لایه نشانی الکتروفورتیک نانوذرات Al_2O_3-TiO_2 در محیط‌های الکلی مختلف و بررسی مقاومت الکتریکی آن‌ها

بهنام مبینی دهکردی*[1]، بهروز شایق بروجنی[1]، محمدرضا سائری[1]، مجید مرادی زاده[1]، یحیی عبدالهی[1]، شهرام شریفیان[2]

[1]*دانشگاه شهرکرد، گروه مهندسی مواد، شهرکرد، ایران.*

[2]*شرکت گاز استان چهارمحال و بختیاری، شهرکرد، ایران.*

تاریخ ثبت اولیه:۱۳۹۴/۹/۲۶، **تاریخ دریافت نسخهٔ اصلاح شده:**۱۳۹۵/۳/۲، **تاریخ پذیرش قطعی:**۱۳۹۵/۳/۲۳

چکیده در این پژوهش، نشست الکتروشیمیایی نانوذرات آلومینا- تیتانیا به صورت لایه نازک در محیط‌های الکلی مختلف از جمله الکترولیت‌های اتانولی، بوتانولی و ایزوپروپانولی بر روی زیرلایه‌های فولادی Api۵-GrB با استفاده از فرآیند الکتروفورتیک (Electrophoretic) مورد ارزیابی قرار گرفت. عملیات پوشش‌دهی در محدوده ولتاژ ۳۰ تا ۶۰ ولت انجام شد، همچنین از روش کرونوآمپرومتری برای بررسی مکانیزم جوانه‌زنی و کیفیت سطحی پوشش‌ها استفاده گردید. نانوذرات آلومینا- تیتانیا، الکترولیت‌های الکلی مختلف (اتانول، بوتانول و ایزوپروپانول)، ذرات پراکنده‌ساز (ید) و زیرلایه‌های فولادی Api۵-GrB به عنوان مواد مصرفی مورد استفاده قرار گرفتند. در آزمون اندازه‌گیری وزن پوشش نشان داده شد که وزن پوشش ایجاد شده با افزایش ولتاژ پوشش‌دهی افزایش می‌یابد. با اعمال ولتاژهای ۳۰ و ۴۰ ولت، بیشترین میزان پوشش در حضور سوسپانسیون بوتانولی ایجاد شد اما با افزایش ولتاژ، بیشترین پوشش در حضور سوسپانسیون اتانولی تشکیل شد.

کلمات کلیدی: نشست الکتروشیمیایی، نانوذرات آلومینا- تیتانیا، فرآیند الکتروفورتیک، روش کرونوآمپرومتری، زیرلایه‌های فولادی Api۵-GrB.

Investigation of Electrical Resistance and Electrophoretic Deposition of Al_2O_3-TiO_2 Nanoparticles in Different Alcoholic Environments

B.Mobini Dehkordi*[1], B.Shayegh Borujeny[1], M.R.Saeri[1], M.Moradi Zadeh[1], Y.Abdollahi[1] , Sh.Sharifian[2]

[1]*University of Shahrekord, Department of Material Engineering, Shahrekord, Iran.*

[2]*Chaharmahal and Bakhtiari Province Gas Company, Shahrekord, Iran.*

Abstract In this research, electrochemical deposition of alumina-titania nanoparticles in thin-film forms and in different alcoholic environments such as ethanol, butanol and isopropanol on Api5-GrB steel substrates was evaluated. Different voltages were applied to the coating, also chronoamperometry method was used in order to investigation of nucleation mechanism and quality of the coatings surface. Alumina-Titania nanoparticles, different alcoholic electrolytes (ethanol, butanol and isopropanol), dispersant particles (iodine) and Api5-GrB steel substrates were used as consuming materials. In the coating weight measurement test showed that the coatings weight increases with increasing voltage. With applying 30, 40 voltages, the maximum coverage was created in presence of butanol suspension but by increasing the voltage, the maximum cover was made in the presence of ethanol suspension.

Keywords electrochemical deposition, alumina-titania nanoparticles, Api5-GrB steel, chronoamperometry method.

***عهده دار مکاتبات**

نشانی: شهرکرد، بلوار رهبر، دانشگاه شهرکرد، **تلفن:** ۰۹۱۳۱۸۵۱۸۱۲، **پیام نگار:** bmobini_d@yahoo.com

۱- مقدمه

تکنیک‌های الکتروشیمیایی، روش‌هایی سریع جهت شناسایی فرآیندهایی هستند که در سطح اتفاق می‌افتد. از روش‌های الکتروشیمیایی مانند ولتامتری سیکلی، کرونوآمپرومتری و کرونوپتانسیومتری به منظور بررسی مکانیزم جوانه‌زنی و رشد رسوب نانوذرات (فلزی، سرامیکی) به صورت لایه نازک در حمام‌های مختلف استفاده شده است. تا کنون تحقیقات زیادی در مورد نشست الکتروشیمیایی آلیاژهای فلزی مختلف به صورت لایه نازک در حضور محلول‌های مختلف از جمله سولفاتی انجام گرفته است. از نشست الکتروشیمیایی مواد مهندسی به صورت آلیاژی به طور گسترده برای تولید مواد با ساختار جدید و منحصر به فرد مانند لایه‌های نازک با خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوت در سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۳-۱].

