

# بررسی رفتار خوردگی پوشش کامپوزیتی Ni-ZrO<sub>2</sub> ساخته شده به روش رسوب دهی هم زمان الکترولیتی با استفاده از طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی

رضا ارغوانیان، نقی پروینی احمدی و ساسان یزدانی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

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

## چکیده

رفتار خوردگی پوشش‌های Ni خالص و Ni-ZrO<sub>2</sub> کامپوزیتی با استفاده از طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی بررسی شد. برای آرایه مدل تئوری مناسب مسیرهای پیشرفت خوردگی بررسی شد. یک مدار معادل بر اساس خصوصیات سطح دارای خوردگی موضعی و قسمت رویین شده آرایه گردیده و تطابق خوبی بین طیف حاصل از مدار معادل و طیف بدست آمده از آزمایش عملی مشاهده شد. مقاومت انتقال بار Ni-ZrO<sub>2</sub> بیشتر از Ni خالص بدست آمد. بررسی سطوح خورده شده توسط میکروسکپ الکترونی و مقاطع اچ شده نشان داد که تغییر مسیر خوردگی از مرز بین خوشه‌های نیکل در پوشش نیکل خالص به مرز بین ذره زیرکونیا و زمینه نیکل در پوشش Ni-ZrO<sub>2</sub> کامپوزیتی به همراه تغییر ریزساختار عامل افزایش مقاومت به خوردگی است. نتایج آزمایشات پلاریزاسیون نیز نتایج بدست آمده از طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی را تایید کردند.

واژه های کلیدی: طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی، لایه دوگانه سطحی، مقاومت انتقال بار، مقاومت پلاریزاسیون.

## Investigation on the corrosion properties of co- electrodeposited Ni-ZrO<sub>2</sub> composite coating usig EIS

R. Arghavanian, N. Parvini Ahmadi and S. Yazdani

Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz

(Received 31 January 2012, accepted 28 February 2012)

### Abstract

Corrosion behavior of Ni and Ni-ZrO<sub>2</sub> composite coatings were studied using electrochemical impedance spectroscopy (EIS) technic. An equivalent circuit diagram based on blocked and partially corroded surface characterizations were proposed and a good agreement was observed between theoretical impedance spectra obtained on the basis of the equivalent circuit and spectra recorded during the measurements. The changes in the charge transfer resistance obtained from impedance measurements were comparable with the changes in polarization resistance obtained from potentiodynamic measurements and both of potentiodynamic and EIS tests showed that the corrosion resistance of Ni-ZrO<sub>2</sub> was higher than that of pure Ni. Investigation of corroded surfaces showed that the cluster boundaries in pure Ni and weak bonds between Ni matrix and ZrO<sub>2</sub> particles in Ni-ZrO<sub>2</sub> composite coating were the appropriate paths for corrosion to proceed. Changing of microstructure and corrosion proceeding paths were recognized as the reasons for higher corrosion resistance of Ni-ZrO<sub>2</sub> with respect to pure Ni.

**Keywords:** Electrochemical Impedance Spectroscopy, Surface Double Layer, Charge Transfer Resistance, Polarization Resistance.

E-mail of corresponding author: arghavanian@gmail.com

## مقدمه

پوشش‌های کامپوزیتی به دلیل خواص خوردگی بهتر، مقاومت بیشتر در برابر سایش و سایش خورنده، میکروسختی بیشتر و دیگر خصوصیات ممتاز نسبت به پوشش‌های تک فاز، کاربرد بسیاری یافته‌اند که از آن جمله می‌توان به صنایع هوا و فضا و خودروسازی اشاره کرد. روش رسوب دهی هم زمان الکترولیتی یک روش ارزان قیمت و آسان برای ساخت پوشش‌های زمینه فلزی است که کاربرد آن بسیار گسترش یافته است. در این روش از یک حمام آبکاری الکترولیتی که در آن ذرات فاز ثانوی برای رسوب کردن هم زمان در زمینه فلزی پخش شده‌اند استفاده می‌شود. عموماً زمینه فلزی نیکل، مس، کروم و کبالت و ذرات فاز ثانوی Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، ZrO<sub>2</sub>، SiC و غیره است [۱-۱۷].

