

بررسی کارایی و مقایسه خواص پوشش‌های پلی‌اتیلن سه‌لایه، پلی‌یورتان و اپوکسی پیوند همجوشی دولایه اعمالی بر خطوط لوله

سید علیرضا بطحائی^۱، سلمان نوروزی^{۱*}، حامد جمشیدی اول^۱ و سیامک سیف^۲

۱- گروه مواد، دانشکده مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

۲- واحد خدمات مهندسی خوردگی، شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۳/۲۲ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۲۹

چکیده

انتخاب پوشش مناسب برای سطح خارجی لوله‌های انتقال نفت و گاز مهم‌ترین قسمت در ایجاد یک سیستم حفاظتی برای کاهش خوردگی به شمار می‌رود. یکی از مشکلات پوشش‌های خط لوله مسئله جدایش کاتدی است که در اثر اعمال جریان کاتدی و ایجاد محیط قلیایی در فصل مشترک پوشش-فلز به وجود می‌آید و جدایش پوشش را سبب می‌شود. در این پژوهش به بررسی سه نوع پوشش پلی‌اتیلن سه‌لایه، پلی‌یورتان و اپوکسی پودری پیوند همجوشی دولایه پرداخته و خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته شد. نتایج آزمون جدایش کاتدی با شبیه‌سازی شرایط بلندمدت کاری، دید مناسبی را از رفتار پوشش‌ها در مدت زمان طولانی قرارگیری در سرویس، ارائه می‌دهد. با استفاده از نتایج آزمون‌های مکانیکی، برتری پوشش‌ها در چسبندگی سطح به زیرلایه و همچنین مقاومت در برابر ضربه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمون سختی نشان داد که میزان سختی نمونه با پوشش اپوکسی پودری پیوند همجوشی دولایه به ترتیب نسبت به نمونه‌های با پوشش پلی‌یورتان و پلی‌اتیلن سه‌لایه به میزان ۱۴ و ۴۰٪ بالاتر بوده است. همچنین نتایج آزمون ضربه و منفذیابی بر روی سه پوشش نشان داد که هر سه پوشش مقاومت قابل قبولی در برابر عوامل خارجی را دارند. انجام آزمون جدایش کاتدی در دمای محیط و دمای بالا نشان داد که افزایش دما تاثیر مستقیمی بر روی افزایش میزان شعاع جدایش پوشش‌ها داشته است. کمترین میزان شعاع جدایش معادل ۴/۴۹ mm در پوشش پلی‌اتیلن سه‌لایه به دلیل ماهیت ذاتی و ضخامت بالای آن مشاهده شد.

کلمات کلیدی: پوشش‌های خطوط لوله، آزمون جدایش کاتدی، اپوکسی پودری پیوند همجوشی دولایه، پلی‌اتیلن سه‌لایه، پلی‌یورتان

مقدمه

انتخاب، کاربرد و بازرسی پوشش‌های خط لوله به‌علت تنوع در انواع پوشش‌ها، روش‌های آماده‌سازی و شرایط کاربردی لوله‌ها نیاز به دقت زیادی دارد. حفاظت از خوردگی خطوط لوله مدفون معمولاً توسط پوشش محافظ خوردگی و سیستم حفاظت کاتدی به‌عنوان مکمل حفاظتی به‌دلیل وجود نقاطی که پوشش دارای ضعف است، صورت می‌گیرد. پوشش با فراهم آوردن یک لایه پیوسته، یکنواخت، عایق الکتریسیته و ترجیحاً غیر تراوا نسبت به آب، روی سطح حفاظت غیرفعال انجام می‌دهد. این لایه در حین انبارداری، حمل و نقل، خواباندن لوله در خاک و سرویس دهی، حفاظت فلز را بر عهده دارد. خطوط لوله انتقال سیالات معمولاً شاه‌راه‌های اقتصادی و خدماتی هر کشور بوده و از اهمیت استراتژیک برخوردار هستند، بدین منظور گروه‌های تحقیقاتی در کشورهای مختلف به نحوی بر روی انواع پوشش‌های مورد استفاده به منظور حفاظت خطوط لوله کار کرده‌اند که مروری از آن‌ها به قرار زیر است.

وی و همکاران [۱] تخریب سه پوشش اپوکسی پیوند همجوشی^۱ مختلف در شرایط غوطه‌وری روان و ثابت با استفاده از طیف‌سنجی امیدانوس الکتروشیمیایی در محلول آبی سدیم کلرید سه درصد وزنی در 60°C را بررسی کردند. نتایج نشان داد که شرایط تشدید جریان موجب تخریب پوشش شد. چنگ و همکاران [۲] نفوذپذیری پوشش کامپوزیت با کارایی بالا و لایه‌های سازنده آن، پوشش اپوکسی پیوند همجوشی و پلی‌اتیلن با چگالی متوسط را، توسط تست‌های چسبندگی کاتدیک و اندازه‌گیری‌های مختلف الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که نفوذپذیری پوشش اپوکسی پیوند همجوشی نسبت به آب بیشتر از سایر پوشش‌ها است. دیاجو و همکاران [۳] برای محافظت از خطوط لوله در برابر خوردگی از پوشش پلی‌اولفین سه

لایه استفاده کردند. آنها مشاهده کردند که از دست دادن چسبندگی میان پوشش اپوکسی پیوند همجوشی و فولاد گاهی بدون ایجاد نقص خارجی در خطوط لوله به وجود می‌آید. بیلی و زین [۴] تاثیر پرایمرهای پلی‌یورتان با مخلوطی از فسفات آهن/روی و ولاستونیت را بر ویژگی ضد خوردگی و خصوصیات فیزیکی مکانیکی آن مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج تحقیقات تجربی، به منظور حفاظت از بخش‌های دارای مشکل در سایت‌های خطوط لوله انتقال زمینی و هوایی یک پرایمر جدید پلی‌یورتان-پرکلرونیل استفاده شد. نیپ و همکاران [۵] از یک برش حلقوی شعاعی و پهن در پوشش به‌جای یک برش پیوسته دایره‌ای برای ارزیابی مقاومت به لایه لایه شدن کاتدیک استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از بریدگی حلقوی، اطلاعات دقیق تری روی مقاومت به لایه‌لایه شدن کاتدیک پوشش به دست آوردند. کامیموران و کیشیکاوا [۶] به بررسی مکانیزم جدایش کاتدی پوشش پلی‌اتیلن سه لایه خطوط لوله پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان‌دهنده کاهش شعاع جدایش کاتدی با افزایش ضخامت پوشش به‌دلیل کاهش انتقال رطوبت و اکسیژن در طول پوشش به سطح فلز است. مالیک و همکاران [۷] خواص و کارایی چهار پوشش اپوکسی پیوند همجوشی، پلی‌اتیلن سه لایه، ایراتان^۲ و آکوالین^۳ را مورد بررسی قرار دادند. یکی از آزمایشاتی که بر روی پوشش‌ها انجام دادند، آزمایش جدایش کاتدی در محلول الکترولیت سدیم کلرید ۳ درصد وزنی بوده است و نتایج نشان داد که بیشترین شعاع جدایش مربوط به پوشش‌های آکوالین و ایراتان بوده، در حالی که شعاع جدایش پوشش‌های پلی‌اتیلن سه لایه و اپوکسی نزدیک به هم و کمتر از دو پوشش دیگر است.