فرآیند الکتروفورتیک (Electrophoretic) یکی از روش‌های مهم برای لایه‌نشانی ذرات سرامیکی در حضور حمام‌های الکترولیتی مختلف می‌باشد، در اکثر تحقیقات انجام گرفته بر روی فرآیند پوشش‌دهی به روش الکتروفورتیک، اغلب از میدان الکتریکی با جریان مستقیم (DC) برای لایه نشانی استفاده شده است [۶-۴]. فرآیند الکتروفورتیک (Electrophoretic) یکی از تکنیک‌های رسوب‌دهی ذرات کلوئیدی است که دارای مزیت‌های زیادی از جمله آسان بودن روش، هزینه کم و کنترل میکروساختار پوشش از طریق منظم نمودن پارامترهای پوشش‌دهی می‌باشد. روش الکتروفورتیک یک فرآیند دو مرحله‌ای است:

۱) در مرحله اول، ذرات باردار موجود در سوسپانسیون تحت تأثیر میدان الکتریکی اعمالی به طرف الکترود با بار مخالف حرکت می‌کنند.

۲) در مرحله دوم، ذرات بر روی الکترود با بار مخالف رسوب می‌کنند و یک لایه نسبتاً متراکم را تشکیل می‌دهند [۷].

پوشش‌های سرامیکی اخیراً برای بهبود مقاومت در برابر سایش [۱۰-۸]، مقاومت در برابر خوردگی [۱۶-۱۱]، مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

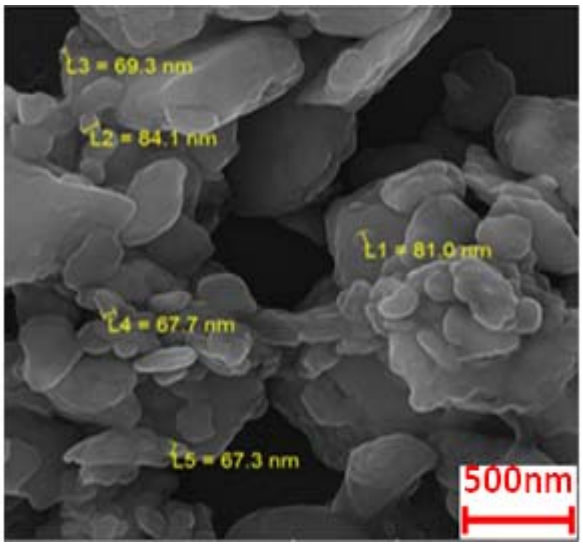
هدف از این تحقیق بررسی نشست الکتروشیمیایی نانوذرات آلومینا - تیتانیا به صورت لایه نازک در حضور الکترولیت‌های الکلی مختلف از جمله الکترولیت‌های اتانولی، بوتانولی و ایزوپروپانولی بر روی زیرلایه‌های فولادی Api۵-GrB می‌باشد. در این پژوهش، تأثیر عوامل مختلفی از جمله: حلال‌های الکلی مختلف، ولتاژ اعمالی و زمان پوشش‌دهی بر روی سینتیک عملیات پوشش‌دهی و همچنین بر روی وزن نشست پوشش سنتز شده مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

پودر Al_2O_3-TiO_2 با وزن مولکولی ۱۸۱/۸۳ gr/mol، از شرکت سیگما-آلدریچ (SIGMA-ALDRICH Corporation,st.Louis, MO) مورد استفاده قرار گرفت.

در شکل (۱)، تصویر میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (FE-SEM) از ذرات سرامیکی آلومینا - تیتانیا نشان داده شده و اندازه برخی از ذرات نیز اندازه گیری گردیده است. الکل‌های اتانول با خلوص % ۹۹/۹ ≤ بوتانول و ایزوپروپانول هر دو با خلوص % ۹۹/۵ ≤ [همگی از شرکت مرک (Merck Corporation)] به عنوان حلال استفاده شدند، همچنین از ذرات ید به عنوان پراکنده ساز استفاده گردید.

سوسپانسیون‌هایی با غلظت ۱۰gr/Lit، از پودر آلومینا-تیتانیا (Al_2O_3-TiO_2) در حضور الکترولیت‌های الکلی مختلف از جمله اتانول، بوتانول و ایزوپروپانول تهیه گردید، از ذرات ید به عنوان پراکنده‌ساز بهره گرفته شد، همچنین لازم به ذکر است که سوسپانسیون‌های آماده شده با استفاده از مقدار بهینه پراکنده ساز ید، به منظور پایدار سازی به ترتیب به مدت ۶ ساعت بر روی هم‌زن مغناطیسی و ۱۰ دقیقه در معرض حمام آلتراسونیک قرار داده شدند. برای تهیه الکترودهای کمکی و کار از قطعه‌های فولادی Api۵-GrB با ابعاد (۱×۲cm) استفاده شد. نمونه‌های پوشش داده شده برای پخت در کوره الکتریکی به مدت ۲ ساعت و در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس قرار داده شدند. لازم به ذکر است که به منظور آسیب نخوردن به پوشش‌ها، سرعت گرم و سرد کردن کوره به میزان ۳/۳ c°/min قرار داده شد. در شکل (۲)، شماتیکی از دستگاه الکتروفورتیک مشاهده می‌شود.

