

کاربرد طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) در بررسی اثر نوع الکترولیت بر جدایش کاتدی پوشش‌های پلی‌یورتان خطوط لوله نفت و گاز

فرزانه اکوان: دانشکده شیمی دانشگاه آزاد واحد تهران شمال- باشگاه پژوهشگران جوان (f.akvan@gmail.com)
جمشید مفیدی: دانشکده شیمی دانشگاه آزاد واحد تهران شمال
جابر نشاطی: پژوهشگاه صنعت نفت ایران

چکیده

در سیستم‌های انتقال و توزیع نفت و گاز، جدا شدن پوشش‌های آلی لوله‌های مدفونی که تحت حفاظت کاتدی قرار دارند، یکی از مشکلات عمده در صنعت می‌باشد. اعمال پتانسیل کاتدی باعث ایجاد محیط قلیایی در فصل مشترک پوشش-فلز می‌شود که این امر موجب نقصان چسبندگی و جدایش پوشش در قسمت‌های معیوب و ورود الکترولیت در پوشش محافظ آلی می‌گردد. در این تحقیق تاثیر نوع الکترولیت بر پوشش پلی‌یورتان طبق استاندارد ASTM G8 با استفاده از تکنیک طیف نگاری الکتروشیمیایی امپدانس (EIS) مورد بررسی قرار گرفت. بدین صورت که پوشش‌هایی با ضخامت‌های تقریباً یکسان ۳۵۴، ۳۶۳ و ۴۰۱ میکرون، با ایجاد یک حفره عمده به قطر ۶ میلی‌متر در الکترولیت‌های NaCl و KCl و ۳/۵ درصد وزنی بررسی شدند. مدت زمان غوطه‌وری نمونه ۲۸ روز و نمونه‌ها تحت پتانسیل کاتدی ۱/۵- ولت نسبت کالومل اشباع قرار داشتند، اندازه‌گیری‌های طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی در فواصل معین زمانی منظم انجام گردید.

کلمات کلیدی: پوشش پلی‌یورتان، جدایش کاتدی، نوع الکترولیت، خطوط لوله، طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)

Applications of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) In Investigation of electrolyte type in Cathodic Disbonding of Polyurethane Coatings

F.Akvan - Faculty of Chemistry, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Young Researchers Club, Tehran, Iran – (f.akvan@gmail.com)

J.Neshati - Corrosion Department, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

J.Mofidi - Faculty of Chemistry, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

Transmission and distribution systems in oil and gas separation in buried pipe for organic coatings under cathodic protection are one of the major problems in the industry. Cathodic flow produces alkalinity at the interfaces which causes faults, either inherent or induced electrolyte in coating.

In this study the effect of electrolyte type were investigated according to ASTM G8 using Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS).

Experiments were done in 3.5 % NaCl, KCl and CaCl₂ solutions at room temperature with same coating thicknesses equal 354, 363 and 401 microns and Artificial holidays diameters was selected as 6 mm. Immersion time was 28 days and during the immersion cathodic potential of -1.5 V (vs. SCE) was applied, but the EIS measurements were done in open circuit potential(OCP).

Keywords: Polyurethane coating, Cathodic disbonding, Electrolyte type, Pipeline, EIS.

مقدمه

الکترولیت های موجود در اطراف خطوط لوله های نفت و گاز بر حسب مکان قرارگیری لوله مثلاً در آب دریا، بستر دریا یا خاک دارای نمک و یا خاک با خوردگی بسیار ناچیز متفاوت می باشند. خوردگی سازه های فلزی و ترک خوردگی ها، معمولاً در قسمت هایی که پوشش از فلز جدا شده است اتفاق می افتد [۳-۱]، و این جدا شدن پوشش می تواند عوامل مختلفی داشته باشد [۴]. مطالعات مربوط به جدا شدن پوشش ها بر اثر واکنش های کاتدی که از دهه ۱۹۶۰ شروع شد، منجر به ارائه ASTM G8 در سال ۱۹۶۹ گردید [۷-۵]، با این وجود مکانیسم جدا شدن پوشش های آلی در واکنش های کاتدی به طور کامل تشخیص داده نشده است [۷-۱۴].

مواد و روش تحقیق

نمونه های پوششی روی صفحات کربن استیل (SAE 1020) در اندازه های ۱۰۰×۱۵۰×۲ میلی متری اعمال شدند. قبل از اعمال پوشش ها عمل شن پاشی روی صفحات کربن استیل بر طبق روش استاندارد Sa (SIS055900-67) 2.5 انجام و با استفاده از تولوئن عمل چربی زدائی صورت گرفت. از یک توری پلاتین به

ابعاد (۵۰×۱۰mm) به عنوان الکتروود کمکی استفاده گردید. از الکتروود کالومل اشباع به عنوان الکتروود مرجع استفاده شد.

