

پوشش پلی اتیلن با خاصیت مقاومت در برابر جدایش کاتدی بهبود یافته از طریق اصلاح شیمیایی سطح توسط ترکیبات سیلان‌های آلی

تاریخ دریافت: ۸۹/۳/۱۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۱/۲

پژوهش نفت

سال بیست و یکم
شماره ۶۷
صفحه ۳۸-۳۰، ۱۳۹۰

جواد حیدریان*، احمد بابانعلبندی و همایون حسین‌خانلی
پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده علوم و تکنولوژی پلیمر
Heidarianj@ripi.ir

مقدمه

یکی از مشکلات شناخته شده پوشش‌های پلی اولفینی تک لایه چسبندگی کم پوشش به سطح فلز می‌باشد. لذا برای بهبود چسبندگی و محافظت از خوردگی، معمولاً از یک لایه رزین اپوکسی در زیر پوشش پلی اولفین استفاده می‌نمایند. گرچه چسبندگی اپوکسی به سطح فلز خوب است، لیکن چسبندگی آن به پلی اولفین بسیار ضعیف می‌باشد. عموماً برای رفع این مشکل از یک لایه چسب برپایه پلی اتیلن مالئینه بین لایه اپوکسی و پلی اولفین بیرونی استفاده می‌شود [۱ و ۲].

در بررسی‌هایی که طی چند سال گذشته در خصوص پوشش‌های پلی اتیلن سه لایه در کشور ما انجام گرفته، مشخص گردیده که این پوشش‌ها در بعضی نواحی دچار مشکل جدایش می‌شوند. بدین صورت که سامانه پوشش از سطح فلز جدا شده و به شکل غلاف دور لوله باقی می‌ماند. این معضل به هرعلتی که روی داده باشد، به نظر می‌آید لایه اپوکسی، در آن نقش دارد. اگر هنگام اعمال لایه اپوکسی دمای سطح لوله مناسب باشد به طوری که پودر FBE^۱ بتواند قبل از انجام ژلاسیون در

چکیده

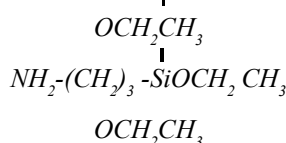
پوشش‌های پلی اتیلن دولایه متشکل از زیرلایه پلی اتیلن مالئینه و روکش HDPE سالهاست که مورد استفاده قرار می‌گیرند. در تحقیق حاضر به منظور افزایش دوام و چسبندگی لایه پلی اتیلن مالئینه به فلز، از اصلاح شیمیایی سطح به وسیله نوعی ترکیبات آلی سیلان استفاده شده است. انتظار می‌رود با انجام عملیات اصلاح شیمیایی سطح طی فرآیند اعمال پوشش پلی اتیلن مالئینه، محصولات پوششی با خواصی معادل پوشش‌های پلی اتیلن سه لایه (اپوکسی/چسب/پلی اتیلن)، تولید نمود. بدین منظور، چسبندگی لایه پلی اتیلن مالئینه به فلز پس از اصلاح شیمیایی سطح در شرایط متفاوت، اندازه‌گیری شد. همچنین آزمون جدایش کاتدی بر روی تعدادی از نمونه‌های پوشش‌دار که سطح فلز آن قبلاً تحت اصلاح شیمیایی قرار گرفته بود، اجرا گردید. در انتها نتایج آزمون‌های چسبندگی و جدایش کاتدی نمونه‌های پوشش پلی اتیلن مالئینه بدون عملیات اصلاح شیمیایی با نمونه‌هایی که اصلاح شیمیایی سطح را طی کرده بودند، مقایسه گردید.

واژه‌های کلیدی: پوشش پلی اتیلن، اصلاح شیمیایی سطح، جدایش کاتدی، ترکیبات آلی سیلان، فولاد

1. Fusion Bonded

nonshielding دارد [۱]. ترکیبات آلی سیلان دارای گروه‌های قابل هیدرولیز است که موجب تولید گروه‌های سیلانول SiOH می‌گردد. گروه‌های سیلانول با گروه‌های هیدروکسیل موجود در سطح فلز، تشکیل پیوند می‌دهند و ایجاد شبکه Si-O-Si می‌نمایند. این شبکه به صورت یک فیلم سیلان کاملاً یکنواخت، سطح را احاطه می‌کند.