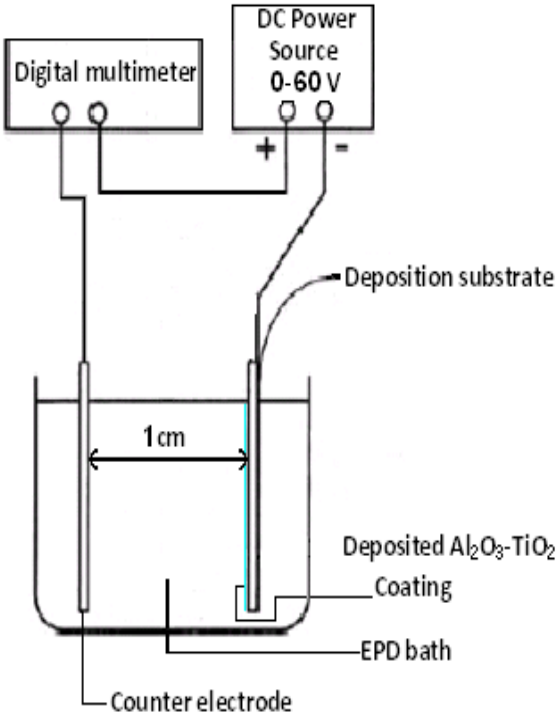


شکل ۱. تصویر FESEM ذرات سرامیکی آلومینا- تیتانیا.

تجهیزات مورد استفاده برای فرآیند لایه نشانی در منابع [۱۹-۱۷] توضیح داده شده است.

تأثیر عامل‌های زمان، ولتاژ پوشش‌دهی و محیط‌های الکترولیتی مختلف بر روی مورفولوژی پوشش سنتز شده، مورد بررسی قرار گرفت.

برای محاسبه وزن پوشش و عکس‌برداری از نمونه‌ها به ترتیب از ترازوی دیجیتالی (Metler-Toledo, AG ۲۸۵) با دقت ۰٫۰۰۰۱ گرم و میکروسکوپ نوری (IMM-۴۲۰) با حداکثر بزرگنمایی × ۴۰ استفاده شد.



شکل ۲. شماتیکی از دستگاه الکتروفورتیک [۲۰].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر زمان

با توجه به منحنی‌های تغییرات وزن پوشش بر حسب زمان، با اعمال ولتاژهای ثابت، جرم نشست با گذشت زمان افزایش می‌یابد اما روند تغییرات آن در حضور الکترولیت‌های اتانولی و بوتانولی به این صورت است که ابتدا شیب منحنی زیاد و سپس در زمان‌های بالاتر کاهش می‌یابد اما در حضور سوسپانسیون ایزوپروپانولی، در ابتدا شیب منحنی کم، سپس افزایش می‌یابد و در زمان‌های بالاتر کاهش می‌یابد.

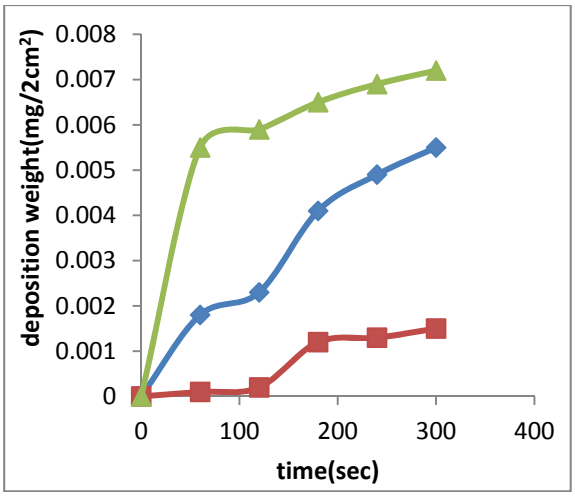
بر اساس رابطه هاماکر (Hamaker)، جرم نشست با زمان رابطه مستقیم خطی دارد [۲۲،۲۱،۶]:

$$dW/dt = f.\mu.E.A.C \qquad \text{معادله (۱)}$$

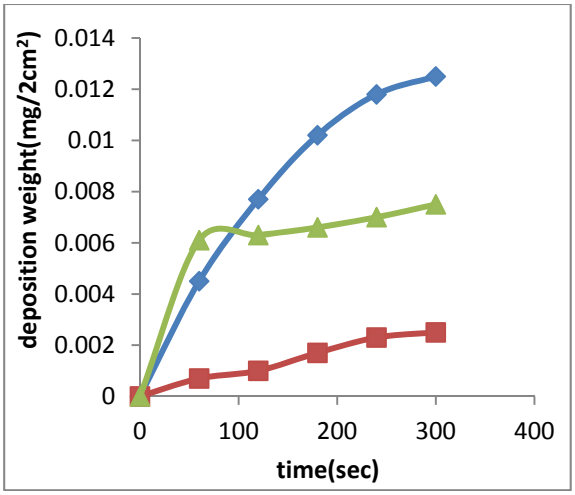
که در آن μ تحرک ذرات، E شدت میدان الکتریکی، A مساحت سطح نشست، C غلظت پودر جامد و f ضریبی است که نشان می‌دهد همه ذراتی که به سطح الکترود آورده می‌شوند در فرآیند پوشش‌دهی شرکت نمی‌کنند ($f \leq 1$). در این رابطه، همه پارامترهای موجود در سمت راست معادله ثابت هستند در حالی‌که μ (تحرک ذرات) در حضور سوسپانسیون‌های مختلف مقادیر متفاوتی دارد.