در این تحقیق یک سلول الکتروشیمیایی استوانه ای مضاعف طراحی گردید، بدین صورت که یک استوانه شیشه ای به قطر ۶۲ میلیمتر به عنوان سلول خارجی و استوانه دیگری در داخل آن به قطر ۳۰ میلیمتر به عنوان سلول داخلی انتخاب و در اطراف یک حفره عمودی مخروطی شکل که ایجاد کردیم بر روی پوشش قرار داده شد و توسط چسب سیلیکونی بر روی پوشش پلی یورتان چسبانده شد و کاملاً آب بندی گردید. سطح تحتانی سل داخلی که حفره عمداً ایجاد شده در آن قرار دارد تقریباً ۷ سانتیمتر مربع و سطح تحتانی واقع بین دو استوانه شیشه ای تقریباً ۲۳ سانتی متر مربع می باشد.

مدت زمان اندازه گیری ها و کسب نتایج تجربی، ۲۸ روز است و اندازه گیری ها به صورت منظم و هفته ای یک مرتبه انجام شد. لازم به ذکر است ارتفاع محلول الکتروولیت در طول مدت آزمایش با افزودن آب مقطر ثابت نگه داشته می شود. بر طبق استاندارد آزمون ها در دمای اتاق معادل تقریباً ۲۵ درجه سانتیگراد انجام گرفتند.

در هر سری آزمایش سیستم در کلیه لحظات، تحت پتانسیل حفاظت کاتدی مازاد ۵/۱- ولت نسبت به الکتروود کالومل اشباع، قرار داده می شد، مگر در روزهای معینی که توسط پتانسیواستات اندازه گیری انجام می پذیرفت. بدین صورت که قطب منفی منبع تغذیه به صفحه کربن استیل پوشش داده شده و قطب مثبت به الکتروود پلاتین (به عنوان آند) متصل می شد. در این هنگام خروج گازهای هیدروژن مشاهده می گردید.

اندازه گیری های امپدانس در پتانسیل مدار باز (AC) با اعمال موج سینوسی ۵ میلی ولت در فرکانس های ۵ میلی هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز صورت گرفت. در پایان هر سری آزمایش، میزان جدایش پوشش از سطح کربن استیل با استفاده از وزن کاغذ کالک به روش توزین محاسبه می گردید.

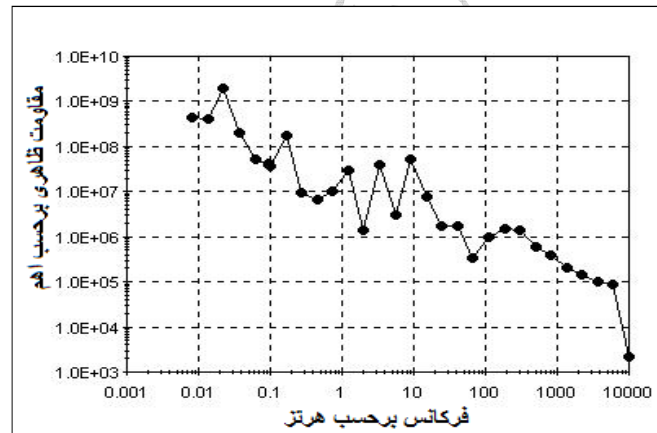
به منظور بررسی اثر نوع الکتروولیت بر میزان مساحت گسیخته شده پوشش در اثر اعمال پتانسیل مازاد، الکتروولیت های NaCl ، KCl و CaCl_2 ۳/۵ درصد وزنی برپوشش هایی با ضخامت های تقریباً یکسان و حفره هایی به قطر ۶ میلیمتر در استوانه داخلی به مدت ۲۸ روز قرار گرفت (جدول ۱). در طول آزمایش منحنی های امپدانس در زمان های مختلف ترسیم گردید که هدف ایجاد ارتباط بین منحنی های امپدانس با سطح گسیخته شده بعد از ۲۸ روز می باشد. برای ارزیابی سطح گسیخته شده از استاندارد EN 10290 و JFE استفاده گردید [۱۶-۱۵].

