

بررسی عوامل موثر بر روی مقاومت در برابر خوردگی لایه مرکاپتو سیلان توسط روش EIS

احمد رضوانی بروجنیⁱ، محسن محسنیⁱⁱ، محمدرضا محمدزاده عطارⁱⁱⁱ

چکیده

هدف این تحقیق بررسی عوامل موثر بر مقاومت در برابر خوردگی لایه پلیمر آلی معدنی مرکاپتوسیلانی بر روی زمینه فولاد نرم با آزمون EIS می باشد. pH، طبیعت و غلظت وزنی، نسبت مولی و دما از مهمترین عواملی می باشد که در این تحقیق بررسی گردیدند. مشخص شد که نوع آماده سازی سطح، pH و نوع خشک شدن لایه سیلانی (حرارت دهی لایه سیلان) به ترتیب بیشترین اثر را بر روی مقاومت لایه سیلان دارا بوده اند و غلظت محلول و میزان زمان ماندگاری محلول کمترین اثر را بر روی میزان مقاومت پوشش دارد. با کاهش pH محلول سیلان به سمت pH های اسیدی و کمتر از ۶ مقاومت به خوردگی پوشش بدلیل تشکیل پیوند سیلوکسانی پرایمر سیلان با زمینه افزایش می یابد. همچنین حرارت دهی لایه سیلانی مقاومت پوشش را در برابر خوردگی افزایش می دهد ولی پس از ۳۰ دقیقه حرارت دهی در ۱۰۰ درجه سانتیگراد، شیب افزایش مقاومت کم می شود. دلیل این امر به پیشی گرفتن واکنش تراکم سیلان با خود به جای واکنش با سطح نسبت داده می شود.

کلمات کلیدی

بهبود دهنده های چسبندگی سیلانی، مرکاپتو سیلان، فولاد نرم، مقاومت در برابر خوردگی، EIS

An Investigation of Effective Parameters on Corrosion Resistance of Mercaptosilane using EIS method

A. Rezvani, M. Mohseni, M. Attar

ABSTRACT

Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) has been conducted to investigate the corrosion resistance of the Mercapto silane primer that has been coated on the mild steel. Characteristics of the silane layer depends on the condensation and hydrolysis reactions rate including pH, temperature, reaction time, reagent concentration, nature and aging of solution, molar ratio, and drying. To study the effect of these factors, the design of experiment by means of mix Taguchi method was performed. Results revealed that surface treatment method, pH and drying of the silane layer are the most effective factors on the corrosion resistance of the silane layer. The resistance of the coating was improved as pH increased. Annealing of the silane layer also shown results in better corrosion resistance.

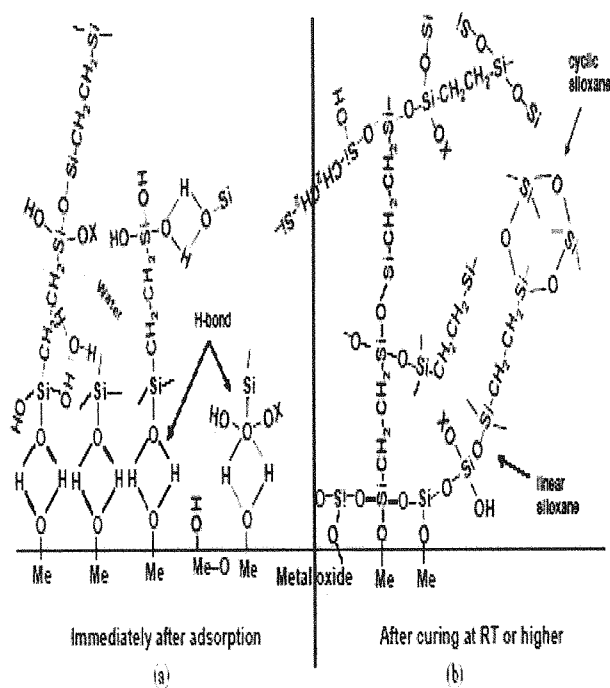
KEYWORDS

Silane adhesion promoter, Mercapto silane, Mild steel, Corrosion resistance, EIS

ⁱ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی پلیمر Email: Ahmadrezvani59@yahoo.com

