

بررسی اثر میان لایه نیکل الکترولس بر رفتار خوردگی فولاد فنر Cr-Si پوشش داده شده با Zn خالص و Zn-12%Ni

حمید ناظمی^{۱*}، مریم احتشامزاده^۲

^۱ استادیار، بخش مهندسی مواد و متالورژی، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
^۲ استاد، بخش مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران.

* نویسنده مسئول: hamidnazemy@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۲۵

چکیده

در این مقاله، پوشش‌های Zn خالص و Zn-12%Ni به روش آبرکاری الکتریکی با استفاده از حمام قلیایی بر روی مفتول‌هایی از جنس فولاد فنر Cr-Si با استحکام بالا اعمال شدند و اثر ایجاد یک میان‌لایه نیکلی از طریق روش الکترولس قبل از آبرکاری الکتریکی، بر رفتار خوردگی پوشش‌ها از طریق تکنیک‌های پلاریزاسیون تافل و امپدانس الکتروشیمیایی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. نتایج آزمون پلاریزاسیون نشان داد که رسوب آلیاژی Zn با نیکل، پتانسیل خوردگی را به سمت مقادیر نجیب‌تر جابجا کرده و جریان خوردگی را نیز کاهش می‌دهد. همچنین حضور میان‌لایه نیکل، پتانسیل خوردگی پوشش Zn خالص را از 1044 mV به 1188 mV - و جریان خوردگی آن را از $43/1\text{ }\mu\text{A}$ به $119/4\text{ }\mu\text{A}$ تغییر می‌دهد. نتایج آزمون امپدانس الکتروشیمیایی نشان داد که مقاومت پلاریزاسیون پوشش‌های Zn خالص و Zn-12%Ni در حضور میان‌لایه نیکل به ترتیب به میزان ۶۴٪ و ۷۷٪ کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: میان لایه نیکل، فولاد فنر Cr-Si، خوردگی، Zn خالص، Zn-12%Ni؛

The Effect of Electroless Nickel Interlayer on the Corrosion Behavior of Cr - Si Spring Steel Electroplated With Pure Zn and Zn-12%Ni

H. Nazemi^{1*}, M. Ehteshamzadeh²

¹ Assistance Professor, Department of Materials Science and Engineering, Majlesi Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

² Professor, Department of Materials Science and Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran.

* Corresponding Author: hamidnazemy@yahoo.com

Submission: 2016, 05, 04 Acceptance: 2016, 11, 15

Abstract

In This Article, Pure Zn and Zn-12%Ni Coatings Were First Applied by Electroplating Using an Alkaline Bath on the High Tensile Strength Cr - Si Spring Steels and Then the Effect of Electroless Plating of a Nickel Interlayer on Corrosion Behavior of Those Coatings Was Assessed and Compared Due to Tafel Plot and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). Polarization Test Results Shows That Alloying Zn With Nickel Shifts the Corrosion Potential Towards More Noble Values and Reduces the Corrosion Current. The Presence of the Nickel Interlayer Alters the Corrosion Potential of the Pure Zn Coating from -1044 mV to -1188 mV and the Corrosion Current from 43.1 μ A to 119.4 μ A. Besides, the EIS Results Indicate that the Coating's Polarization Resistance Decreases Significantly as a Result of the Nickel Interlayer. The Values Reduce 64% and 77% for Pure Zn and Zn-12%Ni, Respectively.

Keywords: Electroless Nickel Interlayer, Cr - Si spring Steel, Corrosion, Pure Zn, Zn-12%Ni

۱. مقدمه

تردی هیدروژنی فولاد Cr-Si را در پوشش های Zn خالص و آلیاژی Zn-12%Ni به ترتیب ۳۳٪ و ۵۴٪ کاهش می دهد [۱۹]. در این تحقیق، ابتدا سطح فولاد فنر Cr-Si از طریق فرآیند آبکاری کترولس نیکل پوشش داده می شود. این لایه نیکل کترولس به عنوان یک میان لایه، می تواند سد فیزیکی مناسبی در مقابل نفوذ هیدروژن در حین فرآیند آبکاری الکتریکی ایجاد نماید [۲۰ و ۲۱]. سپس پوشش های Zn خالص و Zn-12%Ni از طریق آبکاری الکتریکی بر روی میان لایه نیکلی اعمال می شوند. اثر حضور این میان لایه در تغییر رفتار خوردگی زیر لایه با استفاده از آزمون های الکتروشیمیایی خوردگی، ارزیابی و مقایسه می شود.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- زیر لایه

فولاد فنر Cr-Si با نماد استاندارد 55SiCr6 با استحکام کششی ۱۹۲۰MPa و سختی ۵۶RC به عنوان زیر لایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد فنر Cr-Si با نماد استاندارد 55SiCr6

| S | P | Si | Cr | Mn | C |
|-------|-------|------|------|------|------|
| ۰/۰۰۷ | ۰/۰۰۹ | ۱/۴۴ | ۰/۶۴ | ۰/۶۸ | ۰/۵۵ |

۲-۲- آبکاری الکتریکی Zn خالص

حمام سیانیدی استاندارد با ترکیب شیمیایی مندرج در جدول ۲ برای آبکاری الکتریکی Zn خالص استفاده شد. پس از چندین تلاش پوششی با ضخامت ۱۰ میکرون پس از ۲۰ دقیقه آبکاری به دست آمد.