در شکل (۳)، تغییرات وزن پوشش ایجاد شده بر حسب زمان پوشش‌دهی، نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۳)، می‌توان گفت که با اعمال ولتاژ (شدت میدان) ۶۰ ولت، منحنی‌های اتانولی و بوتانولی در یک نقطه با یکدیگر برخورد کرده و از آن به بعد منحنی وزن پوشش در حضور سوسپانسیون اتانولی نسبت به همین منحنی در حضور سوسپانسیون بوتانولی، مقادیر بالاتری را پیدا می‌کند، در کل می‌توان گفت در زمان‌های کم، رابطه وزن پوشش با زمان به صورت خطی می‌باشد اما در زمان‌های زیاد، منحنی از روند خطی فاصله می‌گیرد تا به یک مقدار ثابتی برسد.



الف: اعمال ولتاژ ۳۰ ولت و در حضور محیط‌های اتانولی ، بوتانولی و ایزوپروپانولی .



ب: اعمال ولتاژ ۶۰ ولت و در حضور محیط‌های اتانولی ، بوتانولی و ایزوپروپانولی .

شکل ۳. تغییرات وزن پوشش بر حسب زمان پوشش‌دهی الف) اعمال ولتاژ ۳۰ ولت و ب) اعمال ولتاژ ۶۰ ولت.

دلیل انحراف منحنی از حالت خطی را می‌توان به موارد زیر نسبت داد:

۱) با گذشت زمان که فرآیند نشست انجام می‌شود، غلظت ذرات جامد داخل سوسپانسیون به تدریج کاهش می‌یابد. کاهش غلظت دو دلیل اصلی دارد:

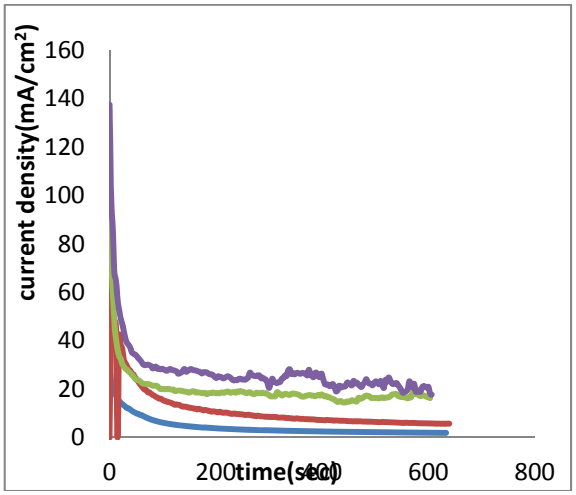
(الف) نشست ذرات روی الکترودها، (ب) ته نشین شدن برخی از ذرات پودر داخل سوسپانسیون. بنابراین در زمان‌های طولانی، تعداد ذرات جامدی که برای نشست روی الکترودها موجود هستند کمتر می‌شود.

۲) از آنجا که مقاومت الکتریکی ذرات جامد از سوسپانسیون بیشتر است، تشکیل پوشش روی الکترودها باعث می‌شود مقاومت الکتریکی بین الکترودها بیشتر شود و در نتیجه شدت میدان به تدریج کاهش یابد، بنابراین برای ادامه انجام فرآیند، به شدت میدان با ولتاژ بیشتری نیاز است [۲۲]. در این آزمایش‌ها که از حالت ولتاژ ثابت استفاده شده با گذشت زمان، افزایش ضخامت پوشش موجب افزایش مقاومت الکتریکی شده و در نتیجه وزن پوشش افزایش کمتری خواهد داشت.

۳-۲- اثر ولتاژ (شدت میدان الکتریکی)

با توجه به منحنی‌های تغییرات وزن پوشش بر حسب زمان پوشش‌دهی می‌توان نتیجه گرفت که مقدار پوشش ایجاد شده بر روی الکترودها با افزایش ولتاژ (شدت میدان الکتریکی)، افزایش می‌یابد. بدیهی است که افزایش ولتاژ موجب افزایش نیرو محرکه لازم برای مهاجرت ذرات جامد به سمت الکترودها می‌شود، در نتیجه در یک زمان مشخص، تعداد ذرات بیشتری روی الکترودها می‌نشینند.

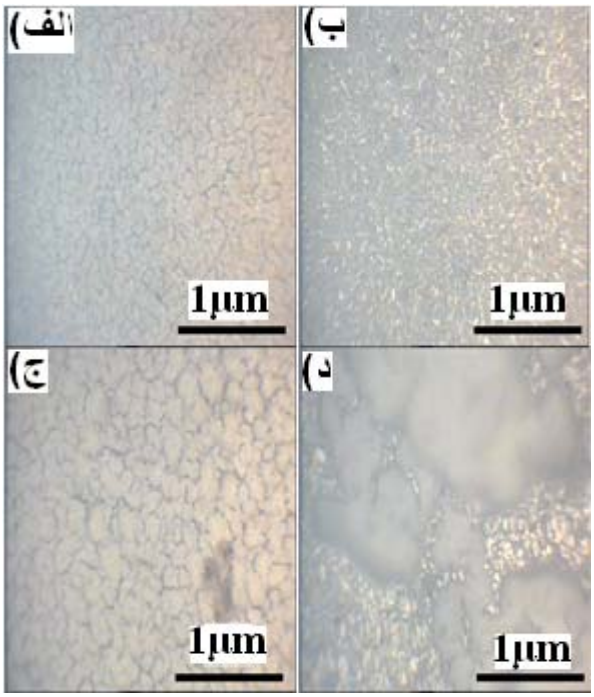
در شکل (۴)، منحنی‌های کرونوآمپرومتری که نشان دهنده رابطه بین جریان پوشش‌دهی با ولتاژ اعمالی می‌باشد، نشان داده شده‌اند.