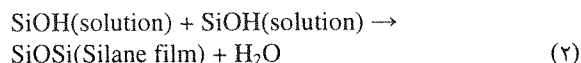
ⁱⁱ عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی امیر کبیر - دانشکده مهندسی پلیمر, Email: mmohseni@aut.ac.ir

ⁱⁱⁱ عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی امیر کبیر - دانشکده مهندسی پلیمر Email: attar@aut.ac.ir



شکل (۱): پیوند دهی سیلانها به سطح فلز به طور شماتیک [۱۲]

یالینکه گروههای SiOH اضافی جذب شده روی سطح فلز باخودشان متراکم می‌شوند و تشکیل فیلم سیلوکسانی (SiOSi) می‌دهند.



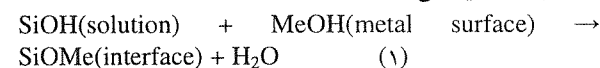
علت پیوند عالی فیلم سیلانی به روی سطح فلز نیز همین پیوندهای SiOSi و SiOMe ذکر شده است (شکل ۲). همچنین با افزایش تعداد گروههای هیدرولیز شونده (OR) مانند بیس سیلانها مانند BTSE یا bis-sulfur silane در کاربری در محافظت در برابر خوردگی لایه سیلانی افزایش می‌یابد [۱۶]، [۱۵]، [۱۴]، [۱۳] که بدلیل افزایش احتمال واکنش با سطح و ایجاد فصل مشترک بسیار چگالتر و متراکم‌تر است.

علاوه بر کاربری ضد خوردگی بالا، علت دیگر استفاده از فیلمهای سیلانی خواص مکانیکی این فیلمها می‌باشد. فیلمهای سیلانی روی فلزات، توانایی مقاومت در برابر آسیبهای مکانیکی حاصل از ضربه، خراش و سایش را دارند [۱۷]. مشخصات و خواص لایه سیلانی وابسته به عواملی است که بر روی سرعت واکنشهای هیدرولیز و تراکم تاثیر می‌گذارند. برای مثال، می‌توان به pH، دما و زمان واکنش، غلظت واکنشگرها، طبیعت و غلظت کاتالیست، نسبت مولی، زمان و درجه حرارت، ماندگاری و خشک شدن اشاره کرد. از میان عوامل ذکر شده pH، طبیعت و غلظت، نسبت مولی و دما از مهمترین عوامل می‌باشند. در این

به منظور حفظ چسبندگی و بالا بردن مقاومت در برابر خوردگی فلزات می‌توان از پلیمرهای آلی- معدنی بهبود دهنده چسبندگی پایه سیلانی، به دلیل قابلیت حفظ چسبندگی در رطوبت استفاده کرد.

در سالهای اخیر تحقیق بر روی فیلمهای نانومتری تشکیل شده از مواد بر پایه سیلانی به عنوان مواد شیمیایی سازگار با محیط، به خاطر داشتن مقاومت در برابر خوردگی بسیار خوب علاوه بر افزایش چسبندگی عالی رنگ بر روی زمینه، به عنوان جایگزینی برای دیگر آماده‌سازی‌های موجود (به خصوص کرومات) ، رو به افزایش است [۱]، [۲]، [۳]، [۴]، [۵]، [۶]، [۷]. به منظور افزایش چسبندگی پوششهای آلی بر روی زمینه‌های معدنی یا فلزی سیلان می‌تواند به عنوان پرایمر یا به صورت افزودنی درون روکش بکار گرفته شود. سیلانها به عنوان یک گروه سازگار با محیط زیست، به طور قابل قبولی می‌توانند سطح فلز را برای ۶ ماه تا ۱ سال در برابر خوردگی محافظت کند و به عنوان پیش آماده سازی قبل از اعمال پوشش عمل نمایند [۱]، [۴]، [۵]. ضخامت لایه سیلانی از محلول ۵٪ سیلان حدود ۲۰۰-۴۰۰ nm واز محلول ۲٪ سیلانی ۱۰۰ nm گزارش شده است. این لایه نازک در زیر روکشهای اپوکسی یا پلی یورتان، پلی استر، اکریلیک، نشان داده است که می‌تواند تاخیر اندازنده خوردگی مناسبی محسوب گردد [۸]، [۹]، [۱۰]، [۱۱].