۲-۳- آبکاری الکتریکی Zn-Ni

در این تحقیق از حمام قلیایی برای تهیه پوشش آلیاژی Zn-Ni با مشخصات و ترکیب شیمیایی مندرج در جدول ۳ استفاده شد. پس از چندین تلاش پوشش آلیاژی Zn-12%Ni به ضخامت تقریبی ۱۰ میکرون پس از ۳۰ دقیقه آبکاری الکتریکی به دست آمد.

فولاد فنر آلیاژی Cr-Si با استحکام بالا به طور گسترده ای در تولید انواع فنرها مورد استفاده قرار می گیرد. فنرهای ساخته شده از این فولاد، توانایی تحمل تنش های عملیاتی بالا و بارگذاری های ضربه ای و ناگهانی را دارند. با توجه به استحکام کششی بالا و حساسیت این فولاد به تردی هیدروژنی، اغلب فرآیندهای آبکاری الکتریکی بر روی این فنرها انجام نمی شود. اما در موارد ضروری، آبکاری الکتریکی Zn خالص به منظور افزایش مقاومت به خوردگی، انجام می شود. این امر به علت حساسیت بالای این فولاد به تردی هیدروژنی، ممکن است به وقوع شکست های زودرس منجر شود [۱ و ۲]. به علاوه، فرآیندهای الکتروشیمیایی علاوه بر واکنش آزاد شدن گاز هیدروژن، به دلیل امکان ایجاد تنش های پسماند کششی در سطح فولاد و نیز چگالی بالای ریز ترک های ناشی از آبکاری الکتریکی، منجر به کاهش عمر خستگی قطعات در شرایط بارگذاری دینامیکی می شوند [۳ و ۴]. در یک تحقیق با استفاده از مدل آماری Weibull اثبات شد که با اعمال یک میان لایه نیکل کترولس، تعداد سیکل تا شکست فنرهای آبکاری شده با پوشش Zn-12%Ni در آزمون خستگی، حدود ۸٪ بهبود می یابد [۵].

آبکاری آلیاژی Zn-Ni به عنوان یک جایگزین مناسب برای پوشش Zn خالص به کار گرفته می شود. اغلب آلیاژسازی Zn با مقدار نیکل حدود ۱۰ تا ۱۲ درصد می تواند بهبود قابل ملاحظه ای در کنترل نرخ خوردگی رسوبات آلیاژی نشان دهد [۶-۱۳]. پوشش های Zn-Ni از طریق یک مکانیزم نامتعارف (آنامولوس) تشکیل می شوند؛ به نحوی که مشارکت فلز نجیب تر یعنی نیکل، در تشکیل پوشش، بر خلاف انتظار، کمتر است و در نهایت رسوب آلیاژی با مقدار Zn زیاد و نیکل کمتر تشکیل می شود [۱۴، ۱۵ و ۱۶]. فولادهای با استحکام بالا اگر به وسیله پوشش های الکتروشیمیایی Zn-Ni با درصد نیکل بین ۱۰ تا ۱۴ درصد پوشش دهی شوند، هم تمایل اندکی برای تردی هیدروژنی نشان داده و هم پاسخ بهتری به عملیات هیدروژن زدایی از طریق پخت می دهند [۱۷ و ۱۸]. در تحقیق دیگری گزارش شده است که حضور میان لایه نیکل کترولس، به عنوان یک سد فیزیکی در مقابل نفوذ هیدروژن عمل کرده و اندیس

جدول ۲- ترکیب شیمیایی و مشخصات حمام آبکاری الکتریکی Zn خالص

| چگالی جریان (A/dm ²) | دما (°C) | pH | ترکیب شیمیایی محلول الکترولیت (g/lit) | | | | مشخصات | |
|----------------------------------|----------|------|---------------------------------------|---------------------------------|------|------|--------|-------|
| | | | براق کننده | Na ₂ CO ₃ | NaOH | ZnCN | | NaCN |
| ۳ | ۲۵ | ۱۲/۳ | ۴ | ۱۵ | ۷۹ | ۶۱ | ۴۷ | مقدار |

