

بررسی تأثیر عملیات سطحی پسیواسیون روی مقاومت به خوردگی فولاد زنگ‌نزن ۴۲۰ در محیط ۳/۵% NaCl ساکن

سید محمدصادق حسینی و کوروش جعفرزاده

دانشکده مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

آرش ربیعی و محسن صبوری

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت مقاله : ۹۰/۱۱/۴ - پذیرش مقاله : ۹۰/۱۲/۱۰)

چکیده

در این پژوهش تأثیر سه روش پسیواسیون شیمیایی، الکتروشیمیایی و الکتروشیمیایی - شیمیایی روی رفتار خوردگی فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی نوع ۴۲۰ در محیط ۳/۵% NaCl ساکن با استفاده از تکنیک‌های طیفسنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) و پلاریزاسیون دینامیکی و آنالیز کروم و آهن محلول پسیواسیون با روش ICP، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که امپدانس سطح نمونه به نسبت آهن به کروم حل شده در محلول پسیواسیون، ضخامت لایه‌های داخلی و خارجی فیلم پسیو و میزان همگنی این لایه‌ها وابسته است. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از روش الکتروشیمیایی - شیمیایی بهترین عملکرد را به لحاظ افزایش مقاومت به خوردگی ایجاد می‌کند و لایه پسیو تشکیل شده به دو روش شیمیایی و الکتروشیمیایی نیز عملکردی تقریباً مشابه داشته‌اند. همچنین نتایج حاکیست که فیلم پسیو تشکیل شده با هر سه روش فوق دارای مقاومت به خوردگی بالایی نسبت به فیلم پسیو تشکیل شده به صورت طبیعی (تشکیل شده در هوای مرطوب) بودند.

واژه‌های کلیدی: خوردگی، فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی نوع ۴۲۰، طیفسنجی امپدانس الکتروشیمیایی، پسیواسیون شیمیایی، الکتروشیمیایی، الکتروشیمیایی - شیمیایی، NaCl ۳/۵%

Effects of passivation on the corrosion resistance of 420 stainless steel in 3.5% NaCl solution

M. S. Hosseini and K. Jafarzadeh

Materials engineer, Maleke Ashtar University of Technology, Tehran

A. Rabiei and M. Sabouri

Department of Materials Engineering, Amirkabir University of Technology

(Received 23 January 2012, accepted 28 February 2012)

Abstract

In this study, effects of three methods of chemical, electrochemical and electrochemical - chemical passivation on corrosion behavior of martensitic stainless steel type 420 in 3.5% NaCl have been evaluated by d.c. potentiodynamic polarization, electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and analysis of Cr and Fe content in passivation solutions by Induction Coupled Plasma (ICP). The results showed that the impedance of surface was depend upon Fe/Cr ratio in passivation's solutions, inner and outer layers thickness of passive film and homogeneity of inner and outer layers. Also, The result indicated that electrochemical - chemical passivation provided the best performance in terms of increase corrosion resistance and the passive film formed by chemical and electrochemical passivation methods had the same functional. The result also suggested that the passive film formed with all three methods had higher corrosion resistance to passive film formed naturally (formed in moist air).

Keywords: Martensitic Stainless Steel Type 420, Electrochemical Impedance Spectroscopy, Chemical, Electrochemical and Electrochemical - Chemical Passivation, 3.5% NaCl

