

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

بهنام مبینی دهکردی^{۱*}، بهروز شایق بروجنی^۱، محمدرضا سائری^۱، مجید مرادی زاده^۱، یحیی عبدالهی^۱، شهرام شریفیان^۲

^۱دانشگاه شهرکرد، گروه مهندسی مواد، شهرکرد، ایران.

^۲شرکت گاز استان چهارمحال و بختیاری، شهرکرد، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۴/۹/۲۶، تاریخ دریافت نسخه 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 Api5-GrB با استفاده از فرآیند الکتروفوریتیک (Electrophoretic) مورد ارزیابی قرار گرفت. عملیات پوشش‌دهی در محدوده ولتاژ ۳۰ تا ۶۰ ولت انجام شد، همچنین از روش کروئوآمپرومتری 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 Api5-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 الکتروفوریتیک، روش کروئوآمپرومتری، زیرلایه‌های فولادی Api5-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 Borujeny¹, M.R.Saeri¹, M.Moradi Zadeh¹, Y.Abdollahi¹, Sh.Sharifian²

¹University of Shahrekord, Department of Material Engineering, Shahrekord, Iran.

²Chaharmahal 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.

۱- مقدمه

تکنیک‌های الکتروشیمیایی، روش‌هایی سریع جهت شناسایی فرآیندهایی هستند که در سطح اتفاق می‌افتد. از روش‌های الکتروشیمیایی مانند ولتامتری سیکلی، کروئوآمپرومتری و کروئوپتانسیومتری 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 سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۱-۳].

فرآیند الکتروفوریتیک (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 الکتروفوریتیک، اغلب از میدان الکتریکی با جریان مستقیم (DC) برای لایه‌نشانی استفاده شده است [۴-۶]. فرآیند الکتروفوریتیک (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 الکتروفوریتیک 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 [۸-۱۰]، مقاومت در برابر خوردگی [۱۱-۱۶]، 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 Api5-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 $181/83 \text{ gr/mol}$ 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 اندازه‌گیری گردیده است. الکل‌های اتانول با خلوص $\geq 99/9\%$ بوتانول و ایزوپروپانول هر دو با خلوص $\geq 99/5\%$ [همگی از شرکت مرک (Merck Corporation)] به عنوان حلال استفاده شدند، همچنین از ذرات ید به عنوان پراکنده ساز استفاده گردید.

سوسپانسیون‌هایی با غلظت 10 gr/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 Api5-GrB با ابعاد ($1 \times 2 \text{ cm}$) استفاده شد. نمونه‌های پوشش داده شده برای پخت در کوره الکتریکی به مدت ۲ ساعت و در دمای 350°C درجه سلسیوس قرار داده شدند. لازم به ذکر است که به منظور آسیب نخوردن به پوشش‌ها، سرعت گرم و سرد کردن کوره به میزان $3/3^\circ \text{C/min}$ قرار داده شد. در شکل (۲)، شماتیکی از دستگاه الکتروفوریتیک مشاهده می‌شود.

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.

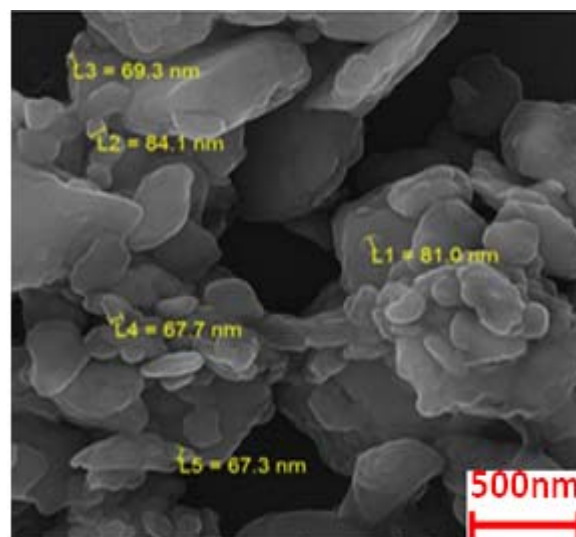
بر اساس رابطه هاماکر (Hamaker)، جرم نشست با زمان رابطه مستقیم خطی دارد [۲۲، ۲۱، ۶]:

$$dW/dt = f \cdot \mu \cdot E \cdot A \cdot C \quad (۱)$$

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 الکتروود آورده می‌شوند در فرآیند پوشش‌دهی شرکت نمی‌کنند ($f \leq 1$). در این رابطه، همه پارامترهای موجود در سمت راست معادله ثابت هستند در حالی که 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.

