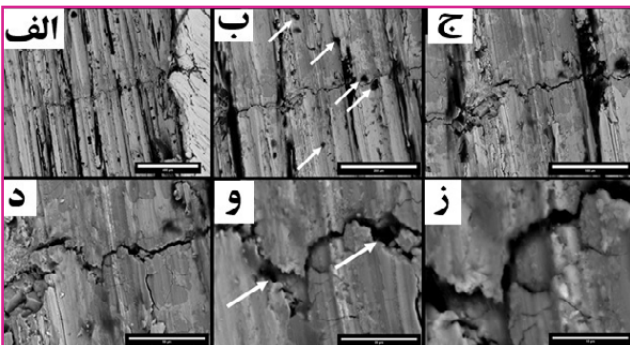
آزمون ماکروسختی

به منظور بررسی سختی، آزمون ماکروسختی از مقاطع مختلف نمونه مورد بررسی براساس استاندارد ASTM E10 انجام شد. نتایج حاصل از آزمون ماکروسختی و استاندارد ASTM A105 در جدول (۳) ارائه شده است. سختی سنجی به صورت سه پروفیل (۸) نقطه ای، در سه موقعیت مختلف از قطعه صورت گرفته است. وجود مقادیر بالاتر از حد استاندارد، در جدول (۳)، می تواند ناشی از تغییر موضعی خواص ماده در اثر جوشکاری باشد.

جدول (۳): نتایج ماکروسختی روی نمونه مورد بررسی.

سختی سنجی (HB 2.5/187.5)								
مشخصه نمونه ^{۲۸}	نقطه ۱	نقطه ۲	نقطه ۳	نقطه ۴	نقطه ۵	نقطه ۶	نقطه ۷	
ساعت ۹	۱۳۸	۱۳۹	۱۴۲	۱۴۰	۱۴۰	۱۴۰	۱۴۳	
ساعت ۳	۱۸۵	۱۳۸	۱۳۹	۱۴۰	۱۴۰	۱۴۱	۱۴۳	
موازی ترک	۲۰۱	۱۷۶	۱۵۷	۱۴۳	۱۴۴	-	-	
حد استاندارد (ASTM A105 (2021)							Max ۱۸۷	

در شکل (۸)، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از اشاعه ترک در نمونه مورد بررسی، در بزرگنمایی‌های مختلف نشان داده شده‌است. طبق ناحیه نشان داده شده در شکل (۸-ب)، علاوه بر میکرو ترک‌ها، میکرو حفرات نیز به صورت پراکنده در سطح وجود دارند، به گونه‌ای که انتهای بعضی از میکرو ترک‌ها به یک میکرو حفره ختم می‌شود (شکل (۸-۹)). علاوه بر آن، آخال‌ها و ناخالصی‌های متعددی، در بین دانه‌های ریزساختار فاز زمینه و ناحیه مجاور ترک مشاهده می‌شود. وجود میکرو ترک‌های موازی و عمود بر ترک اصلی نیز در شکل مشخص شده‌اند.

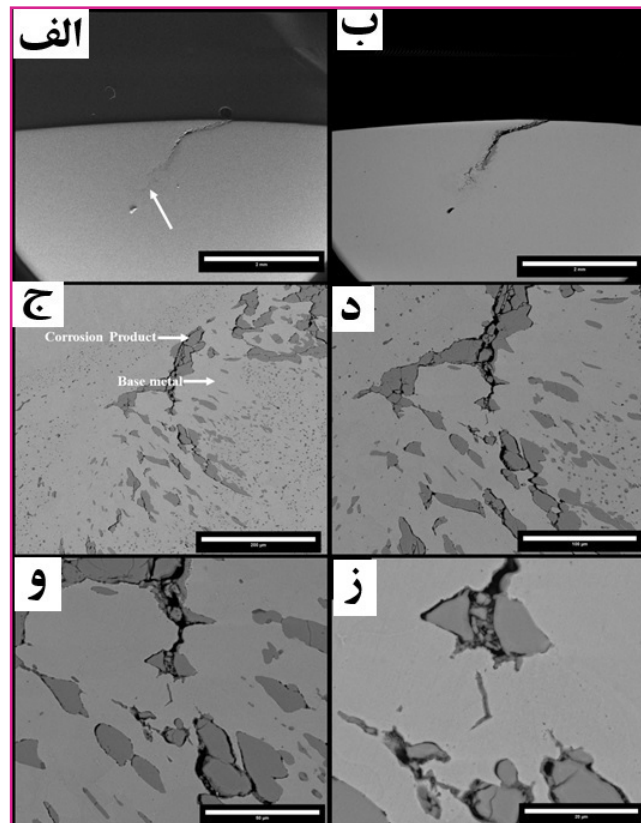


شکل (۸): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از اشاعه ترک در نمونه مورد بررسی.