یکی از مهمترین خواص مورد نظر در ساخت پوشش‌های کامپوزیتی افزایش مقاومت به خوردگی است. برای پوشش‌های کامپوزیتی دارای زمینه نیکل، چندین مکانیسم برای توجیه رفتار خوردگی بهتر پوشش‌های کامپوزیتی نسبت به پوشش فلزی نیکل خالص ارائه شده است. از مهمترین این مکانیسم‌ها می‌توان به تغییر ریزساختار از حالت ستونی به هم محور، اشغال قسمتی از سطح توسط ذرات خنثی، افزایش مکان‌های جوانه زنی لایه رویین و غیره اشاره کرد [۱۸-۲۲]. اما در این مورد باید کارهای بیشتری صورت گیرد.

در کارهای گذشته [۲۳-۲۴] نشان داده شد که بیشترین مقدار زیرکونیای رسوب کرده در زمینه نیکل از یک حمام واتس دارای ۹۰ g/l پودر زیرکونیا حاصل می‌شود که این پوشش دارای بیشترین میکروسختی و مقاومت به خوردگی است. برای بررسی خواص خوردگی از روش پلاریزاسیون پتانسودینامیک استفاده شده بود [۲۳-۲۴].

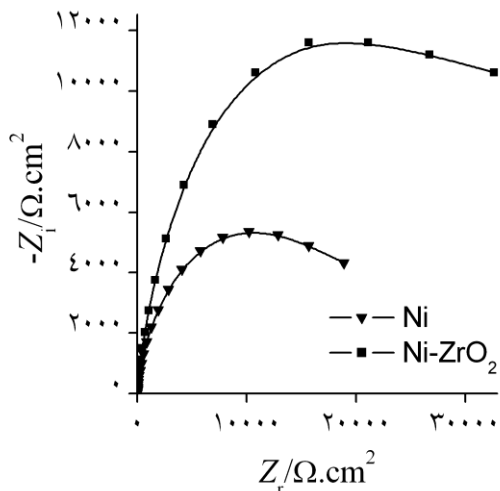
روش طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی یک روش مطمئن برای تعیین رفتار و مکانیسم خوردگی است اما این روش در مورد پوشش‌های کامپوزیتی بسیار کم مورد استفاده قرار گرفته است که دلیل آن پیچیدگی درک مکانیسم خوردگی و مدل سازی نتایج آزمایشات است. از سوی دیگر برای درک مکانیسم خوردگی، بررسی میکروسکوپی سطوح خورده شده

بسیار مفید است که متأسفانه این مورد نیز در مورد پوشش‌های کامپوزیتی بسیار کم مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش، طیف امپدانس الکتروشیمیایی پوشش‌های Ni خالص و Ni-ZrO<sub>2</sub> کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته و برای مدل سازی نتایج و همچنین درک دلیل تغییر رفتار خوردگی از بررسی سطوح خورده شده استفاده شده است.

## مواد و روش تحقیق

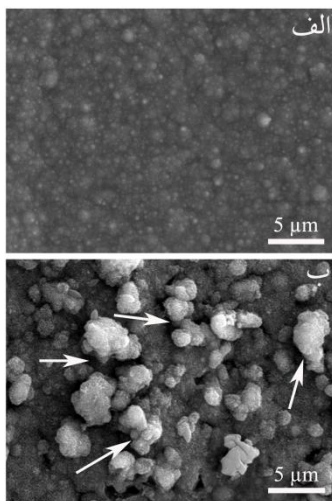
پوشش‌های نیکل و نیکل-زیرکونیای (پوشش ایجاد شده از حمام واتس دارای ۹۰ g/l پودر زیرکونیا با اندازه ذره کوچکتر از ۵ μm) ساخته شده در تحقیقات گذشته [۲۳-۲۴] در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند. بررسی ریخت شناسی پوشش‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی جاروبی مدل Cam Scan MV2300 صورت گرفت. آزمایشات الکتروشیمیایی با استفاده از دستگاه Zahner ELEKTRIK IM6e انجام شد. برای این آزمایشات از یک سلول دارای ۳ الکتروده استفاده شد: الکتروده کار، الکتروده شاهد کالومل اشباع و الکتروده مخالف از جنس پلاتین در حالیکه الکترولیت، محلول ۳٪ وزنی کلرید سدیم - که به طور عادی هوا دار بود و در دمای اتاق قرار داشت - انتخاب شد. قبل از انجام آزمایشات، الکتروده کار به مدت ۲ ساعت در الکترولیت قرار گرفت تا یک حالت پایدار در پتانسیل مدار باز حاصل شود. طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی در محدوده فرکانس ۱۰۰ kHz تا ۱۰ mHz با دامنه ۵ mV در اطراف پتانسیل مدار باز (E<sub>Corr</sub>) انجام شد. برای انتخاب مدل تئوری مناسب - که با یک مدار معادل ساده بیان می‌شود - از نرم افزار Zview version 2.0 استفاده شد. برای بررسی مسیرهای پیشرفت خوردگی، نمونه‌ها به مدت ۳۰ روز در محلول کلرید سدیم قرار داده شدند و سپس بررسی میکروسکوپی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی جاروبی صورت پذیرفت. برای بررسی مقاطع پوشش‌ها، پس از سنباده و پولیش زنی، اچ شیمیایی صورت گرفته و سپس بررسی میکروسکوپی انجام شد. برای اچ شیمیایی، نمونه‌ها به مدت ۳۰-۴۵ ثانیه در

