

مقایسه و ارزیابی رفتار خوردگی پوشش الکترولس نیکل - بور در ضخامت‌های متفاوت بر روی زیر لایه مسی

پگاه قاسمی زاده^{۱*}، عبدالمجید اسلامی^۲، محمدعلی گل‌عذار^۳

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

^۳ استاد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

* نویسنده مسئول: pegah.ghasemizadeh@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰

چکیده

در سال‌های اخیر پوشش‌های الکترولس نیکل - بور به علت خواص خوردگی و سایشی مطلوبی که دارند مورد توجه محققین و صنایع قرار گرفته است. در این پژوهش تاثیر ضخامت بر رفتار خوردگی این نوع پوشش‌ها در دو حالت قبل و بعد از عملیات حرارتی مورد ارزیابی قرار گرفت. پوشش‌دهی در سه ضخامت مختلف ۴۰، ۲۰ و ۶۰ میکرون انجام شد. نمونه‌ها تحت دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد و زمان یک ساعت عملیات حرارتی شدند. برای بررسی سطح پوشش از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. برای بررسی رفتار خوردگی از آزمون‌های پلاریزاسیون و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شد. بررسی رفتار خوردگی پوشش‌ها نشان داد که نمونه پوشش داده شده با ضخامت ۴۰ میکرون پس از عملیات حرارتی رفتار خوردگی بهتری نسبت به حالت‌های دیگر نشان می‌دهد. تصاویر به دست آمده از سطح این پوشش بزرگ‌تر شدن گل کلم شکل‌های مربوط به ساختار پوشش را نشان می‌دهد که منجر به کمتر شدن مرز دانه‌ها و بهبود رفتار خوردگی می‌شوند.

کلیدواژه: الکترولس نیکل - بور، خواص خوردگی، ضخامت پوشش، مورفولوژی پوشش.

Comparison and Evaluation of Nickel Boron Electroless Corrosion Behavior at Different Thicknesses on Copper Substrate

P. Ghasemizadeh ¹ *, A.M. Eslami ², M. A. Golazar ³

¹ Master, Faculty of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan

² Associate Professor, Faculty of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan

³ Professor, Faculty of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan

* Corresponding Author: pegah.ghasemizadeh@gmail.com

Submission: 2022, 04, 04 Acceptance: 2022, 07, 11

Abstract

Researchers and industries have considered Electroless nickel boron coatings due to their appropriate corrosion and wear properties. In this study, the effect of thickness on corrosion behavior of the nickel-boron electroless coating was evaluated before and after heat treatment. The coating was performed in three different thicknesses of 40, 20 and 60 micrometers. The samples were heat treated at 450 ° C for one hour. Scanning electron microscopy was used to evaluate the coating surface. Potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy tests were used to study the corrosion behavior. The results showed that the coated sample with a thickness of 40 microns after heat treatment shows better corrosion behavior than other samples. SEM images obtained from the surface of produced coatings showed the larger cauliflower-type structure having better corrosion behavior due to fewer grain boundaries.

Keywords: Nickel-boron electrodes, corrosion properties, coating thickness, coating morphology

۱- مقدمه

پیشرفت روزافزون علم و به وجود آمدن دستگاه‌ها و قطعات پیچیده که در محیط‌های گوناگون تحت خوردگی قرار می‌گیرند، لزوم استفاده از مواد با مقاومت در برابر خوردگی بیشتر را ایجاد می‌کنند. جهت افزایش توان دستگاه‌ها بایستی بتوان عمر کاری آن‌ها را افزایش داد، که این امر مستلزم داشتن سطحی مقاوم به خوردگی در محیط و شرایط کاری آن می‌باشد. به‌طور کلی پوشش‌ها را می‌توان به‌عنوان لایه‌ای سطحی روی مواد معرفی نمود که می‌تواند فلزی و یا غیرفلزی باشند. به کار بردن حمام‌های شیمیایی جهت ایجاد پوشش‌های رسوبی به طریق الکتروکاتیو و یا غیر الکتروکاتیو (الکتروکاتودیک) روی سطح قطعات از جمله روش‌های متداول و مرسوم است. آبکاری الکتروکاتودیک به دلیل یکنواختی ترکیب شیمیایی پوشش، ایجاد پوشش یکنواخت روی سطوح با اشکال پیچیده و توانایی ایجاد پوشش روی مواد عایق بیش از نیم‌قرن است که مورد توجه قرار گرفته است و به همین دلیل کاربرد گسترده‌ای در صنایع نیروگاهی، نفت، هوافضا، اتومبیل‌سازی، الکترونیک و شیمیایی پیدا کرده است [۱]. آبکاری الکتروکاتودیک با استفاده از حمام شیمیایی و بدون استفاده از جریان الکتروکاتیو خارجی، توسط واکنش شیمیایی درون حمام، پوشش یکنواختی از یک ترکیب فلزی روی سطح قطعات ایجاد می‌کند [۲]. در این فرایند یون‌های فلزی و عامل احیاکننده در حضور کاتالیزور با یکدیگر واکنش داده و بر روی سطح موردنظر که با انجام چند مرحله پیش از غوطه‌وری در حمام الکتروکاتودیک فعال شده است، رسوب می‌کنند. در حمام‌های الکتروکاتودیک، عامل احیاکننده، منبع تهیه الکترون برای انجام واکنش می‌باشد که می‌تواند هیپوفسیت، بورهیدرید و یا دیگر عوامل احیاکننده باشد. بسته به اینکه چه عامل احیاکننده‌ای استفاده شود، نوع پوشش الکتروکاتودیک نیکل مشخص می‌شود. فرایندهای آبکاری الکتروکاتودیک نیکل، عمدتاً به دودسته‌ی مهم نیکل - فسفر و نیکل - بور تقسیم‌بندی می‌شوند [۳]. پوشش‌های الکتروکاتودیک نیکل - بور از سختی و مقاومت به سایش بالاتری نسبت به پوشش نیکل - فسفر برخوردار هستند اما به دلیل هزینه‌ی بالاتر حمام و عدم سهولت در کنترل حمام نسبت به پوشش نیکل -