طیف‌سنجی پراش انرژی اشعه ایکس (EDS)

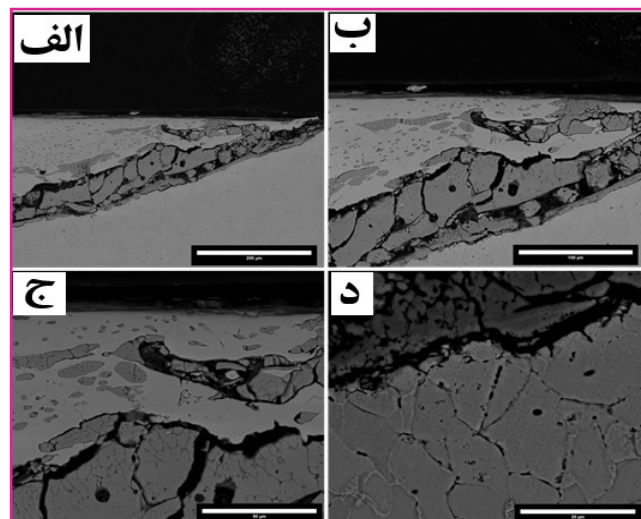
به منظور بررسی ترکیب شیمیایی ایجاد شده در دهانه حفره‌های ایجاد شده در نمونه مورد بررسی، با استفاده از روش EDS مشخصه‌یابی عنصری صورت گرفت. در شکل (۹-الف)، نتایج حاصل از آنالیز EDS نواحی مشخص شده تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، ناحیه شروع ترک نشان داده شده‌است. براساس نتایج نشان داده شده، مقادیر بالای اکسیژن در آنالیز ناحیه ترک و کاهش مقدار آهن نسبت به آنالیز زمینه، نشان‌دهنده تشکیل اکسیدها و هیدروکسیدهای ناشی از پدیده خوردگی آهن، در بین ترک و میکرو ترک‌ها است. نکته حائز اهمیت در نتایج به دست آمده از آنالیز نمونه شامل، ترک، وجود مقادیر بالای منگنز، سیلیسیم، کربن و سولفور است. این عناصر ممکن است در طی فرآیند ساخت و یا با ذوب موضعی ناشی فیلر الکترو جوشکاری، به ماده، وارد شده باشند. تشکیل ترکیباتی نظیر کاربید سیلیسیم (SiC) و سولفید منیزیم (MnS) منجر به تسهیل در جوانه‌زنی و رشد میکرو ترک‌ها می‌شود. با افزایش درصد کروم در برخی نواحی مورد بررسی، احتمال وجود ترکیب‌هایی نظیر کاربید کروم (Cr_3C_2) و یا اکسید کروم (Cr_2O_3) در این آخال‌ها وجود دارد.

در شکل (۹-ب)، نتایج حاصل از آنالیز EDS نواحی مشخص شده تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ناحیه میانی ترک، نشان داده شده‌است. مقدار بالای Si و وجود کربن کافی در این ناحیه، نشان‌دهنده تشکیل کاربید سیلیسیم (SiC)، در مجاورت ترک است. مقدار بالای کربن و اکسیژن نیز نشان‌دهنده وجود محصولات اکسید آهن و کاربیدهای تشکیل شده در دهانه ترک است.