در حضور یون کلرید این لایه رویین در مکان‌های ضعیف شکسته می‌شود و خوردگی موضعی رخ می‌دهد.



شکل ۲. منحنی‌های نایکوئیست پوشش‌های Ni و Ni-ZrO<sub>2</sub>.

در شکل ۳ سطوح خورده شده پوشش‌ها نشان داده شده است.



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطوح خورده شده پوشش‌های Ni (الف) و Ni-ZrO<sub>2</sub> (ب).

با توجه به شکل ۳-الف (پوشش نیکل خالص خورده شده) و مقایسه آن با شکل ۱-الف مشاهده می‌شود که در پوشش نیکل خالص مرز بین خوشه‌های نیکل خورده شده و فرو رفته‌اند، لذا مکان مناسب برای شکست لایه رویین مرز بین خوشه‌هاست. در حالیکه در پوشش Ni-ZrO<sub>2</sub> مرز بین ذرات

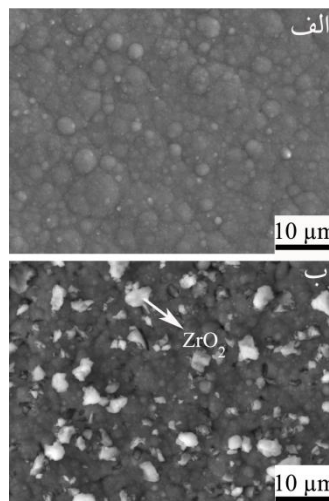
محلولی متشکل از ۱ قسمت محلول ۱۰٪ وزنی NH<sub>4</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> و ۱ قسمت محلول ۱۰٪ وزنی NaCN غوطه‌ور شدند. آزمایشات پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محدوده پتانسیل E<sub>Corr</sub> ± ۱۰ mV انجام شد و پتانسیل از محدوده کاتدی به آندی با سرعت جاروب ۰/۱ mV/s تغییر یافت. برای محاسبه مقاومت پلاریزاسیون (R<sub>p</sub>) از رابطه ۱ استفاده شد.

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} \quad (1)$$

که در این رابطه E پتانسیل و i دانسیته جریان است.

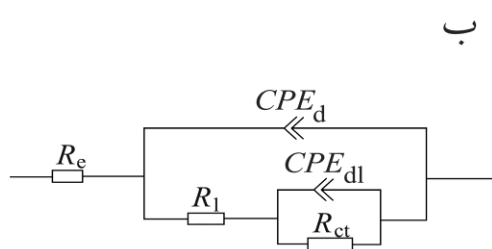
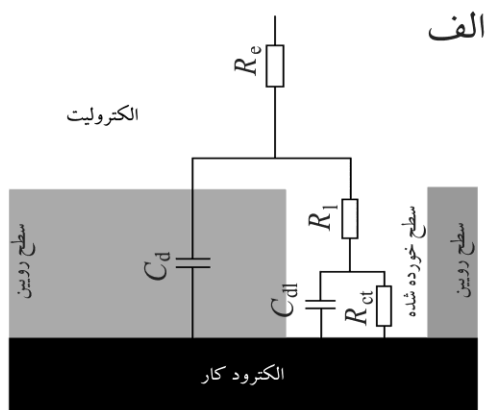
### نتایج و بحث

در شکل ۱ سطوح پوشش‌ها نشان داده شده است. ذرات زیرکونیا به طور یکنواخت در زمینه نیکل پخش شده‌اند (شکل ۱-ب). پوشش نیکل خالص دارای ریخت شناسی لانه زنبوری است (شکل ۱-الف) اما در مورد پوشش نیکل-زیرکونیا ریخت شناسی صاف حاصل شده است.