فسفر استفاده کمتری در صنعت از آن‌ها صورت گرفته است. اخیراً پوشش الکتروکاتودیک نیکل - بور و به‌ویژه نوع بورهیدریدی آن توجه زیادی را به خود جلب کرده است، علت این امر قابلیت این پوشش در بهبود خواص خوردگی و سایشی می‌باشد [۴-۶]. در پوشش‌دهی الکتروکاتودیک نیکل - بور از حمام‌های بورهیدریدی به‌منظور جلوگیری از تجزیه خودبه‌خودی حمام آبکاری و رسوب هیدروکسید نیکل و برای جلوگیری از تجزیه ناگهانی حمام آبکاری از عوامل پایدارکننده استفاده می‌گردد [۷]. درصد بور پوشش تعیین‌کننده نوع ساختار الکتروکاتودیک نیکل - بور پس از آبکاری است. هنگامی که درصد بور پوشش کمتر از ۳ درصد وزنی باشد، ساختار پوشش بلورین و زمانی که درصد بور بین ۶-۵ درصد وزنی باشد ساختار آمورف و در مقادیر مابین آن‌ها ساختار شامل هر دو فاز بلوری و آمورف خواهد بود [۸]. براساس مطالعات انجام‌شده [۹ و ۱۰]، مورفولوژی سطحی پوشش الکتروکاتودیک نیکل - بور به‌صورت گل‌کلمی است. در رابطه با نحوه شکل‌گیری ساختار سطحی پوشش نیکل-بور راتو و همکارانش [۱۱] بر این باورند که پوشش با مکانیسم جوانه‌زنی شروع به رشد می‌کند به‌طوری‌که رشد عرضی یکدیگر را محدود می‌کنند و به‌صورت ستونی رشد می‌کنند. با مصرف یون‌های محلول طی واکنش احیا، یک‌لایه نفوذی در ناحیه با غلظت یونی کم شکل می‌گیرد. هرچه این لایه نفوذی ضخیم‌تر شود سرعت رسوب‌گذاری را کاهش می‌دهد تا در نهایت رشد را متوقف کند. با این حال هنوز در جاهایی که لایه نفوذی توسط خروج گاز هیدروژن یا تلاطم حمام دچار تخریب شده است جوانه‌زنی رخ می‌دهد اما به دلیل کم بودن این جوانه‌ها فقط موجب خشن‌تر شدن ساختار سطحی می‌شوند. نرخ آبکاری که در شکل‌گیری ساختار نقش مؤثری ایفا می‌کند به عوامل مختلفی شامل دما [۱۲]، زمان آبکاری [۱۳]، تلاطم [۱۴] و ترکیب حمام آبکاری [۱۵] بستگی دارد. افزایش دما و تلاطم باعث افزایش نرخ آبکاری می‌شوند [۱۶] اما هرچه زمان آبکاری بیشتر شود سرعت رسوب‌گذاری کاهش می‌یابد. در مورد اثر ترکیب حمام تحقیقات زیوان و همکارانش [۱۵] نشان دادند که یک مقدار بهینه برای مقادیر آن‌ها وجود دارد که در آن بیشینه نرخ آبکاری به دست می‌آید.

با توجه به مهم بودن زمان و هزینه‌ها در صنایع مختلف، دستیابی به یک ضخامت بهینه از پوشش که خواص مطلوبی از آن را عرضه کند اهمیت زیادی دارد. در این مقاله پوشش الکتروکاتالیزور نیکل - بور با استفاده از یک حمام قلیایی در ضخامت‌های مختلف ایجاد شده و جهت مطالعه رفتار خوردگی و مورفولوژی سطحی مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش آزمایش

در این تحقیق از مس به عنوان زیر لایه استفاده گردید. ترکیب شیمیایی مس مزبور در جدول ۱ آورده شده است. از این زیر لایه نمونه‌هایی دیسکی شکل به قطر ۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۱ سانتیمتر تهیه گردید. زیر لایه‌های مسی پس از سایش با کاغذ سنباده SiC تا شماره ۱۲۰۰، به مدت ۱۵ دقیقه در حمام التراسونیک و استون گذاشته شدند و پس از آن به منظور چربی زدایی در محلول سود ۱۵ درصد وزنی با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شدند، سپس برای فعال‌سازی سطح نمونه‌ها برای زمان ۱ دقیقه در هیدروکلریک اسید ۵ درصد وزنی اچ شدند و بعد از این مرحله عملیات پوشش دهی بر روی نمونه‌ها انجام شد.