جدول ۳- ترکیب شیمیایی و مشخصات حمام آبکاری الکتریکی Zn-Ni

| چگالی جریان (A/dm ²) | دما (°C) | pH | ترکیب شیمیایی محلول الکترولیت (g/lit) | | | | مشخصات | |
|----------------------------------|----------|----|---------------------------------------|---------------------------------|------|-------------------|--------|-------------------|
| | | | براق کننده | Na ₂ CO ₃ | NaOH | NiCl ₂ | | ZnCl ₂ |
| ۳ | ۲۵ | ۱۳ | ۴ | ۶۰ | ۱۳۰ | ۱ | ۱۰ | مقدار |

۲-۴- اعمال میان لایه نیکل الکترولس

در این تحقیق میان لایه نیکل از طریق روش الکترولس قبل از آبکاری الکتریکی بر روی سطح زیرلایه اعمال شد. آبکاری الکترولس نیکل در یک حمام قلیایی با مشخصات و ترکیب شیمیایی مندرج در جدول ۴ برای رسیدن به رسوبی با مقدار فسفر کمتر از ۳ درصد انجام شد. رسوبی با ضخامت ۵ میکرون در مدت زمان حدود ۳۰ دقیقه از طریق روش الکترولس تشکیل شد. نمونه‌ها قبل از آبکاری الکترولس به منظور بهبود ترشوندگی، توسط اسید نیتریک ۱۰٪ شستشو شدند.

۲-۵- آزمون‌های خوردگی الکتروشیمیایی

آزمون‌های خوردگی الکتروشیمیایی توسط دستگاه EG & G مدل 263A انجام شد. پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در پیلی شامل ۱۰۰ ml محلول نمک طعام با غلظت ۳/۵ درصد در محدوده ولتاژ $250 \pm mV$ از پتانسیل مدار باز و با نرخ روبش $1 mV/sec$ انجام شد. قبل از شروع آزمون، نمونه‌ها به مدت یک ساعت در محلول قرار گرفته تا واکنش سطح نمونه‌ها با محلول به حالت پایدار برسد. آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) نیز بر روی نمونه‌های مختلف انجام شد. در این آزمون دامنه ولتاژ $10 mV$ و فرکانس در بازه $10^5 Hz$ تا $10^3 Hz$ در نظر گرفته شد. در همه شرایط سطح در تماس نمونه‌ها با محیط خورنده، $1/3 cm^2$ بود. همچنین از نرم‌افزارهای Power Suite و Zview جهت رسم مدارهای معادل و تحلیل نتایج، و از نرم‌افزار Tecplot جهت ترسیم نمودارها استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

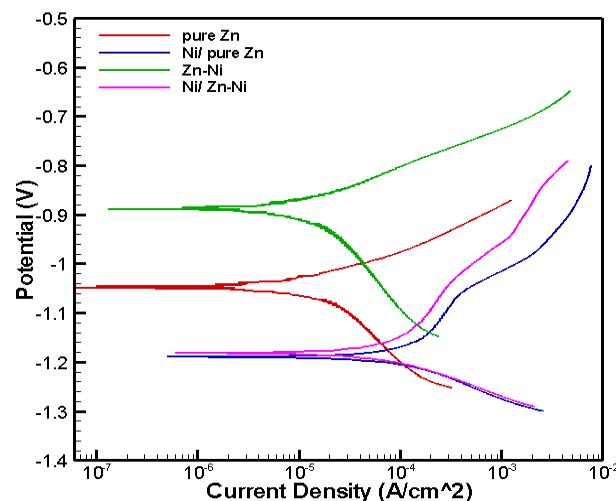
۳-۱- آزمون پلاریزاسیون الکتروشیمیایی

شکل ۱ اثر اعمال میان‌لایه را بر رفتار پلاریزاسیون پتانسیودینامیک پوشش‌های Zn خالص و Zn-Ni نشان می‌دهد. میان‌لایه تغییرات نامطلوبی در پتانسیل و جریان خوردگی پوشش‌ها ایجاد کرده است. به طوری که نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد، در اثر حضور میان‌لایه پتانسیل خوردگی پوشش Zn خالص از $1044 mV$ به $118 mV$ - و جریان خوردگی آن از $43/1 \mu A$ به $119/4 \mu A$ تغییر می‌کند. در مورد پوشش آلیاژی Zn-Ni، میان‌لایه نیکل، باعث شده تا پتانسیل خوردگی از $886 mV$ - به $1180 mV$ - و جریان خوردگی از $15/5 \mu A$ به $87/9 \mu A$ برسد.