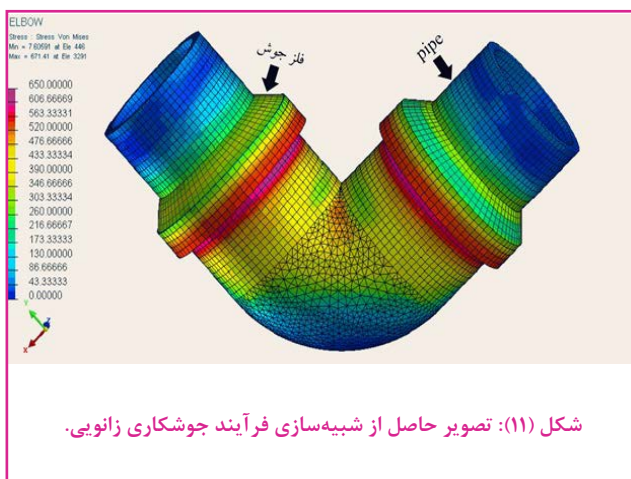
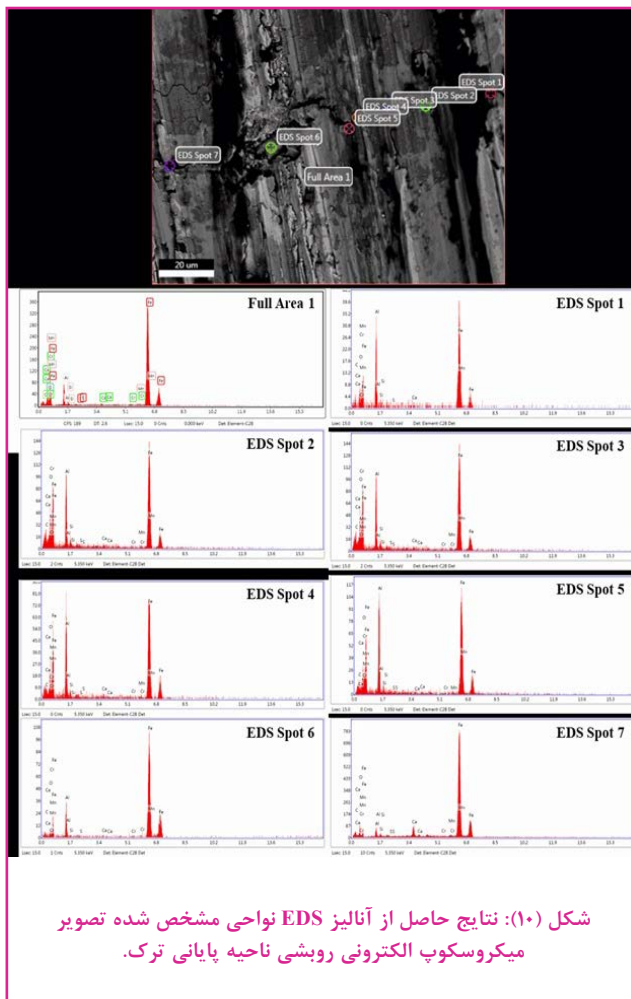
شکل (۶): تصاویر حاصل از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی از نواحی آغاز ترک.

در شکل (۷) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع نواحی میانی ترک، ارائه شده‌است. براساس تصاویر موجود، در حد فاصل ترک و نواحی مجاور آن، محصولات خوردگی به صورت موضعی ایجاد شده‌است. این رسوبات به صورت غیریکنواخت توزیع شده‌اند و به دلیل سختی بالا، ترد هستند، به طوری که علاوه بر ترک اصلی، میکرو ترک‌هایی با جهت‌گیری‌های متفاوت، در بین رسوبات ایجاد شده‌است. علاوه بر آن، در مرزدانه‌ها، کاربیدهای ناخواسته مشاهده می‌شود.

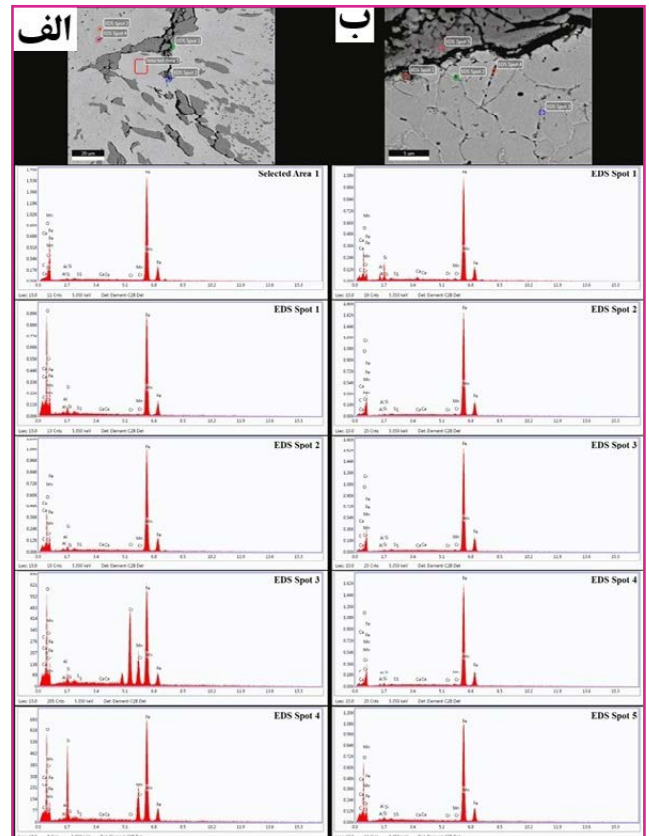


شکل (۷): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع نواحی میانی ترک.