به منظور عملیات پوشش دهی حمام الکتروکاتالیزور نیکل - بور از نیکل کلراید به عنوان منبع یون نیکل، سدیم بوروهیدرید به عنوان منبع یون بور، اتیلن دی آمین به عنوان عامل کمپلکس کننده، تالیم استات به عنوان پایدار کننده و سدیم هیدروکسید به عنوان عامل بافر استفاده شد. ترکیب شیمیایی حمام در جدول ۲ نمایش داده شده است. سدیم بوروهیدرید در حمام‌های قلیایی پایدار است بنابراین سدیم هیدروکسید نقش مهمی در قلیایی کردن حمام دارد.

۱ pH و دمای حمام آبکاری الکتروکاتالیزور نیکل-بور در هنگام پوشش دهی به ترتیب در محدوده 12 ± 0.5 و 85 ± 5 درجه سانتیگراد نگه داشته شد. آبکاری درون یک بشر ۳۰۰ میلی‌لیتری انجام شد که توسط یک آهنربا، محلول آبکاری هم زده می‌شد. به منظور اندازه‌گیری pH از دستگاه pH متر دیجیتال مدل Adwa با دقت ۰/۰۱ استفاده شد. زمان آبکاری برای هر کدام از سه ضخامت به دست آمده متفاوت بود. در جدول ۳ زمان بندی آبکاری برای به دست آوردن ضخامت‌های متفاوت آورده شده است. در این آزمایش متغیر مورد نظر ضخامت پوشش است. به همین منظور عملیات آبکاری بر روی سه زوج نمونه در سه بازه زمانی متفاوت انجام شد. از هر زوج از نمونه‌ها،

جدول ۱. ترکیب شیمیایی مس مورد استفاده

عنصر	Cu	Si	Al	Mg	Ca	Fe	Cl	S
غلظت (درصد وزنی)	۹۸/۳۲	۰/۹۹۲	۰/۲۲	۰/۰۷۷	۰/۰۶۳	۰/۰۵۳	۰/۰۴۷	۰/۰۴۶

جدول ۲. ترکیب حمام آبکاری پوشش الکتروکاتالیزور نیکل-بور

نام ماده	غلظت (گرم/لیتر)
نیکل کلراید	۳۰
سدیم بوروهیدرید	۱
اتیلن دی آمین	۹۰
سدیم هیدروکسید	۹۰
تالیم استات	۰/۰۱۸

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمون پراش پرتو ایکس

شکل ۱ الگوی پراش پرتو ایکس در مورد دو نمونه در شرایط پس از آبکاری و پس از عملیات حرارتی را نشان می‌دهد. مطابق شکل در شرایط پس از آبکاری، ساختار بلورشناسی پوشش آمورف است چراکه یک پیک وسیع با ارتفاع کم دیده می‌شود و پیک تیزی در پراش آن مشاهده نمی‌شود. در تحقیقات پیشین علت تشکیل فاز آمورف بعد از عملیات آبکاری، تفاوت در عدد همسایگی و شبکه بلوری نیکل و بور، میل شیمیایی این دو عنصر نسبت به یکدیگر و دمای پایین فرایند پوشش‌دهی بیان شده است. در شرایط پس از عملیات حرارتی در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد و زمان یک ساعت، پوشش به جهت داشتن پیک‌های مرتفع کاملاً متبلور گردیده و فازهای مربوط به بورید نیکل یعنی Ni_3B و Ni_2B قابل مشاهده هستند. در طی عملیات حرارتی، بور از مرکز پوشش به سطح آن منتقل می‌شود که در نهایت این عمل باعث به وجود آمدن درجه بالایی از بلورینگی می‌شود.

۳-۲- بررسی مورفولوژیکی

شکل ۲ تصاویر بدست آمده از سطح نمونه با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی را برای نمونه‌ها در ضخامت‌های مختلف نشان می‌دهد.

خواص یکی در حالت پس از آبکاری و دیگری در حالت عملیات حرارتی شده مورد بررسی قرار گرفت. عملیات حرارتی بر روی نمونه‌ها در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد و زمان یک ساعت در اتمسفر هوا انجام گرفت.