آمینو سیلانی که برای این نوع اصلاح شیمیایی سطح ترجیح داده می‌شود، گاما-آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان (γ-APS) است که دارای ساختار شیمیایی زیر می‌باشد:



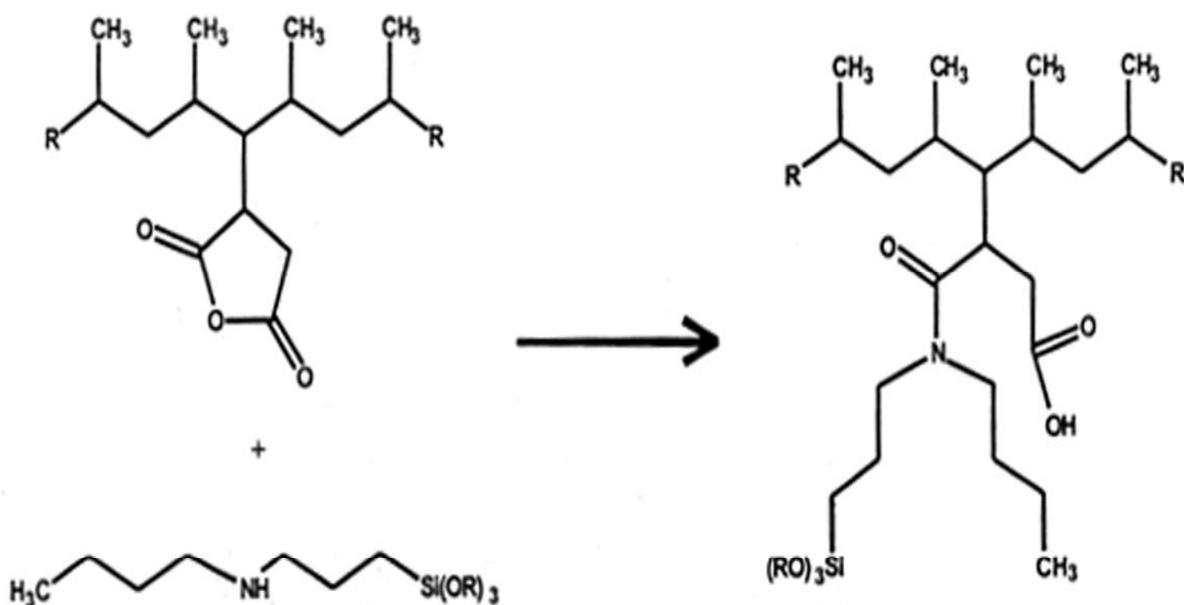
آمینو سیلان‌ها می‌توانند با گروه‌های اسیدی مربوط به انیدرید مالئیک موجود در پلی اتیلن گرافت شده (Ma-g-PE)، واکنش داده و باعث اتصال سطح فلز به پلیمر شوند [۵]. این واکنش، مناسب‌ترین راهکار برای اتصال فلز به پلیمر می‌باشد. شکل ۱ چگونگی انجام واکنش گروه‌های اسیدی در انیدرید مالئیک گرافت شده به پلی اتیلن با آمینو سیلان را نشان می‌دهد.

سرتاسر لوله به خوبی ذوب شده و سطح لوله را به طور یکنواخت تر نماید، در این صورت تجربه نشان می‌دهد که چسبندگی آن به سطح لوله بسیار خوب خواهد بود. لیکن گاهی به دلیل نامناسب بودن دمای لوله، شرایطی پیش می‌آید که پوشش، کیفیت و کارایی مناسب خود را از دست می‌دهد. در این حالت پرایمر FBE باعث ضعف چسبندگی سیستم پوشش سه لایه می‌گردد [۱ و ۲].

بنابراین چنانچه بتوان اصلاح‌سازی دیگری به جای اعمال رزین اپوکسی روی سطح انجام داد، انتظار می‌رود که مشکل جدایش برطرف گردد [۱، ۳ و ۴].