1. Fusion Bonded Epoxy
2. Irathan
3. Aqualine

از اتمام آزمایش و جدا نمودن محفظه، نمونه‌ها با آب شسته‌شده و توسط اسپری هوا خشک شدند. سپس برای اندازه‌گیری شعاع جدایش کاتدی که نشان‌دهنده میزان تخریب پوشش در طول زمان تست است، ۸ قطاع شعاعی به مرکزیت حفره توسط فرز مینیاتوری ایجاد شد. بعد از تمیز نمودن سطح نمونه با اسپری هوا، توسط کاردک هر کدام از قطاع‌ها تا جایی که پوشش چسبندگی خود با سطح فلز را از دست داده بود برداشته شدند. سپس شعاع جدایش هر کدام از قطاع‌ها اندازه‌گیری و میانگین آن برای هر نمونه گزارش شد. برای تشخیص بهتر ناحیه جدایش یافته و اندازه‌گیری دقیق‌تر شعاع جدایش از محلول فنل فتالین استفاده شد. برای اندازه‌گیری استحکام چسبندگی و مقایسه میزان آن‌ها میان سه پوشش طبق استاندارد ASTM D4541 [۱۰] عمل شد. برای اندازه‌گیری در دمای بالا نمونه‌ها به مدت یک هفته در دمای ۴۵°C محیط آون قرار داده شدند، سپس به ترتیب از محیط خارج شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. به منظور ارزیابی میزان چسبندگی پوشش پلی‌اتیلن سه‌لایه آزمایش پیل^۵ طبق استاندارد IGS-E-Tp-010 [۱۱] انجام شد و نیروی لازم برای جدا کردن پوشش سه‌لایه اندازه‌گیری شد. برای این منظور از دستگاه کشش که قابلیت ثبت نیرو جهت جدا کردن پوشش را داشته باشد استفاده می‌شود. سرعت کشش دستگاه ۱۰ mm/min تنظیم شده است. به منظور ارزیابی سختی پوشش‌ها آزمایش سختی Shore D براساس استاندارد ASTM D2240 [۱۲] روی پوشش‌های پلی‌اتیلن سه‌لایه، پلی‌یورتان و اپوکسی پیوند همجوشی دولایه انجام شد. میزان مقاومت پوشش‌ها در برابر ضربه مطابق با استاندارد EN 10290 [۱۳] به روش سقوط وزنه بر روی سطح پوشش اندازه‌گیری شد.

تحقیق حاضر با هدف مقایسه خواص حفاظتی و کارایی سه نوع پوشش پلی‌اتیلن سه‌لایه^۱، پلی‌یورتان^۲ و اپوکسی پودری پیوند همجوشی دولایه^۳ جهت حفاظت سطوح خارجی خط لوله انجام شده است. بدین منظور از آزمایش جدایش کاتدی برای اندازه‌گیری ناحیه جدایش یافته برای هر پوشش و مقایسه آن‌ها با یکدیگر استفاده شد. همچنین برای بررسی خواص مکانیکی پوشش‌ها آزمایش‌های ضربه، سختی و چسبندگی صورت پذیرفت. فصل مشترک پوشش‌ها و زیرلایه و سطح زیر پوشش در آزمایش جدایش کاتدی توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت.

روش کار

نمونه‌های پوشش پلی‌یورتانی از لوله‌ای به قطر ۱۸/۵ cm و طول ۵۰ cm که پس از ماسه پاشی به منظور جداسازی پوسته‌های اکسیدی، توسط پاشش پودر جامد پلی‌یورتانی پوشش داده شده بود به ابعاد ۱۰×۱۰ cm^۲ برای انجام آزمایش‌ها بریده و آماده‌سازی شدند. نمونه‌های پوشش‌های پلی‌اتیلن سه‌لایه و اپوکسی پیوند همجوشی دولایه از لوله‌های پوشش داده شده به قطر ۵۸ cm و ضخامت ۲۰ cm به اندازه ۱۰×۱۰ cm مربع جدا گردید. برای اندازه‌گیری ضخامت پوشش‌ها براساس استاندارد ASTM D7091 [۸] از دستگاه ضخامت‌سنج الکومتر^۴ مدل ۴۵۶ استفاده شد. آزمایش جدایش کاتدی مطابق استاندارد ایزو ISO 21809 [۹] در دو دمای متفاوت جهت ارزیابی مقاومت پوشش‌ها در برابر محیط قلیایی ایجاد شده در اثر اعمال پتانسیل کاتدی انجام گرفت. از الکتروود غیر مصرفی گرافیتی به‌عنوان الکتروود مرجع استفاده شد. نمونه‌ها تحت پتانسیل کاتدی ۱/۵- ولت نسبت به الکتروود مرجع گرافیتی به مدت ۲۸ روز در الکتروولیت سدیم کلرید ۳٪ وزنی و در دمای محیط آزمایشگاه (۲۳±۲°C) و دمای بالا (۴۵±۲°C) قرار داشتند. پس

1. Three-layer polyethylene coating (3LPE)
2. Polyurethane (PU)
3. Dual Fusion Bonded Epoxy (DFBE)
4. Elcometer
5. Peel test

در این آزمایش توسط سقوط وزنه میزان انرژی‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۷ ژول به سطح نمونه پوشش‌ها وارد شد. سطح اثر ایجاد شده از برخورد وزنه‌های آزمایش به منظور محاسبه میزان مقاومت پوشش‌ها در برابر ضربه توسط آزمون منفذیابی ارزیابی گردید.

نتایج و بحث

نتایج آزمون ضخامت‌سنجی در جدول ۱ نشان داده شده است. معمولاً پوشش‌های پلی‌اتیلن سه‌لایه اعمال شده در صنعت ضخامتی در محدوده mm ۳-۴ و مقدار ضخامت اعمالی برای پوشش‌های پلی‌یورتان اعمال در سایت در حدود mm ۱/۵-۱ است. همچنین ضخامت پوشش‌های اپوکسی پیوند همجوشی دولایه تولید شده در خط اعمال پوشش در محدوده $100 \mu\text{m}$ تا ۱ mm قرار دارد. لازم به ذکر است محدوده ضخامت برای هر پوشش بسته به نوع استاندارد اعمالی آن پوشش می‌تواند متفاوت باشد. آزمایش سختی Shore D بر روی هر سه پوشش انجام شد. مطابق نتایج سختی نمونه با پوشش اپوکسی پودری پیوند همجوشی دولایه دارای سختی ۸۰ و نمونه‌های با پوشش پلی‌یورتان و پلی‌اتیلن سه‌لایه دارای سختی‌های ۷۰ و ۵۷ هستند. سختی پوشش از این نظر قابل اهمیت است که لوله پوشش داده شده از زمان اعمال پوشش در کارخانه و یا در سایت در معرض آسیب است. این آسیب‌ها می‌تواند ناشی از حمل و نقل از کارخانه، دیپو و یا حمل و نقل لوله‌ها به محل سرویس دهی، در حین قرارگیری در سرویس همچنین در زمان دفن در درون زمین باشد. در نتیجه پوشش

محافظ بایستی با سختی مناسب مقاومت به سایش و فرورفتگی و همچنین مقامت در برابر تنش خاک مناسب را داشته باشد. بنابراین پوششی که از سختی بالایی برخوردار است، می‌تواند اطمینان بالاتری از سالم بودن آن در حین قرارگیری در سرویس به ما بدهد. طبق نتایج سختی نمونه اپوکسی پودری پیوند همجوشی دو لایه و پلی‌یورتان بیشتر از نمونه پلی‌اتیلن سه‌لایه به دست آمد که می‌تواند نشانه برتری این پوشش‌ها در برابر عوامل ساینده باشد. آزمایش ضربه بر روی سه پوشش پلی‌اتیلن سه‌لایه، پلی‌یورتان و اپوکسی پودری پیوند همجوشی دولایه انجام شد. مطابق با نتایج به دست آمده از آزمون ضربه هر سه پوشش مقاومت در برابر ضربه بالاتر از ۴۷ ژول دارند. آزمون منفذیابی شامل یافتن هرگونه تخلخل در پوشش با استفاده از اسکن الکتروانرژی، توسط قوس الکتریکی ولتاژ بالا است. نقص بایستی توسط یک جرقه بین جز فولادی و الکتروود همراه با یک سیگنال صدا و نور به وسیله آشکارساز منفذیاب مشاهده و کشف شود [۹].