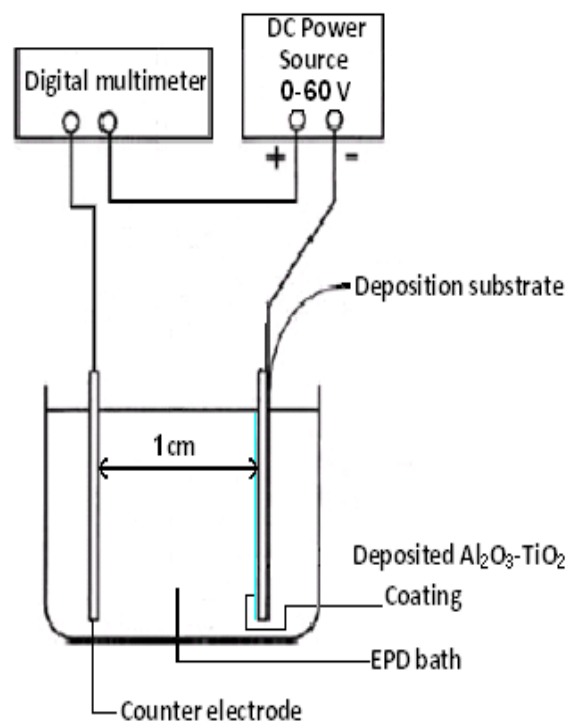


شکل ۱. تصویر FESEM ذرات سرامیکی آلومینا-تیتانیا.

تجهیزات مورد استفاده برای فرآیند لایه نشانی در منابع [۱۷-۱۹] 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 $\times 40$ استفاده شد.

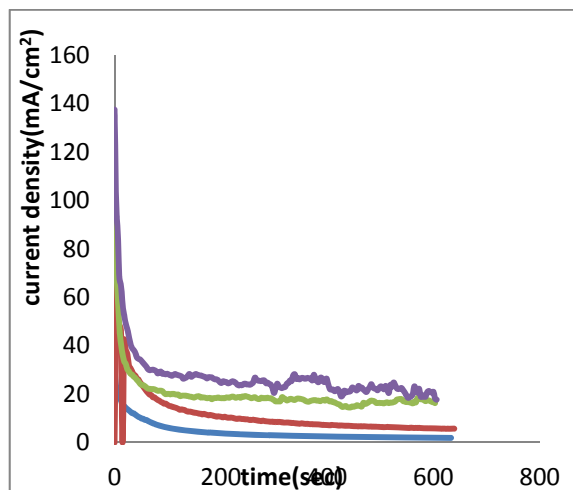


شکل ۲. شماتیکی از دستگاه الکتروفوریتیک [۲۰].

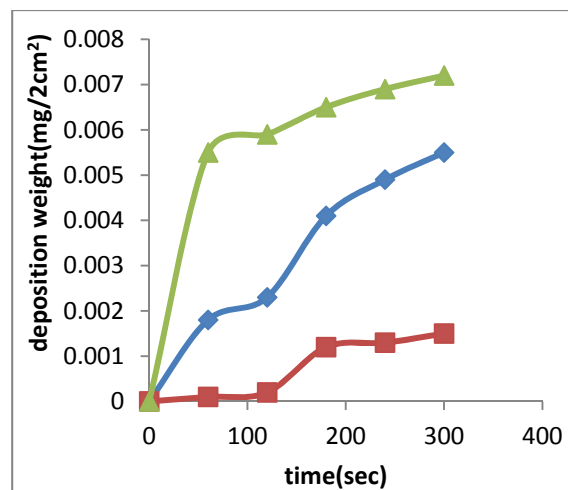
(۲) از آنجا که مقاومت الکتریکی ذرات جامد از سوسپانسیون بیشتر است، تشکیل پوشش روی الکترودها باعث می‌شود مقاومت الکتریکی بین الکترودها بیشتر شود و در نتیجه شدت میدان به تدریج کاهش یابد، بنابراین برای ادامه انجام فرآیند، به شدت میدان با ولتاژ بیشتری نیاز است [۲۲]. در این آزمایش‌ها که از حالت ولتاژ ثابت 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)