با این هدف در این پروژه تلاش شده تا اصلاح شیمیایی سطح با ترکیبات آلی سیلان جایگزین لایه اپوکسی گردد. اصلاح سطح با ترکیبات آلی سیلان، مقاومت خوردگی فلز را افزایش می‌دهد، به گونه‌ای که دیگر نیازی به استفاده از کرومات‌های سمی و سرطان‌زا نمی‌باشد [۱، ۳ و ۴].

این لایه که در ضخامت‌های کمتر از ۱۰ میکرون اعمال می‌شود، خواص مقاومتی سیستم پوشش به جدایش را بهبود بخشیده و همچنین مانعی برای عبور جریان حفاظت کاتدی ایجاد نمی‌نماید. به عبارت دیگر خاصیت



شکل ۱- واکنش آمینو سیلان با گروه‌های اسیدی انیدرید مالئیک موجود در پلی اتیلن گرافت شده [۵]

پوشش پودری اپوکسی - پلی استر در 180°C پخت شده‌اند، در برابر جدایش کاتدی کارایی بسیار بهتری داشته‌اند. همچنین مکانیزم جدایش پوشش اپوکسی / پلی آمید از فولاد در حین جدایش کاتدی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۴]. در صورت اعمال سیلان بر روی زیرآیند فلزی و پخت آن در دمای بالا پیش از اعمال پوشش اپوکسی / پلی آمید، کاهش قابل ملاحظه‌ای در سرعت جدایش کاتدی مشاهده گردید. کارایی و مقاومت به جدایش کاتدی پوشش سه لایه (3LPE or 3 Layer polyethylene: epoxy/adhesive/polyethylene) بر روی لوله‌های فلزی حمل نفت، گاز، آب و ... با و بدون اعمال محلول سیلان بر روی لوله مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵]. نتایج نشان می‌دهد که شعاع جدایش کاتدی نمونه‌های اصلاح شده با سیلان، نصف مقدار نمونه‌های بدون سیلان می‌باشد.

در تحقیق حاضر، اثر اصلاح شیمیایی سطح فلز با محلول آمینو سیلان بر چسبندگی و مقاومت در برابر جدایش کاتدی پوشش‌های پلی اتیلن اصلاح شده با انیدرید مالئیک (Ma-g-PE) مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

مواد: از گاما-آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان^۱ به اختصار γ -APS تولید شرکت EVONIK (دگوسای سابق) با نام تجاری Dynasytan AMEO در این تحقیق استفاده شد. پلی اتیلن گرفت شده با انیدرید مالئیک^۲ به اختصار Ma-g-PE ساخت شرکت بورالیز^۳ با نام تجاری ME0470 به عنوان پوشش استفاده گردید. قطعاتی از ورق‌های فولاد کربنی به ابعاد $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ به عنوان زیر آیند در این تحقیق استفاده شد. سایر مواد شیمیایی از شرکت آلدریچ تهیه گردید.

روش‌ها

تهیه محلول γ -APS

پنج قسمت حجمی از γ -APS را به ۱۰ قسمت حجمی متانول افزوده و به مخلوط فوق تا رسیدن به ۱۰۰ قسمت

در پژوهشی که در سال ۲۰۰۵ توسط Harun و همکاران انجام شد، اثر اصلاح شیمیایی سطح فولاد کربنی با مخلوط سیلان‌های ۳-گلایسیدوکسی پروپیل تری اتوکسی سیلان (GPS-۳) و γ -APS بر خواص چسبندگی خشک و تر و نیز سرعت جدایش کاتدی پوشش‌های اپوکسی و آلکید مورد بررسی قرار گرفت [۶]. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که چسبندگی خشک و تر پوشش‌های اپوکسی و آلکید به ترتیب توسط 3-GPS و γ -APS بهبود پیدا می‌کند. ضمناً 3-GPS سرعت جدایش کاتدی پوشش اپوکسی را ۳ برابر کاهش می‌دهد. در پوشش آلکید، γ -APS تغییری در سرعت جدایش کاتدی ایجاد نمی‌نماید. به این دلیل که پوشش آلکید در اثر قلیایی تشکیل شده تخریب شده و عملاً کارایی خود را از دست می‌دهد.