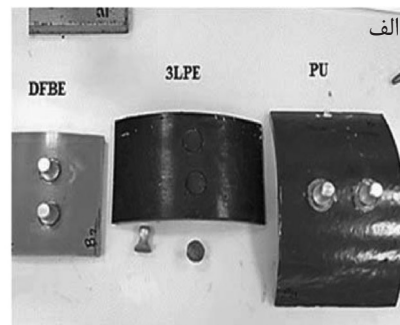
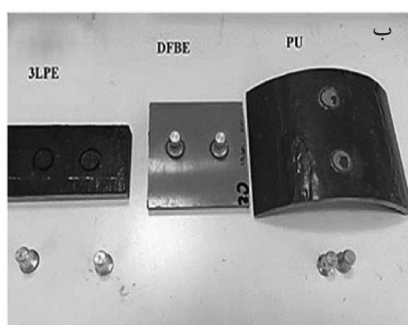
پس از انجام آزمون ضربه بر روی نمونه‌ها، ناحیه برخورد ضربه توسط آزمون منفذیابی مورد بررسی قرار گرفت. براساس بررسی‌های انجام شده در این آزمون اثری از وجود ترک، منفذ و یا شکست ایجاد شده ناشی از برخورد وزنه با سطح پوشش مشاهده نشد. با توجه به نتایج آزمون ضربه و منفذیابی می‌توان نتیجه گرفت که هر سه پوشش علاوه بر مقاومت در برابر ضربه بالاتر از ۴۷ ژول، تا این میزان اثری از شکست و یا ترک بر روی پوشش به وجود نمی‌آید.

جدول ۱ نتایج آزمون ضخامت‌سنجی

نوع پوشش	روش آزمایش	ضخامت نمونه پوشش (μm)
پلی‌اتیلن سه لایه	ASTM D7091	بیشتر از ۱۵۰۰
پلی‌یورتان	ASTM D7091	950 ± 30
اپوکسی پیوند همجوشی دولایه	ASTM D7091	920 ± 60

اتفاق افتاد. در دمای بالا چسب از سطح پوشش جدا گردیده و نتوانسته مقدار نیروی لازم برای جدا کردن پوشش از سطح فلز را به پوشش وارد کند. بنابراین میزان چسبندگی پوشش مذکور به سطح لوله از مقدار $4/19 \text{ MPa}$ بیشتر است. به همین ترتیب میزان چسبندگی پوشش پلی یورتان در دمای بالا نسبت به دمای محیط کاهش داشته است که نشان دهنده اثر دما بر میزان استحکام چسبندگی است. میزان چسبندگی پوشش پلی یورتان در دمای بالا از مقدار $9/68 \text{ MPa}$ بیشتر است که با افزایش دما از دمای محیط به دمای 45°C میزان استحکام چسبندگی به صورت تقریبی به نصف رسیده است. مطابق شکل ۱- ب تنها پوشش اپوکسی پودری پیوند همجوشی دولایه توانسته استحکام چسبندگی خود را در دمای بالا حفظ کند. می توان نتیجه گرفت که میزان استحکام چسبندگی پوشش اپوکسی پودری پیوند همجوشی دولایه بر خلاف دو پوشش دیگر مستقل از دما است. از آنجا که آزمون چسبندگی به منظور مقایسه مابین سه پوشش انجام گرفت و برای پوشش پلی اتیلن سه لایه کمتر استفاده می شود. به منظور ارزیابی چسبندگی این پوشش، آزمایش پیل بر این پوشش انجام شد که مقدار استحکام چسبندگی 20 MPa حاصل شد. چسبندگی این پوشش از حداقل مجاز بیان شده در استاندارد IGS-E-Tp-010 که برابر با 15 MPa در دمای 23°C است، بالاتر است.

براساس نتایج آزمایش چسبندگی در دمای محیط، جدا شدن زود هنگام دالی (لقمه آلومینیومی) به همراه چسب از سطح پوشش پلی اتیلن سه لایه (3LPE) در میزان تنش $5/56 \text{ MPa}$ اتفاق افتاد که نشان می دهد میزان چسبندگی پوشش مذکور به سطح لوله از مقدار $5/56 \text{ MPa}$ بیشتر است. به دلیل جدا شدن زود هنگام دالی و چسب از سطح پوشش پلی اتیلن سه لایه و برای بررسی دقیق تر میزان چسبندگی در ادامه آزمون پیل بر روی این پوشش انجام گردید. مطابق شکل ۱ الف انجام آزمایش بر روی پوشش اپوکسی پودری پیوند همجوشی دولایه (DBFE) نشان داد با حداکثر میزان تنش دستگاه، $20/11 \text{ MPa}$ دالی از سطح پوشش جدا نشد. همچنین با انجام تست بر روی پوشش پلی یورتان (PU) هم میزان تنش حداکثر دستگاه، $20/24 \text{ MPa}$ نتوانست لقمه آلومینیومی را از سطح پوشش جدا کند. بنابراین میزان چسبندگی پوشش های اپوکسی پودری پیوند همجوشی دولایه و پلی یورتان از حداکثر میزان تنش دستگاه بیشتر است. با توجه به اینکه حداقل مقدار مجاز چسبندگی مطابق با استاندارد NACE TG281 [۱۴] و EN10290 برابر $10/3$ است، می توان نتیجه گرفت پوشش های پلی یورتان و اپوکسی پودری پیوند همجوشی دولایه الزامات چسبندگی مطابق با استاندارد را تامین کرده اند. برای بررسی میزان چسبندگی پوشش ها به سطح لوله در دمای بالا، آزمایش چسبندگی در دمای 45°C انجام شد. جدا شدن زود هنگام دالی از سطح پوشش پلی اتیلن سه لایه در میزان تنش $4/19 \text{ MPa}$



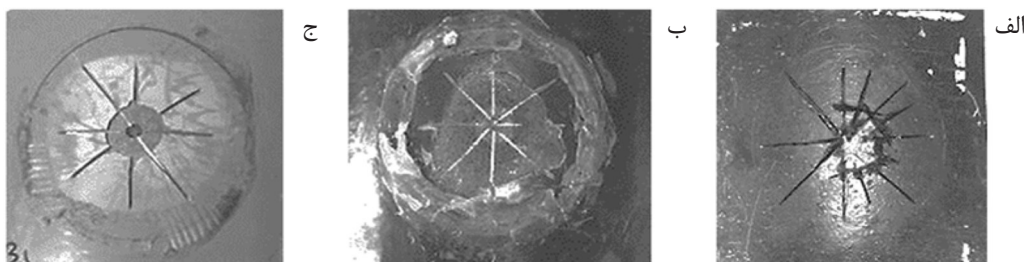
شکل ۱ الف) نمونه ها پس از آزمون چسبندگی در دمای محیط، ب) نمونه ها پس از آزمون چسبندگی در دمای 45°C