تری الکوکسی سیلانها با فرمول عمومی $\text{R}^-(\text{CH}_2)_n\text{NSi}(\text{OR})_3$ می‌باشند که R^- نشانگر عاملیت آلی و OR گروه آلکوکسی با قابلیت هیدرولیز شدن است. در دهه گذشته مطالعات زیادی بر روی مکانیزم چسبندگی این سیلانها بطور گسترده انجام شده است [۱۰]، [۱۱]. بر طبق این تئوریا با یک توافق عمومی مکانیزم پیوند دهی سیلانها به سطح فلز به طور شماتیک واکنش شیمیایی با سطح است (شکل ۲) [۱۲]. همانطور که در شکل ۲(a) نشان داده شده است، زمانی که یک فلز داخل یک محلول رقیق سیلانی (۲-۵٪) می‌شود گروههای سیلانول (Si-OH) به طور خود به خود از طریق پیوندهای هیدروژنی روی سطح فلز جذب می‌شوند. هنگام خشک شدن دو نوع واکنش تراکمی در ناحیه فصل مشترک روی می‌دهد؛ گروههای سیلانول از محلول سیلان با هیدروکسیلهای فلزی از سطح اکسید فلزی واکنش داده و پیوندهای کوالانسی متالو سیلوکسان (MeOSi) را مطابق واکنش ۱ تشکیل می‌دهند.



تحقیق هدف بررسی اثرات عوامل موثر بر مقاومت به خوردگی لایه پلیمری آلی معدنی بر پایه مرکاپتوسیلان بر روی زمینه فولاد نرم با استفاده از آزمون EIS می‌باشد.

۲- مواد مصرفی و روش آزمایشها

مواد مورد استفاده :

۱-سیلان: گاما-مرکاپتو پروپیل تری متوکسی سیلان با خلوص ۹۹/۹ درصد، ساخت شرکت GE SPECIAL MATERIAL با نام تجاری SILQUEST A-189.

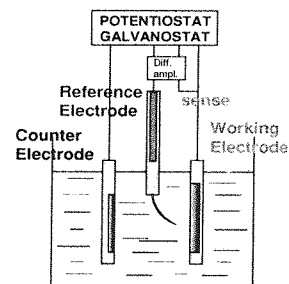
۲- ورقه‌های فلزی : فولاد نرم به ابعاد $7 \times 14 \text{ cm}$ و ضخامت 0.8 mm .

۳- اتانول، استن، MEK، اسید هیدروکلریک، از نوع آزمایشگاهی ساخت شرکت Merck.

۴- موم وزین کلوفونی با نسبت ۱/۲ به ۳ NaCl صنعتی. دستگاه مورد استفاده در آزمون EIS دستگاه AC Gill (ACM Instrument) - مدل AUTOLAB G12 ساخت شرکت AUTOLAB شامل تجهیزات :

الکتروود مرجع (RE) - از نوع Ag/AgCl (3N KCL)، الکتروود کمکی (AE) از جنس پلاتین با سطح 1 cm^2 . سیم رابط جهت برقراری اتصال الکتریکی و سل سه دهانه. تحلیل نتایج نیز با دستگاه FRA یا Frequency Response Analyser انجام شد.

در شکل ۲ به طور نموداری نحوه قرار گرفتن الکتروودهای کمکی و مرجع و نمونه نشان داده شده است.



شکل (۲): نحوه قرار گرفتن الکتروودهای کمکی و مرجع و نمونه

تهیه نمونه‌ها:

همانطور که گفته شد عوامل موثر بر روی خواص لایه سیلانی عبارتند از pH، دما، زمان واکنش، غلظت واکنشگرها، طبیعت و غلظت کاتالیست، درجه حرارت، ماندگاری، خشک شدن و نوع زمینه [۲۰]، [۱۹]، [۱۸]. در ابتدا برای تعیین نوع حلال پایداری محلولهای ۲، ۳/۵، ۵ درصد مرکاپتو سیلان در حلالهای اتانول-آب مقطر با نسبت ۴:۱، اتانول-آب با نسبت ۵:۵، استن به آب ۴:۱، MEK به آب ۴:۱ و MEK خالص تهیه و