در کارهای تحقیقاتی دیگر، کارایی و کیفیت پوشش‌های پلی اتیلن اصلاح شده با انیدرید مالئیک (Ma-g-PE) از منظر نتایج آزمون جدایش کاتدی مورد بررسی و ارزیابی واقع شده است [۷-۱۰]. این بررسی‌ها نشان می‌دهد حضور مقادیر کمی (۳-۲/۵ wt%) از ترکیباتی همچون پلی اتیلن مالئینه، EPDM، بعضی افزودنی‌های پلیمری به صورت آلیاژ و نیز پرکن‌ها، استحکام چسبندگی مرطوب و کارایی در مقابل جدایش کاتدی در پلی اتیلن را بهبود می‌بخشد. اثر اصلاح شیمیایی و ایجاد اتصال بین سیلان نوع γ -APS با فلز بر جدایش لوله‌های فولادی که با پلی اتیلن پوشیده شده بودند، مورد مطالعه قرار گرفت. این تحقیقات نشان داد که برای بالا بردن مقاومت به جدایش کاتدی، لازم است از یک غلظت بهینه γ -APS برای اصلاح شیمیایی سطح استفاده گردد [۱۱]. اصلاح شیمیایی سطح با γ -APS برای پوشش‌هایی که در ساختارشان گروه‌های اپوکسی حضور دارند، باعث بهبود خواص جدایش کاتدی شده است [۱۲]. در یک کار پژوهشی، ورقه‌های آهن اصلاح شیمیایی شده و خواص محافظت خوردگی پوشش‌های زیر بر روی آنان مورد بررسی قرار گرفتند [۱۳]. این ورقه‌ها متعاقب اصلاح شیمیایی با پوشش‌های پودری اپوکسی-پلی‌اتر پوشش داده شده و سپس آزمون جدایش کاتدی بر روی آنان اجرا گردید. نتایج به‌دست آمده نشان داد که نمونه‌هایی که قبل از اعمال

1. γ -Aminopropyltriethoxy Silane
2. maleic Anhydride Grafted Polyethylene
3. Borealis

انتخاب شد. این آزمون مطابق روش DIN 30670 صورت گرفت. از دستگاه کشش Zwick آلمان مدل Roell ZO30 و دستگاه پرس شرکت Matsuda ژاپن نوع DAC-37 استفاده شد.

تهیه نمونه و نحوه انجام آزمون جدایش کاتدی

روش تهیه نمونه برای این آزمون دقیقاً مشابه روش تهیه نمونه برای آزمون چسبندگی می باشد. با این تفاوت که قالب لازم برای این تست، دارای حفره‌ای به ابعاد $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 6\text{ mm}$ است (شکل ۲ ب). ابعاد ورق فولاد کربنی که به عنوان زیرآیند استفاده شده $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 3\text{ mm}$ و ابعاد ورق پلی اتیلن مالئینه $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 6\text{ mm}$ بودند.

آزمون جدایش کاتدی مطابق استاندارد G8 به مدت ۲۸ روز انجام گرفت که محلول الکترولیت آن شامل ۱٪ جرمی از هر کدام از نمک‌های (بدون آب) کلرید سدیم، سولفات سدیم و کربنات سدیم بوده و از پتانسیل اعمالی $1/45\text{ V}$ تا $1/55\text{ V}$ - نسبت به الکتروکد کالومل اشباع در طول مدت آزمایش استفاده شده است. از ولت متر شرکت Philips جهت تعیین ولتاژ آزمون جدایش کاتدی استفاده شد. در آزمون فوق از یک حفره به قطر 9 mm برای نمونه و یک حفره به قطر 6 mm برای شاهد استفاده گردید.