اثر میان‌لایه نیکل را می‌توان به تغییر شرایط فصل مشترکی نسبت داد. تفاوت نوع تنش پسماند در فصل مشترک میان‌لایه نیکل الکترولس با پوشش Zn-Ni، به گسترش شبکه عیوب و ریز ترک در داخل پوشش آلیاژی منجر می‌شود. به طوری که این شبکه عیوب حتی تا سطح پوشش نیز امتداد یافته و مورفولوژی سطح را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مشاهدات ساساکی [۲۲] در نتیجه بررسی اختلاف تنش‌های پسماند در فصل مشترک، مؤید این مطلب است. مقایسه شکل‌های ۲ و ۳ با شکل‌های ۴ و ۵ نشان‌دهنده ناهم‌واری و غیریکنواختی بیشتر در حضور میان‌لایه است. به همین دلیل جریان خوردگی که متناسب با دانسیته عیوب سطحی است، در حضور میان‌لایه، افزایش قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهد. این با گزارش سوچیمارو [۲۳] در خصوص تشدید شبکه عیوب در فصل مشترک سیستم‌های پوشش چند لایه تطابق دارد.

جدول ۴- ترکیب شیمیایی و مشخصات حمام آبکاری الکترولس نیکل

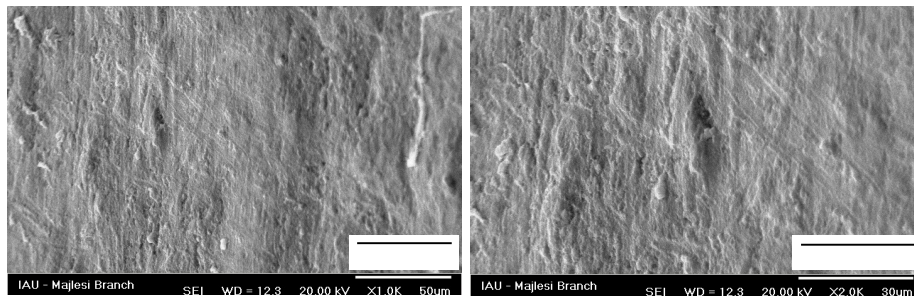
| دما (°C) | pH | ترکیب شیمیایی محلول الکترولیت (g/lit) | | | | | مشخصات |
|-------------|-----|---------------------------------------|----------|----------|-------------|----------------------|--------|
| | | $Na_3C_6H_5O_7 \cdot 5H_2O$ | NH_4OH | NH_4Cl | NaH_2PO_2 | $NiCl_2 \cdot 7H_2O$ | |
| ۸۰ | ۹/۵ | ۸۰ | ۹ | ۵۰ | ۲۰ | ۳۰ | مقدار |



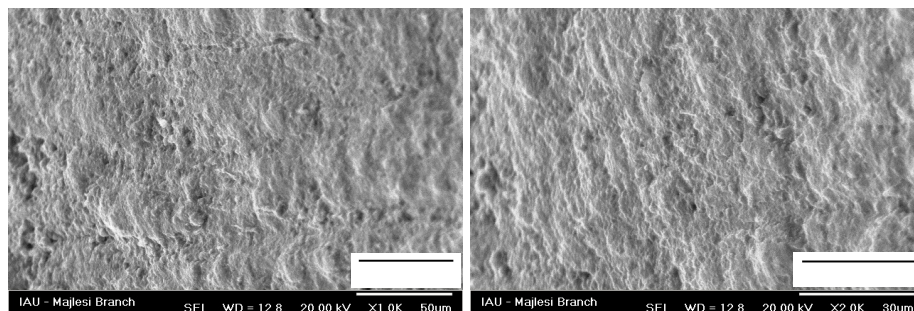
شکل ۱- اثر حضور میان‌لایه نیکل بر منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک پوشش‌های Zn خالص و Zn-Ni.

جدول ۵ - مقادیر پتانسیل و جریان خوردگی نمونه‌های مختلف که با برون‌یابی تافل به دست آمده است

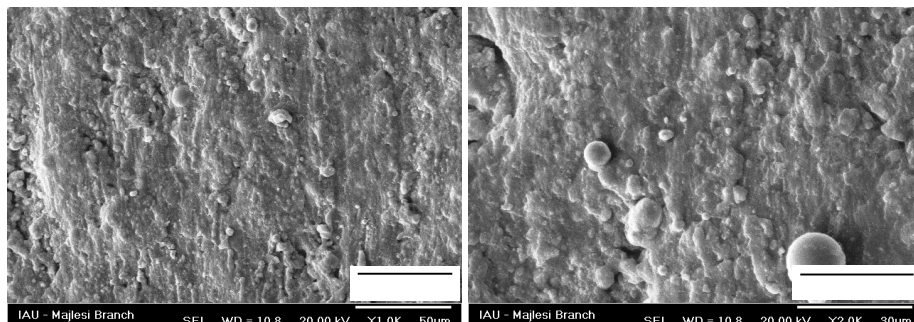
| ردیف | شرایط پوشش دهی | پتانسیل مدار باز (mV) OCP | پتانسیل خوردگی (mV) E_{corr} | جریان خوردگی (μA) I_{corr} |
|------|----------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| ۱ | pure Zn | -۱۱۱۹ | -۱۰۴۴ | ۴۳/۱ |
| ۲ | Ni/ pure Zn | -۱۰۴۸ | -۱۱۸۸ | ۱۱۹/۴ |
| ۳ | Zn-Ni | -۸۹۷ | -۸۸۶ | ۱۵/۵ |
| ۴ | Ni/ Zn-Ni | -۱۰۳۹ | -۱۱۸۰ | ۸۸/۹ |