پایداری محلولها طی زمان بررسی شد. نتیجتاً از حلال اتانول به آب با نسبت ۵:۹۵ به خاطر پایداری بالای آن استفاده گردید. در واقع با بالا رفتن درصد آب در سیستم به علت افزایش سرعت هیدرولیز سیلانها و نیز افزایش امکان انجام واکنشهای تراکمی سیلانولها با یکدیگر و با آب، رسوب سریعتر تشکیل شده و محلول کدر می‌گردد. جهت تعیین محدوده pH پایداری محلول مرکاپتو سیلان، محلولهایی ۲، ۳/۵، ۵ درصد مرکاپتو سیلان در pH های ۲، ۶، ۷ و ۹ تهیه شد (pH با محلول های بافر کالیبره گردید و دقت آن ± 0.1 بود). مشاهده گردید که با بالاتر رفتن pH، محلول سیلان شروع به کدر شدن می‌کند به طوری که وقتی میزان pH به ۹ برسد به سرعت محلول شیری رنگ می‌شود (pH طبیعی محلول مرکاپتوسیلان برابر ۶ است). در واقع به علت حضور گروه اسیدی SH در سیستم با قلیایی شدن محلول سیلانولها با تشکیل نمک رسوب کرده و باعث کدر شدن محلول می‌شوند.

متغیرها و سطوح مطابق جدول ۱ انتخاب شدند و به وسیله نرم افزار Minitab به روش تاگوچی میکس مطابق ماتریس L16 طراحی آزمایش انجام شد. به منظور شستشوی اسیدی، ورقه‌های فلزی به مدت ۱۵۰ ثانیه در محلول اسید هیدروکلریک ۲۰٪ با تکان دادن مداوم قرار گرفتند و برای شستشوی حلالی نیز با استن و اتانول ۲ بار شستشو انجام شد تا هیچ گونه آلودگی بر روی سطح باقی نماند. محلولهای سیلانی نیز پس از تهیه طبق شرایط جدول، به مدت ۲ ساعت با همزن مغناطیسی همزده شدند. پس از آماده سازی سطح و محلولهای سیلان، ورقه‌های فلزی، اعمال لایه سیلانی به روش غوطه‌وری و تحت سرعت ثابت 1 mm/min اعمال لایه سیلان انجام شد. پس از تهیه نمونه‌ها به منظور انجام آزمون EIS سطح نمونه‌ها بجز یک مساحت 1 cm^2 با مخلوط موم و رزین کلوفونی پوشانده شد و نمونه‌ها برای مدت ۱۵ دقیقه در محلول ۳/۵٪ NaCl غوطه‌ور شده و سپس آزمون EIS انجام شد.

۳- نتایج

برای هر نمونه ۲ بار تکرار در نظر گرفته شد که نتایج میانگین آن در جدول ۳ آورده شده است. نتایج مقاومت لایه سیلانی که با نرم افزار Minitab تحلیل و در شکل ۴ آورده شده است. در جدول ۴ نیز آنالیز واریانس نتایج نشان داده شده است.

جدول ۱: متغیرها و سطوح آن

متغیر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
غلظت ترکیب سیلان محلول	۲٪ وزنی	۳٪ وزنی	۴٪ وزنی	۵٪ وزنی
pH محلول	۶ (خنثی)	۲ (اسیدی)	-	-
زمان ماندگاری محلول	۱ روز	۱ هفته	-	-
خشک شدن لایه سیلان	۲۴ ساعت در دمای محیط	۱۰ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد	۲۰ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد	۶۰ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد
		۲۴ و ۲۴ ساعت در دمای محیط	۲۴ و ۲۴ ساعت در دمای محیط	۲۴ و ۲۴ ساعت در دمای محیط
		حلال	اسید شویی	اسید شویی
		اسید شویی	اسید شویی	اسید شویی

ع- بحث

با توجه به نتایج بدست آمده در روند تغییرات مقاومت پوشش، مشخص شد که نوع آماده سازی سطح، pH و نوع خشک شدن لایه سیلانی (حرارت دهی لایه سیلان) به ترتیب بیشترین اثر را بر روی مقاومت لایه سیلان دارا بوده اند و غلظت محلول و میزان زمان ماندگاری محلول کمترین اثر را بر روی میزان مقاومت پوشش دارا بوده و به عبارت دیگر اثر معناداری ندارند.