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از ریخت شناسی پوشش‌های Ni (الف) و Ni-ZrO<sub>2</sub> (ب).

نمودارهای نایکوئیست پوشش‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. مقاومت به خوردگی پوشش Ni-ZrO<sub>2</sub> بیشتر از Ni خالص است. برای ارایه مدل تئوری بر اساس یک مدار معادل باید مکانیزم پیشرفت خوردگی بررسی شود. مقاومت به خوردگی پوشش نیکل بر پایه ایجاد لایه رویین سطحی است.



شکل ۴: شماتیک سطح الکتروود در حال خوردگی در محلول دارای یون کلرید [۲۵] (الف) و مدار معادل به کار رفته برای مدل سازی شرایط سطوح در آزمایش طیف نگاری امپدانی الکتروشیمیایی (ب).

در شکل ۵ نمودارهای باد حاصل از آزمایشات عملی و مدل سازی توسط مدار معادل مذکور برای هر دو پوشش نشان داده شده است. همخوانی بسیار زیاد بین نمودارها نشانگر صحت مدار معادل انتخاب شده برای مدل سازی شرایط خوردگی پوشش نیکل و نیکل-زیرکونیا در محیط دارای یون کلرید است. مقادیر پارامترهای مدار معادل در جدول ۱ بیان شده است. مقاومت انتقال بار ( $R_{ct}$ ) پوشش  $Ni-ZrO_2$  بیشتر از  $Ni$  است که نشانگر مقاومت به خوردگی بیشتر این پوشش ( $Ni-ZrO_2$ ) در محیط دارای یون کلرید است.

در شکل ۶ نمودار پلاریزاسیون پوششها در محدوده  $10\text{ mV}$   $\pm E_{Corr}$  نشان داده شده است. انطباق خط بر روی نقاط توسط نرم افزار Origin version 8 صورت گرفت. نتایج این انطباق در جدول ۲ بیان شده است. برای نمونه  $Ni-ZrO_2$  هم پتانسیل خوردگی ( $E_{Corr}$ ) مثبت تر و هم  $R_p$  بزرگتر است لذا نتیجه آزمایش پلاریزاسیون صحت نتیجه آزمایش طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی را تایید می کند. لازم به ذکر است که

زیرکونیا و زمینه نیکل مکان مناسب برای شکست لایه روئین هستند (پیکانهای سفید در شکل ۳-ب). می توان نتیجه گرفت در هر دو نمونه خوردگی موضعی رخ داده است. برای این نوع خوردگی نمی توان از مدار ساده رندلز استفاده کرد (با وجود آنکه در برخی از منابع از این مدار استفاده شده است). در شکل ۴-الف یک سطح رویین با منطقه خوردگی موضعی نشان داده شده است. در هر سطح یکنواختی، پتانسیل کل مجموع پتانسیل سطح و افت پتانسیل ناشی از مقاومت الکترولیت بین الکتروود شاهد و الکتروود کار است. جریان کل نیز مجموع جریان فارادیک و جریان شارژ لایه دوگانه سطحی است. اگر انتقال جرم در واکنش الکتروشیمیایی نقشی نداشته باشد آنگاه جریان انتقال بار با جریان فارادیک برابر خواهد شد. در اینجا دو سطح متفاوت (رویین و خورده شده) وجود دارد که برای هر دو باید یک لایه دو گانه سطحی در نظر گرفته شود. این لایه های دوگانه توسط خازن ها نشان داده شده اند ( $C_d$  برای قسمت رویین و  $C_{dl}$  برای قسمت خورده شده). در قسمت رویین مقاومت انتقال بار به حدی زیاد است که می توان از جریان فارادیک صرف نظر کرد اما در قسمت خورده شده یک مقاومت ( $R_{ct}$ ) برای نشان دادن مقاومت انتقال بار لازم است. الکترولیت محبوس شده در داخل منطقه خورده شده دارای مقاومتی است که با  $R_1$  نشان داده شده است. از سوی دیگر، الکترولیت بین نمونه و الکتروود شاهد نیز دارای مقاومتی است که با  $R_e$  نشان داده شده است [۲۵].