جهت بررسی فازهای موجود در پوشش الکتروکاتالیز نیکل - بور آنالیز پراش پرتو ایکس توسط دستگاه XRD^۱ مدل PANalytical xpert با منبع اشعه ایکس $Cu K\alpha$ مورد استفاده قرار گرفت. جهت مشاهده مورفولوژی سطح و ضخامت برش نمونه‌ها از دستگاه SEM^۲ مدل Philips xl 300 series استفاده شد. به منظور بررسی رفتار خوردگی پوشش الکتروکاتالیز نیکل - بور از آزمون‌های پلاریزاسیون و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)^۳ در یک سل استاندارد سه الکترودی استفاده شد. دستگاه مورد استفاده برای آزمون خوردگی پتانسیواستات/گالوانواستات مدل AMETEK PARSTAT 2237 بود. از الکترودهای پلاتین و نقره/کلرید نقره به ترتیب به عنوان الکتروکاتالیز کمی و مرجع استفاده شد. تمامی آزمون‌ها در محلول ۳/۵ درصد آب نمک انجام شد. شایان ذکر است که قبل از انجام آزمون‌های پلاریزاسیون، نمونه‌ها تا زمانی که پتانسیل مدار باز آن‌ها به تعادل برسد، در داخل محلول آب نمک غوطه‌ور بودند و آزمون‌های طیف سنجی الکتروشیمیایی امپدانس در پتانسیل مدار باز انجام شد.

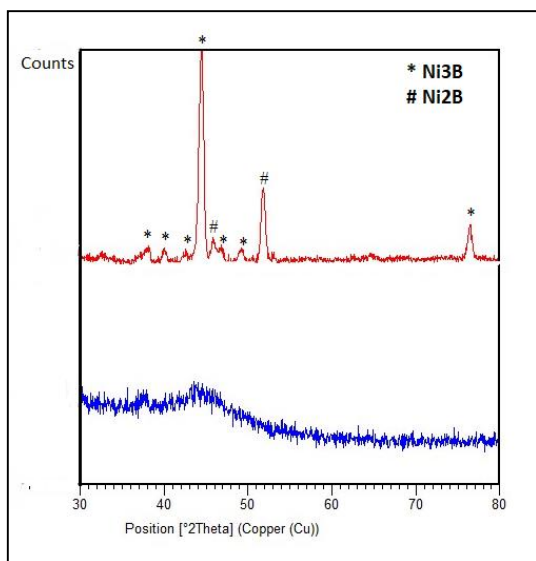
جدول ۳. زمان بندی آبکاری الکتروکاتالیز نیکل - بور