پوشش پلی‌اتیلن سه‌لایه نشان‌دهنده این نیست که این پوشش بهترین عملکرد را در حین سرویس از سایر پوشش‌ها دارد بلکه به دلیل نواری بودن لایه آخر پلی‌اتیلنی یا همان رویه پوشش، و همچنین با توجه به ضخامت قابل توجه این لایه که حدود سه برابر ضخامت دو پوشش دیگر است عملاً نفوذ برای الکترولیت از این طریق وجود نخواهد داشت و تنها نفوذ از طریق سطح اثری امکان‌پذیر است که در ابتدای آزمایش بر روی سطح پوشش ایجاد شد. بنابراین مقدار ناحیه جدایش یافته در این آزمایش به این دلیل نسبت به دیگر پوشش‌ها کاهش یافته است. بر خلاف آنچه که در آزمایش جدایش کاتدی برای پوشش پلی‌اتیلن سه‌لایه به دست آمد، طبق بررسی‌های نعلبندی و حیدریان [۱۵] مشخص شده که این پوشش پس از قرار گرفتن در سرویس در مدت زمان نسبتاً کوتاهی (کمتر از ۵ سال) از سطح لوله جدا می‌شود.

بنابراین نمی‌توان گفت که پوشش پلی‌اتیلن سه‌لایه چسبندگی لازم به سطح لوله را دارا نیست. جدول ۲ نتایج آزمایش جدایش کاتدی پوشش‌های پلی‌اتیلن سه‌لایه، پلی‌یورتان و پوشش اپوکسی پودری پیوند همجوشی دولایه را در الکترولیت ۳ درصد وزنی سدیم کلرید، در دمای محیط و شکل ۲ نمونه‌های تحت آزمایش را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول ۲ مشاهده می‌شود که کمترین میزان جدایش مربوط به پوشش پلی‌اتیلن سه‌لایه و بیشترین میزان مربوط به پوشش پلی‌یورتان است. به منظور بررسی اثر دما بر میزان جدایش پوشش از سطح لوله، آزمایش جدایش کاتدی در دمای 45°C نیز انجام شد که نتایج آن در جدول ۳ آمده است. با توجه به نتایج جدول‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که افزایش دما موجب افزایش شعاع جدایش کاتدی می‌شود. شکل ۳ نمونه‌های تحت آزمایش در دمای 45°C را نشان می‌دهد. نتیجه آزمایش جدایش کاتدی بر روی

جدول ۲ نتایج آزمون جدایش کاتدی در دمای محیط

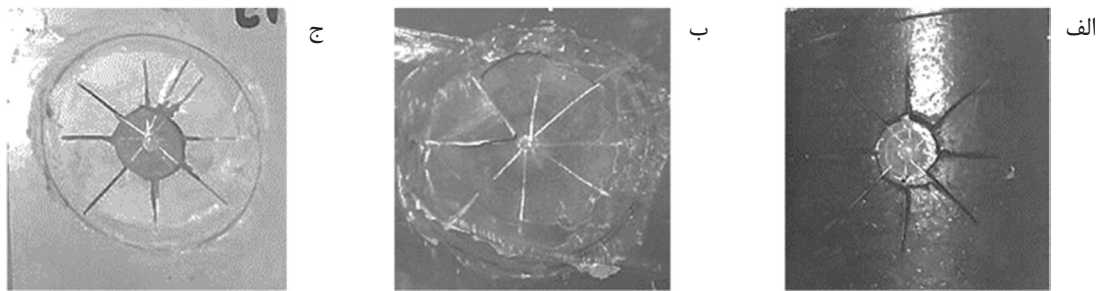
متوسط شعاع جدایش کاتدی (mm)	روش آزمایش	نوع پوشش
۲/۷۳	ISO 21809	پلی‌اتیلن سه لایه
۱۷/۱۱	ISO 21809	پلی‌یورتان
۷/۳۴	ISO 21809	اپوکسی پیوند همجوشی دولایه



شکل ۲ نمونه‌های (الف) پلی‌اتیلن سه لایه، (ب) پلی‌یورتان و (ج) اپوکسی پیوند همجوشی دولایه پس از انجام آزمایش جدایش کاتدی در دمای محیط.

جدول ۳ نتایج آزمون جدایش کاتدی در دمای 45°C

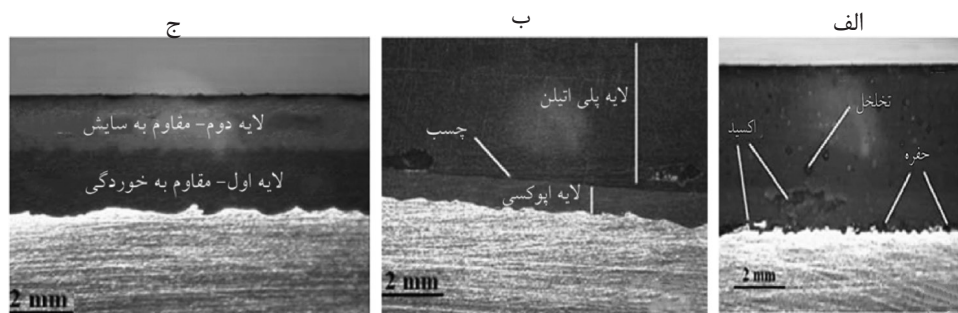
متوسط شعاع جدایش کاتدی (mm)	روش آزمایش	نوع پوشش
۴/۴۹	ISO 21809	پلی‌اتیلن سه لایه
۲۱/۸۶	ISO 21809	پلی‌یورتان
۹/۳۳	ISO 21809	اپوکسی پیوند همجوشی دولایه



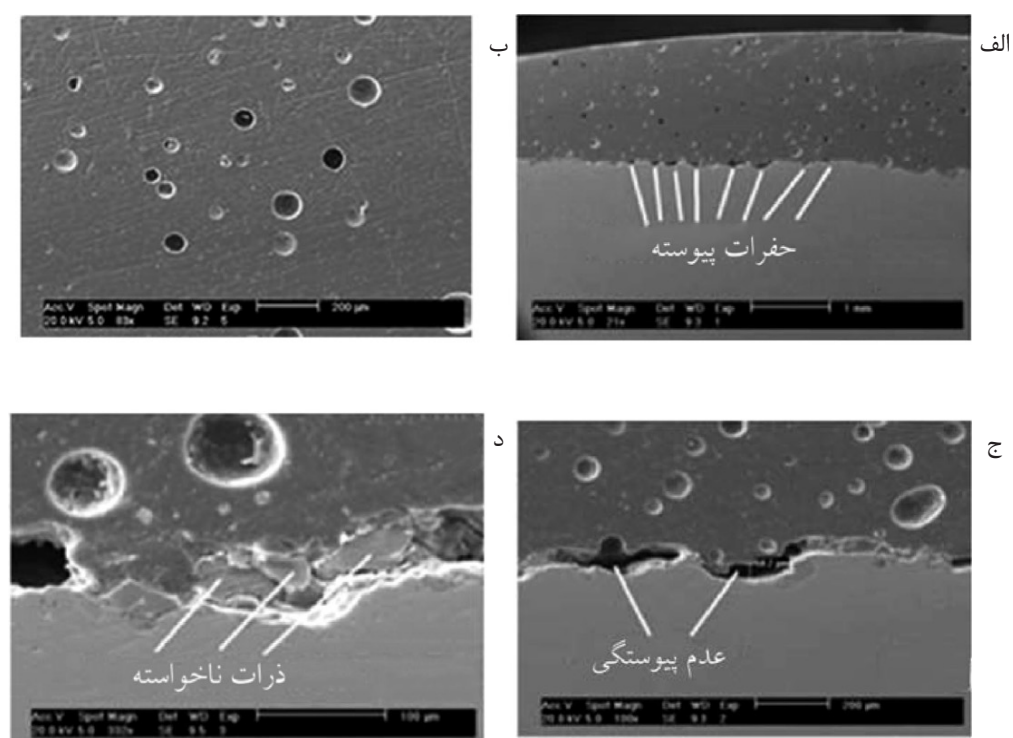
شکل ۳ نمونه‌های الف) پلی‌اتیلن سه لایه، ب) پلی‌یورتان و ج) اپوکسی پیوند همجوشی دولایه پس از انجام آزمایش جدایش کاتدی در دمای 45°C