شکل ۴. منحنی‌های کرونوآمپرومتری (تغییرات جریان بر حسب زمان پوشش دهی) در حضور سوسپانسیون اتانولی و با اعمال ولتاژهای ۳۰ ولت ، ۴۰ ولت ، ۵۰ ولت و ۶۰ ولت .

در شکل (۴)، روند تغییرات منحنی‌ها ابتدا به صورت یک صعود تیز و سپس به صورت نزولی می‌باشد تا این‌که به مقادیر ثابتی برسند که این صعود تیز و سپس نزول نشان دهنده جوانه زنی اولیه می‌باشد. با توجه به شکل (۴) می‌توان گفت هرچقدر ولتاژ اعمالی افزایش یابد، منحنی‌های تغییرات جریان بر حسب زمان پوشش دهی دارای نویز بیشتری می‌شوند که این نویزها بیانگر این است که از کیفیت سطحی پوشش کاسته شده است.

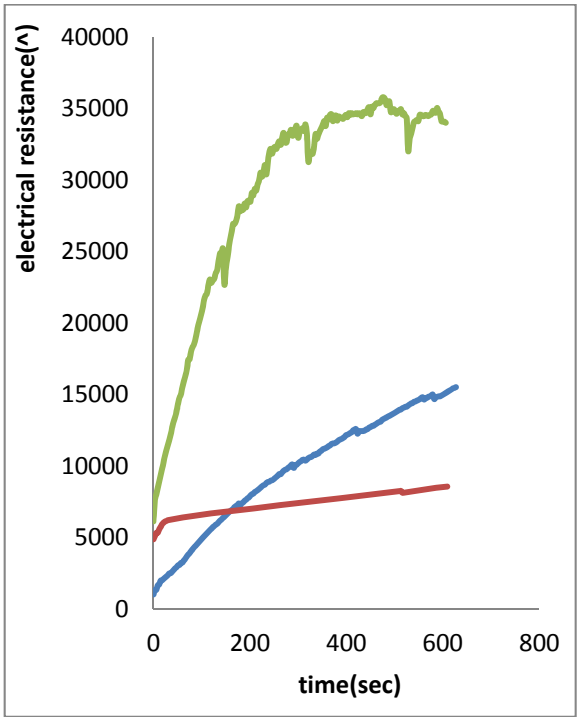
در شکل (۵)، تصاویر میکروسکوپ نوری از پوشش‌های ایجاد شده در حضور سوسپانسیون اتانولی تحت ولتاژهای مختلف نشان داده شده است.



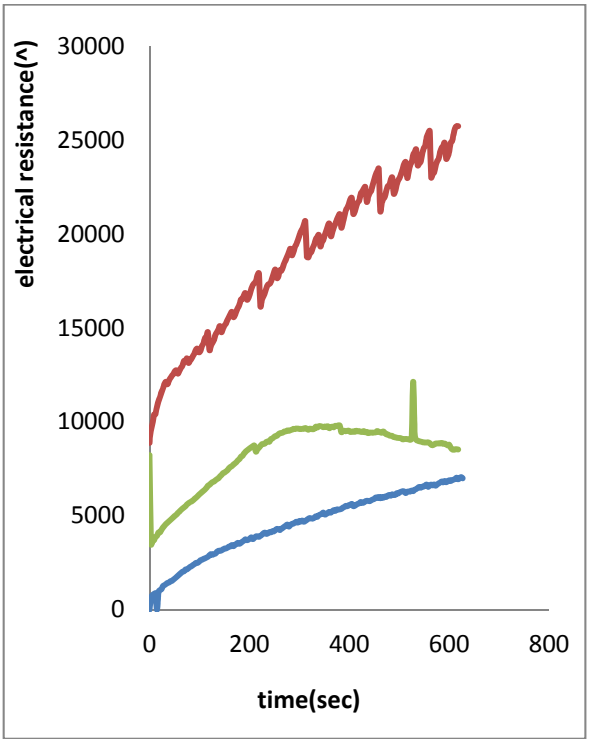
شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ نوری از پوشش‌های ایجاد شده در محیط اتانولی: الف) ۳۰ ولت، ب) ۴۰ ولت، ج) ۵۰ ولت، د) ۶۰ ولت.

در تصاویر شکل (۵)، با افزایش ولتاژ پوشش‌دهی از کیفیت پوشش‌ها کاسته شده اما پوشش‌ها ضخیم‌تر شده و وزن نشست آنها نیز افزایش یافته است، به عنوان مثال در مورد ۵-د (۶۰ ولت)، نشان داده شده که پوشش بر روی همه سطح زیرلایه نشانده نشده درحالی‌که دارای ضخامت بالایی می‌باشد. نقاط سفید براق در تصاویر میکروسکوپ نوری شکل (۵)، نشانگر نقاطی از زیرلایه‌های فولادی می‌باشد که پوشش بر روی آنها تشکیل نشده است.