با توجه به اینکه سطوح واقعی صاف، یکنواخت و ایده آل نیستند، از خازن ایده آل نمی توان برای مدل سازی استفاده کرد و در این موارد از عنصر فاز ثابت (CPE) استفاده می شود. عنصر فاز ثابت توسط رابطه ۲ مدل سازی می شود.

$$Z_{CPE} = (j\omega C)^{-\alpha} \quad (2)$$

در این رابطه  $Z_{CPE}$  امپدانس،  $\alpha$  ریشه دوم  $-1$ ،  $\omega$  فرکانس،  $C$  ظرفیت خازنی و  $\alpha$  مقدار غیر ایده آل بودن خازن است که توسط عددی بین ۰ و ۱ بیان می شود. مدار نهایی در شکل ۴-ب نشان داده شده است.

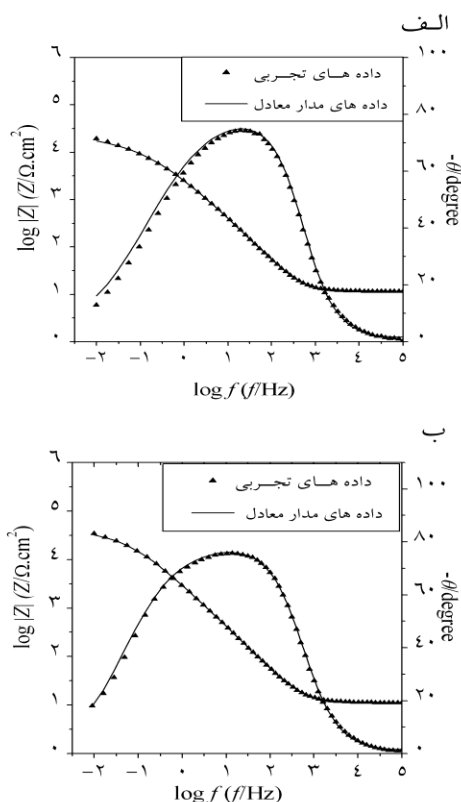
برای بررسی علت افزایش مقاومت به خوردگی در پوشش کامپوزیتی، در شکل ۷ مقاطع اچ شده پوشش‌ها نشان داده شده است. ریزساختار پوشش نیکل از خوشه‌های ستونی شکل نیکل تشکیل شده است که این ستون‌ها از سطح پوشش تا زیرلایه ادامه پیدا کرده‌اند (شکل ۷-الف) اما در پوشش کامپوزیتی ذرات فاز ثانوی مانع از رشد خوشه‌های جوانه زده شده و مکان‌های جوانه زنی برای خوشه‌های جدید فراهم می‌آورند، لذا ریزساختار از حالت ستونی به حالت هم محور میل می‌کند (شکل ۷-ب).

در شکل ۸ شماتیک این دو ریزساختار نشان داده شده است. در نیکل خالص، مرز بین خوشه‌ها مستقیم و طولانی است و به دلیل ضعیف بودن ساختار در این نواحی، مسیر مناسب برای شکست لایه روئین و پیشرفت خوردگی همین مرز بین خوشه‌هاست که شکل ۳-الف نیز موید این مساله است. این مرزها تا زیرلایه ادامه دارند و خوردگی در طول آنها متوقف نخواهد شد و پیشرفت سریع خواهد داشت (شکل ۸-الف). در مورد پوشش کامپوزیتی، مرز بین خوشه‌ها کوتاه بوده و تا زیرلایه ادامه نمی‌یابد. این مرزها مسیر مناسبی برای پیشرفت خوردگی نیستند. در این مورد فصل مشترک ضعیف بین ذره فاز ثانوی و زمینه نیکل مکان مناسب برای شکست لایه روئین و پیشرفت خوردگی است (شکل ۳-ب این مساله را تایید می‌کند). اما این مسیرها نیز طولانی نبوده و تا زیرلایه ادامه نمی‌یابند و تعداد آنها نیز در مقایسه با مرز بین خوشه‌ها کمتر