E-mail of corresponding author: Sadegh_hos374@yahoo.com

مقدمه

فولادهای زنگ‌نزن مارتزیتی از دسته آلیاژی هستند که در صنایع گوناگونی مانند نفت، گاز و پتروشیمی، صنایع نظامی، تجهیزات پزشکی و... به دلیل مقاومت به خوردگی قابل قبول و خواص مکانیکی مناسب و غیره کاربردهای زیادی دارند [۱]. اگرچه در این آلیاژها با توجه به وجود عنصر کروم به میزان حداقل ۱۰/۵٪ در فولادهای زنگ‌نزن، فیلمی پاسیو بصورت طبیعی روی سطح تشکیل می‌شود اما بدلیل حضور ناخالصی‌هایی مانند گوگرد و فسفر در زمان ساخت فولاد و عدم امکان حذف کامل ناخالصی‌ها از فولاد به لحاظ مسایل تکنولوژیکی و اقتصادی و قرارگیری این عناصر مضر در مرز دانه‌ها در زمان انجماد فولاد و همچنین آلوده شدن سطح به ذرات آهن در زمان ماشینکاری، محلهای مناسبی برای خوردگی موضعی خواهند بود. جهت افزایش مقاومت به خوردگی این آلیاژها و کاهش اثر ناخالصی‌ها و ذرات آهن وارد شده به سطح، عموماً از عملیات پاسیواسیون استفاده می‌شود. عملیات پاسیواسیون معمولاً با سه روش شیمیایی، الکتروشیمیایی و الکتروشیمیایی-شیمیایی انجام می‌گیرد [۳-۱]. اساس روشهای یاد شده انحلال انتخابی عناصر مضر در سطح و افزایش درصد ترکیبات مفید مانند اکسید کروم (Cr₂O₃) در سطح می‌باشد. جهت ارزیابی عملکرد لایه پاسیو ایجاد شده روی این آلیاژها از روشهای طیفسنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) و پلاریزاسیون دینامیکی بهره گرفته می‌شود.

لی کوک^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۰ تأثیر عملیات پاسیواسیون شیمیایی را روی مقاومت به حفره‌دار شدن را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که پاسیواسیون باعث کاهش

محل‌های مستعد برای حفره‌دار شدن می‌شود.

پارکاش^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۰ تأثیر عملیات پاسیواسیون الکتروشیمیایی روی مقاومت به خوردگی فولاد زنگ‌نزن LVM۳۱۶ بررسی کردند و نتیجه گرفتند که عملیات پاسیواسیون الکتروشیمیایی ضمن افزایش صافی سطح، باعث افزایش مقاومت به خوردگی در محیط بیولوژی شده و همچنین انجام عملیات پاسیواسیون شیمیایی بعد از پاسیواسیون الکتروشیمیایی نیز به طور قابل ملاحظه‌ای باعث افزایش مقاومت به خوردگی می‌شود [۱]. در این تحقیق هدف این است که فولاد زنگ‌نزن ۴۲۰ با سه روش شیمیایی، الکتروشیمیایی، شیمیایی-الکتروشیمیایی تحت عملیات پاسیواسیون قرار گرفته و با روشهای امپدانس الکتروشیمیایی، پلاریزاسیون دینامیکی و آنالیز محلول با روش ICP مورد ارزیابی قرار گرفته و بهترین روش پاسیواسیون برای افزایش مقاومت به خوردگی فیلم پاسیو انتخاب شود.

مواد و روش تحقیق

نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق از فولاد زنگ‌نزن مارتزیتی است که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است. این نمونه‌ها با کاغذ سنباده با گرید ۱۰۰ تا ۲۵۰۰ پرداخت شده و سپس با خمیر آلومینیم تا رسیدن به سطح آینه‌ای پولیش شدند. قبل از عملیات پاسیواسیون نمونه‌ها با استفاده از شستشو با آب مقطر در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱ ساعت و سپس با استن و در نهایت با آب مقطر چربی‌زدایی شدند. پس از چربی‌زدایی، نمونه‌ها به سه روش شیمیایی، الکتروشیمیایی و الکتروشیمیایی-شیمیایی تحت عملیات پاسیواسیون قرار گرفتند.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی نمونه آلیاژ فولاد زنگ‌نزن نوع ۴۲۰ برای انجام تست‌ها

عنصر	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	Fe
درصد وزنی	۰/۲۳	۰/۳۴	۰/۵۰	۱۲/۶۹	<۰/۱۲	<۰/۰۰۵	۰/۰۳	۰/۰۱۳	مابقی