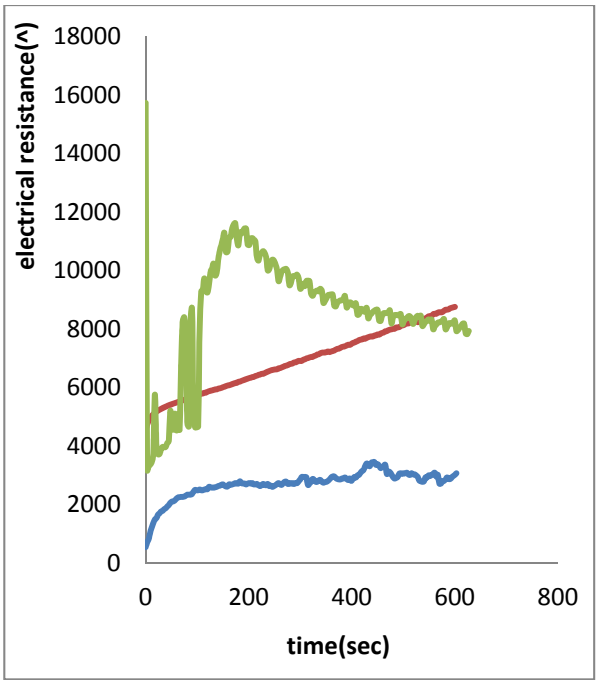
در شکل (۶)، مقاومت الکتریکی پوشش‌های ایجاد شده بر روی زیرلایه‌های فولادی با اعمال ولتاژهای مختلف نشان داده شده است.



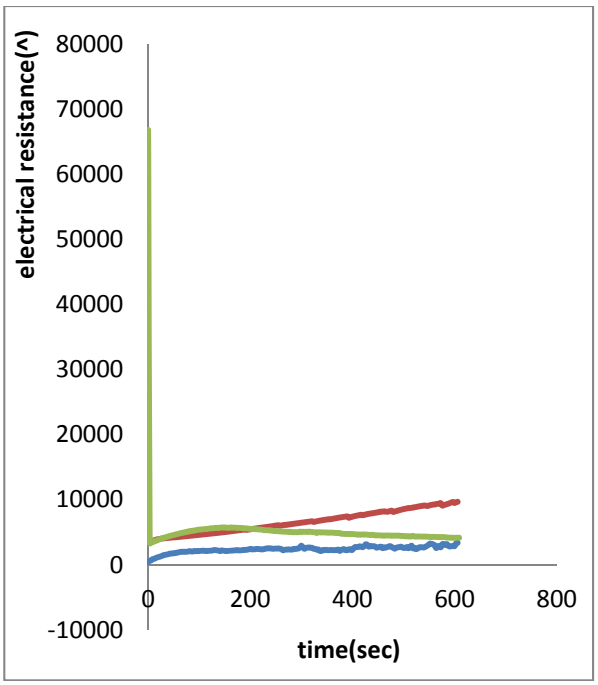
الف) اعمال ولتاژ ۳۰ ولت و در حضور محیط‌های اتانولی ، بوتانولی و ایزوپروپانولی .



ب) اعمال ولتاژ ۴۰ ولت و در حضور محیط‌های اتانولی ، بوتانولی و ایزوپروپانولی .



ج) اعمال ولتاژ ۵۰ ولت و در حضور محیط‌های اتانولی ، بوتانولی و ایزوپروپانولی.



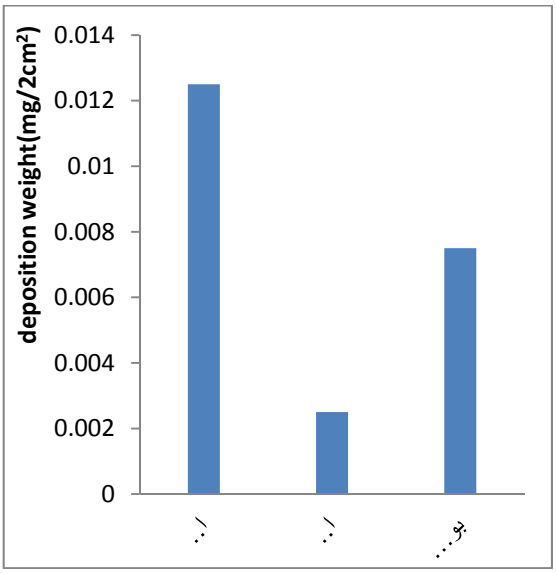
د) اعمال ولتاژ ۶۰ ولت و در حضور محیط‌های اتانولی ، بوتانولی و ایزوپروپانولی.

شکل ۶: مقاومت الکتریکی پوشش‌های سرامیکی ایجاد شده تحت ولتاژهای مختلف.

از منحنی‌های شکل (۶) می‌توان دریافت که پوشش‌های ایجاد شده در محیط‌های اتانولی به جز در ولتاژهای پایین، کمترین مقاومت الکتریکی را دارند بنابراین با توجه به این منحنی‌ها و نمودارهای تغییرات وزن پوشش بر حسب زمان پوشش‌دهی می‌توان گفت که پوشش‌های ایجاد شده در حضور الکترولیت‌های اتانولی دارای بیشترین ضخامت و در نتیجه بیشترین وزن نشست می‌باشند، همچنین با توجه به نویزهای موجود در منحنی‌ها، می‌توان گفت پوشش‌های ایجاد شده در حضور محیط‌های بوتانولی، به نسبت از کیفیت سطحی بهتری برخوردار هستند.