جدول ۱- بررسی اثر نوع الکترولیت بر مساحت گسیخته شده

نمونه	ضخامت (μm)	قطر دایره معادل سطح گسیخته شده (mm)	مساحت شده (mm^2)	گسیخته
B	۳۵۴	۲۲/۹۴	۴۱۳/۵۲	
G	۳۶۳	۲۷/۸۴	۸۲/۷۰	
H	۴۰۱	۱۰/۱۵	۸۰/۹۰۶	

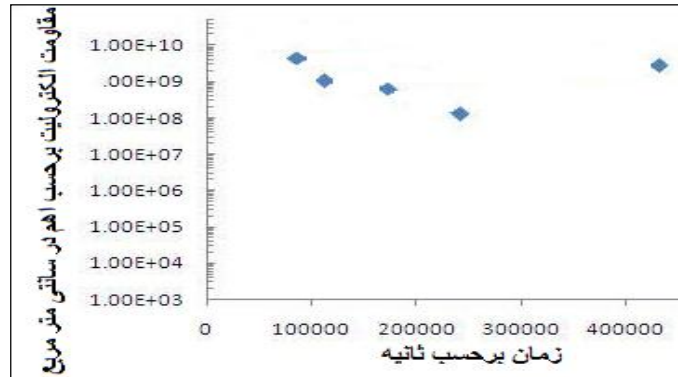
بررسی منحنی های استوانه های خارجی نشان داد، میزان مقاومت این نوع پوشش ها بالاتر از 10^8 اهم بر سانتی متر مربع می باشند، یعنی پوششی با عملکرد مناسب محسوب می شوند [۱۷]. در فرکانس های پایین مقاومت بین 10^8 تا 10^{10} اندازه گیری شد (نمودار ۱)

نمودار ۱- مقاومت منحنی Bode برای استوانه خارجی نمونه B بعد از ۲۸ روز غوطه وری

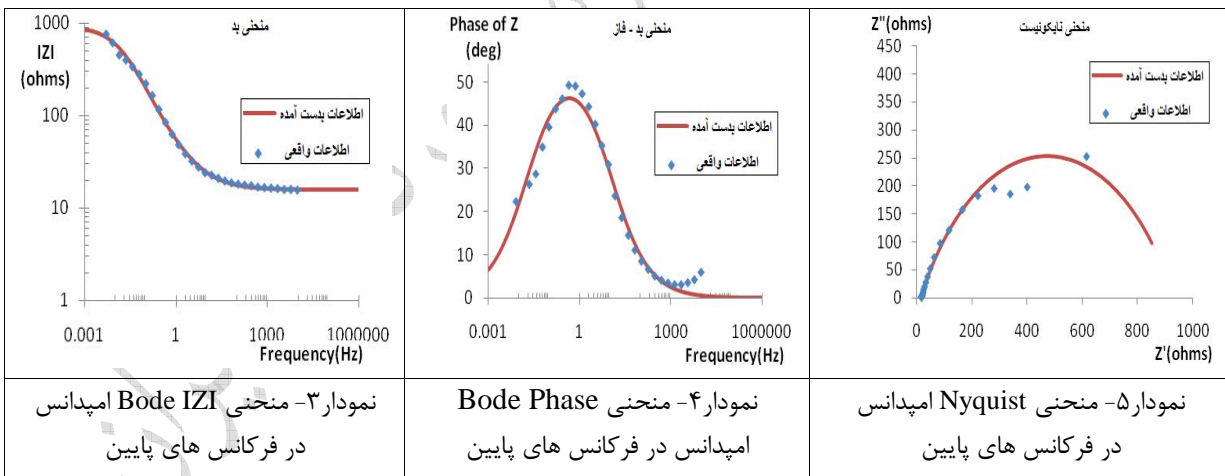


اگر مقاومت پوشش ها را در فرکانس های پایین با R_f نشان دهیم که در واقع مجموع مقاومت پلاریزاسیون (R_p) و مقاومت الکترولیت (R_s) می باشد و تغییرات مقاومت پوشش ها را نسبت به زمان رسم کنیم، مشاهده می شود که مقاومت پوشش بعد از گذشت ۲۸ روز تغییر محسوسی پیدا نمی کند. همانطور که تغییرات R_f نسبت به زمان برای این پوشش ها در نمودار ۲ مشاهده می شود. تغییرات قابل ملاحظه R_f نسبت به زمان در واقع نشان دهنده مکانیسم خوردگی بر اثر حفرات ریز روی پوشش می باشد. ایجاد محصولات خوردگی در سطح آلیاژ به طور مقطعی می تواند باعث افزایش میزان R_f گردد که بعد از نفوذ مجدد آب، مقدار R_f کاهش می یابد. این قضیه در مرز مشترک پوشش - فلز نیز اتفاق می افتد.