نشده است تا هر چه دقیق تر نتایج برون یابی شود. همان طور که در شکل (۱۱) قابل مشاهده است، بیشترین تنش پسماند کششی که منجر به شکست قطعه می شود، در زیر ناحیه مورد جوشکاری قرار گرفته است. در این ناحیه، تنش پسماند کششی، پس از جوشکاری، از مقدار تنش تسلیم ماده فراتر رفته و منجر به شکست قطعه می شود. از جمله عواملی که از شکست زانویی جلوگیری می کند، پیش گرم زانویی قبل از جوشکاری است؛ این امر منجر به کاهش تنش پسماند می شود.



شکل (۱۱): تصویر حاصل از شبیه سازی فرآیند جوشکاری زانویی.



شکل (۱۱): تصویر حاصل از شبیه سازی فرآیند جوشکاری زانویی.

در شکل (۱۰)، نتایج حاصل از آنالیز EDS نواحی مشخص شده تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ناحیه پابانی ترک نشان داده شده است. براساس نتایج، مقدار بالای عناصر کربن، اکسیژن و منگنز در آنالیز کل سطح از نکات مهم این آنالیز است. با توجه به وجود مقادیر بالای آلومینیوم لازم به ذکر است که آلومینیوم باعث پایداری فاز فریت در ریزساختار می شود و همان طور که پیش از این گفته شد، احتمالاً یکی از علل ازدیاد دانه های فریتی و عاری شدن از دانه های پرلیتی در ناحیه مجاور ترک، همین موضوع است. در درصدهای حدود ۱ درصد فاز فریت به طور کامل پایدار می شود. از طرف دیگر، به دلیل ماهیت فیزیکی و شیمیایی این عنصر در ترکیب با اکسیژن، فیلم سطحی بسیار محکم اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) در سطح تشکیل می دهد که منجر به افزایش مقاومت خوردگی سطحی می شود.

با توجه به سازوکار گفته شده در بخش های قبلی، سازوکار تخریب ناشی از تنش پسماند تخمین زده شده است. در راستای تأکید بر این موضوع، شبیه سازی زانویی، با استفاده از نرم افزارهای المان محدود و با استناد بر استاندارد WPS، انجام شد. در شکل (۱۱)، تنش پسماند در زانویی قابل مشاهده است. با توجه بر اینکه شبیه سازی تنش پسماند، یک فرآیند وابسته به زمان است، از ساده سازی نمونه و ساده سازی شرایط شبیه سازی استفاده

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ضمن مطالعه تخصصی اسناد فنی معتبر و مقالات پژوهشی منتشر شده و شبیه‌سازی اولیه از محل ترک در قطعه، آزمون‌های آزمایشگاهی گوناگونی از قبیل استریوگرافی، کوانتومتری، متالوگرافی، بررسی میکروسکوپی ریزساختار با میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آنالیز EDS، آزمون ماکروسختی و آزمون کشش بر نمونه مورد بررسی صورت گرفت. براساس نتایج حاصل، بالا بودن میزان سختی در نزدیکی ترک، نشان از متأثر شدن ریزساختار قطعه در طی عملیات جوشکاری است که با افت استحکام مکانیکی موضعی همراه است؛ به طوری که مشاهده آخال‌ها، نقص‌های ساختاری و ایجاد میکرو ترک‌های سطحی و عمقی موجود در تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی نیز گویای این موضوع است. بر همین اساس، قطعه در حین جوشکاری دچار حساسیت شده و حاوی مقادیری تنش‌های پسماند است. براساس تصاویر میکروسکوپ نوری، میکرو حفره‌های انقباضی پراکنده در ابتدای برخی از میکرو ترک‌ها مشاهده شدند که این حفرات به طور عمده در مجاورت آخال‌ها قرار گرفته‌اند. همچنین بررسی سطح شکست، شامل پله‌ها و وجوه شبیه به شکست کلیواژ (برشی) است که در مدت زمان کوتاهی پس از فرآیند جوشکاری ایجاد شده است. آنالیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان‌دهنده این موضوع است که با نزدیکی به ناحیه مجاور ترک، تراکم دانه‌های پرلیت کاهش چشمگیری پیدا می‌کند و این موضوع بر خواص مکانیکی موضعی در این ناحیه تأثیر به‌سزایی دارد. با توجه به اینکه ریزساختار در ناحیه سالم این‌گونه است، به نظر می‌رسد در اثر عملیات جوشکاری، کربن‌زدایی دانه‌های پرلیتی، فعل و انفعالات شیمیایی و کاربیدسازی ناخواسته صورت گرفته است. آنالیز EDS نشان‌دهنده مقادیر بالای عناصری نظیر کربن، اکسیژن، سولفور، منگنز، آلومینیوم، کروم و سیلیسیم است که این عناصر توانایی ایجاد ترکیبات آخالی متعددی در ریزساختار را دارند.