۳-۳- اثر محیط

تأثیر سه محیط الکلی شامل: اتانول، بوتانول و ایزوپروپانول بر روی وزن نشست پودر سرامیکی Al_2O_3-TiO_2 بر روی زیرلایه‌های فولادی در شکل (۷) به صورت دو بعدی نشان داده شده است.



شکل ۷. تأثیر محیط‌های الکلی مختلف بر روی وزن نشست پودر Al_2O_3-TiO_2، در ولتاژ اعمالی ۶۰ ولت و زمان ۵ دقیقه.

در جدول (۱)، خواص فیزیکی برخی از حلال‌های آلی (الکل‌ها) ارائه شده است.

جدول ۱. خواص فیزیکی حلال‌های آلی [۲۰].

Solvent	Viscosity(cP) (=10^{-3} N.s.m^{-2})	Relative dielectric Constance (–)
Ethanol	۱/۰۸۸۵	**۲۴/۵۵**
n-butanol	۲/۵۸۷۵	**۱۷/۵۱**
Iso-propanol	۲/۰۴۳۹	**۱۹/۹۲**

با توجه به رابطه هاماکر، وزن نشست رابطه مستقیمی با موبیلیته (تحرک) مولکول‌های الکترولیت‌های الکلی دارد، موبیلیته از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۴،۲۳]:

$$\mu = \varepsilon(\square.)\zeta_r.\varepsilon/\eta$$ معادله (۲)

در این رابطه μ موبیلیته، ε_0 ضریب گذردهی الکتریکی خلأ ($۸/۸۵\times۱۰^{-۱۲}$F/m)، ε_r ثابت دی الکتریک نسبی، ζ پتانسیل زتا و η ویسکوزیته (گرانروی) می‌باشد.

در رابطه (۲) که به رابطه هنری معروف است، تحرک (μ) با ثابت دی الکتریک نسبی (ε_r) رابطه مستقیم و با ویسکوزیته (η) رابطه معکوس دارد.

نسبت ثابت دی الکتریک نسبی به ویسکوزیته (ε_r/η) برای اتانول، بوتانول و ایزوپروپانول به ترتیب برابر ۲۲/۵۵، ۶/۷۶، ۹/۷۴ می‌باشد، بنابراین در ولتاژهای بالای پوشش دهی می‌توان مقدار زیاد پوشش ایجاد شده در محیط اتانولی را در مقدار زیاد نسبت ثابت دی‌الکتریک نسبی به ویسکوزیته و در نتیجه به تحرک زیاد پودر آلومینا - تیتانیا در این محیط نسبت داد. همچنین عوامل دیگری از جمله پتانسیل زتا نیز در مقدار تحرک و در نتیجه در مقدار پوشش ایجاد شده بر روی زیرلایه‌های فولادی مؤثر می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج اندازه‌گیری وزن پوشش‌ها و مشاهده کیفی آنها نشان دادند که تغییرات وزن پوشش با ولتاژ (شدت میدان الکتریکی) و زمان از رابطه هاماکر پیروی می‌کنند. در منحنی‌های تغییرات وزن پوشش بر حسب زمان پوشش‌دهی مشاهده شد که در ولتاژهای پایین (۳۰ و ۴۰ ولت) بیشترین پوشش ایجاد شده در حضور سوسپانسیون بوتانولی می‌باشد در حالی‌که در ولتاژهای بالا (۵۰ و ۶۰ ولت) بیشترین پوشش در حضور محیط اتانولی ایجاد شده است. پارامتر متغیر در رابطه هاماکر، موبیلیته است که تغییرات وزن پوشش سنتز شده را بر حسب زمان پوشش‌دهی مشخص می‌کند. وزن پوشش سنتز شده در محیط اتانولی با اعمال ولتاژهای بالا (۵۰ و ۶۰ ولت) به دلیل نسبت بیشتر ثابت دی‌الکتریک نسبی به ویسکوزیته (ε_r/η) در مقایسه با محیط‌های بوتانولی و ایزوپروپانولی بیشتر بود. بنابراین با توجه به عوامل ولتاژ (شدت میدان الکتریکی) و نوع محیط، می‌توان پوشش‌هایی با کیفیت‌های مختلف به دست آورد. با توجه منحنی‌های مقاومت الکتریکی بر حسب زمان، پوشش‌های سنتز شده در حضور محیط اتانولی و با اعمال ولتاژهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ ولت دارای کمترین مقاومت الکتریکی هستند.

سپاسگزاری

از اساتید و کارشناسان محترم گروه مهندسی مواد دانشگاه شهرکرد و همچنین پرسنل شرکت گاز استان چهارمحال و بختیاری جهت راهنمایی و همکاریشان در مدت زمان انجام پژوهش، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

مراجع

۱. دولتی، ابوالقاسم.، مطالعه سینتیک رسوب الکتروشیمیایی آلیاژ کبالت- نیکل نانوکریستالی به صورت لایه نازک در محلول سولفاتی، مجله تحقیقات مواد نانو کامپوزیتی، ۱۳۸۸، ۳:۱، ۱۴۲- ۱۳۵.