². Prakash Sojitra

¹. Laycock

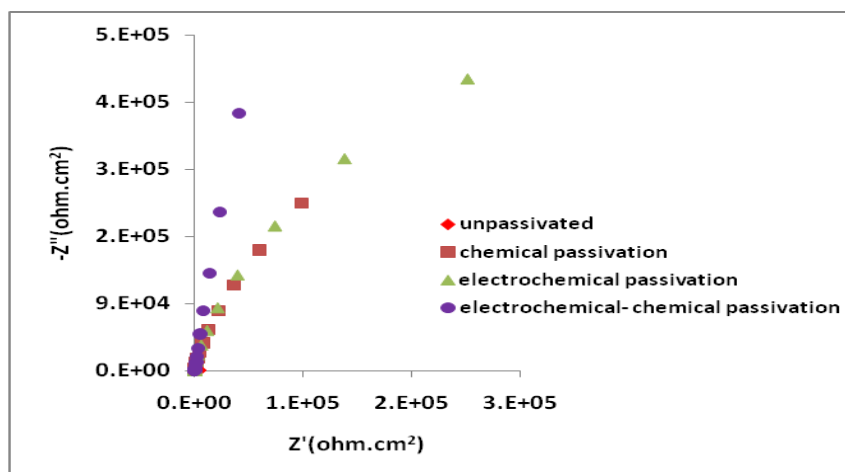
پسیواسیون با روش ICP با استفاده از دستگاه مدل SPECTRO CCD CIROS با دقتی در حد ppm آنالیز شدند.

نتایج و بحث

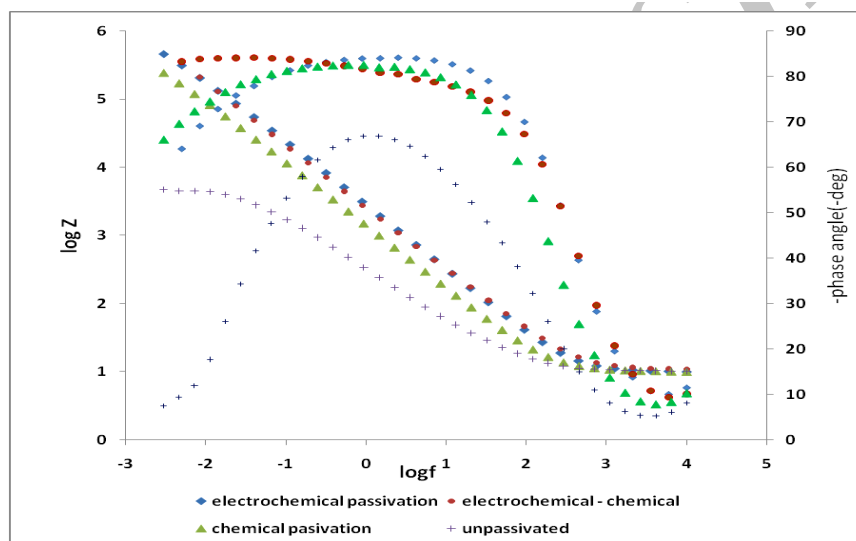
شکل ۱ نتایج منحنی‌های نایکویست مربوط به نمونه‌های پسیو نشده و نمونه‌های پسیو شده با روشهای شیمیایی، الکتروشیمیایی و الکتروشیمیایی - شیمیایی را نشان می‌دهد. شکل ۲ نیز منحنی‌های بد-امپدانس و بد-فاز مربوط به نمونه‌های پسیو نشده و نمونه‌های پسیو شده با روشهای شیمیایی، الکتروشیمیایی و الکتروشیمیایی - شیمیایی را نشان می‌دهد. با توجه به منحنی‌های نایکویست، بد-امپدانس و بد-فاز بدست آمده، مدار معادل نشان داده شده در شکل ۳ جهت انطباق و استخراج داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از انطباق این منحنی‌ها با مدار معادل مذکور در جدول ۲ ارائه شده است. شکل ۴ نیز منحنی‌های پلاریزاسیون دینامیکی مربوط به نمونه‌های پسیو نشده و نمونه‌های پسیو شده با روشهای شیمیایی، الکتروشیمیایی و الکتروشیمیایی - شیمیایی را نشان می‌دهد. جدول ۳ نیز نتایج حاصل از آنالیز کروم و آهن محلول‌های پسیواسیون با روش ICP را نشان می‌دهد. مطابق تحقیقات انجام شده، فیلم پسیو روی فولادهای زنگ‌نزن دارای یک لایه داخلی متراکم غنی از اکسید کروم و یک لایه خارجی با ترکیب هیدروکسید کروم حاوی اکسید آهن است [۱۱-۵]. لایه خارجی به دلیل وجود اکسید آهن بیشتر در محلول‌های اسیدی و لایه‌مانع داخلی به دلیل غنی بودن از اکسید کروم در محلول‌های قلیایی دارای مقاومت به خوردگی کمی هستند. با توجه به تقریباً اسیدی بودن محلول ۳/۵NaCl (pH = ۵/۷۲)، لایه خارجی در اثر حل شدن اکسید آهن متخلخل شده و الکترولیت به درون لایه خارجی نفوذ می‌کند. نفوذ الکترولیت به لایه خارجی باعث افت شدید مقاومت الکتریکی لایه خارجی می‌شود [۱۰].