به‌طور کلی می‌توان گفت تخریب مورد نظر به علت وجود آخال‌ها و معایب ایجاد شده در زمان شکل‌دهی فلز و یا متأثر از فرآیند جوشکاری، تنش پسماند و تأثیرات ریزساختاری متأثر از جوشکاری، رخ داده است. در بین عوامل ذکر شده، مهم‌ترین عامل، تنش‌های پسماند است، چرا که این تنش‌های پسماند حتی به مقدار پایین می‌تواند منجر به ترک خوردگی در قطعات شود. تغییر در ترکیب شیمیایی براساس آنالیزهای موجود، وجود آخال‌های گوناگون چون سولفید منگنز و حساسیت در ریزساختار با رسوب کاربید در حین فرآیند تولید یا جوشکاری نیز تصدیقی بر علل اصلی تخریب است.

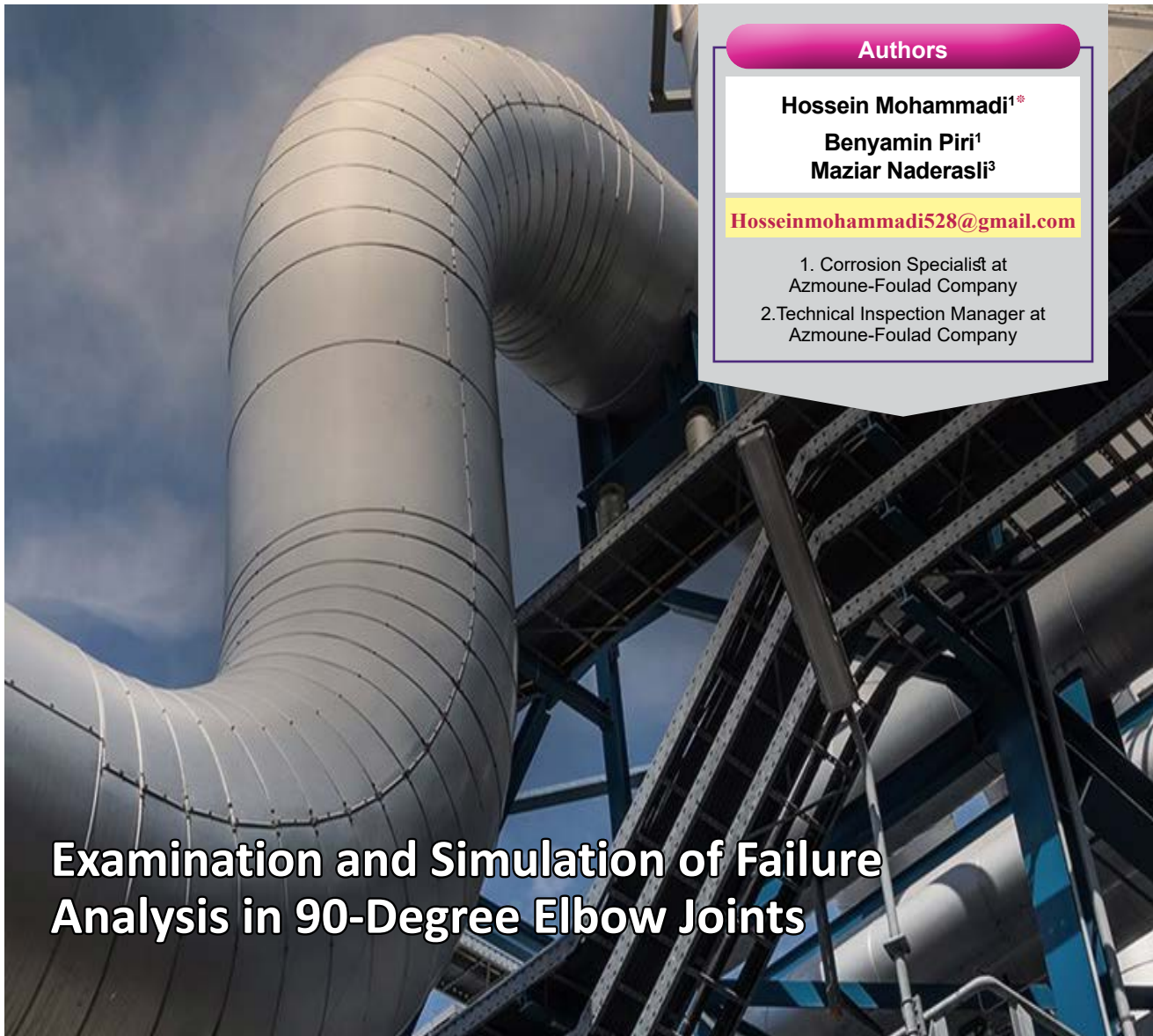
یکی از راهکارهای مناسب به‌منظور کاهش خسارات ناشی از این تخریب، استفاده از فرآیند عملیات حرارتی قبل و بعد از جوشکاری است.