زمان (دقیقه)	ضخامت (میکرومتر)
۳۰	۲۰
۶۰	۴۰
۱۲۰	۶۰

^۳ Electrochemical impedance spectroscopy

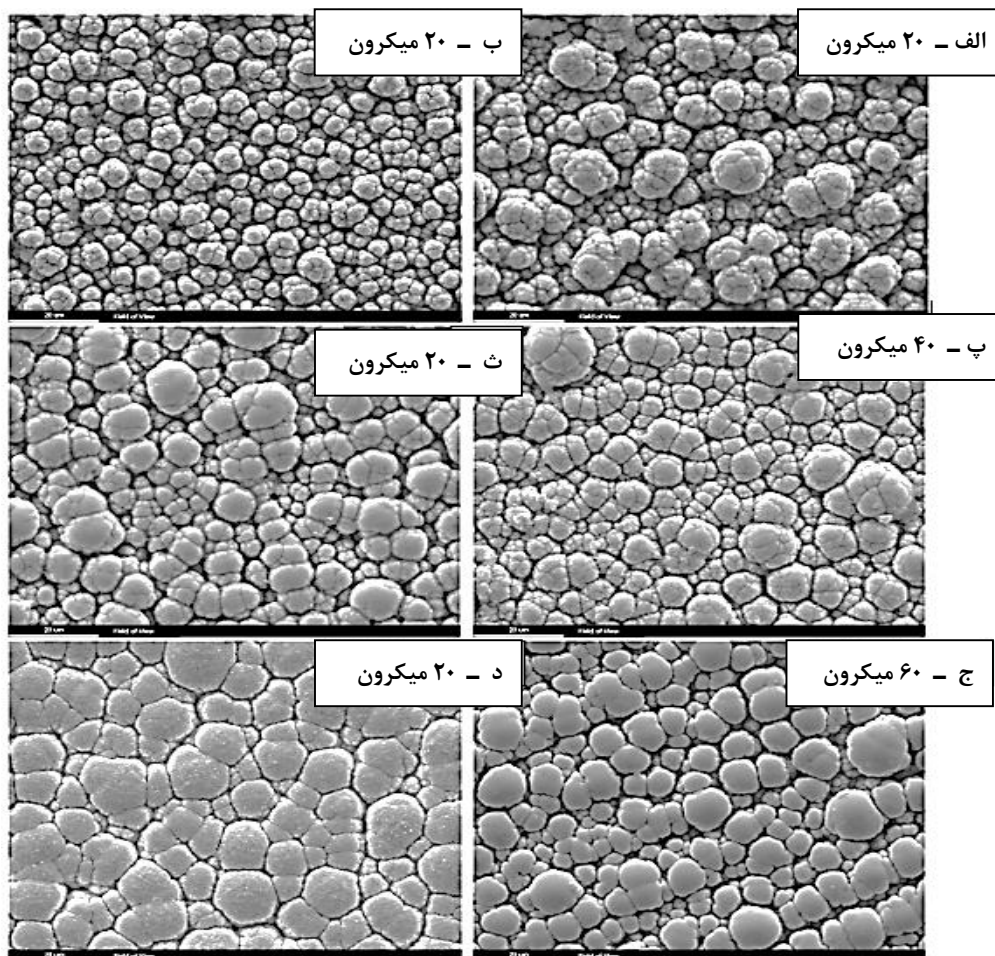
^۱ X-Ray Diffraction

^۲ Scanning Electron Microscopy

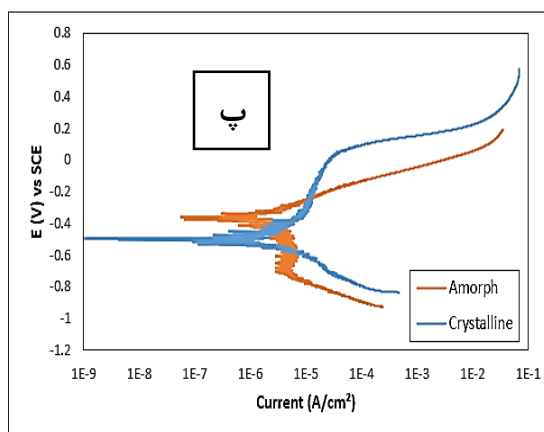
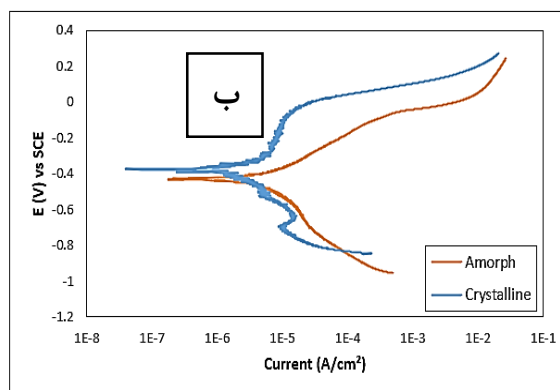
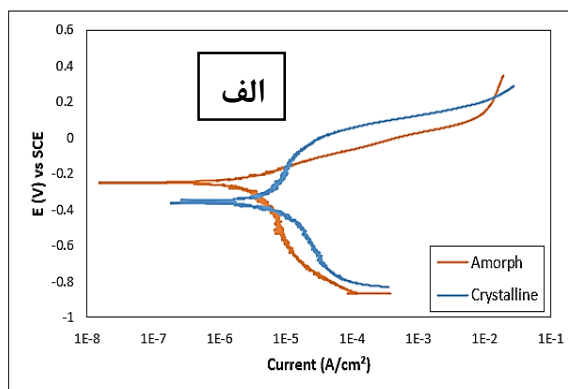


شکل ۱. الگوی پراش پرتو ایکس پوشش الکترولس نیکل-بور قبل و بعد از عملیات حرارتی

مطابق با این تصاویر مشاهده می‌شود که برای ضخامت کمتر ساختار گل کلمی شکلی ایجاد شده است اما هرچه ضخامت پوشش بیشتر می‌شود ساختار از حالت گل کلمی شکل به سمت دانه‌ای شدن می‌رود. علت این امر را می‌توان با در نظر گرفتن نظریه‌های گفته شده بر اساس تحقیقات پیشین بدین صورت بیان کرد که با افزایش مدت زمان آبکاری ساختارهای گل کلمی شکل ناشی از جوانه‌زنی‌های اولیه، رشد می‌کنند و گل کلم‌های کوچکتر را درون خود می‌کشند که منجر به درشت تر شدن آن‌ها و تشکیل دانه‌ها می‌شود که در نهایت منجر به ایجاد ساختار به صورت دانه‌ای (قلوه سنگی) می‌گردد. هنگامی که نمونه‌ها تحت عملیات حرارتی قرار می‌گیرند، در ضخامت‌های متفاوت رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند.



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مورفولوژی پوشش الکترولس نیکل - بور پیش از عملیات‌های حرارتی با ضخامت‌های مختلف



شکل ۳. نمودارهای حاصل از آزمون‌های پلاریزاسیون، الف)

پوشش با ضخامت ۲۰ میکرون، ب) پوشش با ضخامت ۴۰

میکرون، پ) پوشش با ضخامت ۶۰ میکرون

در ضخامت ۲۰ میکرون اندازه گل کلم‌ها نسبت به حالت پیش از عملیات حرارتی، ریزتر شده است. در مورد نمونه‌ها با ضخامت ۴۰ میکرون عملیات حرارتی باعث می‌شود که میانگین اندازه دانه‌ها مقداری افزایش یابد. برای نمونه‌های پوشش داده شده با ضخامت ۶۰ میکرون عملیات حرارتی به طور محسوسی باعث فشرده تر شدن دانه‌ها می‌شود.