جدول ۱. پارامترهای مدار معادل بدست آمده از مدل‌سازی داده‌های

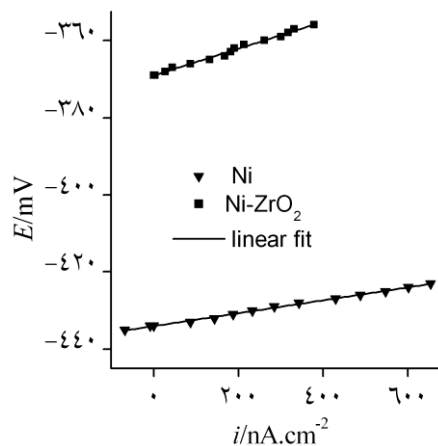
طیف امپدانس پوشش‌های  $Ni$  و  $Ni-ZrO_2$

نمونه	Ni	Ni-ZrO <sub>2</sub>
R <sub>e</sub> (Ω.cm <sup>2</sup> )	۸/۱۶۷	۷/۵۹۳
R <sub>i</sub> (Ω.cm <sup>2</sup> )	۳/۷۱۸	۳/۸۴۵
C <sub>d</sub> (μF.cm <sup>-2</sup> )	۶۸/۲۶۹	۳۰/۶۲۷
α <sub>d</sub>	۰/۴۶۵۳۴	۰/۴۹۴۷۸
C <sub>dl</sub> (μF.cm <sup>-2</sup> )	۴۵/۲۱	۵۱/۹۳۹
α <sub>dl</sub>	۰/۹۳۰۲۱	۰/۹۰۴۱۱
R <sub>ct</sub> (Ω.cm <sup>2</sup> )	۲۴۳۷۴	۴۲۴۳۸



شکل ۵. مقایسه منحنی باد حاصل از آزمایش تجربی و بدست آمده از مدل‌سازی توسط مدار معادل برای پوشش‌های  $Ni$  (الف) و  $Ni-ZrO_2$  (ب).

اعداد بدست آمده برای  $R_p$  و  $R_{ct}$  یکسان نیستند ولی تغییرات آنها شبیه به هم است. عدم تطابق اعداد می‌تواند به دلیل رخ دادن خوردگی غیر یکنواخت (برای محاسبه  $R_p$  باید خوردگی یکنواخت باشد) و همچنین خطای استفاده از مدار معادل باشد.



شکل ۶: نمودار پلاریزاسیون پوشش‌های  $Ni$  و  $Ni-ZrO_2$  در

محدوده  $E_{CORR} \pm 10 \text{ mV}$

معادلی با دو عنصر فاز ثابت خواهد شد که طیف حاصل از آن همخوانی بسیار خوبی با نتایج عملی دارد. پوشش کامپوزیتی Ni-ZrO<sub>2</sub> نسبت به Ni خالص در محیط دارای یون کلرید از مقاومت به خوردگی بیشتری برخوردار است که این مقاومت بیشتر در نتیجه تغییر ریزساختار از حالت ستونی به هم محور و تغییر مسیر پیشرفت خوردگی از مرز بین خوشه‌های نیکل به فصل مشترک بین ذره فاز ثانوی و زمینه حاصل می‌شود.

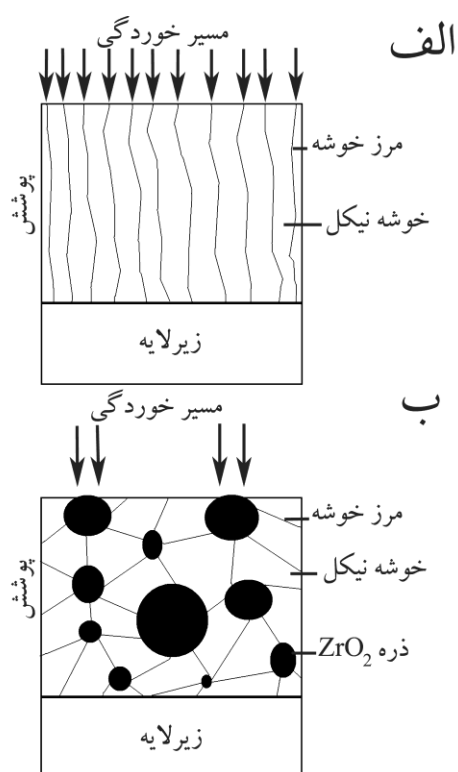
نتایج آزمایش پلاریزاسیون نیز موید نتایج حاصل از طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی است و تفاوت‌های موجود بین اعداد حاصل از این دو روش در نتیجه مدل سازی نتایج طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی و همچنین وجود خوردگی غیر یکنواخت در آزمایش پلاریزاسیون ایجاد شده است.