پی‌نوشت

- | | |
|---|-------------------------------------|
| 1. Optical microscopy (OM) | 16. ANSYS |
| 2. Scanning Electrode Microscope (SEM) | 17. SYSWELD |
| 3. Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) | 18. Kunitake |
| 4. Gas metal arc welding (GMAW) | 19. Okada |
| 5. Metal Inert Gas (MIG) | 20. Leblond-Devaux |
| 6. Shielded metal arc welding (SMAW) | 21. Koistinen-Marburger |
| 7. Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) | 22. Goldak |
| 8. Tungsten Inert Gas (TIG) | 23. Fractography |
| 9. Submerged arc welding (SAW) | 24. Stress Corrosion Cracking (SCC) |
| 10. Electroslag welding (ESW) | 25. Elbow |
| 11. Flux-Cored Arc Welding (FCAW) | 26. Post Weld Heat Treatment (PWHT) |
| 12. Friction stir welding (FSW) | 27. InterGranular (IG) |
| 13. Oxyacetylene Welding (OAW) | 28. Specimen ID |
| 14. The finite element method (FEM) | 29. Reduction of Area |
| 15. ABAQUS | |

- [1] Vollers, G. G., "Welding of Metals important to the Petroleum Industry", World Petroleum Congress, Vol. pp. WPC-4703, 1951.
- [2] Gooch, T. G., "Welding new stainless steels for the oil and gas industry", NACE CORROSION, Vol. pp. NACE-00138, 2000.
- [3] Sharma, S. K. and Maheshwari, S., "A review on welding of high strength oil and gas pipeline steels", Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 38, No. pp. 203-217, 2017.
- [4] Gonzaga, A., Barbosa, C., Tavares, S., Zeemann, A., and Payão, J., "Influence of post welding heat treatments on sensitization of AISI 347 stainless steel welded joints", Journal of Materials Research and Technology, Vol. 9, No. 1, pp. 908-921, 2020.
- [5] Zhou, C. and Zhang, G., "Effects of Post Weld Heat Treatment Residual Stress on the Creep of Elbow Welded Joint", ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 43703, pp. 3-8, 2009.
- [6] Mostafapour, A. Nejad Ebrahimi, A., "Investigation of the effect of welding residual stresses on the fatigue life of steel pipes," presented at the 9th Conference on Construction and Production Engineering, 2017.
- [7] Čičo, P., Kalincová, D., and Kotus, M., "Influence of welding method on microstructural creation of welded joints", Research in agricultural engineering, Vol. 57, No. Special Issue, pp. S50-S56, 2011.
- [8] Haagensen, P. J. and Maddox, S. J., "IIW recommendations on methods for improving the fatigue strength of welded joints: IIW-2142-110", Vol. No. pp. 2013.
- [9] Qiao, Q., Cheng, G., Li, Y., Wu, W., Hu, H., and Huang, H., "Corrosion failure analyses of an elbow and an elbow-to-pipe weld in a natural gas gathering pipeline", Engineering Failure Analysis, Vol. 82, No. pp. 599-616, 2017.
- [10] Zhang, J., Kang, J., Fan, J., and Gao, J., "Study on erosion wear of fracturing pipeline under the action of multiphase flow in oil & gas industry", Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 32, No. pp. 334-346, 2016.
- [11] Arora, P., Singh, P., Bhasin, V., Vaze, K., Pukazhendhi, D., Gandhi, P., and Raghava, G., "Fatigue crack growth behavior in pipes and elbows of carbon steel and stainless steel materials", Procedia Engineering, Vol. 55, No. pp. 703-709, 2013.
- [12] Khan, R., H. Ya, H., and Pao, W., "An experimental study on the erosion-corrosion performance of AISI 1018 carbon steel and AISI 304L stainless steel 90-degree elbow pipe", Metals, Vol. 9, No. 12, pp. 1260, 2019.
- [13] Servetti, G. and Zhang, X., "Predicting fatigue crack growth rate in a welded butt joint: The role of effective R ratio in accounting for residual stress effect", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 76, No. 11, pp. 1589-1602, 2009.
- [14] Ul-Hamid, A., Tawancy, H. M., and Abbas, N. M., "Failure of weld joints between carbon steel pipe and 304 stainless steel elbows", Engineering failure analysis, Vol. 12, No. 2, pp. 181-191, 2005.
- [15] Jiang, S., Zheng, Y., and Duan, D., "Failure analysis on weld joints between the elbow and straight pipes of a vacuum evaporator outlet", Engineering Failure Analysis, Vol. 27, No. pp. 203-212, 2013.
- [16] Lu, X., Influence of residual stress on fatigue failure of welded joints, North Carolina State University 2003.
- [17] Medjo, B., Rakin, M., Gubeljak, N., Matvienko, Y., Arsić, M., Šarkoćević, Ž., and Sedmak, A., "Failure resistance of drilling rig casing pipes with an axial crack", Engineering Failure Analysis, Vol. 58, No. pp. 429-440, 2015.
- [18] Ossai, C. I., Boswell, B., and Davies, I. J., "Pipeline failures in corrosive environments—A conceptual analysis of trends and effects", Engineering Failure Analysis, Vol. 53, No. pp. 36-58, 2015.
- [19] Qiao, Q., Cheng, G., Wu, W., Li, Y., Huang, H., and Wei, Z., "Failure analysis of corrosion at an inhomogeneous welded joint in a natural gas gathering pipeline considering the combined action of multiple factors", Engineering Failure Analysis, Vol. 64, No. pp. 126-143, 2016.
- [20] 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, No. 15, pp. 11474-11486, 2012.
- [21] Subramanian, C., "Sulfide Stress Cracking of column overhead pipe to flange fitting joints in a petroleum