بنابراین با توجه به مقادیر حاصل از انطباق مدار معادل شکل ۳ با طیف‌های امپدانس، مقدار RI که دارای مقاومت کمتری

در روش پسیواسیون شیمیایی از محلول با ترکیب Boric Acid 0.2M + 0.1M EDTA + 0.05M Citric Acid, pH=8.54، دمای ۶۰°C و مدت زمان ۴۵ دقیقه استفاده شد [۲]. جهت پسیواسیون الکتروشیمیایی از نمونه‌ها به عنوان آند و فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ به عنوان کاتد استفاده شد و پسیواسیون در محلول ۹۰٪ حجمی از محلول شش قسمت اسید فسفریک و چهار قسمت اسید سولفوریک و ۱۰٪ آب مقطر، درجه حرارت ۸۵°C، دانسیته جریان ۰/۵ آمپر بر سانتیمتر مربع و مدت زمان ۳ دقیقه انجام شد [۳]. در روش پسیواسیون الکتروشیمیایی - شیمیایی نیز ابتدا نمونه در محلول مربوط به روش الکتروشیمیایی پسیو و سپس بلافاصله بعد از شستشو با آب و خشک شدن در هوا، در محلول آماده شده با شرایط دمایی و زمانی روش شیمیایی قرار گرفته و در نهایت نمونه با آب مقطر کاملاً شستشو و با هوا خشک شد. کلیه نمونه‌ها قبل از انجام آزمایشات الکتروشیمیایی با استن چربی‌زدایی شده و در آب مقطر شستشو شدند. جهت انجام آزمایشات الکتروشیمیایی از نمونه‌ها به عنوان الکتروود کار، الکتروود مرجع Ag/AgCl و الکتروود کمکی فولاد زنگ‌نزن نوع ۳۱۶ استفاده شد. به منظور ارزیابی مقاومت به خوردگی نمونه‌ها، آزمایشات الکتروشیمیایی پس از پایداری پتانسیل مدار باز در الکترولیت ۳/۵NaCl با درجه حرارت ۲۵ درجه سانتیگراد، با استفاده از دستگاه AUTOLAB PGSTAT30 انجام شد. جهت ارزیابی فیلم‌های پسیو تشکیل شده ابتدا آزمایش امپدانس با میزان تهییج ۱۰mV ± نسبت به پتانسیل مدار باز در محدوده فرکانس ۳mHz - ۱۰kHz انجام گرفت و سپس آزمایش پلاریزاسیون دینامیکی در محدوده پتانسیل ۱۰۰mV - تا ۶۰۰mV + نسبت به پتانسیل مدار باز و با سرعت اسکن ۰/۱۷mV/s انجام گرفت. در این تحقیق جهت اطمینان از پایدار بودن سیستم در زمان انجام آزمایش امپدانس الکتروشیمیایی، طیف امپدانس یکبار از فرکانس بالا به پایین و سپس از پایین به بالا بدست آمده که برای تمام نمونه‌ها طیف‌های بدست آمده در هر دو حالت کاملاً بر هم منطبق بوده که نشان دهنده پایدار بودن سیستم است [۴]. بعد از پسیواسیون، میزان Fe و Cr حل شده در محلولهای