نمودار ۲ - مقاومت پوششی یکی از استوانه های خارجی در فرکانس ۰/۰۱ هرتز در طول ۲۸ روز

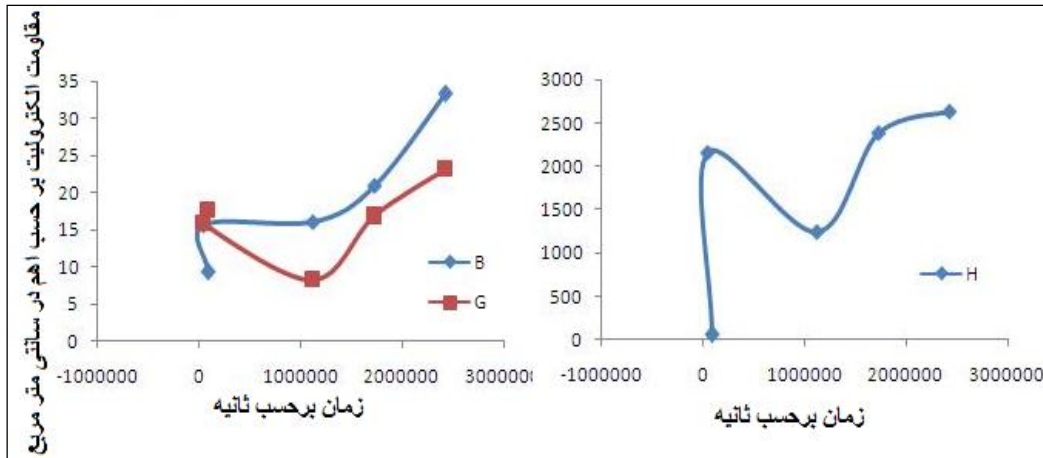


در استوانه داخلی ایجاد حفره باعث می شود که فلز کربن استیل مستقیماً در معرض الکترولیت قرار گیرد بنابراین منحنی های امپدانس حاصل در واقع میزان خوردگی آلیاژ بدون پوشش را نشان می دهند. بررسی منحنی های Bode امپدانس در فرکانس های پایین میزان مقاومت را حدود 10^3 اهم در سانتی متر مربع نشان می دهد، که این میزان برای امپدانس فلز فاقد پوشش مطابقت دارد. برای نمونه منحنی های امپدانس Bode و Nyquist پوشش نمونه B در نمودارهای آورده شده است:



مقاومت الکترولیت نسبت به زمان به افت و خیز مقاومت در طول زمان غوطه وری (نمودار ۶) به مکانیسم خوردگی و تخریب پوشش بر می گردد. با توجه به نمودار ۶، مقاومت هر سه الکترولیت در نهایت افزایش نشان می دهند، در نمونه های B و G، در مرحله اول که نمونه با محلول الکترولیت در تماس قرار می گیرد، از آنجا که هنوز الکترولیت در پوشش نفوذ پیدا نکرده هیچ واکنش الکتروشیمیایی صورت نمی گیرد. مدت زمان لازم برای نفوذ و رسیدن مولکول های آب به وجه مشترک پوشش-فلز بر طبق نتایج حاصل از آزمایش

بین دو ساعت تا پنج روز می باشد که این امر با نتایج محققین دیگر مطابقت دارد. یعنی می توان نتیجه گرفت کل فرآیند در کنترل انتقال آب و مولکول های اکسیژن حل شده در پوشش و وجه مشترک پوشش- فلز می باشد.



نمودار ۶- مقاومت الکترولیت نسبت به زمان برای نمونه های B,G,H

مقدار R_s در نمونه B و G ، از روز سیزدهم تا بیست و هشتم در حال افزایش چشمگیری است یعنی می توان نتیجه گرفت نفوذ الکترولیت در پوشش به طور تدریجی و با یک شیب تقریباً ثابت رو به افزایش است، نفوذ آب به دلایلی چون فشار اسمزی، گرادیان غلظت و نیروهای موئین می تواند به داخل پوشش صورت گیرد. با توجه به افزایش تدریجی این دو الکترولیت، می توان پیش بینی نمود که میزان جدایش پوشش از سطح فلز در حال افزایش است. در این دو الکترولیت، آب به مقدار کافی در وجه مشترک پوشش-فلز اجتماع کرده و واکنش کاتدی زیر صورت می گیرد [۱۸-۱۹]:

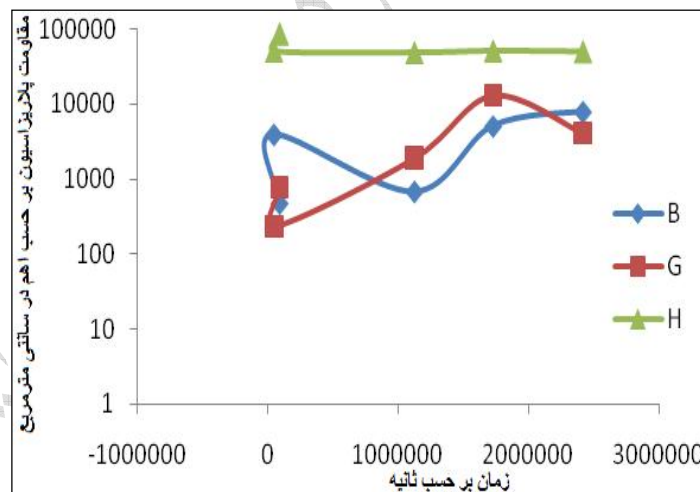


قلیایی شدن محصولات واکنش های کاتدی (واکنش ۱) عامل اصلی ایجاد جدایش پوشش در نقاط کاتدی است. به هر حال انحلال پذیری بالای محصولات واکنش در آب ، عامل اصلی در تشکیل حباب های کاتدی است. این مواد قلیایی ، فعالیت آب را کاهش داده و یک شیب از فشار اسمزی در مرز پوشش - فلز بوجود می آورند که این باعث ایجاد حباب کاتدی و جدایش پوشش می گردد.