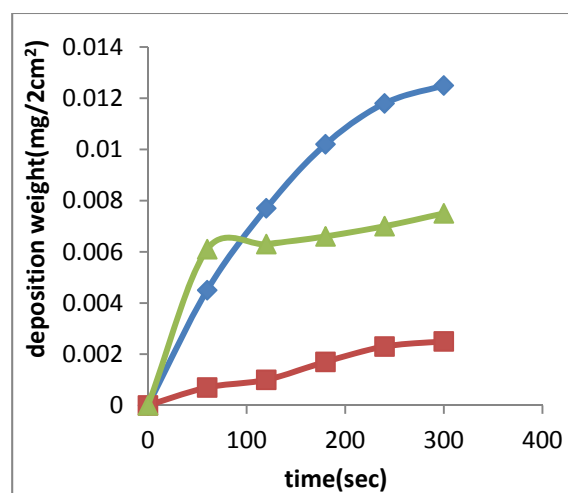
با توجه به منحنی‌های تغییرات وزن پوشش بر حسب زمان پوشش‌دهی می‌توان نتیجه گرفت که مقدار پوشش ایجاد شده بر روی الکترودها با افزایش ولتاژ (شدت میدان الکتریکی)، افزایش می‌یابد. بدیهی است که افزایش ولتاژ موجب افزایش نیرو محرکه لازم برای مهاجرت ذرات جامد به سمت الکترودها می‌شود، در نتیجه در یک زمان مشخص، تعداد ذرات بیشتری روی الکترودها می‌نشینند. در شکل (۴)، منحنی‌های کروئوآمپرومتری که نشان دهنده رابطه بین جریان پوشش‌دهی با ولتاژ اعمالی می‌باشد، نشان داده شده‌اند.



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



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

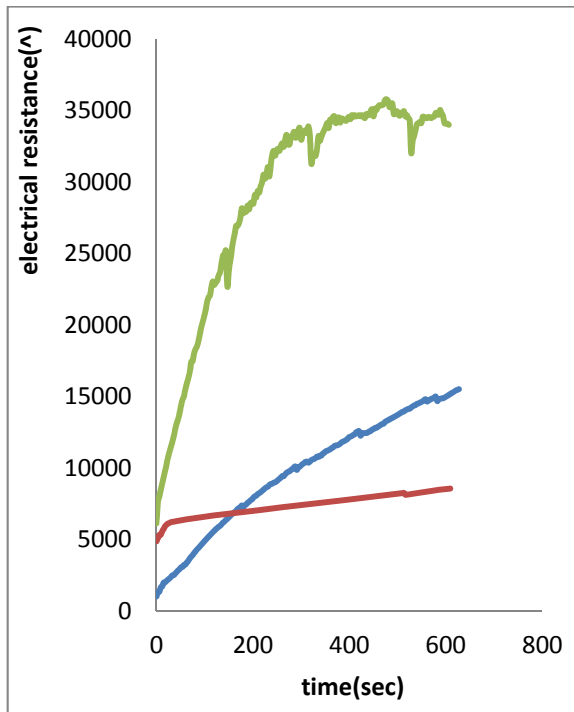
زیر نسبت داد:

(۱) با گذشت زمان که فرآیند نشست انجام می‌شود، غلظت ذرات جامد داخل سوسپانسیون به تدریج کاهش می‌یابد.