این میزان اختلاف در مقدار متوسط جدایش غیر قابل تصور است. با استفاده از تصاویر ماکروسکوپی فصل مشترک پوشش و زیرلایه، نحوه اتصال و نحوه قرارگیری لایه‌های مختلف روی یکدیگر مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل ۴- الف علاوه‌بر تخلخل‌های موجود در پوشش پلی‌یورتان که به ماهیت آن برمی‌گردد و وجود آن طبیعی است، در فصل مشترک پوشش و فلز وجود ذرات ناخواسته، اکسیدها، حفرات و عدم چسبندگی مناسب سطح و پوشش دیده می‌شود. وجود این عیب‌ها در پوشش به خصوص در فصل مشترک پوشش و زیرلایه، زمینه نفوذ الکترولیت به فصل مشترک را به سرعت فراهم می‌کند و در مدت زمان بسیار کمی الکترولیت در طول عیوب حرکت می‌کند و در نهایت اندازه شعاع جدایش به طور ناخواسته افزایش می‌یابد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شده از پوشش پلی‌یورتان در شکل ۵ وضعیت عوامل مختلف در فصل مشترک را نشان می‌دهد. همچنین افزایش دما در حین سرویس در کنار این عیوب زنجیره‌ای می‌تواند جدایش بسیار بزرگی را به وجود آورده و موجب رخداد ناگواری شود. با توجه به شکل ۵- د برای بررسی ماهیت ذرات ناخواسته در فصل مشترک از آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس استفاده شد. با توجه به شکل ۶ علاوه بر محصولات اکسیدی مشخص گردید که ذراتی بر پایه سیلیسیم نیز در فصل مشترک وجود دارد.

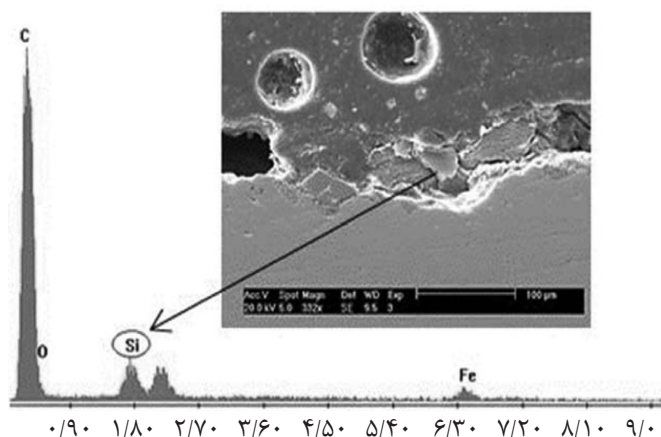
مطالعه و بررسی‌هایی که درخصوص فرآیند اعمال پوشش پلی‌اتیلن سه‌لایه انجام شده، این احتمال را قوت می‌دهد که باقی ماندن تنش‌های ناشی از مرحله اعمال پوشش و آزاد شدن تدریجی این تنش‌ها طی سرویس دهی، عامل اصلی جدایش پوشش مذکور از سطح است. در پوشش‌های پودری الکترولیت از دو طریق به سطح زیر پوشش، فصل مشترک پوشش و فلز زیر لایه می‌رسد که عبارتند از: نفوذ از طریق سطح اثر ایجاد شده بر روی پوشش و همچنین از طریق عبور از طول پوشش. به دلیل اینکه ماهیت این پوشش‌ها پودری است و با قرار گرفتن ذرات پودری در دمای بالا و حالت خمیری بر روی یکدیگر یک لایه پوشش یکپارچه را تشکیل داده‌اند طبیعتاً این پوشش‌ها دارای خلل و فرج هستند. با توجه به میزان ضخامت پوشش‌های پلی‌یورتان و اپوکسی پیوند همجوشی دولایه و متخلخل بودن آن‌ها عبور الکترولیت از سطح و طول و رسیدن به فصل مشترک امکان‌پذیر بوده و بر نتایج آزمایش جدایش کاتدی تاثیرگذار بوده است. همچنین افزایش دما موجب افزایش سرعت نفوذ الکترولیت از دو طریق به فصل مشترک شده و در نهایت افزایش متوسط شعاع جدایش کاتدی را واقع شده است. با توجه به این موارد میزان متوسط شعاع جدایش کاتدی پوشش پلی‌یورتان در دمای محیط و در دمای بالا براساس جدول ۲ و ۳ دور از انتظار بوده است. با توجه به ماهیت پودری دو پوشش پلی‌یورتان و اپوکسی پیوند همجوشی دولایه



شکل ۴ الف) تصاویر میکروسکوپی فصل مشترک پوشش پلی‌یورتان، ب) تصویر میکروسکوپی پوشش پلی‌اتیلن سه لایه و ج) تصویر میکروسکوپی پوشش اپوکسی پیوند همجوشی دولایه



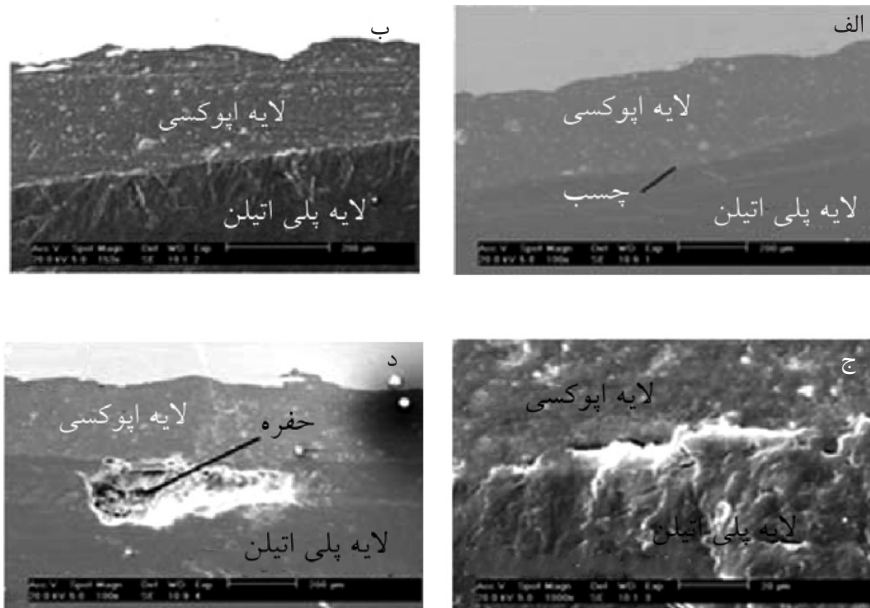
شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پوشش پلی‌یورتان و فصل مشترک پیوسته در فصل مشترک پوشش و زیر لایه، ب) تخلخل‌های موجود در پوشش، ج) عدم پیوستگی پوشش و زیر لایه و د) وجود ذرات ناخواسته در فصل مشترک