ولی در نمونه H ، مقدار R_s دارای افت وخیزهایی می باشد. در مرحله اول که الکترولیت با پوشش در تماس قرار می گیرد ، از آنجا که هنوز الکترولیت در پوشش نفوذ پیدا نکرده هیچ واکنش الکتروشیمیایی صورت نمی گیرد . ولی بعد از چند ساعت نفوذ آغاز می شود ، نتایج حاصل از شبیه سازی های امپدانس مقدار R_s را به نسبت دو الکترولیت دیگر ، بسیار بالا نشان می دهد .

می توان نتیجه گرفت در ابتدا کل فرآیند در کنترل انتقال آب و مولکول های اکسیژن حل شده در پوشش و وجه مشترک پوشش-فلز می باشد. با توجه به افت وخیز بین روزهای پنجم تا بیستم ، می توان جدایش پوشش را در این مدت فرض کرد ولی از روز بیستم تا بیست و هشتم شیب نمودار تقریباً ثابت می شود که نشان میدهد، جدایش تقریباً با سرعت ثابت پیش می رود . با توجه به مقاومت های خیلی زیاد الکترولیت ، می توان پیش بینی کرد که میزان جدایش کم می باشد . علاوه بر این به علت شعاع یونی بزرگ کلسیم نفوذ الکترولیت ، در پوشش مشکل می باشد و نیز رسوبات و محصولات خوردگی اجازه ورود به حفره را نمی دهند .

نفوذ یون های Na^+ و Cl^- موجود در الکترولیت به درون پوشش از یک طرف و خروج یون های OH^- حاصل از واکنش های کاتدی در زیر پوشش واز طرف دیگر از فصل مشترک فلز- پوشش به سوی الکترولیت باعث افت مقاومت پوشش می شوند . همچنین جابجایی یونها با ساختار پلیمر یعنی Na^+ با H^+ می تواند باعث افت مقاومت پوشش شوند. افزایش گونه های شیمیایی به ویژه Cl^- و دستیابی آنها به فصل مشترک پوشش ، لایه اکسیدی تخریب شده و مقاومت انتقال بار کاهش می یابد، از طرف دیگر تشکیل محصولات خوردگی تولید شده در اثر پیل گالوانیکی بین لایه اکسیدی و آهن در فصل مشترک می تواند نیرو محرکه ای جهت افزایش و توسعه مسیر های رسانا در پوشش باشند که همین امر باعث کاهش مقاومت پوشش می شود.

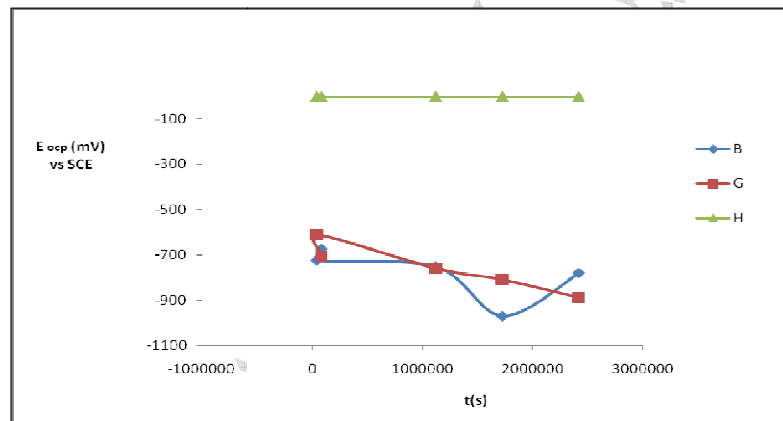


نمودار ۷- مقاومت پلاریزاسیون نسبت به زمان برای نمونه های B,G,H

در نمونه G و B افت مقاومت می تواند هم ناشی از تخریب پوشش و هم ناشی از تخریب لایه دوگانه باشد و هرگونه افت در مقاومت پوشش یا مقاومت انتقال بار می تواند باعث افت مقاومت پلاریزاسیون گردد(نمودار ۷).