است، لذا خوردگی در این مسیرها پیشرفت کمتری خواهد داشت (شکل ۸-ب). تغییر ریزساختار از حالت ستونی به حالت هم محور و تغییر مسیرهای پیشرفت خوردگی از مرز بین خوشه‌ها به فصل مشترک بین ذره فاز ثانوی و زمینه عوامل اصلی مقاومت به خوردگی بیشتر پوشش Ni-ZrO<sub>2</sub> نسبت به Ni خالص است.

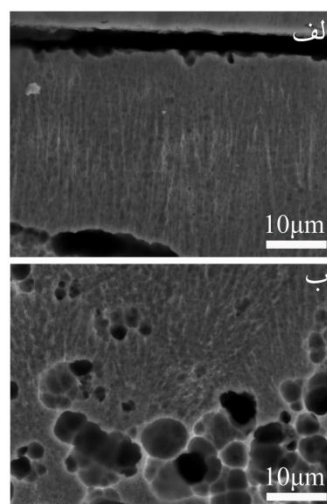
جدول ۲. نتایج خطی سازی داده‌های حاصل از پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محدوده  $E_{corr} \pm 10$  mV برای پوشش‌های Ni و

Ni-ZrO<sub>2</sub>

نمونه	Ni	Ni-ZrO <sub>2</sub>
$E_{i}$ معادله	$E=16924i-0.434$	$E=33416i-0.369$
$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	۱۶۹۲۴	-۴۳۴
$E_{corr}$ (mV)	۳۳۴۱۶	-۳۶۹



شکل ۸: شماتیک ریزساختار پوشش‌های Ni (الف) و Ni-ZrO<sub>2</sub> (ب).



شکل ۷: تصاویر میکروسکوپ الکترونی از مقاطع اچ شده پوشش‌های Ni (الف) و Ni-ZrO<sub>2</sub> (ب).

### نتیجه گیری

طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی برای بررسی رفتار خوردگی پوشش‌های کامپوزیتی مناسب است. در محیط دارای یون کلرید، برای مدل سازی رفتار پوشش‌های Ni و Ni-ZrO<sub>2</sub> باید سطح روئین به همراه مناطق دارای خوردگی موضعی در نظر گرفته شود. چنین مدلی منجر به ارایه مدار