شکل ۶ آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس ذرات موجود در فصل مشترک پوشش پلی‌یورتان و سطح زیر لایه

مشترک پوشش و سطح لوله حفره و ذرات ناخواسته دیده نمی‌شود. برخلاف فصل مشترک پوشش و زیر لایه، مطابق شکل ۷ در فصل مشترک لایه اپوکسی، چسب و لایه پلی‌اتیلن به دلیل آنکه ماهیت ذاتی این پوشش‌ها متفاوت است، نتوانسته‌اند به خوبی در یکدیگر قفل شوند و یک فصل مشترک صاف را تشکیل داده‌اند. این فصل مشترک با کمترین میزان تنش وارد می‌تواند اتصال خود را از دست بدهد و دولایه پودری و نواری از یکدیگر جدا شوند. در هنگام اعمال پوشش پلی‌اتیلن سه لایه باید دقت شود که مابین لایه پودری و لایه نواری حفرات هوایی باقی نماند بلکه این حفرات در هنگام وارد شدن تنش می‌توانند موجب تمرکز تنش در فصل مشترک شوند و با جوانه زدن میکرو ترک‌ها در این نقاط و رشد آن‌ها در طول فصل مشترک دو لایه از یکدیگر جدا شود. شکل ۴- ج تصاویر میکروسکوپی پوشش اپوکسی پیوند همجوشی دولایه را نشان می‌دهد. با توجه به تصاویر، سطح لوله دارای پستی بلندی‌های لازم برای تشکیل قفل‌های شیمیایی و مکانیکی بوده است. همچنین در فصل مشترک پوشش و سطح لوله حفره و ذرات ناخواسته دیده نمی‌شود.

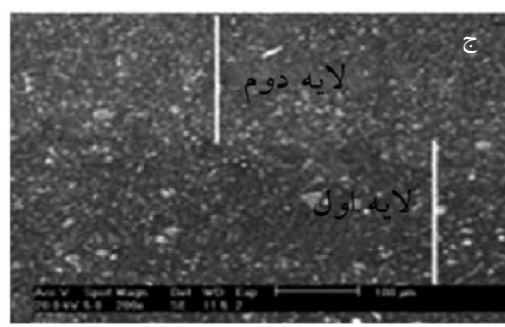
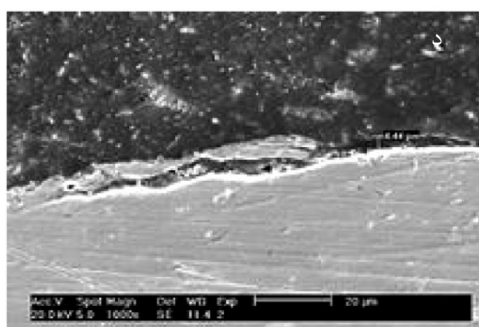
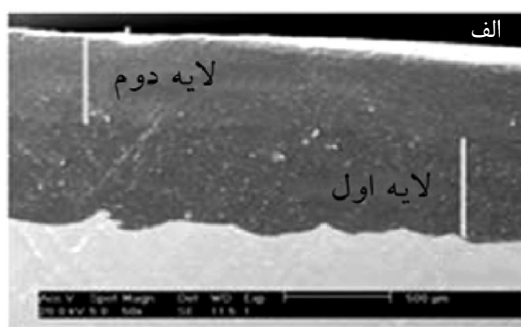
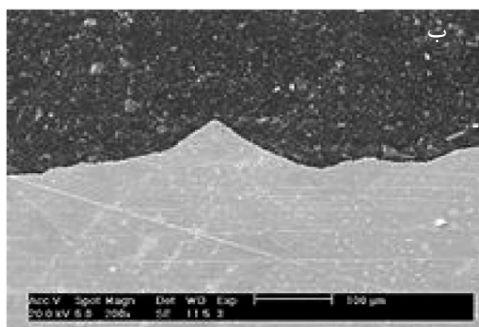
این ذرات سیلیسیمی، ذرات باقی‌مانده از مرحله ماسه پاشی هستند که به همراه محصولات اکسیدی روی سطح لوله باقی‌مانده‌اند و با اعمال پوشش درون فصل مشترک قرار گرفته‌اند. این مواد می‌بایستی قبل از مرحله اعمال توسط اسیدشویی از سطح لوله پاک شوند. وجود این مواد روی سطح لوله از نفوذ کامل ذرات پودری پوشش به درون پستی بلندی‌های روی سطح و ایجاد قفل‌های مکانیکی و شیمیایی مناسب بین پوشش و سطح فلز جلوگیری می‌کند. بنابراین سطح لوله پیش از مرحله اعمال پوشش نیاز به بازرسی سطحی مناسب دارد. البته از آنجایی که اعمال پوشش پلی‌یورتان به صورت اتوماتیک انجام نمی‌گیرد و پوشش توسط نازل‌های پاشش پودر در محل قرارگیری لوله در سرویس اعمال می‌گردد، وجود مواد ناخواسته در فصل مشترک اجتناب‌ناپذیر است که این مسئله به‌طور قابل توجهی از کارایی این پوشش می‌کاهد. شکل ۴- ب تصویر میکروسکوپی پوشش پلی‌اتیلن سه‌لایه را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، سطح لوله دارای پستی بلندی‌های لازم برای تشکیل قفل‌های شیمیایی و مکانیکی بوده است. همچنین در فصل



شکل ۷ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پوشش پلی‌اتیلن سه لایه (الف) فصل مشترک بدون عیب پوشش و زیر لایه، (ب) تفاوت ماهیت لایه پودری و نواری پوشش، (ج) فصل مشترک لایه پودری و نواری و (د) وجود حفره در فصل مشترک.

یک سیستم یکپارچه عمل می‌کند. با توجه به شکل ۸- ج مشاهده می‌شود که لایه رویه از ذرات پودری با اندازه ذره کوچک‌تری اعمال شده است و در لایه اول اندازه ذرات پودری تشکیل‌دهنده آن از اندازه ذرات لایه رویه درشت‌تر است. این تفاوت در اندازه ذرات تشکیل‌دهنده به این دلیل است که لایه رویه به دلیل در تماس بودن با محیط خارجی، هوا، رطوبت، اجسام صلب و سایر عوامل مخرب و خورنده بایستی دارای خلل و فرج کمتری بوده تا بتواند در مقابل این عوامل مقاومت کافی را داشته باشد. برخلاف لایه رویه که نقش مقاومت در برابر عوامل خارجی را دارد لایه اول وظیفه مقاومت در برابر خوردگی سطح لوله را دارد.