۳-۳- نتایج آزمون‌های پلاریزاسیون

شکل ۳ نمودارهای حاصل از آزمون‌های پلاریزاسیون را برای پوشش‌های با ضخامت متفاوت در دو حالت قبل و بعد از عملیات حرارتی نشان می‌دهد. مقادیر جریان و پتانسیل خوردگی به دست آمده از این نمودارها در جدول ۴ آورده شده است. برای به دست آوردن جریان خوردگی از روش برون‌یابی در ۳۰ میلی ولت بالاتر و پایین‌تر از پتانسیل خوردگی استفاده شد. به طور کلی مواد آمورف مقاومت به خوردگی بهتری نسبت به مواد کریستالی و پلی کریستالی ارائه می‌دهند، زیرا از مرز دانه‌ها که مناطق مستعد به خوردگی هستند و سبب خوردگی موضعی می‌شوند عاری هستند. در بررسی انجام شده مشاهده می‌شود که برای نمونه با ضخامت ۲۰ میکرون عملیات حرارتی باعث کاهش جریان خوردگی می‌شود که در تطابق با تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نیز می‌باشد، زیرا عملیات حرارتی باعث ریزتر شدن ساختار گل کلمی شکل و در نتیجه افزایش مرز دانه شده است. برای نمونه با ضخامت ۴۰ میکرون عملیات حرارتی رفتار خوردگی را بهبود داده است که با توجه به تصاویر میکروسکوپی افزایش اندازه گل کلم شکل‌ها و به دنبال آن کاهش میزان مرز دانه برای این رفتار قابل توجه است. در مورد نمونه با ضخامت ۶۰ میکرون عملیات حرارتی روند خوردگی را کاهش داده است که در راستای تصاویر میکروسکوپی میتوان علت را در فشرده تر شدن مورفولوژی سطح دانست.

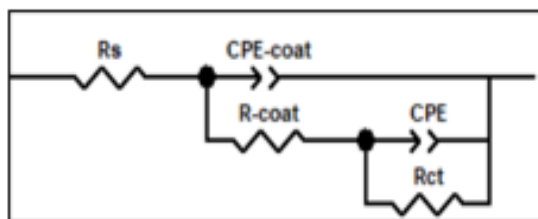
پوشش با الف. ضخامت ۲۰ میکرون، ب. پوشش با ضخامت ۴۰ میکرون، پ. پوشش با ضخامت ۶۰ میکرون حالت عملیات حرارتی شده برای تمامی ضخامت‌ها شاخه آندی نشان‌دهنده رفتار شبه رویین است. در این حالت اگرچه ناحیه رویین بصورت عدم تغییر پتانسیل با افزایش جریان ظاهر نمی‌شود، اما نرخ تغییرات پتانسیل نسبت به جریان بسیار کم است. عملیات حرارتی پوشش الکترولس نیکل بور به دلیل تشکیل پلی کریستال‌های Ni_2B و Ni_3B منطقه پسیواسیون را افزایش می‌دهد.

۳-۴ - نتایج آزمون‌های طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی

نمودارهای نایکوئیست حاصل از طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی در شکل ۵ آورده شده است. قطر نیم دایره‌ها نشان‌دهنده مقاومت انتقال بار است. هرچه قطر حلقه بزرگ‌تر و ظرفیت خازنی آن کمتر باشد پوشش مقاوم‌تر است. بهترین مدار الکتریکی برای توضیح روند خوردگی دو ثابت زمانی دارد که در شکل ۴ آورده شده است. مدار معادل شامل یک ظرفیت خازنی موازی با یک مقاومت برای پوشش است که با یک ظرفیت خازنی و مقاومت انتقال بار موازی دیگر، سری شده‌اند. نتایج آنالیز طیف‌نگاری امپدانس در جدول ۵ قابل مشاهده است. اولین ثابت زمانی در فرکانس زیاد به ساختار پوشش نسبت داده می‌شود و دومین ثابت زمانی در فرکانس کم مربوط به خوردگی پوشش است. با بررسی قطر نیم دایره‌های نایکوئیست نمونه‌ها ملاحظه شد بهترین عملکرد خوردگی برای پوشش در حالت عملیات حرارتی شده برای ضخامت ۴۰ میکرون می‌باشد. با توجه به نتایج پلاریزاسیون کمترین جریان خوردگی مربوط به نمونه آمورف با ضخامت ۲۰ میکرون می‌باشد و پس از آن نمونه کریستالی با ضخامت ۴۰ میکرون در رتبه دوم قرار می‌گیرد. اما با در نظر گرفتن روند خوردگی، نمونه آمورف با ضخامت ۲۰ میکرون در شاخه آندی با شیب تند در حال خورده شدن است در حالی که نمونه کریستالی با ضخامت ۴۰ میکرون رفتار رویین از خود نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن این نکات رفتار نایکوئیست نمونه‌ها قابل توجه می‌باشد.