جدول ۳: نتایج آزمون EIS سطح لایه سیلانی تهیه شده روش

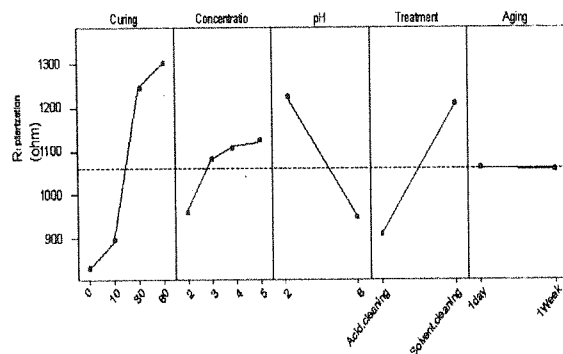
تاگوچی

	مقاومت پلاریزاسیون (اهم)	Log(Cdl) (F/cm ²)
۱	800.00	-4.303
۲	1270.00	-4.558
۳	560.00	-4.021
۴	700.00	-4.403
۵	1000.00	-3.795
۶	593.00	-3.652
۷	715.75	-4.288
۸	1278.00	-4.464
۹	726.00	-4.0765
۱۰	1612.66	-4.395
۱۱	1165.00	-4.302
۱۲	1100.00	-4.591
۱۳	1313.00	-3.823
۱۴	855.00	-3.971
۱۵	1768.00	-4.338
۱۶	1500.00	-3.977

جدول ۲: نمونه های تهیه شده به روش طراحی آزمایش تاگوچی

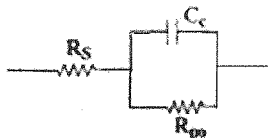
مدت ماندگاری	آماده سازی	pH	غلظت	نحوه پخت
۱ روز	حلال شویی	۲	۲	دمای محیط
۱ روز	حلال شویی	۲	۳	دمای محیط
۱ هفته	اسید شویی	۶	۴	دمای محیط
۱ هفته	اسید شویی	۶	۵	دمای محیط
۱ هفته	اسید شویی	۲	۲	10 min at 100°C
۱ هفته	اسید شویی	۲	۳	10 min at 100°C
۱ روز	حلال شویی	۶	۴	10 min at 100°C
۱ روز	حلال شویی	۶	۵	10 min at 100°C
۱ هفته	حلال شویی	۶	۲	30 min at 100°C
۱ هفته	حلال شویی	۶	۳	30 min at 100°C
۱ روز	اسید شویی	۲	۴	30 min at 100°C
۱ روز	اسید شویی	۲	۵	30 min at 100°C
۱ روز	اسید شویی	۶	۲	60 min at 100°C
۱ روز	اسید شویی	۶	۳	60 min at 100°C
۱ هفته	حلال شویی	۲	۴	60 min at 100°C
۱ هفته	حلال شویی	۲	۵	60 min at 100°C

منحنی اثرات اصلی



شکل (۳): نتایج آزمون EIS سطح لایه سیلانی تهیه شده روش

تاگوچی



شکل (۴): مدار معادل برای لایه سیلانی

اثر حرارت دهی لایه سیلانی (Curing):