در مورد نمونه H، با توجه به ساختار الکترولیت و رسوبات آن و محصولات خوردگی نفوذ یون های Na^+ و Cl^- موجود در الکترولیت به درون پوشش، و خروج یون های OH^- حاصل از واکنش های کاتدی خیلی به کندی امکان پذیر می باشد. لذا از آنجا که ورود و خروج یونی در پوشش بسیار کم می باشد، مقاومت پلاریزاسیون تقریباً ثابت به نظر می رسد.

با توجه به نمودار ۸ در نمونه G پتانسیل اندازه گیری شده با گذشت زمان به سمت منفی گرایش نشان می دهد و مشخص می سازد که جذب آب در زیر پوشش ناحیه سالم، در حال افزایش است و واکنش خوردگی کربن استیل رو به افزایش است. برای نمونه G می توان نتیجه گرفت، هرچه مقدار E_{ocp} (vs.SCE) به سمت منفی باشد واکنش خوردگی کربن استیل رو به افزایش است و جدایش پوشش بیشتری شود. در خصوص نمونه H، مقدار E_{ocp} (vs.SCE) نسبت به زمان تقریباً ثابت می باشد، که می توان نتیجه گرفت میزان جدایش پوشش تقریباً ثابت است. در نمونه B بین روزهای سیزدهم تا بیستم بیشترین میزان جدایش و خوردگی وجود دارد.

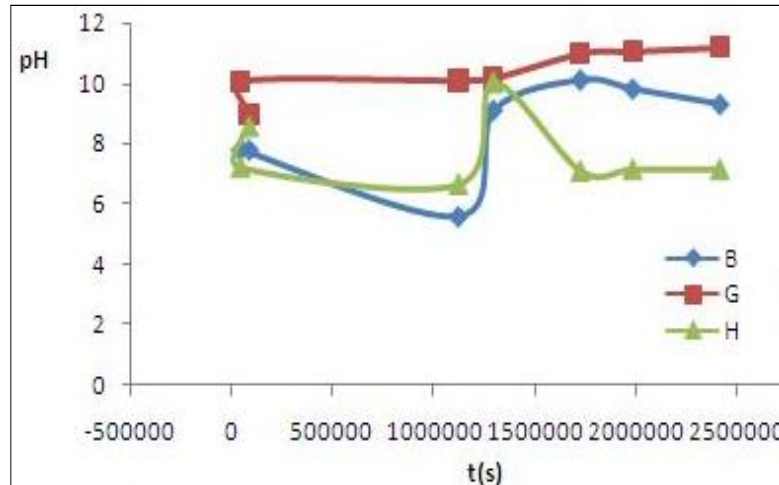


نمودار ۸- تغییرات پتانسیل نسبت به زمان برای نمونه های B,G,H

بر طبق نمودار ۹ هرچه تولید یون های هیدروکسیل با سرعت بیشتری انجام شود، در نتیجه pH زیر پوشش بیشتر خواهد شد و قلیائیت محلول بیشتر خواهد شد تا زمانی که به مقدار تقریباً ثابتی برسد. این قلیائیت، فعالیت آب را کاهش داده و یک شیب از فشار اسمزی در مرز پوشش - فلز بوجود می آورند، که این باعث ایجاد حباب کاتدی و جدایش پوشش می گردد. در نمونه B تا روز سیزدهم افزایش قلیائیت در محلول وجود دارد، در نتیجه بیشترین جدایش پوشش صورت می گیرد و پس از آن تا روز بیست و هشتم این مقدار تقریباً ثابت باقی می ماند، یعنی ناحیه زیر پوشش کاملاً قلیایی شده و از یون ها اشباع می شود.

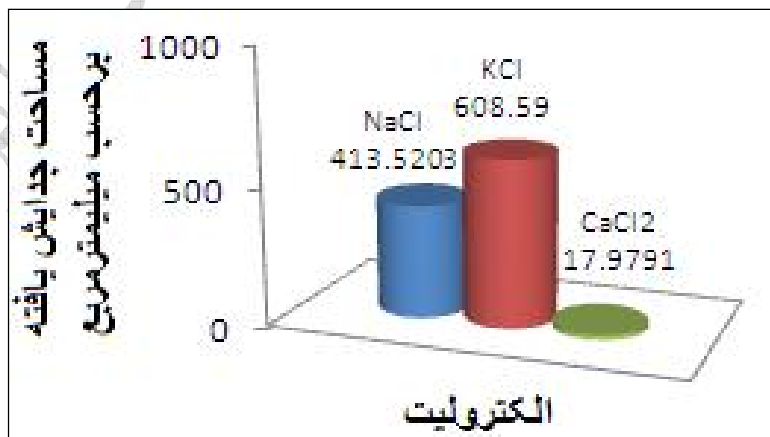
در نمونه G، قلیائیت با یک شیب خیلی کم افزایش دارد، یعنی از روزهای آغازین تست، محیط شروع به قلیایی شدن می کند، در نتیجه جدایش پوشش خیلی زود آغاز می شود. در نمونه H، pH الکترولیت از

روزهای آغازین تست تقریباً ثابت است ولی در روز سیزدهم شدیداً افزایش می یابد و جدایش پوشش صورت می گیرد ولی پس از آن کاهش قلیائیت وجود دارد، که می توان نتیجه گرفت جدایش ثابت می شود .