جدول ۴. مقادیر پتانسیل و جریان خوردگی برای نمونه‌های پوشش داده شده در ضخامت‌های مختلف

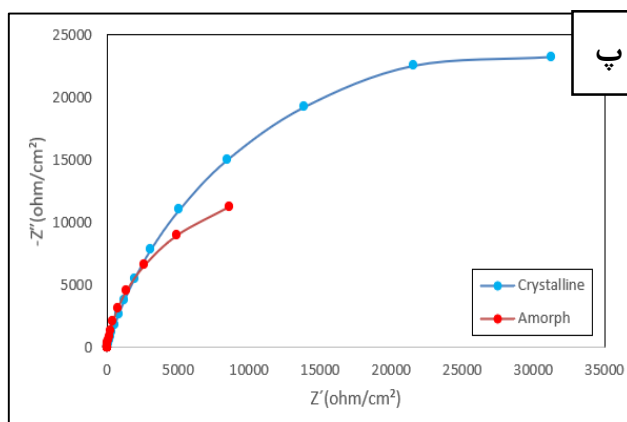
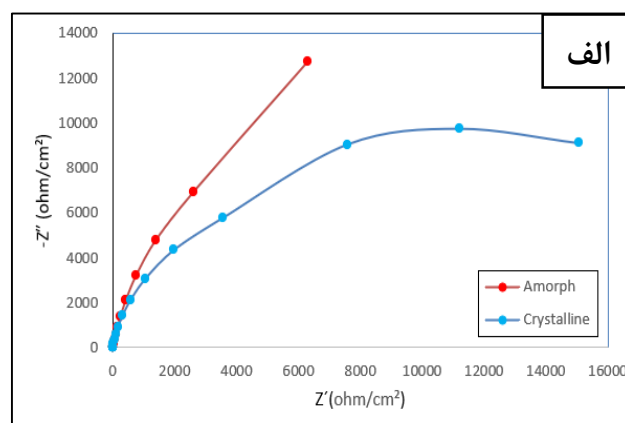
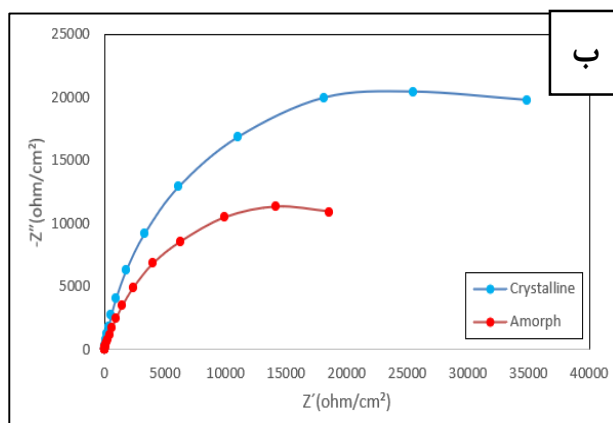
ضخامت (میکرومتر)	ساختار	پتانسیل خوردگی (ولت)	جریان خوردگی (میلی آمپر بر سانتی‌متر مربع)
۲۰	آمورف	-۰/۲۸	۰/۰۰۲۶۳
	کریستالی	-۰/۳۹	۰/۰۰۶۴۹
۴۰	آمورف	-۰/۵	۰/۰۰۶۴۷
	کریستالی	-۰/۴۳	۰/۰۰۳۶۴
۶۰	آمورف	-۰/۳۹	۰/۰۰۴۱۷
	کریستالی	-۰/۵۵	۰/۰۰۴۸۵



شکل ۴. مدار معادل فیت شده برای نمودار طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

جدول ۵. مقادیر به دست آمده از مدار معادل مربوط به نمودارهای نیکوئیست پوشش الکتروکاتالیز نیکل - بور

نمونه‌ها بر حسب ضخامت (میکرومتر)			قبل از عملیات حرارتی			بعد از عملیات حرارتی		
	۲۰	۴۰	۶۰	۲۰	۴۰	۶۰		
R_s	۱۰/۴۶	۸/۸۲۳	۴/۹۲۳	۶/۱۸۳	۹/۴۸۶	۷/۳۷۲		
CPE_{coat}	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۱	۵۵/۲۶۶×۱۰ ^{-۵}		
R_{coat}	۷۷/۴۷	۱۶۲/۲	۶۷/۲۳	۱۵۸/۹	۱۷۸	۱۲۰/۷۱		
CPE	۴/۰۸×۱۰ ^{-۵}	۶/۶۱×۱۰ ^{-۵}	۲/۶×۱۰ ^{-۱۸}	۱/۲×۱۰ ^{-۱۸}	۲/۲۵×۱۰ ^{-۵}	۳/۹۷×۱۰ ^{-۱۷}		
R_{ct}	۳۲۲۶۶	۳۰۲۶۶	۱۸۹۲۳	۲۰۷۵۷	۴۸۴۰۳	۴۱۴۷۷		



شکل ۵. نمودارهای طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی برای پوشش الکتروکاتالیز نیکل - بور، (الف) ضخامت ۲۰ میکرون، (ب) ضخامت ۴۰ میکرون، (ج) ضخامت ۶۰ میکرون