- industry", *Materials Today Communications*, Vol. 37, No. pp. 106995, 2023.
- [22] Li, X.-y. and Lü, T., "Analysis of corrosion failure of petrochemical pipe elbow", *Journal of Central South University of Technology*, Vol. 12, No. pp. 119-123, 2005.
- [23] Smith, R., Watson, P., and Topper, T., "A stress-strain parameter for the fatigue of metals", *Journal of Materials*, Vol. 5, No. 4, pp. 767-778, 1970.
- [24] Kim, S.-W., Chang, S.-J., Park, D.-U., and Jeon, B.-G., "Failure criteria of a carbon steel pipe elbow for low-cycle fatigue using the damage index", *Thin-Walled Structures*, Vol. 153, No. pp. 106800, 2020.
- [25] Vora, P., Mumtaz, K., Todd, I., and Hopkinson, N., "AlSi12 in-situ alloy formation and residual stress reduction using anchorless selective laser melting", *Additive manufacturing*, Vol. 7, No. pp. 12-19, 2015.
- [26] Hofer, P., Kaschnitz, E., and Schumacher, P., "Distortion and residual stress in high-pressure die castings: simulation and measurements", *Jom*, Vol. 66, No. pp. 1638-1646, 2014.
- [27] Teng, T.-L. and Chang, P.-H., "Effect of residual stresses on fatigue crack initiation life for butt-welded joints", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 145, No. 3, pp. 325-335, 2004.
- [28] Withers, P., Turski, M., Edwards, L., Bouchard, P., and Buttle, D., "Recent advances in residual stress measurement", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85, No. 3, pp. 118-127, 2008.
- [29] Nasir, N. S. M., Razab, M. K. A. A., Mamat, S., and Iqbal, M., "Review on welding residual stress", *stress*, Vol. 2, No. 5, pp. 8-10, 2006.
- [30] Bahadur, A., Kumar, B. R., Kumar, A. S., Sarkar, G., and Rao, J., "Development and comparison of residual stress measurement on welds by various methods", *Materials Science and Technology*, Vol. 20, No. 2, pp. 261-269, 2004.
- [31] Deng, D. and Murakawa, H., "Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint", *Computational Materials Science*, Vol. 43, No. 2, pp. 353-365, 2008.
- [32] Deng, D., "FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects", *Materials & Design*, Vol. 30, No. 2, pp. 359-366, 2009.
- [33] Dai, P., Wang, Y., Li, S., Lu, S., Feng, G., and Deng, D., "FEM analysis of residual stress induced by repair welding in SUS304 stainless steel pipe butt-welded joint", *Journal of Manufacturing processes*, Vol. 58, No. pp. 975-983, 2020.
- [34] Vemanaboina, H., Akella, S., and Buddu, R. K., "Welding process simulation model for temperature and residual stress analysis", *Procedia materials science*, Vol. 6, No. pp. 1539-1546, 2014.
- [35] Khoshroyan, A. and Darvazi, A. R., "Effects of welding parameters and welding sequence on residual stress and distortion in Al6061-T6 aluminum alloy for T-shaped welded joint", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 30, No. 1, pp. 76-89, 2020.
- [36] Lima, T. R., Tavares, S. M., and De Castro, P. M., "Residual stress field and distortions resulting from welding processes: numerical modelling using Sysweld", *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, Vol. 29, No. 1, pp. e56-e61, 2017.