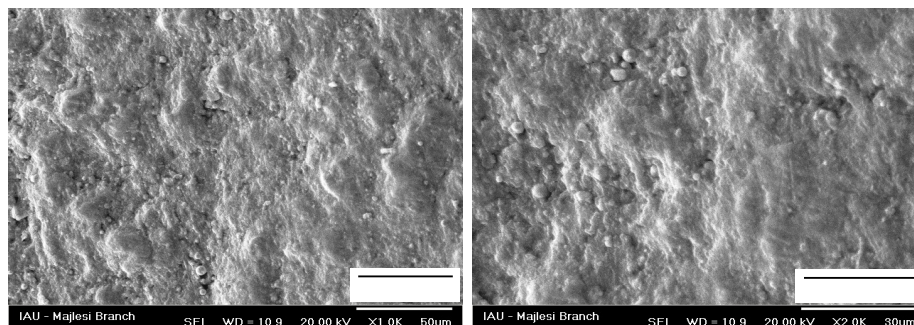
شکل ۲ - تصویر SEM از سطح نمونه دارای پوشش Zn خالص.



شکل ۳ - تصویر SEM از سطح نمونه دارای پوشش Zn-Ni.



شکل ۴ - تصویر SEM از سطح نمونه دارای پوشش Ni/ pure Zn.



شکل ۵ - تصویر SEM از سطح نمونه دارای پوشش Ni/ Zn-Ni.

منحنی نایکوئیست پوشش Zn-Ni نیز در صورت اعمال میان لایه نیکل، دچار تغییراتی مشابه با Zn خالص می شود. از جمله اینکه مقاومت پلاریزاسیون مربوط به لایه پوشش نهایی در اثر حضور میان لایه به شدت کاهش یافته است. مقایسه تصاویر مورفولوژی سطح پوشش ها در شکل های ۳ و ۵ وجود ناهمواری های بیشتری را در پوشش دارای میان لایه نشان می دهد. بنابراین مقاومت پلاریزاسیون نفوذی پوشش Zn-Ni در حضور میان لایه نیکل الکترولس کاهش یافته است. این با نتایج مربوط به آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک پوشش های دارای میان لایه نیکل، تطابق دارد.

شکل ۶ هم چنین نشان می دهد منحنی نایکوئیست پوشش Zn-Ni در نتیجه اعمال میان لایه نیکل، از حالت دو حلقه ای به تک حلقه ای تغییر می کند. دو علت برای رفتار دارای یک ثابت زمانی پوشش Ni/Zn-Ni می توان بیان کرد. اول اینکه با ادامه روند روی زدایی از لایه آلیاژی سطح، غلظت نیکل در این لایه بالا می رود. اما به دلیل حضور شبکه ریزترک در ساختار پوشش Zn-Ni و افزایش تخلخل های سطحی به علت جدایش انتخابی Zn، مسیرهای بسیار مناسبی برای مهاجرت محلول الکترولیت به سمت فصل مشترک Zn-Ni با میان لایه نیکلی، فراهم است [۳ و ۴]. علت دوم، عدم تطابق تنش های فشاری باقی مانده در میان لایه، با تنش های پسماند کششی در لایه Zn-Ni است [۲۴]. از این رو، فصل مشترک میان لایه با رسوب آلیاژی یک مرز ناپوسته و نفوذپذیر است. این منجر به تشدید خوردگی پوشش به منظور حفاظت زیر لایه و در نهایت مقدار R2 بسیار پایین در مقایسه با R1 می شود. به طوری که با صرف نظر از مقدار R2، طبق منحنی نایکوئیست، تقریباً می توان رفتار دارای یک ثابت زمانی را به پوشش Zn-Ni شامل میان لایه نسبت داد. این با نتایج تحقیق عبدالرحمان [۲۵] که ثابت کرد آلیاژسازی Zn با نیکل منجر به کاهش نفوذ یون های Zn در لایه پوشش و بهبود رفتار خوردگی می شود، تطابق دارد. وی نشان داد که قطر نیم دایره منحنی نایکوئیست در آلیاژ Zn-Ni کمتر از Zn خالص است.