شکل ۱. نمودار نایکوئیست مربوط به نمونه‌های پاسیو شده به روشهای شیمیایی، الکتروشیمیایی، الکتروشیمیایی- شیمیایی و نمونه پاسیو نشده



شکل ۲. نمودار بد مربوط به نمونه‌های پاسیو شده به روشهای شیمیایی، الکتروشیمیایی، الکتروشیمیایی- شیمیایی و نمونه پاسیو نشده

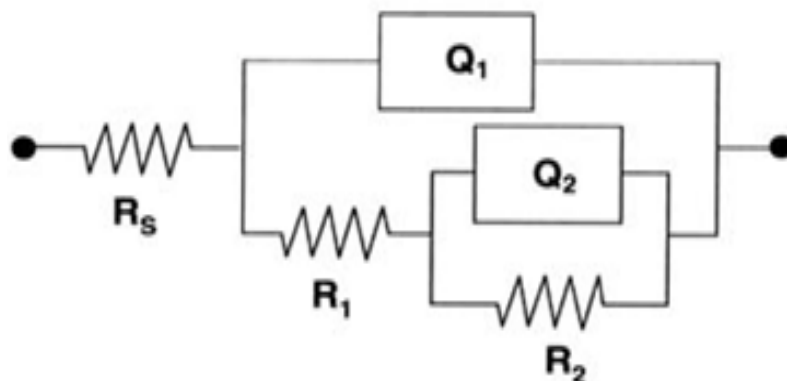
جدول ۲. نمودار بد مربوط به نمونه‌های پاسیو شده به روشهای شیمیایی، الکتروشیمیایی، الکتروشیمیایی- شیمیایی و نمونه پاسیو نشده

	$R_s (\Omega.cm^2)$	$Y_{01}(\mu Fcm^{-2}S^{-n})$	n_1	$R_1(\Omega.cm^2)$	$Y_{02}(\mu Fcm^{-2}S^{-n})$	n_2	$R_2 (k\Omega.cm^2)$
ECP ¹	۱۰/۹	۲۷/۳۳	۰/۹۲	۲۸۴۰	۸/۱۴	۱	۲۵۰۰
EP ^۲	۸/۱۱	۴/۵۸	۰/۸۴	۴/۲۶	۳۰/۹۱	۱	۱۱۱۷
CP ^۳	۹/۵	۱۷/۸۳	۰/۸۷	۳/۱۳	۳۹/۸۲	۰/۹۶	۸۴۴
Unpassivated	۹/۹۱	۸۹/۳۴	۰/۸۱	۱۰۳	۲۵/۸۳	۰/۸۱	۴/۹۷