نتایج و بحث

جدول ۲ نتایج آزمون چسبندگی پوشش پلی اتیلن گرفت شده با انیدرید مالئیک (Ma-g-PE) به فولاد کربنی که با محلول ۵٪ APS- γ اصلاح شیمیایی شده را نشان می دهد. در این جدول نمونه ۲ تکرار ۱ بوده و نمونه ۳ شاهد (بدون اصلاح شیمیایی با محلول سیلان) می باشد.

جدول ۲- نتایج چسبندگی Ma-g-PE به فولاد بعد از به کارگیری محلول ۵٪ APS- γ

نمونه	استحکام چسبندگی (kg/cm)
۱	۲۲/۳-۲۵/۸۹
۲	۳۰/۰۱-۳۱/۳۶
شاهد	۲۳/۳

همان گونه که مشاهده می شود، چسبندگی Ma-g-PE به فولاد کربنی که با محلول APS- γ اصلاح شده از حد استاندارد اعلام گردیده توسط شرکت ملی گاز 8 kg/cm برای

حجمی آب اضافه نمودیم. این مخلوط به مدت ۳ ساعت توسط همزن مغناطیسی قبل از مصرف به هم زده شد. این محلول در دمای محیط با سرعت هم زدن 200 rpm و با آب مقطر تهیه گردید. pH محلول نیاز به تنظیم ندارد و همان pH طبیعی محلول که معمولاً قلیایی است، می باشد.

تهیه ورق پلی اتیلن مالئینه

به کمک فرایند قالب گیری با پرس گرم، ورق هایی از پلی اتیلن مالئینه (Ma-g-PE) به ابعاد $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 6\text{ mm}$ و $25\text{ cm} \times 25\text{ cm} \times 6\text{ mm}$ با شرایط قالب گیری ارائه شده در جدول ۱، تهیه گردید.

جدول ۱- شرایط قالب گیری ورق Ma-g-PE با کمک پرس گرم

دما	190°C
زمان پیش گرم	۵ min
زمان تحت فشار	۳ min
فشار پرس	۱۵۰ bar
زمان سرد کردن	۳ min

قبل از پوشش دهی صفحات فولاد کربنی با ورق های Ma-g-PE، سطح این ورق ها با آب مقطر و پارچه نرم شستشو داده شده و پس از خشک شدن توسط سنباده بسیار نرم (شماره ۱۰۰۰) کاملاً تمیز گردید.

تهیه نمونه و نحوه انجام آزمون چسبندگی

سندبلاست با درجه SA 1/2 بر روی ورق های فولاد کربن انجام شد. برای اعمال پرایمر و رسیدن به ضخامت تقریبی ۱۰ میکرون از چندین مرحله اسپری محلول سیلان که در بین مراحل آن فرآیند خشک کردن در محیط مجموعاً به مدت 210 min و پخت در آن (80°C) مجموعاً به مدت 40 min انجام می شد، استفاده گردید. برای تهیه نمونه های آزمون چسبندگی از روش قالب گیری فشاری به طریق زیر استفاده گردید: قالب مورد استفاده دارای حفره ای به ابعاد $12/5\text{ cm} \times 2/5\text{ cm} \times 6\text{ mm}$ می باشد (شکل ۲ الف). فک پایین پرس تا 250°C گرم می شود. فک بالا سرد بوده و فشار برابر $0/2\text{ bar}$ تنظیم می گردد. قبل از قالب گیری، ورق فلزی اصلاح شده با سیلان در قالب به مدت ۳ دقیقه پیش گرم شد و سپس با گذاردن ورق Ma-g-PE روی آن قالب گیری انجام گردید. زمان قالب گیری با پرس ۵ دقیقه

جدول ۳ نتایج آزمون جدایش کاتدی پوشش Ma-g-PE که سطح زیر آیند فولاد کربنی آن با محلول ۵٪ γ -APS اصلاح شیمیایی شده را به همراه نمونه شاهد که سطح زیر آیند آن با محلول سیلان تماسی نداشته، نشان می‌دهد. این نتایج به روشنی تاثیرات مثبت استفاده از محلول سیلان ۵٪ γ -APS در افزایش مقاومت پوشش به جدایش کاتدی را آشکار می‌نماید.