نتیجه‌گیری

۱. با توجه به تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی، در ضخامت ۲۰ میکرون اندازه گل کلم‌ها نسبت به حالت پیش از عملیات حرارتی، ریزتر شده است. در مورد نمونه‌ها با ضخامت ۴۰ میکرون عملیات حرارتی باعث میانگین اندازه دانه‌ها مقداری افزایش یابد. برای نمونه‌های پوشش داده‌شده با ضخامت ۶۰ میکرون عملیات حرارتی به طور محسوسی باعث فشردگی دانه‌ها می‌شود.
۲. با توجه به الگوی پراش پرتو ایکس، در شرایط پس از عملیات حرارتی در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد و زمان یک ساعت، پوشش به جهت داشتن پیک‌های مرتفع کاملاً متبلور گردیده و فازهای مربوط به بورید نیکل یعنی Ni_3B و Ni_2B قابل مشاهده هستند.
۳. در بررسی‌های انجام‌شده بر روی نتایج آزمون پلاریزاسیون، مشاهده شد که برای نمونه با ضخامت ۲۰ میکرون عملیات حرارتی باعث کاهش جریان خوردگی می‌شود زیرا عملیات حرارتی باعث ریزتر شدن ساختار گل کلمی شکل و در نتیجه افزایش مرز دانه شده است. برای نمونه با ضخامت ۴۰ میکرون عملیات حرارتی رفتار خوردگی را بهبود داده است که با توجه به افزایش اندازه گل کلم شکل‌ها و به دنبال آن کاهش میزان مرز دانه این رفتار قابل توجیه است. در مورد نمونه با ضخامت ۶۰ میکرون عملیات حرارتی روند خوردگی را کاهش داده است که میتوان علت را در فشردگی سطح دانست.
۴. براساس نتایج آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، بیشترین مقاومت انتقال بار برای ضخامت ۴۰ میکرون در حالت عملیات حرارتی شده می‌باشد بنابراین بهترین عملکرد خوردگی برای این حالت است. با توجه به نتایج پلاریزاسیون کمترین جریان خوردگی مربوط به نمونه آمورف با ضخامت ۲۰ میکرون می‌باشد و پس از آن نمونه کریستالی با ضخامت ۴۰ میکرون در رتبه دوم قرار می‌گیرد. اما با در نظر گرفتن روند خوردگی، نمونه آمورف با ضخامت ۲۰ میکرون در شاخه آندی با شیب تندی در حال خورده شدن است در حالی که نمونه کریستالی با ضخامت ۴۰ میکرون رفتار روئین از خود نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن این نکات رفتار نایکون‌یست نمونه‌ها قابل توجیه می‌باشد.

مراجع

- [1] Y. Riddle and T. Bailerare, "Friction and wear reduction via an Ni-B electroless bath coating for metal alloys", Jom, 57, 2005, 40-45.
- [2] N. Kanani, "Electroplating: basic principles, processes and practice," 2004, Elsevier ,
- [3] C. Dervos, J. Novakovic, and P. Vassiliou. *Electroless Ni-B and Ni-P coatings with high-fretting resistance for electrical contact applications*. In *Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts Electrical Contacts*, 2004. 2004. IEEE.
- [4] C. Loto, "Electroless nickel plating-a review," Silicon, 8, 2016, 177-186.
- [5] C. Dervos, J. Novakovic, and P. Vassiliou, "Vacuum heat treatment of electroless Ni-B coatings," Materials Letters, 58, 2004, 619-623.
- [6] T. Watanabe, "Nano-plating: microstructure control theory of plated film and database of plated film microstructure," 2004, Elsevier ,
- [7] Y.W. Riddle and C.E. McComas, *Advances in electroless Nickel-Boron coatings: Improvements to lubricity and wear resistance on surfaces of automotive components*. 2005, SAE Technical Paper.
- [8] A.-F. Kanta, V. Vitry, and F. Delaunois, "Wear and corrosion resistance behaviors of autocatalytic electroless plating," Journal of Alloys and Compounds, 486, 2009, L21-L23.
- [9] F. Delaunois, et al., "Autocatalytic electroless nickel-boron plating on light alloys," Surface and Coatings Technology, 124, 2000, 201-209.
- [10] L. Bonin, et al., "Electroless deposition of nickel-boron coatings using low-frequency ultrasonic agitation : Effect of ultrasonic frequency on the coatings," Ultrasonics, 77, 2017, 61-68.
- [11] Q.-I. Rao, et al., "Microstructure evolution of electroless Ni-B film during its depositing process," Applied Surface Science, 240, 2005, 28-33.
- [12] T.S. Narayanan and S. Seshadri, "Formation and characterization of borohydride reduced electroless nickel deposits," Journal of alloys and compounds, 365, 2004, 197-205.
- [13] I. Baskaran, et al., "Formation of electroless Ni-B coatings using low-temperature bath and evaluation of their characteristic properties," Surface and Coatings Technology, 200, 2006, 6888-6894.
- [14] A. Chiba, H. Haijima, and K. Kobayashi, "Effect of sonication and vibration on the electroless Ni-B deposited film from the acid bath," Surface and Coatings Technology, 169, 2003, 104-107.
- [15] S. Ziyuan, W. Deqing, and D. Zhimin, "Surface strengthening pure copper by Ni-B coating," Applied Surface Science, 221, 2004, 62-68.
- [16] A. Mondal, et al., "NiB deposits on p-silicon using borohydride as a reducing agent," Materials research bulletin, 39, 2004, 2187-2192.