¹. Electrochemical - Chemical passivation

². Electrochemical Passivation

³. Chemical Passivation



شکل ۳. مدار معادل استفاده شده برای انطباق با طیف‌های امپدانس

پایداری فیلم پسیو تشکیل شده بر روی نمونه پسیو شده به روش الکتروشیمیایی - شیمیایی نسبت به دو نمونه پسیو شده به روش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی بیشتر است [۱۳]. با ملاحظه نمودار نایکویست نشان داده شده در شکل ۱ نیز نمونه پسیو شده به روش الکتروشیمیایی - شیمیایی دارای قطر به مراتب بیشتری نسبت به دو روش دیگر است که نشان دهنده بالاتر بودن مقاومت پلاریزاسیون نمونه پسیو شده به روش الکتروشیمیایی - شیمیایی نسبت به نمونه‌های پسیو شده با دو روش شیمیایی و الکتروشیمیایی است که با نتایج مربوط به انطباق مدار با طیف امپدانس (جدول ۲) مطابقت دارد. با توجه به مقادیر مربوط به عناصر مدار (جدول ۲)، هم لایه خارجی و لایه مانع مربوط به نمونه پسیو شده به روش الکتروشیمیایی - شیمیایی همگن‌تر بوده (n_1 و n_2 بیشتر) و همچنین دارای ضخامت لایه مانع بیشتری است (مقادیر C_2 کمتر) در نتیجه دارای مقاومت پلاریزاسیون بیشتری است [۱۳]. بالاتر بودن مقدار R_1 برای نمونه پسیو شده به روش الکتروشیمیایی - شیمیایی می‌تواند به دلیل همگن‌تر بودن و کمتر معیوب بودن لایه خارجی (مقدار n_1 بالاتر) باشد. بالاتر بودن مقدار R_1 برای نمونه پسیو نشده نسبت به دو روش شیمیایی و الکتروشیمیایی شاید به دلیل وجود محصولات خوردگی است. دو نمونه پسیو شده به روش شیمیایی و الکتروشیمیایی نیز با توجه به نمودارهای بد و نایکویست دارای عملکرد نسبتاً نزدیکی می‌باشند. ولی به دلیل

شکل ۳. نسبت Fe/Cr در محلول‌های پالیسیون حاصل از آزمایش ICP

الکتروشیمیایی - شیمیایی	الکتروشیمیایی	شیمیایی	Fe/Cr
۹/۴	۸/۶۳	۸/۳	

است، مربوط به لایه خارجی است. نظر به اینکه ثابت زمانی ($\tau=RC$) با فرکانس رابطه عکس دارد [۱۲]، لذا با توجه به مقادیر عناصر مدار (جدول ۲) ثابت زمانی کوچکتر مربوط به فرکانس بالا و ثابت زمانی بزرگتر مربوط به فرکانس‌های پایین‌تر است. بنابراین (R_1Q_1) مربوط به ثابت زمانی اول و (R_2Q_2) مربوط به ثابت زمانی دوم می‌باشد. با مقایسه نتایج حاصل از ICP محلول‌های مربوط به نمونه‌های پسیو شده با روش‌های پالیسیون شیمیایی، الکتروشیمیایی و الکتروشیمیایی - شیمیایی (جدول ۳)، نسبت آهن به کروم حل شده در روش الکتروشیمیایی - شیمیایی در مقایسه با دو روش دیگر بیشتر است که نشان دهنده بیشتر بودن میزان اکسید کروم در فیلم پسیو تشکیل شده با روش الکتروشیمیایی - شیمیایی در مقایسه با دو روش دیگر است. همچنین با ملاحظه نمودارهای بد- فاز شکل ۲، طول ناحیه با زاویه بزرگ برای نمونه پسیو شده با روش الکتروشیمیایی - شیمیایی نسبت به دو نمونه پسیو شده با روش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی به مراتب بیشتر است. بنابراین با توجه به غنی‌تر بودن سطح از اکسید کروم و همچنین وسیع‌تر بودن ناحیه فرکانسی در زاویه فازی بزرگ در نمودار بد- فاز،