جدول ۳- نتایج تست جدایش کاتدی پوشش Ma-g-PE به فولاد با و بدون استفاده از محلول ۵٪ γ -APS

نمونه	شعاع جدایش (mm)
γ -APS	۱
شاهد ۱	۲۸/۳۳
شاهد ۲	۳۴/۵۳

پوشش پلی اتیلن ۳ لایه بیشتر می‌باشد. شکل ۳ نمونه پوشش فوق را قبل از آزمون چسبندگی (شکل الف)، در حین انجام آزمون چسبندگی (شکل ب) و بعد از انجام آزمون چسبندگی (شکل ج) نشان می‌دهد.

همان طور که در بخش مقدمه اشاره شد، چسبندگی ترکیبات آلی سیلان به Ma-g-PE و فولاد کربنی از نوع شیمیایی بوده و همین مسأله، دلیل بالا بودن میزان چسبندگی این نوع پوشش می‌باشد.

از یک سو گروه‌های هیدروکسیل موجود در ترکیبات آلی سیلان با گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل سطح فلز واکنش داده و از سوی دیگر، گروه‌های آمینی در ساختار γ -APS با بعضی گروه‌های سطح Ma-g-PE اتصال شیمیایی ایجاد می‌کنند.

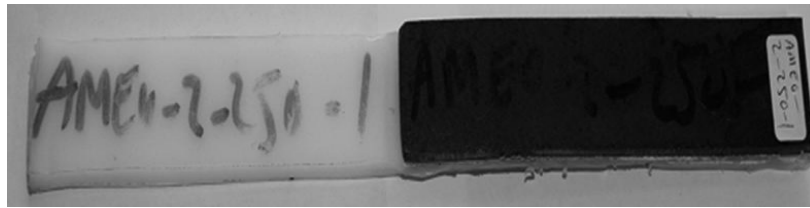


(الف)



(ب)

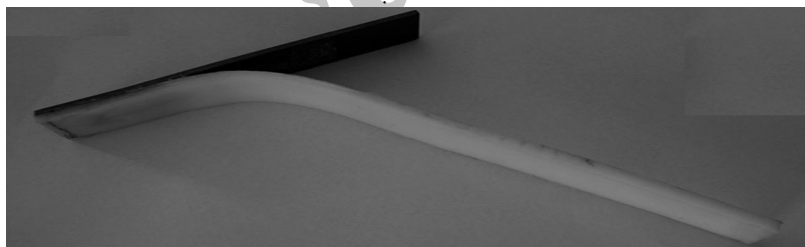
شکل ۲- قالب تست‌های الف) چسبندگی و ب) جدایش کاتدی



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳- نمونه پوشش Ma-g-PE به فولاد عمل آوری شده با محلول ۵٪ APS- γ جهت آزمون چسبندگی: (الف) قبل از آزمون چسبندگی، (ب) در حین انجام آزمون چسبندگی و (ج) بعد از انجام آزمون چسبندگی

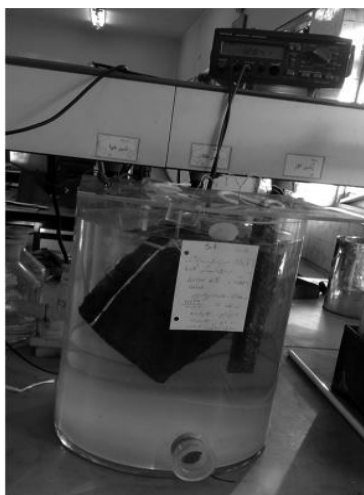
در شکل ۶ رسم شده است. نتایج آزمون جدایش کاتدی نشان می‌دهد که پیوند ترکیبات آلی سیلان به فولاد کربنی (Si-O-Metal) و نیز پیوند Ma-g-PE به سیلان (اتصال آمیدی) در مقابل قلبی تولید شده ناشی از جریان حفاظت کاتدی مقاوم می‌باشد. نتایج بالا موید این است که کاهش جدایش پوشش می‌تواند به دلیل کم شدن نفوذ محلول الکترولیت موجود در سل آزمون جدایش کاتدی به فصل مشترک فولاد کربنی و ترکیبات آلی سیلان و یا به دلیل مقاومت لایه سیلانی به قلبا باشد. بنابراین، ایجاد پیوند شیمیایی سیلان به فولاد