## منابع

- J. R. Tuck, A. M. Korsunsky, R. I. Davidson, S. J. Bull and D. M. Elliott, *Modeling of the hardness of electroplated nickel coatings on copper substrates*, Surface and Coating Technology, 127(2000)1-8.
- L. Benea, P.L. Bonora, A. Borello and S. Martelli, *Wear corrosion properties of nano-structured SiC-nickel composite coatings obtained by electroplating*, Wear, 249(2002)995-1003.
- S. T. Aruna, V. K. William Grips and K. S. Rajam, *Ni-based electrodeposited composite coating exhibiting improved microhardness, corrosion and wear resistance properties*, Journal of Alloys and Compounds, 468(2009)546-552.
- S. C. Wang and W. C. J. Wei, *Kinetics of electroplating process of nano-sized ceramic particle/Ni composite*, Materials Chemistry and Physics, 78(2003)574-580.
- Y. S. Dong, P. H. Lin and H. X. Wang, *Electroplating preparation of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> graded composite coatings using a rotating cathode*, Surface and Coating Technology, 200(2006)3633-3636.
- C. Wang, Y. Zhong, W. Ren, Z. Lei, Z. Ren, J. Jia and A. Jiang, *Effects of parallel magnetic field on electrocodeposition behavior of Ni/nanoparticle composite electroplating*, Applied Surface Science, 254(2008)5649-5654.
- C. Wang, Y. B. Zhong, J. Wang, Z. Q. Wang, W.L. Ren, Z.S. Lei and Z.M. Ren, *Effect of magnetic field on electroplating Ni/nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coating*, Journal of Electroanalytical Chemistry, 630(2009)42-48.
- P. Gyftou, E. A. Pavlatou and N. Spyrellis, *Effect of pulse electrodeposition parameters on the properties of Ni/nano-SiC composites*, Applied Surface Science, 254(2008)5910-5916.
- X. S. Liang, J. H. Ouyang, Y. F. Li and Y. M. Wang, *Electrodeposition and tribological properties of Ni-SrSO<sub>4</sub> composite coatings*, Applied Surface Science, 255(2009)4316-4321.
- Y. J. Xue, X. Z. Jia, Y. W. Zhou, W. Ma and J. S. Li, *Tribological performance of Ni-CeO<sub>2</sub> composite coatings by electrodeposition*, Surface and Coating Technology, 200(2006)5677-5681.
- L. Chen, L. Wang, Z. Zeng and J. Zhang, *Effect of surfactant on the electrodeposition and wear resistance of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings*, Materials Science and Engineering: A, 434(2006)319-325.
- C. S. Ramesh and S. K. Seshadri, *Tribological characteristics of nickel based composite coatings*, Wear, 255(2003)893-902.
- Y. Zhou, H. Zhang and B. Qian, *Friction and wear properties of the co-deposited Ni-SiC nanocomposite coating*, Applied Surface Science, 253(2007)8335-8339.
- E. A. Pavlatou, M. Stroumbouli, P. Gyftou and N. Spyrellis, *Hardening effect induced by incorporation of SiC particles in nickel electrodeposits*, Journal of Applied Electrochemistry, 36(2006)385-394.
- X. Cui, W. Wei, H. Liu and W. Chen, *Electrochemical study of codeposition of Al particle-Nanocrystalline Ni/Cu composite coatings*, Electrochimica Acta, 54(2008)415-420.
- F. Hu, K. C. Chan, S. Z. Song and X. J. Yang, *Enhancement of corrosion resistance of electrocodeposited Ni-SiC composites by magnetic field*, Journal of Solid State Electrochemistry, 11(2007)745-750.
- C. Zanella, M. Lekka and P. L. Bonora, *Influence of the particle size on the mechanical and electrochemical behaviour of micro and nano-nickel matrix composite coatings*, Journal of Applied Electrochemistry, 39(2009)31-38.
- Th. Lampke, A. Leopold, D. Dietrich, G. Alisch and B. Wielage, *Correlation between structure and corrosion behaviour of nickel dispersion coatings containing ceramic particles of different sizes*, Surface and Coating Technology, 201(2006)3510-3517.
- M. R. Vaezi, S. K. Sadrezaad and L. Nikzad, *Electrodeposition of Ni-SiC nano-composite coatings and evaluation of wear and corrosion resistance and electroplating characteristics*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 315(2008)176-182.
- L. Wang, J. Zhang, Y. Gao, Q. Xue, L. Hu and T. Xua, *Grain size effect in corrosion behavior of electrodeposited nanocrystalline Ni coatings in alkaline solution*, Scripta Materialia, 55(2006)657-660.
- C. Guo, Y. Zuo, X. Zhao, J. Zhao and J. Xiong, *The effects of electrodeposition current density on properties of Ni-CNTs composite coatings*, Surface and Coating Technology, 202(2008)3246-3250.

22. F. Erler, C. Jakob, H. Romanus, L. Spiess, B. Wielage, T. Lampke and S. Steinhauser, *Interface behaviour in nickel composite coatings with nano-particles of oxidic ceramic*, *Electrochimica Acta*, 48(2003)3063-3070.
23. R. Arghavani and N. P. Ahmadi, *The effect of co-electrodeposited  $\text{ZrO}_2$  particles on the microstructure and corrosion resistance of Ni coatings*, *Journal of Solid State Electrochemistry*, DOI 10.1007/s10008-010-1229-z(2010).
24. R. Arghavani and N. P. Ahmadi, *Electrodeposition of  $\text{Ni-ZrO}_2$  composite coatings and evaluation of particle distribution and corrosion resistance*, *Surface Engineering*, 27(2011)649-654.
25. M.E. Orazem and B. Tribollet, *Electrochemical Impedance Spectroscopy*, Wiley, New Jersey(2008).