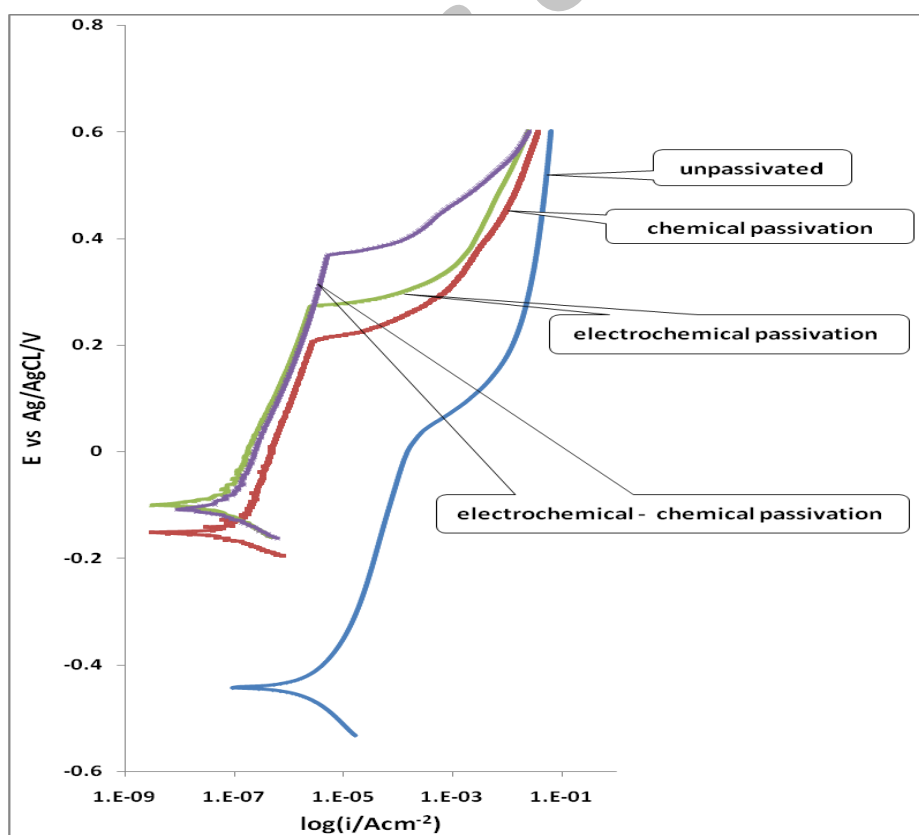
پسیواسیون الکتروشیمیایی است [۱۴ و ۱۳].

نتیجه‌گیری

۱- با مقایسه نتایج حاصل از امپدانس الکتروشیمیایی، پلاریزاسیون دینامیکی و ICP، رابطه‌ی مستقیمی بین نسبت Fe/Cr انحلالی در محلول پسیواسیون (غنی بودن سطح از اکسید کروم) و مقاومت پلاریزاسیون و پایداری لایه پسیو وجود دارد بنحوی که با افزایش نسبت Fe/Cr انحلالی در محلول پسیواسیون، مقاومت پلاریزاسیون و پایداری فیلم پسیو نیز افزایش می‌یابد.

۲- با مقایسه نتایج حاصل از پلاریزاسیون مربوط به هر سه روش پسیواسیون، پتانسیل حفره‌دار شدن نمونه پسیو شده به روش الکتروشیمیایی - شیمیایی از دو روش دیگر بیشتر است که می‌تواند به دلیل انحلال بیشتر ناخالصی‌هایی مانند MnS در سطح باشد.

ضخامت بالاتر لایه مانع (مقدار C2 کمتر) و همگن‌تر بودن این لایه (n2 بیشتر) نمونه پسیو شده به روش الکتروشیمیایی دارای مقاومت پلاریزاسیون بیشتری است. با توجه به شکل ۴، نمونه پسیو شده به روش شیمیایی دارای دانسیته جریان پسیو بیشتری نسبت به دو نمونه پسیو شده به روش‌های الکتروشیمیایی و الکتروشیمیایی - شیمیایی می‌باشد که نشان دهنده کمتر بودن اکسید کروم در فیلم پسیو است. طول ناحیه‌ی با زاویه فاز بزرگ برای نمونه‌های پسیو شده به روش الکتروشیمیایی - شیمیایی نسبت به نمونه‌های پسیو نشده و پسیو شده به روش شیمیایی و الکتروشیمیایی بیشتر است که نشان دهنده‌ی پایداری بیشتر فیلم پسیو تشکیل شده به روش الکتروشیمیایی - شیمیایی نسبت به بقیه نمونه‌ها است [۱۳]. همچنین نمونه پسیو شده با روش الکتروشیمیایی - شیمیایی دارای بیشترین پتانسیل حفره دار شدن است که نشان دهنده بیشتر حل شدن آخال‌هایی مانند MnS توسط روش



شکل ۳. منحنی‌های پلاریزاسیون دینامیکی نمونه‌های پسیو شده به روش‌های شیمیایی، الکتروشیمیایی، الکتروشیمیایی - شیمیایی و نمونه‌ی پسیو نشده