ذرات پودری پوشش اپوکسی پیوند همجوشی در هنگام اعمال پس از برخورد به سطح لوله بر اثر دما به حال خمیری درآمده و با سطح تمیز و عاری از ذرات ناخواسته اتصال‌های شیمیایی و مکانیکی خوبی تشکیل می‌دهد. براساس شکل ۸ فصل مشترک تشکیل شده دارای حفرات، ذرات ناخواسته و اکسید نیست. این فصل مشترک از استحکام چسبندگی خوبی برخوردار بوده و به خوبی با سطح لوله اتصال برقرار کرده است. با توجه به پودری بودن دولایه پوشش اپوکسی پیوند همجوشی و یکسان بودن ماهیت آن‌ها فصل مشترک بین لایه اول پوشش و لایه رویه قابل تشخیص نبوده و به خوبی با یکدیگر اتصال برقرار کرده‌اند. در نتیجه پوشش به صورت



شکل ۸ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی پوشش اپوکسی پیوند همجوشی الف) سیستم پوشش دولایه پودری یکپارچه، ب) فصل مشترک بدون عیب پوشش و زیرلایه، ج) فصل مشترک غیرقابل تشخیص لایه اول و دوم پوشش و د) فصل مشترک پوشش و لوله با بزرگ‌نمایی بالا.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق خواص و خصوصیات پوشش‌های پلی‌اتیلن سه‌لایه، پلی‌یورتان و اپوکسی پیوند همجوشی دولایه اعمالی بر روی لوله‌های انتقال فراورده‌های نفتی بررسی شده است. نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

۱- میزان سختی نمونه با پوشش اپوکسی پودری پیوند همجوشی دولایه بیشتر از سختی نمونه‌های با پوشش پلی‌یورتان و پلی‌اتیلن سه‌لایه است. نتایج آزمون ضربه و منفذ یابی بر روی سه پوشش نشان داد که هر سه پوشش مقاومت قابل قبولی در برابر عوامل خارجی را دارند.

۲- میزان استحکام چسبندگی پوشش‌ها در دمای محیط و 45°C ، که به‌عنوان یک روش مقایسه‌ای در نظر گرفته شد نشان‌دهنده برتری پوشش اپوکسی پیوند همجوشی دولایه و پلی‌یورتان در برابر پوشش پلی‌اتیلن سه‌لایه بوده است. با افزایش دما بر خلاف پایداری پوشش اپوکسی پیوند همجوشی

دولایه، میزان استحکام چسبندگی پلی‌یورتان به‌میزان نصف استحکام آن در دمای محیط رسیده است.

۳- نتایج آزمون جدایش کاتدی در دمای محیط نشان داد که کمترین شعاع جدایش مربوط به پوشش پلی‌اتیلن سه‌لایه به‌میزان $2/73\text{ mm}$ و بیشترین جدایش را پوشش پلی‌یورتان به‌میزان $17/11\text{ mm}$ دارا بوده است. انجام این آزمون در دمای بالا نشان داد که افزایش دما تاثیر مستقیمی بر روی افزایش میزان شعاع جدایش پوشش‌ها داشته است.

۴- با توجه به تصاویر میکروسکوپی دلیل بالا بودن میزان شعاع جدایش کاتدی پوشش پلی‌یورتان وجود ذرات ناخواسته، اکسیدها، حفرات و عدم چسبندگی مناسب سطح و پوشش است. براساس نتایج آزمون سختی، استحکام چسبندگی پوشش و آزمون جدایش کاتدی پوشش اپوکسی پیوند همجوشی دولایه دارای ترکیب خواص بهینه است و این نوع پوشش در اولویت است.

مراجع

- [1]. Wei Y. H., Zhang L. X. and Ke W., "Comparison of the degradation behavior of fusion-bonded epoxy powder coating systems under flowing and static immersion," Corrosion Science, Vol. 48, pp. 1449-1461, 2006.
- [2]. Fu A. Q. and Cheng Y. F., "Characterization of the permeability of a high performance composite coating to cathodic protection and its implications on pipeline integrity," Progress in Organic Coatings, Vol. 72, pp. 423-428, 2011.
- [3]. Tchoquessi Doidjo M. R., Belec L., Aragon E., Joliff Y., Lanarde L., Meyer M., Bonnaudet M. and Perrin F. X., "Influence of silane-based treatment on adherence and wet durability of fusion bonded epoxy/steel joints," Progress in Organic Coatings, Vol. 76, pp. 1765-1772, 2013.
- [4]. Bilyi L., Zin M. and Ya. I., "Inhibited protective coatings based on polyurethane," Materials Science, Vol. 48, No. 2, pp. 162-170, 2012.
- [5]. Hnyp I. P., Zin Ya. I. and Bilyi L. M., "Influence of inhibitors on the resistance of polymeric corrosion-inhibiting coatings to cathodic delamination," Materials Science, Vol. 47, No. 1, pp. 108-113, 2011.
- [6]. Kamimur T. and Kishikaw T., "Mechanism of cathodic disbonding of three-layer polyethylene-coated steel pipe," NACE International, Corrosion, Vol. 54, No. 12, 1998.
- [7]. Malik A. U., Ahmad S., Al-Muaili I. A. F., Parkash T. L. and O'Hara J., "Corrosion protection evaluation of some organic coatings in water transmission lines," NACE International Publication, 1999.

- [8]. ASTM D7091, "Standard practice for nondestructive measurement of dry film thickness of nonmagnetic coatings applied to ferrous metals and nonmagnetic, nonconductive coatings applied to non-ferrous metals," 2005.
- [9]. ISO 21809, "Petroleum and natural gas industries, External coatings for buried or submerged pipelines used in pipeline transportation systems," First edition, 2008.
- [10]. ASTM D4541, "Standard test method for Pull-off strength of coatings using portable adhesion testers," 2009.
- [11]. IGS-E-Tp-010, "3 Layer polyethylene and associated coating system," Part. 1, 1993.
- [12]. ASTM D2240, "Test method for measuring the shore hardness of soft materials," 2000.
- [13]. EN 10290, "Steel tubes and fittings for onshore and offshore pipelines," 2004.
- [14]. NACE.TG281, "Coatings, polyurethane for field repair, rehabilitation, and girth weld joints on pipelines," 2002.
- [15]. Nalbandi A. and Heidarian J., "Early separation, three-layer polyethylene coating the surface of the pipe and performance of coatings alternative," Petroleum Research, Vol. 22, No. 69, pp. 110-120, 2012.



Petroleum Research

Petroleum Research 2018 (August-September), Vol. 28, No. 99. 51-55

DOI: 10.22078/pr.2018.2475.2146

Comparison and Study of Coating Properties of Three-layer Polyethylene, Polyurethane and Fusion Bonded Epoxy for Pipelines

Seyed Alireza Bathaee¹, Salman Nourouzi^{1*}, Hamed Jamshidi Aval¹ and Siyamak Seyf²

1. Department of Materials and Industries, Babol Noshirvani University of Technology, Iran

2. Corrosion Engineering Services Unit, Iranian Oil Pipelines and Telecommunication Company (IOPTC), Tehran, Iran

s-nourouzi@nit.ac.ir

DOI: 10.22078/pr.2018.2837.2315

Received: August/13/2017

Accepted: February/18/2018

Abstract

To reduce corrosion, choosing proper coating for the outer surface of oil and gas transportation pipelines is considered the most important part in developing a protection system. The issue of cathodic disbondment is one of the problems of pipeline coatings which is caused by impressed cathodic current and generation of alkali environment at the coating-metal interface and result in coating disbondment. In this research, three coating types including, 3-layer polyethylene, polyurethane, and dual fusion bond epoxy powder are investigated and their physical, chemical, and mechanical properties are studied. The results of cathodic disbondment with simulating long-term working conditions provide an appropriate view on coatings behavior at long-term service exposure. Coatings advantage in different properties such as surface adhesion to sublayer and impact resistance are investigated using mechanical tests results. Hardness test results showed that sample hardness with dual fusion bond epoxy powder coating compared to samples with polyurethane and 3-layer polyethylene coatings is 14% and 40% higher, respectively. Impact and holiday test on three coating also showed an acceptable level of resistance to external factors. Performing cathodic disbondment test at ambient and high temperature showed that increasing temperature has a direct influence on increasing coatings disbondment radius. 4.49 mm lowest disbondment radius was observed on 3-layer polyethylene coating due to its intrinsic nature and high thickness.