شعاع جدایش بسیار کم نمونه‌های اصلاح شده با محلول سیلان که مقادیر آن از مقدار استاندارد تعیین شده توسط شرکت ملی گاز (۵ mm [۱۶]) هم کمتر است، به وضوح نقش مهم سیلان در بهبود کیفیت حفاظت در برابر جدایش کاتدی پوشش‌های Ma-g-PE را اثبات می‌کند. شکل ۴ آزمون جدایش کاتدی در حین انجام برای نمونه پوشش Ma-g-PE به فولاد (شاهد و با کاربرد محلول ۵٪ APS- γ را نشان می‌دهد. نمونه پوشش Ma-g-PE به فولاد با کاربرد محلول ۵٪ APS- γ پس از انجام آزمون جدایش کاتدی در شکل ۵ و نمونه شاهد پس از انجام آزمون جدایش کاتدی

سطح فلز و سیلان، تراکم مواد پوشش را بالا برده و میزان نفوذ الکترولیت را کاهش می‌دهد.

سیستم پوششی این مقاله از نظر چسبندگی و مقاومت به جدایش کاتدی از پوشش‌های سه لایه‌ای که حداقل کیفیت را برای پذیرش در صنعت دارند، بهتر عمل می‌کند. بنابراین انتظار می‌رود رقیب بالقوه‌ای برای سیستم پوشش مذکور باشد.

کربنی که ارتقاء میزان چسبندگی پوشش به سطح را به دنبال دارد [۱، ۵ و ۱۲] همراه با مقاومت شیمیایی ایجاد شده در مقابل قلیا ناشی از پیوندهای تشکیل شده روی سطح و نیز کاهش نفوذ محلول الکترولیت به فصل مشترک فلز سیلان [۱۱، ۱۲ و ۱۴] منجر به افزایش مقاومت در مقابل جدایش کاتدی می‌شود. ضمناً ایجاد اتصال شیمیایی بین لایه چسب و سیلان به همراه پیوندهای ایجاد شده بین



(الف)

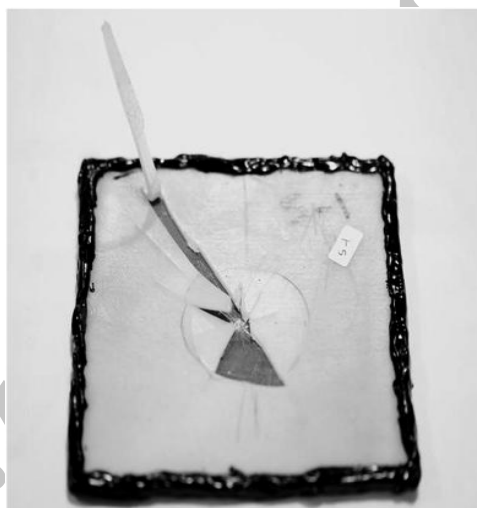


(ب)

شکل ۴- آزمون جدایش کاتدی در حال انجام برای نمونه پوشش Ma-g-PE به فولاد (الف) شاهد و (ب) با محلول ۵٪ APS-γ



شکل ۵- نمونه پوشش Ma-g-PE به فولاد عمل آوری شده با محلول ۵٪، γ -APS پس از پایان آزمون جدایش کاتدی



شکل ۶- نمونه شاهد پس از انجام آزمون جدایش کاتدی

با توجه به اینکه دو خاصیت چسبندگی و مقاومت به جدایش کاتدی از خواص مهم پوشش‌های محافظ خوردگی می‌باشند که در این تحقیق بهبود یافته‌اند، انتظار می‌رود در آینده نزدیک مصرف سیستم پوشش پلی اتیلن مالئینه همراه با زیرآیند اصلاح شده با محلول سیلان، در صنعت مورد پذیرش قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

در پوشش تک لایه Ma-g-PE، سطح زیرآیند را می‌توان به راحتی با محلول سیلان سازگار با محیط γ -APS اصلاح شیمیایی نمود و خواص چسبندگی و جدایش کاتدی آن را نسبت به سیستم‌های پوشش متداول کنونی (اپوکسی، Ma-g-PE و پلی اتیلن) با حداقل کیفیت برای پذیرش در صنعت، بهبود بخشند.