نمودار ۱۰- تغییرات نمودار pH نسبت به زمان برای نمونه ها

پس از گذشت ۲۸ روز ، استوانه ها از روی پوشش برداشته می شوند و به روش استاندارد جدایش پوشش از سطح فلز ارزیابی می گردد، که نتایج در جدول ۱ آورده شده است. با رسم نمودار مساحت گسیخته شده نسبت به نوع الکترولیت همانطور که در نمودار ۱۱ ملاحظه می شود ارتباط بین نتایج بدست آمده به صورت خطی و منظم نمی باشد و نمی توان از روی آن رابطه ای برای تعیین میزان جدایش یافته حدس زد. بنابراین به نظرمی رسد سطح گسیخته شده تابعی از پارامترهای دیگر نیز می باشد . لذا برای ایجاد ارتباط بین منحنی های امپدانس و سطح گسیخته شده از فرکانس در نقطه شکست استفاده شد.



نمودار ۱۱ - بررسی اثر نوع الکترولیت بر جدایش پوشش

به طوری که بیشترین جدایش پوشش هنگامی اتفاق می افتد که نسبت کاتیون به آنیون ۱ : ۱ باشد، یعنی پوشش در تماس با کلرید سدیم و کلرید پتاسیم بیشترین جدایش را دارند، این جدایش را می توان با توجه به هدایت اکی والان حد اثبات نمود یعنی با توجه به قدرت هدایت یون های حاصل از الکترولیت ها ، بدین صورت که هرچه هدایت اکی والان حد الکترولیت بیشتر باشد ،هدایت جریان الکتریکی بیشتر است در نتیجه میزان جدایش در کلرید پتاسیم بیشتر از کلرید سدیم است .

$$\Lambda_{0\text{K}^+} = 73 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{eq}^{-1} > \Lambda_{0\text{Na}^+} = 50 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{eq}^{-1}$$

در هنگام استفاده از کلرید کلسیم کمترین میزان جدایش پوشش را داریم ،در این حالت خروج هیدروژن به کندی صورت می گیرد و رسوب سفید رنگی تقریباً تمام حفره را پوشانده است .

تشکر

تهیه کنندگان مقاله، بر خود لازم می دانند از گروه پژوهش خوردگی فلزات و الکتروشیمی پژوهشگاه صنعت نفت، صمیمانه تشکر نمایند .

نتیجه گیری

- در نمونه های B و G، در مرحله اول که نمونه با محلول الکترولیت در تماس قرار می گیرد ، مدت زمان لازم برای نفوذ و رسیدن مولکول های آب به وجه مشترک پوشش-فلز بر طبق نتایج حاصل از آزمایش بین دو ساعت تا پنج روز می باشد. مقدار R_s در نمونه B و G ، از روز سیزدهم تا بیست و هشتم در حال افزایش چشمگیری است یعنی می توان نتیجه گرفت نفوذ الکترولیت در پوشش به طور تدریجی و با یک شیب تقریباً ثابت رو به افزایش است.

- در نمونه H ، مقدار R_s دارای افت و خیزهایی می باشد. با توجه به افت و خیز بین روزهای پنجم تا بیستم، می توان جدایش پوشش را در این مدت فرض کرد ولی از روز بیستم تا بیست و هشتم شیب نمودار تقریباً ثابت می شود که نشان می دهد، جدایش با سرعت ثابت اتفاق می افتد.

- در نمونه G افت مقاومت می تواند هم ناشی از تخریب پوشش و هم ناشی از تخریب لایه دوگانه باشد و هرگونه افت در مقاومت پوشش یا مقاومت انتقال بار می تواند باعث افت مقاومت پلاریزاسیون گردد.

- در مورد نمونه H، با توجه به ساختار الکترولیت و رسوبات آن و محصولات خوردگی نفوذ یون های Na^+ و Cl^- موجود در الکترولیت به درون پوشش ، و خروج یون های OH^- حاصل از واکنش های کاتدی خیلی به کندی امکان پذیر می باشد . لذا از آنجا که ورود و خروج یونی در پوشش بسیار کم می باشد ، مقاومت پلاریزاسیون تقریباً ثابت به نظر می رسد .