با حرارت دهی لایه سیلانی هنگام خشک شدن در واقع با انرژی دادن به سیلانولهای روی سطح به انجام واکنشهای تراکمی در لایه سیلانی کمک می‌شود و در نتیجه تعداد سیلانولهای بیشتری با هم و یا با زمینه واکنش داده و درصد سیلوکسان (Si-O-Si) همچنین (Si-O-Fe) در لایه سیلانی افزایش می‌یابد. وجود پیوندهای سیلوکسانی بازمینه و با پیشساز اولیه با روشهای آنالیز سطحی نظیر FTIR-ATR به اثبات رسیده است [۲۱]. با توجه به اینکه نقطه ایزوالکتریک زمینه بکاررفته در این تحقیق حدود ۸/۵ می‌باشد، بنابراین در بالای نقطه ایزوالکتریک، سطح دارای بار منفی است و امکان جذب گروه‌های عاملی سیلان بر روی سطح فلز کم می‌گردد. در حالیکه در زیر نقطه ایزوالکتریک سطح دارای بار مثبت می‌شود. در نتیجه تشکیل پیوندهای Si-O-Fe افزایش می‌یابد. با کاهش pH، واکنش‌های هیدرولیز سیلان در محلول و تشکیل سیلانول‌ها بیشتر انجام شده و در نتیجه گروه‌های سیلانول (Si-OH) بیشتری داخل محلول بوجود می‌آید. همچنین به خاطر این که pH نقطه ایزوالکتریک سطح اکسید آهن حدود ۸/۵ است و در هر دو میزان pH برابر ۲ و pH برابر ۶ زیر نقطه ایزوالکتریک قرار داشته و در نتیجه سطح اکسید آهن بخاطر جذب پروتن دارای بار الکتریکی مثبت است و با کاهش pH میزان بارهای مثبت روی سطح افزایش می‌یابد. پس با کاهش pH هم هیدرولیز سیلان در محلول و تشکیل گروه‌های سیلانول بیشتر شده و هم امکان جذب سیلان روی بیشتر می‌گردد. همچنین با کاهش pH امکان تشکیل پیوند Si-O-Fe در اثر واکنش Si-OH-های محلول و Fe-OH-های روی سطح، افزایش می‌یابد که این عوامل باعث می‌شوند که درمیزان pH برابر ۲ فیلم سیلانی قویتر، ضخیمتر و با پیوندهای کوالانسی بیشتری تشکیل گردد [۲۱]، [۹]. با توجه به ساختار سیلوکسان با افزایش درصد پیوندهای سیلوکسان، در اثر چگال تر شدن لایه سیلان، نفوذ آب و یونها از لایه سیلانی کاهش می‌یابد و در نتیجه نفوذ آب به زمینه و ایجاد واکنشهای کاتدی و آندی روی سطح فولاد نرم و ایجاد خوردگی با تاخیر بیشتری انجام می‌گیرد. افزایش مقاومت به خوردگی پوشش در حضور لایه سیلانی با مشاهدات اندازه گیری چسبندگی به روش آزمون pull-off تأییدی است بر نقش لایه مرکاپتوسیلان بر افزایش

با توجه به نتایج مشاهده شده می‌توان مدار معادل پوشش را مطابق (R_p, R_{pp}, C_c) در نظر گرفت (شکل ۴). به عبارت دیگر اثر حضور لایه سیلانی روی سطح با مقاومت پلاریزاسیون به عنوان مقاومت کل بررسی می‌گردد. با کاهش pH، مقاومت پوشش افزایش یافته است. دلیل اصلی این پدیده افزایش میزان هیدرولیز در pH های کم (اسیدی) و کاهش میزان تراکم می‌باشد. عملکرد سیلان به عنوان پرایمر ناشی از هیدرولیز گروه‌های آلکوکسی و تراکم آنها با سطح و با دیگر گروه‌های سیلانول است. در pH اسیدی این پدیده کمتر اتفاق می‌افتد [۲۱].

جدول ۴: آنالیز واریانس مقاومت پلاریزاسیون

	DF	Seq ss	F	P
مدت ماندگاری	۱	۸۶	۰	۰/۹۸۱
آماده سازی	۱	۲۵۵۳۲۸	۲/۵۱	۰/۰۶۴
pH	۱	۱۲۸۸۰۷	۰/۹۱	۰/۰۶۷
غلظت	۳	۷۱۰۵۹	۰/۱۷	۰/۹۱۵
پخت	۳	۷۰۴۳۷۴	۱/۶۶	۰/۰۷۴
خطا	۵	۸۴۹۸۶۷	-	-
مجموع	۱۵	۲۱۰۹۵۲۲	-	-