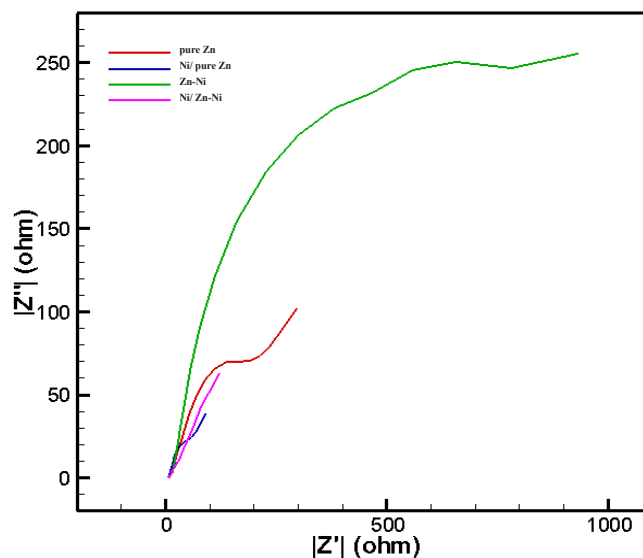
مقدار بسیار پایین پارامتر n (۰/۳۵) برای پوشش Ni/Zn-Ni نیز قابل تأمل است. پایین بودن مقدار n به معنی غیریکنواختی و ناپوستگی سطح پوشش است، که با مشاهدات SEM هم خوانی دارد. اما یک نتیجه گیری مهم از این موضوع آن است که هر چه n از یک دورتر شده و به صفر نزدیک تر شود، مقدار مقاومت R2 در مقایسه با مقاومت R1 کاهش بیشتری می یابد. به نحوی که در مقادیر بسیار پایین n می توان از R2 در مقابل R1 صرف نظر نمود و فقط مقاومت پلاریزاسیون پوشش سطحی را به عنوان مقاومت پلاریزاسیون کل پوشش در نظر گرفت.

مقایسه بین منحنی پلاریزاسیون پوشش های Zn خالص و Zn-Ni شامل میان لایه در شکل ۱، نشان می دهد که در حضور میان لایه، پوشش ها رفتار پلاریزاسیون تقریباً مشابهی نشان می دهند. با این حال، جریان خوردگی با مقدار $88/9 \mu A$ برای پوشش Ni/Zn-Ni هنوز کمتر از $119/4 \mu A$ برای Zn خالص است. این امر مؤید اثر مثبت آلیاژسازی Zn با نیکل بر روی سینتیک واکنش خوردگی و کاهش I_{corr} پوشش می باشد. در بیان علت اثر مثبت تشکیل پوشش آلیاژی Zn-Ni می توان به این نکته اشاره کرد که مکانیزم خوردگی در رسوب آلیاژی از نوع روی زدایی است. به این ترتیب با جدایش انتخابی Zn از سطح، یک لایه غنی از نیکل باقی می ماند. نیکل سد فیزیکی بسیار مقاومی است که می تواند از طریق مکانیزم مانع شوندگی باعث کاهش شدید جریان خوردگی در پوشش آلیاژی شود.

۳-۲- آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

اثر اعمال میان لایه بر رفتار امپدانس الکتروشیمیایی پوشش های Zn خالص و آلیاژی Zn-Ni به ترتیب در شکل ۶ نشان داده شده است. هر دو منحنی مربوط به پوشش Zn خالص دارای دو نیم دایره هستند که بیان گر وجود دو ثابت زمانی می باشد. اما در مورد پوشش Zn-Ni اعمال میان لایه نیکل، رفتار دو ثابت زمانی را تبدیل به رفتاری با یک ثابت زمانی کرده است.

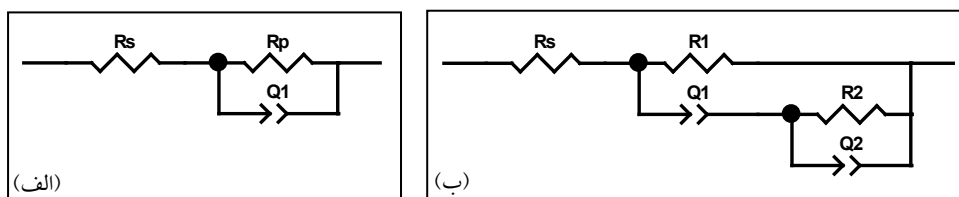
شکل ۶ نشان می دهد که در حضور یا عدم حضور میان لایه نیکل، پوشش Zn خالص دارای رفتاری با دو ثابت زمانی است. در شرایطی که میان لایه وجود ندارد، مقاومت R1 مربوط به لایه پوشش Zn و مقاومت R2 به مقاومت پلاریزاسیون زیر لایه مربوط است. اما در اثر اعمال میان لایه نیکل، R2 به مقاومت پلاریزاسیون میان لایه نسبت داده می شود. مطابق با اطلاعات جدول ۶ در خصوص مدار معادل پوشش ها (شکل ۷)، مقدار R2 برای پوشش Zn خالص شامل میان لایه، بیشتر است؛ اما R1 که مربوط به مقاومت لایه پوشش Zn و محصول خوردگی ناپایدار آن است، در پوشش دارای میان لایه به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است. این می تواند به اختلاف مورفولوژی سطح پوشش ها نسبت داده شود. مقایسه تصاویر SEM شکل های ۲ و ۴ نشان می دهد که سطح پوشش Zn خالص در حضور میان لایه، دارای ناهمواری های بیشتری است. این نشان می دهد که رفتار خوردگی پوشش شامل میان لایه به سرعت وارد ثابت زمانی دوم می شود و فصل مشترک Zn با میان لایه، به سرعت در معرض محلول الکترولیت قرار می گیرد. از سوی دیگر، توان n مربوط به ظرفیت لایه دو گانه Q2 در پوشش Zn خالص بدون میان لایه بیشتر است. این خود مؤید همگن تر بودن سطح پوشش و ناپوستگی کمتر آن است که با مشاهدات SEM تطابق دارد.