1. Leith, S. D., Ramli, S., Schwartz, D.T., *Journal of the Electrochemical Society,* 146, 1999, 1431.
2. Leith, S.D. , Wang, W. , Schwartz, D.T. , *Journal of the Electrochemical Society*, 145, 1999, 2827
3. Morteza Farrokhi-Rad, Mohammad Ghorbani. "Electrophoretic Deposition of Titania Nanoparticles in Different Alcohols: Kinetics of Deposition". *J. Am. Ceram. Soc,* 2011, 94 [8] 2354–2361.
4. Besra, L., Liu,"M., A Review on Fundamentals and Applications of Electrophoretic Deposition (EPD)". *Prog.Mater. Sci*, 2007, 52, 1-61.
5. Sarkar, P., Nicholson., P.S., "Electrophoretic Deposition (EPD): Mechanisms, Kinetics and Application to Ceramics" , J. Am. Ceram. Soc, 1996, 79, 1987-2002.
6. L. Besra and M. Liu, ''A Review on Fundamental and Applications of Electrophoretic Deposition,'' rog.Mater. Sci., 52 [1] 1–61, (2007).
7. X. Wu, P. Su, Z. Jiang, S. Meng, "Influences of current density on tribological characteristics of ceramic coatings on ZK60 Mg alloy by plasma electrolyticoxidation", ACS App. Mate. Interfaces 2 (2010) 808–812.
8. H. Dong, T. Bell, "Enhanced wear resistance of titanium surfaces by a new thermal oxidation treatment", Wear 238 (2000) 131–137.
9. D.S.R. Krishna, Y.L. Brama, Y. Sun, "Thick rutile layer on titanium for tribological applications", Tribol. Int. 40 (2007) 329–334.
10. A.L. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland, A. Matthews, "Characterisation of oxide films produced by plasma electrolytic oxidation of a Ti–6Al–4V alloy", Surf. Coat.Technol. 130 (2000) 195–206.
11. M. Montazeri, C. Dehghanian, M. Shokouhfar, A. Baradaran, "Investigation of the voltage and time effects on the formation of hydroxyl apatite-containing titania prepared by plasma electrolytic oxidation on Ti–6Al–4V alloy and its corrosion behavior", Appl. Surf. Sci. 257

2011) 7268–7275.
12. Ghasemi, V.S. Raja, C. Blawert, W. Dietzel, K.U. Kainer, “Study of thestructure and corrosion behavior of PEO coatings on AM50 magnesium alloy by Electrochemical impedance spectroscopy”, Surf. Coat. Technol. 202 (2008) 3513–3518.
13. L. Wen, Y.M. Wang, Y. Liu, Y. Zhou, L.X. Guo, J.H. Ouyang, D.C. Jia, “EIS study of a self-repairing micro arc oxidation coating”, Corros. Sci. 53 (2011) 618–623.
14. M. Herrmann, “Corrosion of silicon nitride materials in aqueous solutions”, J.Am. Ceram. Soc. 96 (2013) 3009–3022.
15. H. Niazi, S. Yari, F. Golestani-Fard, M. Shahmiri, W. Wang, A. Alfantazi and R. Bayati, “How deposition Parameters affect corrosion behavior of TiO_2-Al_2O_3 nanocomposite coatings”, Applied Surface Science.353 (2015) 1242–1252.
16. A. R. Gardesh zadeh, B. Raissi, E. Marzban rad, "Electrophoretic Deposition of SnO_2 Nanoparticles using Low Frequency AC Electric Fields”. Mater. Lett, 2008, 62, 1697-1699.
17. A. R. Gardeshzadeh, B. Raissi, E. Marzbanra, "Preparation of Si Powder Thick Films by Low Frequency Alternating Electrophoretic Deposition”. J. Mater. Lett ,43, 2008, 2507-2508.
18. A. R. Gardeshzadeh, B. Raissi, .Marzbanrad,"Fabrication of Resistive CO Gas Sensor based on SnO_2 Nanopowders via Low Frequency AC Electrophoretic Deposition”. J. Mater. Sci. Mater. El, 2009, 20, 127-131.
19. H. Negishi, K.Yamaji, N. Sakal,T. Horita, . anaglshlta, H.Yokokawa,"Electrophoretic Deposition of YSz Powders for Solid Oxide Fuel Cells”. Journal of Materials Science, 2004, 39, 833-838.
20. L. Besra, M. Liu, "A Review on Fundamentals and Application of Electrophoretic Deposition (EPD)”. Prog. Mater. Sci, 2007, 52, 1-61.
21. S. N. Heavens, "Electrophoretic Deposition as A Processing Route for Ceramics”. Advanced Ceramic Processing and Technology, Vol. 1, Noyes Pub. NJ, USA, 1990, 255-283.
22. A. V. Delgado, F. González-Caballero, R. J. Hunter, L. K.Koopal, J. Lyklema, "Measurement and Interpretation of Electrokinetic Phenomena”. J. Colloid Interf. Sci, 2007, 309, 194-224.
23. I. Zhitomirsky, Cathodic Electrodeposition of Ceramic and Organoceramic Materials, "Fundamental Aspects”. Adv. Colloid Interfac, 2002, 97, 279-317.