حرارت دهی لایه سیلانی مقاومت آن را در برابر خوردگی افزایش می‌دهد ولی پس از ۳۰ دقیقه حرارت دهی در ۱۰۰ درجه سانتیگراد، شیب افزایش مقاومت کم می‌شود. با حرارت دهی لایه سیلانی که بصورت پرایمر اعمال شده است موجب تراکم بیشتر آن با خود شده و واکنش آن با سطح را کم می‌نماید [۱۷]، [۱۴]. نتیجه این عمل کاهش انرژی سطحی به دلیل تشکیل یک ترکیب سیلوکسانی روی سطح می‌باشد. واکنش سیلان با سطح در شرایط هیدرولیز و تراکم مناسب منجر به افزایش انرژی سطحی و بالا بردن استحکام پوشش از طریق ایجاد پیوندهای سیلوکسانی در داخل پوشش می‌گردد [۲۱]. این پدیده سازوکار اصلی افزایش چسبندگی این ترکیبات تلقی می‌گردد. افزایش مقاومت به خوردگی نمونه‌ها را می‌توان به افزایش چسبندگی ناشی از برقراری اتصال مستحکم تر به سطح قلمداد نمود. با آماده سازی سطح به روش شستشوی اسیدی، مقاومت به خوردگی نسبت به نمونه‌های شستشو شده به روش حلالی کاهش می‌یابد.

با افزایش غلظت سیلان مقاومت لایه سیلانی قدری افزایش می‌یابد ولی این افزایش قابل توجه نیست و با توجه به جدول ۴ غلظت و زمان ماندگاری اثر معناداری روی مقاومت در برابر خوردگی لایه سیلانی ندارد.

اثر آماده سازی سطح

با شستشوی اسیدی سطح فولاد نرم و برداشتن لایه اکسید آهن روی سطح مقاومت پلاریزاسیون کاهش می‌یابد. احتمال دارد با برداشته شدن این لایه در اثر افت مقاومت سطح مقاومت کل نیز کاهش یافته باشد. همچنین ممکن است که بدلیل تغییر اکسید آهن سطح در اثر برداشتن لایه‌های سست و شکنده FeO و Fe₂O₃ و Fe₃O₄ و تشکیل گروه‌های Fe-OH تازه روی سطح، واکنش Fe-OH و Si-OH و تشکیل Si-OFe و O-Fe افزایش یافته ولی باعث کاهش واکنشهای تراکمی بین سیلانولها و تشکیل پیوندهای Si-O-Si در فیلم سیلانی شده و در نتیجه آن مقاومت کل کاهش یافته باشد.

با افزایش غلظت، مقاومت لایه سیلانی کمی افزایش می‌یابد ولی این افزایش قابل توجه نبوده و اثر معناداری روی اختلاف فاز و مقاومت ندارد. در مورد زمان ماندگاری محلول نیز عدم اختلاف نمونه‌ها مشهودتر بوده و زمان ماندگاری محلول بر روی مقاومت پلاریزاسیون تقریباً بی اثر است.

۵- نتیجه گیری کلی :

- ۱- مدار معادل پوشش سیلانی R(QR) بود. به عبارت دیگر اثر حضور لایه سیلانی روی سطح با مقاومت پلاریزاسیون به عنوان مقاومت کل بررسی می‌گردد.
- ۲- با کاهش pH محلول سیلان مقاومت لایه سیلان افزایش یافته است.
- ۳- حرارت دهی لایه سیلانی مقاومت آن را در برابر خوردگی افزایش می‌دهد ولی پس از ۳۰ دقیقه حرارت دهی در ۱۰۰ درجه سانتیگراد، شیب افزایش مقاومت کم می‌شود.
- ۴- با آماده سازی سطح به روش شستشوی اسیدی، مقاومت نسبت به نمونه‌های شستشو شده به روش حلالی کاهش می‌یابد
- ۵- با افزایش غلظت مقاومت لایه سیلانی قدری افزایش می‌یابد ولی این افزایش قابل توجه نیست و اثر معنادار ندارد.
- ۶- غلظت و زمان ماندگاری اثر معناداری روی مقاومت در برابر خوردگی لایه سیلانی ندارد.
- ۷- با کاهش pH، واکنش‌های هیدرولیز سیلان در محلول و تشکیل سیلانولها بیشتر انجام شده و در نتیجه

گروه‌های سیلانول (Si-OH) بیشتری داخل محلول وجود دارد.