شکل ۶ - اثر حضور میان لایه نیکل بر منحنی نایکوئیست پوشش های Zn خالص و Zn-Ni.

جدول ۶ - اطلاعات مربوط به مدار معادل برای نمونه های مختلف، استخراج شده از منحنی های نایکوئیست.

| Q2 | | R2 (ohm) | Q1 | | Rp یا R1 (ohm) | Rs (ohm) | شرایط پوشش دهی | ردیف |
|--------|------|----------|---------|------|----------------|----------|----------------|------|
| CPE2 | n | | CPE1 | n | | | | |
| ۰/۰۲۲۴ | ۰/۸۷ | ۷۶ | ۰/۰۰۴۵۹ | ۰/۴۷ | ۳۹۵ | ۶ | pure Zn | ۱ |
| ۰/۰۲۸ | ۰/۶۵ | ۹۴ | ۰/۰۴۴۳ | ۰/۴۷ | ۱۴۰ | ۵ | Ni/ pure Zn | ۲ |
| ۰/۰۰۲۳ | ۰/۶۳ | ۵۴۶ | ۰/۰۰۲۱۷ | ۰/۷۵ | ۱۰۵۰ | ۹ | Zn-Ni | ۳ |
| --- | --- | --- | ۰/۰۲۰۶۱ | ۰/۳۵ | ۲۴۰ | ۶/۲ | Ni/ Zn-Ni | ۴ |



شکل ۷ - شماتیکی از مدل های مدار معادل استفاده شده برای شبیه سازی اطلاعات نایکوئیست.
 الف: مدار معادل برای نمونه های با یک ثابت زمانی ب: مدار معادل برای نمونه های با دو ثابت زمانی.

نتیجه گیری

- در اثر حضور میان لایه نیکل الکترولس، پتانسیل خوردگی پوشش Zn خالص از -1044mV به -1188mV و جریان خوردگی آن از $43/1\mu\text{A}$ به $119/4\mu\text{A}$ تغییر کرد.
- اعمال میان لایه نیکل الکترولس، منجر به تغییر پتانسیل خوردگی پوشش آلیاژی Zn-12%Ni را از -886mV به -1180mV و تغییر جریان خوردگی از $15/5\text{mV}$ به $88/9\text{mV}$ شد.
- مقاومت پلاریزاسیون نفوذی پوشش ها با اعمال میان لایه نیکل الکترولس، کاهش یافت. مقدار این کاهش در مورد پوشش Zn خالص 64% و در مورد پوشش آلیاژی Zn-12%Ni حدود 77% مشاهده شد.
- منحنی نایکوئیست پوشش Zn-12%Ni در نتیجه اعمال میان لایه نیکل الکترولس، از حالت دو حلقه ای (رفتار دارای دو ثابت زمانی) به حالت تک حلقه ای (رفتار دارای یک ثابت زمانی) تبدیل شد.