منابع

1. P. Sojitra, Ch. Engineer, D. Kothwala and A. Raval, *Electropolishing of 316LVM stainless steel cardiovascular stents: an investigation of material removal, surface roughness and corrosion behaviour*, Trends Biomater. Artif. Organs, 23(2010)115-121.
2. E. Cho, S. Ahn and H. S. Kwon, *Effects of EDTA on the electronic properties of passive film on Fe-20Cr in pH 8.5 buffer solution*, Electrochimica Acta 50(2005)3383-3389.
3. H. Hocheng, P. S. Kao, and Y. F. Chen, *Electropolishing of 316L Stainless Steel for Anticorrosion Passivation*, JMEPEG, 10(2001)414-418.
4. ASTM standard, B912, *Standard Specification for Passivation of Stainless Steels Using Electropolishing*, (2002).
5. I. Nacic and Digby D. Macdonald, *The passivity of Type 316l stainless steel in borate buffer solution*, Journal of Nuclear Materials 379(2008)54-58.
6. D. D. Macdonald, *The point defect model for the passive state*, Journal of the Electrochem. Society, 139(1992)3434-3449.
7. A. Fattah-alhosseini, M. A. Golozar, A. Saatchi and K. Raeissi, *Effect of solution concentration on semiconducting properties of passive films formed on austenitic stainless steels*, Corrosion Science, 52(2010)205-209.
8. A. Lasia and J. Bockris, *Electrochemical Impedance Spectroscopy and its Applications*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 32(1999)143-248
9. M. J. Freire, Carmezim, M. G. S. Ferreira and M. F. Montemor, *The electrochemical behaviour of stainless steel AISI304 in alkaline solutions with different pH in the presence of chlorides*, Electrochimica Acta 56(2011)5280-5289.
10. J. Pan, C. Leygraf, R. F. A. Jargelius-Pettersson, and J. Linde, *Characterization of High-Temperature Oxide Films on Stainless Steels by Electrochemical-Impedance Spectroscopy*, Oxidation of Metals, Chemistry and Materials Science, 50(1998)431- 455.
- ۳- پایداری فیلم پاسیو تشکیل شده بر روی نمونه‌های پاسیو شده به روش الکتروشیمیایی - شیمیایی نسبت به نمونه‌های پاسیو نشده و پاسیو شده به روش شیمیایی و الکتروشیمیایی به دلیل بیشتر بودن طول ناحیه‌ی با زاویه فاز بزرگ، بیشتر است.
- ۴- امیدانس سطح نمونه‌های پاسیو شده با ضخامت فیلم تشکیل شده رابطه مستقیم دارد بنحوی که با افزایش ضخامت (کاهش ظرفیت) مقاومت پلاریزاسیون افزایش می‌یابد.
- ۵- نمونه‌ی پاسیو شده با روش پاسیواسیون الکتروشیمیایی - شیمیایی نسبت به نمونه‌های پاسیو شده با روش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی به دلیل دارا بودن بیشترین پایداری، بیشترین مقاومت پلاریزاسیون، بالاترین پتانسیل حفره‌دار شدن و بیشترین نسبت Cr/Fe در فیلم پاسیو به عنوان بهترین روش جهت افزایش مقاومت به خوردگی انتخاب می‌شود.
11. M.V. Cardoso, S. T. Amaral and E. M. A. Martini, *Temperature effect in the corrosion resistance of Ni-Fe-Cr alloy in chloride medium*, Corrosion Science, 50(2008)2429-2436.
12. W. S. Tait, *An Introduction to Electrochemical Corrosion Testing for Practicing Engineers And Scientist*, Pairdocs Pub, (1994).
13. Robert G. Kelly and John R. Scully, *Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering*, Marcel Dekker, Inc(2003).
14. J. S. Noh, N. J. Laycock, W. Gao and D. B. Well, *Effects of nitric acid passivation on the pitting resistance of 316 stainless steel*, Corrosion Science, 42(2000)2069-2084.