- در نمونه G پتانسیل اندازه گیری شده با گذشت زمان به سمت منفی می گراید و نشان می دهد که جذب آب در زیر پوشش ناحیه سالم ، در حال افزایش است و واکنش خوردگی کربن استیل رو به افزایش است . می توان نتیجه گرفت ، هرچه مقدار E_{ocp} (vs.SCE) منفی تر باشد واکنش خوردگی کربن استیل رو به افزایش است و جدایش پوشش بیشتر می شود.
- در خصوص نمونه H ، مقدار E_{ocp} (vs.SCE) نسبت به زمان تقریباً ثابت می باشد ، که می توان نتیجه گرفت میزان جدایش پوشش تقریباً با سرعت ثابت پیش می رود .
- در نمونه B تا روز سیزدهم افزایش قلیائیت در محلول وجود دارد، در نتیجه بیشترین جدایش پوشش صورت می گیرد و پس از آن تا روز بیست و هشتم این مقدار تقریباً ثابت باقی می ماند، یعنی ناحیه زیر پوشش کاملاً قلیایی شده و از یون ها اشباع می شود .
- در نمونه G ، قلیائیت با یک شیب خیلی کم افزایش دارد، یعنی از روزهای آغازین تست، محیط شروع به قلیایی شدن می کند ، در نتیجه جدایش پوشش خیلی زود آغاز می شود.
- در نمونه H ، pH الکترولیت از روزهای آغازین تست تقریباً ثابت است ولی در روز سیزدهم شدیداً افزایش می یابد و جدایش پوشش صورت می گیرد ولی پس از آن کاهش قلیائیت وجود دارد، که می توان نتیجه گرفت جدایش با سرعت ثابت پیش می رود .
- هرچه هدایت اکی والان حد الکترولیت بیشتر باشد، هدایت جریان الکتریکی بیشتر است در نتیجه میزان جدایش در کلرید پتاسیم(نمونه G)بیشتر از کلرید سدیم(نمونه B) است.
- در نمونه H خروج هیدروژن به کندی صورت می گیرد و رسوب سفید رنگی روی حفره را تقریباً پوشانده است .
- بیشترین جدایش پوشش هنگامی اتفاق می افتد که نسبت کاتیون به آنیون ۱:۱ باشد.



منابع

- [1] C. Dong, A. Fu, X. Li, Y. Cheng, *Electrochimica Acta*, 54 (2008) 628-633.
- [2] R.N. Parkins, *Corrosion'2000*, NACE, Houston, 2000, paper No.363.
- [3] National Energy Board, Report of Public Inquiry Concerning Stress Corrosion Cracking on Canadian Oil and Gas Pipelines, MH-2-95, 1996.
- [4] H. Leidheiser, J.R. Wang, L. Igetoft, *Progress in Organic Coatings* 11 (1983) 19.
- [5] J. Zhang, J. Hu, J. Zhang, C. Cao, *Progress in Organic Coatings*, 49 (2004) 293-301.
- [6] J. Neshati, F. Rezaei, E. Akbarinezhad, *Surface Engineering*, 24 (2008) 470-474.
- [7] J. Luo, C. Lin, Q. Yang, S. Guan, *Progress in Organic Coatings*, 31 (1997) 289-295.
- [8] J. Watts, *The Journal of Adhesion*, 31 (1989) 73-85.
- [9] F. Deflorian, S. Rossi, *Electrochimica. Acta*, 51 (2006) 1736-1744.
- [10] D. Flavio, R. Stefano, *Electrochimica. Acta*, 5 (2006) 1736-1744.
- [11] J. Skar, U. Steinsmo, *Corrosion Science*, 35 (1993) 1385-1389.
- [12] M. Horner, F. Boerio, *The Journal of Adhesion*, 32 (1990) 141-156.
- [13] M. Stratmann, A. Leng, W. Fürbeth, H. Streckel, H. Gehmecker, *Progress in Organic Coatings*, 27 (1996) 261-267.
- [14] M. Rohwerder, E. Hornung, M. Stratmann, *Electrochimica Acta*, 48 (2003) 1235-1243.
- [15] Steel tubes and fitting for onshore and offshore pipelines-External applied liquid polyurethane and polyurethane modified coatings, BS EN 10290, London, UK, 2002.
- [16] Recent corrosion protective steel pipes, JFE technical report No.7, available at <http://www.jfe-steel.co.jp/en/research/report/007/pdf/007-15.pdf> (accessed January(2006)).
- [17] J. Neshati, M. Fardi, *Surface Engineering*, 20 (2004) 299-303.
- [18] F.Deflorian, L.Fedrizzi, S.Rossi, P.L.Bonora, *Electrochimica Acta*, 44 (1999) 4243.
- [19] J.J.Suay, M.T.Rodriguez, K.A.Razzaq, J.J.Carpio, J.J.Saura, *Prog.in Organic Coatings*, 46(2003)121.