- [37] KUNITAKE, T. and OKADA, Y., "The estimation of bainite transformation temperatures in steels by the empirical formulas", *Tetsu-to-Hagane*, Vol. 84, No. 2, pp. 137-141, 1998.
- [38] Leblond, J. and Devaux, J., "A new kinetic model for anisothermal metallurgical transformations in steels including effect of austenite grain size", *acta metallurgica*, Vol. 32, No. 1, pp. 137-146, 1984.
- [39] Koištinien, D. and Marbürger, R., "A general equation prescribing extent of austenite-martensite transformation in pure Fe-C alloy and plain carbon steels", *Acta Metall*, Vol. 7, No. 1, pp. 59-60, 1959.
- [40] Goldak, J., Chakravarti, A., and Bibby, M., "A new finite element model for welding heat sources", *Metalurgical transactions B*, Vol. 15, No. pp. 299-305, 1984.



Examination and Simulation of Failure Analysis in 90-Degree Elbow Joints

Authors

Hossein Mohammadi^{1*}

Benyamin Piri¹

Maziar Naderasli³

Hosseinmohammadi528@gmail.com

1. Corrosion Specialist at Azmoune-Foulad Company
2. Technical Inspection Manager at Azmoune-Foulad Company

Abstract

In this study, the elbow joint of a natural gas pipeline at a 90-degree angle was investigated at the pressure reduction station. Despite not being in operational conditions, a longitudinal crack appeared in the joint after welding operations. To identify the factors leading to joint degradation, tests such as fracture testing, examination of the macroscopic crack structure, chemical composition analysis using quantum testing, optical microscopy, scanning electron microscopy, X-ray energy dispersive spectroscopy, macrohardness testing, and tensile testing at ambient temperature were conducted.

Based on the analysis of the results and modeling performed on the joint, the primary factor contributing to crack formation is attributed to issues in the construction stages and residual stresses resulting from welding operations. The increase in hardness near the crack indicates the influence of residual stresses on the microstructure of the joint during welding operations. This also results in localized reduction in mechanical strength. Consequently, flaws, weaknesses in the microstructure, and microscopic cracks were observed in the images obtained from optical and electron microscopy.

Therefore, it can be concluded that the examined joint has become sensitive due to the welding process and is subjected to residual stresses.

Keywords

Failure analysis, residual stresses, welding process, elbow joints.



Real-time PCR Analysis of Food Allergens and Gluten



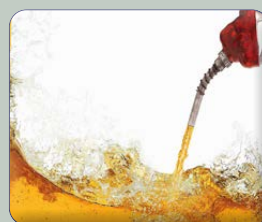
Defining 'Performance' in Asset
Performance Management



Estimation of Remaining
Life of ASTM A106 Grade B
Steel Pipes Used in Refinery
Industries



Examination and Simulation of
Failure Analysis in 90-Degree
Elbow Joints



Quantification of the composi-
tion of liquid hydrocarbon
streams: Comparing the GC-VUV
to DHA and GCxGC



Introducing the isotope ratio
mass spectrometer and the
application of stable isotopes
in tracing and controlling the
authenticity of food