مراجع

- [1] S. Dan, Fundamentals of Spring Design, Pub. Spring Manufacturers Institute (SMI), 2000, Pp. SM-1 to SM-12.
- [2] SRAMA Group, Spring Material Selector, Second Edition, SRAMA Pub., 1991.
- [3] M.P. Nascimento, R.C. Souza, W.L. Pigatin, H.J.C. Voorwald, Effects of tungsten Carbide Thermal Spray Coating by HP/HVOF and Hard Chromium Electroplating on AISI 4340 High Strength Steel, Surface & Coatings Technology, Vol. 138, 2001, Pp. 113-124.
- [4] M.A.S. Torres, H.J.C Voorwald, An Evaluation of Shot Peening, Residual Stress and Stress Relaxation on the Fatigue Life of AISI 4340 Steel, International Journal of Fatigue, Vol. 24, 2002, Pp. 877-886.
- [5] H. Nazemi, M. Ehteshamzadeh, An Investigation on Fatigue and on Fatigue Corrosion Behavior of Cr-Si Spring Steel Sfter Zn-Ni Slectroplating Using Weibull Statistical Model, Iranian Journal of Materials Science and Engineering, Vol. 12, No. 3, 2015, Pp. 27-37.
- [6] W. Tian, F.Q. Xie, X.Q. Wu, Z.Z. Yang, Study on Corrosion Resistance of Electroplating Zinc - Nickel Alloy Coatings, Surface and Interface Analysis, Vol. 41, 2009, Pp. 251-254.
- [7] M. Gavrilu, J.P. Millet, H. Mazille, D. Marchandise, J.M. Cuntz, Corrosion Behaviour of Zinc-Nickel Coatings Electrodeposited on Steel, Surface and Coatings Technology, Vol. 123, 2000, Pp. 164-172.
- [8] C. Muller, M. Sarret, E. Garcia, Heat - Treatment on Black - Passivated Zn-Ni Alloys, J. Electrochem. Soc, Vol. 150, 2003, Pp. 212-218.
- [9] C. Muller, M. Sarret, E. Garcia, Heat treatment Effect on the Corrosion Behaviour of Black Passivated Zn-Ni alloys, Corrosion Science, Vol. 47, 2005, Pp. 307-321.
- [10] O. Girčienė, L. Gudavičiūtė, R. Juškėnas, R. Ramanauskas, Corrosion Resistance of Phosphate Zn-Ni Alloy Electrodeposits, Surface and Coatings Technology, Vol. 203, 2009, Pp. 3072-3077.
- [11] R. Fratesi, G. Roventi, Corrosion resistance of Zn-Ni Alloy Coatings in Industrial Production, Surface and Coatings Technology, Vol. 82, 1996, Pp. 158-164.
- [12] D.W. Siitari, M. Sagiyama, T. Hara, Corrosion of Ni-Zn Electrodeposited alloy, Transactions ISIJ, Vol. 23, 1983, Pp. 959-966.
- [13] F.J. Fabri Miranda, Corrosion Behavior of Zinc-Nickel alloy Electrodeposited Coatings, Corrosion, Vol. 55, 1999, Pp. 732-742.
- [14] R. Winand, Electrodeposition of Zinc and Zinc Alloys, Modern Electroplating: John Wiley & Sons, 2010, Pp. 285-307.
- [15] A. Brenner, Electrodeposition of Alloys, Academic Press, 1963.
- [16] H. Fukushima, H. Akiyama, Electrodeposition Behavior of Zn-Iron Group Metal Alloys from Sulfate and Chloride Bath, ISIJ, Vol. 33, 1993, Pp. 1009-1015.
- [17] S. Brahim, S. Yue, Effect of Surface Processing Variables and Coating Characteristics on Hydrogen Embrittlement of Steel Fasteners Part 2: Electroplating and Non Electrolytic Processes, SUR/FIN 2009, Technical Conference, NASF (National Association for Surface Finishing), 2009.
- [18] H. Kim, B.N. Popov, K.S. Chen, Comparison of Corrosion - Resistance and Hydrogen Permeation Properties of Zn-Ni, Zn-Ni-Cd and Cd Coatings on Low-Carbon steel, Corrosion Science, Vol. 45, 2003, Pp. 1505-1521.

- [19] H. Nazemi, M. Ehteshamzadeh, An Investigation on Hydrogen Embrittlement of the Cr-Si Spring Steel Using Slow Strain Rate Test and Weibull Model, *Int J Advanced Design and Manufacturing Technology*, Vol. 8, No. 4, 2015, Pp. 33-42.
- [20] U. Wiklund, P. Hedenqvist, S. Hogmark, Multilayer Cracking Resistance in Bending, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 97, 1997, Pp. 773-778.
- [21] A. A. Edigaryan, E. N. Lubnin, B. F. Lyakhov, E. B. Molodkina, Y. M. Polukarov, Hydrogen Content in Chromium and Multilayer Nickel – Chromium Coatings Deposited by Periodic Current, *Protection of Metals*, Vol. 39, 2003, Pp. 405-410.
- [22] T. Sasaki, Y. Hirose, Residual stress Distribution in Electroplated Zn - Ni alloy Layer Determined by X-ray Diffraction, *Thin Solid Films*, Vol. 253, 1994, Pp. 356-361.
- [23] Y. Sugimura, S. Suresh, *Ceramic Coatings*, American Society for Mechanical Engineers, ASME Pub., 1993, Pp. 9-14.
- [24] A. Horsewell, Processing and Properties of Electrodeposited Layered Surface Coatings, *Materials Science and Technology*, Vol. 14, 1998, Pp. 549-553.
- [25] A. El - Sayed, H. S. Mohran, H. M. Abd El - Lateef, Corrosion Study of Zinc, Nickel, and Zinc - Nickel Alloys in Alkaline Solutions by Tafel Plot and Impedance Techniques, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 43, 2012, Pp. 619-632.