Keywords: Pipeline Coatings, Cathodic Disbondment Test, Dual Fusion Bonded Epoxy, 3-Layer Polyethylene, Polyurethane.

INTRODUCTION

Selection, application, and inspection of pipeline coatings require a high degree of precision due to the variety of coatings, preparation methods and application conditions of the pipes. Corrosion protection of pipelines is usually carried out by corrosion protection and cathodic protection systems as a protective supplement due to the presence of areas where the coating is weak. The coating provides an inactive protection layer by providing a continuous, uniform, insulating layer, and preferably non-permeable layer, relative to water. This layer protects metal during storage, transportation, pipe laying in the soil and servicing. Pipelines are economic and conveyance services of each country and have strategic importance.

In this research, three coating types including, 3-layer polyethylene, polyurethane, and dual fusion bond epoxy powder are investigated and their physical, chemical, and mechanical properties are studied. For this purpose, a cathodic separation test was used to measure the segregated area for each coating and compare them with each other. To determine the mechanical properties of the coatings, the impact, hardness and adhesion tests were performed. The interface between the coatings and the underlying substrate and the underlying coating was investigated in a cathodic separation test by an optical microscope and scanning electron microscope.

EXPERIMENTAL

The thickness of the coating was measured according to ASTM D7091 standard [1]. The cathodic separation test was carried out in accordance with the ISO 21809 standard [2] at two

different temperatures to evaluate the strength of the coatings against the alkaline environment. Non-consumable graphite electrodes were used as reference electrode. The samples were subjected to -1.5 volt cathodic potential for 28 days in sodium chloride 3% NaCl electrolyte and at ambient temperature ($23\pm 2^\circ\text{C}$) and high temperature ($45\pm 2^\circ\text{C}$). The adhesion strength of the three coatings was measured according to ASTM D4541 standard [3]. For high-temperature measurement, samples were placed at 45°C for one week at ambient temperature, then exited and tested. In order to evaluate the adhesion of the three-layer PE polyethylene coating the peel test performed according to IGS-E-Tp-010 standard [4], and the force necessary to separate the three-layer coating was measured. For this purpose, a pulling device is used that can record the force to separate the coating. In order to evaluate the hardness of the coatings, the Shore D hardness test was performed according to the standard ASTM D2240 [5] on three-layer polyethylene coatings, polyurethane and dual fusion bonded epoxy. The impact strength of the coatings was measured in accordance with EN 10290 [6] by weight drop method on the surface of the coating.

RESULTS AND DISCUSSIONS

According to the hardness of the sample, the dual fusion bonded epoxy, polyurethane, and three-layer polyethylene coating have hardnesses of 80, 70, and 57 respectively. As a result, the dual fusion bonded epoxy against abrasive agents has a better resistance than other coatings. Protective coatings should be well-worn to ensure good wear and tear resistance. According to the impact test results, the impact

resistance of all coatings is above 47 Jules. According to the Continuity test, there was no cracks, voids or defects caused by the impact of weights on the surface of the coating. As shown in Figure 1 (a), dual fusion bonded epoxy (DFBE) showed that with a maximum stress 20.11 MPa aluminum chip was not separated from the coating surface. Also, by performing a test on a polyurethane coating (PU), the maximum stress of the device, 20.24 MPa, could not separate the aluminum chips from the coating surface. Therefore, the adhesion of dual fusion bonded epoxy and polyurethane fusion bond is more than the maximum stress level.

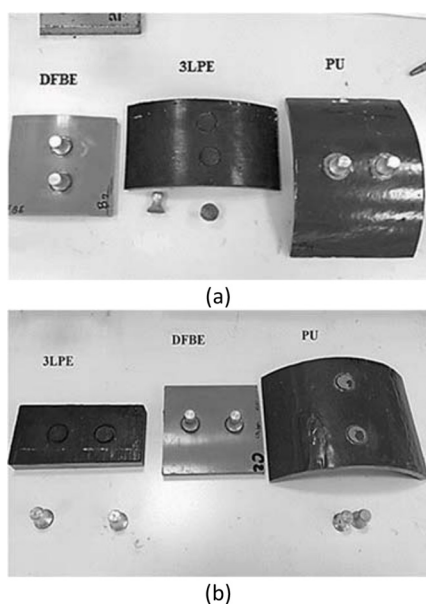


Figure 1: a) Samples were tested after the adhesion test at ambient temperature, b) After testing the adhesion test at 45 °C.

As shown in Figure 1 (b), only dual fusion bonded epoxy can maintain its adhesion strength at high temperatures. According to the Figure 2, the lowest level of separation is related to the three-layer polyethylene coating and the highest amount is related to the polyurethane coating. According to the results of the cathodic separation

test in high temperature, the increase in

temperature increases the radius of cathodic separation.

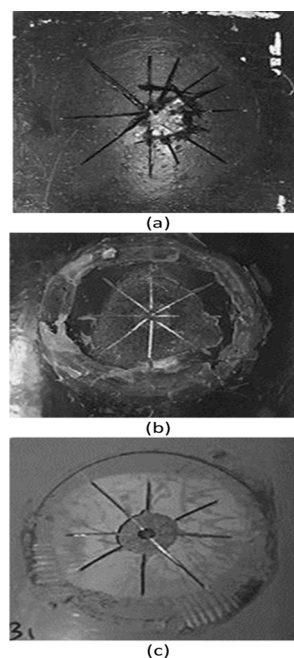


Figure 2: Samples of (a) three-layer polyethylene, (b) polyurethane and (c) dual fusion bonded epoxy after cathodic separation test at ambient temperature.

Conclusions

In this research, the properties of three-layer polyethylene coating, polyurethane, and dual fusion bonded epoxy have been investigated. The results of this research are:

- The hardness of the dual fusion bonded epoxy is higher than three-layer polyethylene coating and polyurethane coatings. The results of the impact and continuity test on the three coatings showed that all three coatings had acceptable resistance to external factors.
- The adhesive strength of the coatings at ambient temperature and 45°C, which was considered as a comparative method, indicates the superiority of the dual fusion bonded epoxy and polyurethane to the three-layer polyethylene coating. By increasing the temperature, unlike the stability of dual fusion bonded epoxy coating, the polyurethane bond

strength has reached half its strength at ambient temperature.

- The results of the cathodic separation test at ambient temperature showed that the lowest separation radius was related to a three-layer polyethylene coating, and the most separation was made of the polyurethane coating. Performing this test at high temperatures showed that the temperature increase had a direct effect on increasing the separation radius of the coatings.

REFERENCES

- [1]. ASTM D4541, *“Standard test method for Pull-off strength of coatings using portable adhesion testers,”* 2009.
- [2]. IGS-E-Tp-010, *“3 Layer polyethylene and associated coating system,”* part. 1, 1993.
- [3]. IGS-E-Tp-010, *“3 Layer polyethylene and associated coating system,”* part. 1, 1993.
- [4]. ASTM D2240, *“Test method for measuring the shore hardness of soft materials,”* 2000.
- [5]. EN 10290, *“Steel tubes and fittings for onshore and offshore pipelines,”* 2004.
- [6]. NACE.TG281, *“Coatings, polyurethane for field repair, rehabilitation, and girth weld joints on pipelines,”* 2002.