۸- با توجه به اینکه در هر دو میزان pH ۶ و ۲ زیر نقطه ایزو الکتریک قرار داشته و در نتیجه سطح اکسید آهن بخاطر جذب پروتن مثبت است و این مثبت بودن با کاهش pH افزایش می‌یابد. پس با کاهش pH هم هیدرولیز سیلان در محلول و تشکیل گروه‌های سیلانول بیشتر شده و هم امکان جذب سیلان روی بیشتر می‌گردد.

۹- با کاهش pH امکان تشکیل پیوند Si-O-Fe در اثر واکنش Si-OH های محلول و Fe-OH های روی سطح، افزایش می‌یابد که این عوامل باعث می‌شوند که در میزان pH برابر ۲، فیلم سیلانی قویتر، ضخیمتر و با پیوندهای کوالانسی بیشتری تشکیل گردد.

۶- مراجع

- [۱] Van Ooij, W.J.; Child, T.F; *Chemtech* 28 (1998) 26.
- [۲] Subramanian, V.; *Ph.D. Dissertation*, Department of Materials Science and Engineering, University of Cincinnati, 1999.
- [۳] Sundararajan, G.P.; *M.S. Thesis*, Department of Materials Science, 1999 and Engineering, University of Cincinnati, 2000.
- [۴] Van Ooij, W.J.; Zhu, D.; Sundararajan, G.P.; Jayaseelan, S.K.; Fu, Y.; Teredesai, N.; *Surface Eng.* 16, p.p 386, 2000.
- [۵] Van Ooij, W.J.; Zhu, D.; *Corrosion* 157, p.p 413 2001.
- [۶] Petrunin, M.A.; Nazarov, A.P. Mikhailovski, Yu. N.; *Journal of Electrochemical Soc.* 143, p.p 251, 1999.
- [۷] Beccaria, A.M.; Chiaruttini, L.; *Corrosion Science.* 41, p.p 885, 1999.
- [۸] Underhill, P.R.; Duquesnay, D.L.; Mittal, K.L.; (Eds.), *Silanes and Other Coupling Agents*, vol. 2, VSP, Utrecht, p.p 149, 2000.
- [۹] Plueddemann, E.P.; "*Silane Coupling Agents*", 2nd ed., Plenum Press, New York, 1991.
- [۱۰] Mittal, K.L.; (Ed.), "*Silanes and Other Coupling Agents*", VSP, Utrecht, 1992.
- [۱۱] K.L. Mittal (Ed.), *Silanes and Other Coupling Agents*, vol. 2, VSP, Utrecht, 2000.
- [۱۲] D. Zhu, W.J. Van Ooij, *Corrosion Science.*, 2177, 2003.
- [۱۳] Zhu, D.; Van Ooij, W.J.; *Journal of Adhesion Science & Technology.* 16, p.p 1235, 2002.
- [۱۴] Osterholtz, F.D.; Pohl, E.R.; *Journal of Adhesion Science & Technology.* 6, p.p 127, 1992.

- Oliver, W.C.; Pharr, G.M.; *Journal of Material. Res.* 7 [۱۵]
p.p1564, 1992.
- Parkhill, R.L.; Knobbe, E.T.; Donley, M.S.; *Progress* [۱۶]
in Organic . Coating. 41,p.p261, 2001.
- Owens, D.K.; Wendt, R.C.; *J. Appl. Polym. Sci.* 13 , [۱۷]
p.p 1740, 1969.
- Franquet, A.; Pen, C.Le.; Terryn, H.; Vereecken, J.; [۱۸]
Electrochemical Acta 48 ,2003.
- Khramv, A.N.; Balbyshev, V.N .;*Progress in Organic* [۱۹]
Coating , 47, 2003.
- Zhu, D.Q.; Van Ooij, W.J.; *Journal of Adhesion .* [۲۰]
Science & Technology 16 ,2002.
- Mohseni, M.; Mirabedini, M.; Hashemi, M.; [۲۱]
ThompsonG.E.; *Progress in Organic Coatings* 57,
307-313,2006.
- Rezvani, A.; *M.Sc Thesis*, Amirkabir University of [۲۲]
Technology, 2006.