منابع

- [1] Leiden L., Purmonen J., Leiden A. & Alastal K., *Coated pipe comprising polyolefin layer with enhanced adhesion*, EP patent: 1859926A1, 2007.
- [2] Argent C., & Norman D., "Three layer polyolefin coatings: fulfilling their potential?", *Corrosion* March 12-16, 2006, <http://www.davidnorman corrosioncontrol.com/html/papers/PDF/DavidNormanNACE2006.pdf>, Available online October 2010.
- [3] Guoli L., Xueming W., Aiju L., Weiqiang W. & Liqiang Z., "Fabrication and adhesive properties of thin organosilane films coated on low carbon steel substrates", *Surface & Coatings Technol.*, Vol. 201, pp. 9571-9578, 2007.
- [4] Ooji V., "On characterization and performance of silane coupling between organic coatings and metallic or ceramic substrates", *American Institute of Physics*, pp. 305-321, 1996.
- 5- Borup B. & Loannidis A., *Polypropylene maleic acid anhydride, and silanes: The winning combination*, Dynasylane literatures, Evonick Industries Co., www.Dynasylane.com/page/en/literature/pageNumber/5-49k, 30.6. 2010.
- [6] Harun M.K., Marsh J. & Lyon S.B., "The effect of surface modification on the cathodic disbondment rate of epoxy and alkyd coatings", *Prog. Org. Coatings*, Vol. 54, pp. 317-321, 2005.
- [7] Roy D., Simon G.P., Forsyth M. & Mardel J., "Modification of thermoplastic coatings for improved cathodic disbondment performance on a steel substrate: a study on failure mechanisms", *Inter. J. of Adhesion & Adhesives*, Vol. 22, pp. 395-403, 2002.
- [8] Roy D., Simon G. P. & Forsyth M., "Improved cathodic disbondment performance of polyethylene blends", *Polym. Eng. and Sci.*, Vol. 42, No. 4, pp. 781-788, 2002.
- [9] Roy D., Simon G. P. & Forsyth M., "Blends of maleic-anhydride-grafted polyethylene with polyethylene for improved cathodic disbondment performance", *Polym. Inter.*, Vol. 50, pp. 1115-1123, 2001.
- [10] Roy D., Simon G. P., Forsyth M. & Mardel J., "Toward a better understanding of the cathodic disbondment performance of polyethylene coatings on steel", *Advances in Polym. Technol.*, Vol. 21, No. 1, pp. 44-58, 2002.
- [11] Matsugu M.O. & Chiaki K., "The effect of silane coupling agent treatment on the cathodic delamination of polyethylene-coated steel pipe", *J. of the Japan Soci. of Colour Material*. Vol. 74, No. 5, pp. 217-222, 2001.
- [12] Love C.T., Xian G. & Karbahari V.M., "Cathodic disbondment resistance with reactive ethylene terpolymer blend", *Prog. in Org. Coatings*, Vol. 60, pp. 287-296, 2007.
- [13] Fedel M., Olivier M., Poelman M., Deflorian F., Rossi S. & Druart M.E., "Corrosion protection properties of silane pre-treated powder coated galvanized steel", *Prog. in Org. Coatings*, Vol. 66, pp. 118-128, 2009.
- [14] Horner M.R. & Boerio F.J., "Cathodic delamination of an epoxy/polyamide coating from steel", *J. Adhesion*, Vol. 32, 141-156, 1990.
- [15] Gaillard G. & Bouliez J.L., "Method for applying an anti-corrosion coating on parts of a duct including the use of a silane aqueous solution and an epoxy powdery paint", U.S. Patent App. Pub.: 20100055327 A1, 2010.
- [16] National Iranian Gas Company, <http://igs.nigc.ir/igs/>, Available online October 2010.