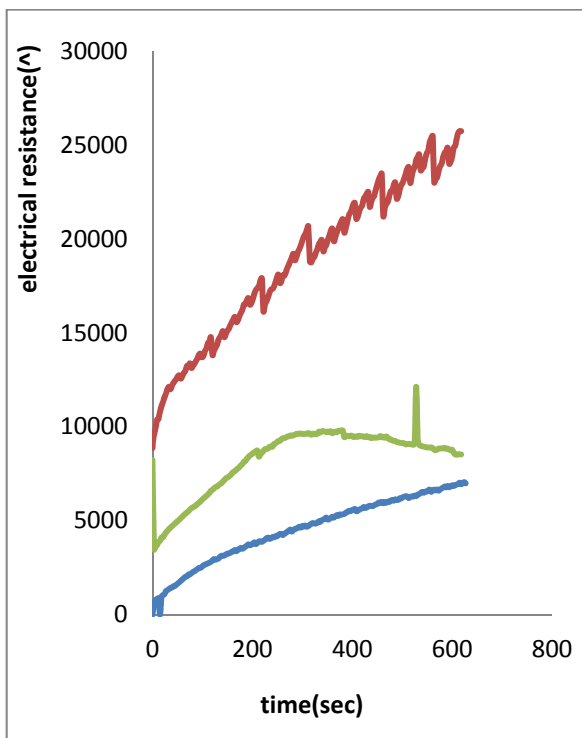
کاهش غلظت دو دلیل اصلی دارد:

(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.

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



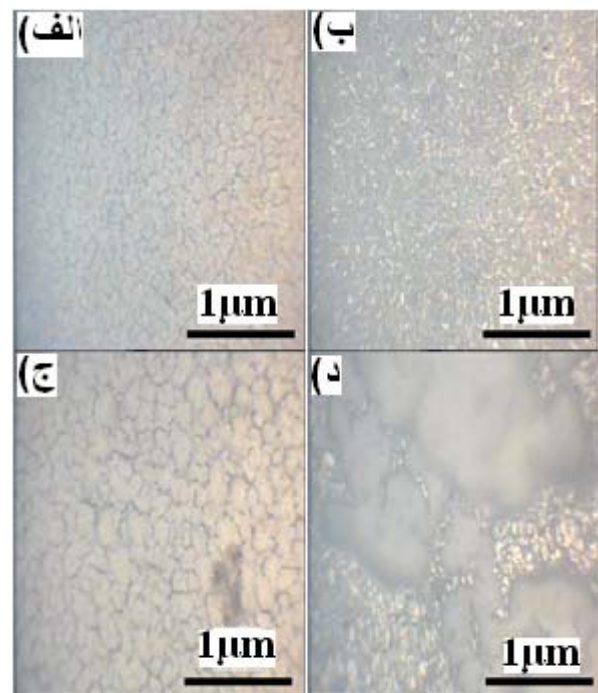
الف) اعمال ولتاژ ۳۰ ولت و در حضور محیط‌های اتانولی، بوتانولی و ایزوپروپانولی.



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

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 هرچه قدر 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.



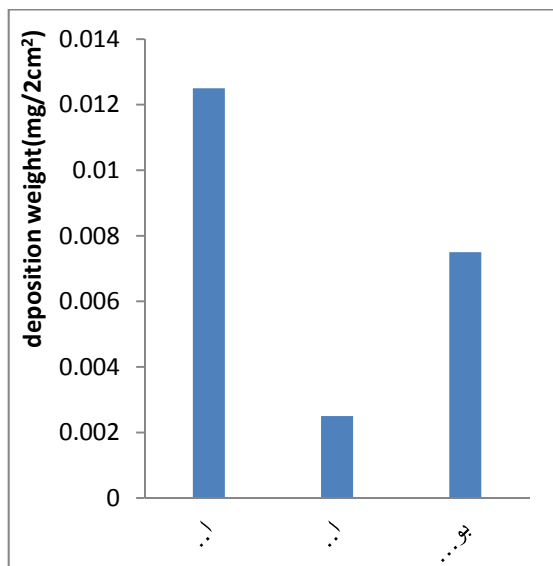
شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ نوری از پوشش‌های ایجاد شده در محیط اتانولی: الف) ۳۰ ولت، ب) ۴۰ ولت، ج) ۵۰ ولت، د) ۶۰ ولت.

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 ۵-۶۰ 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.

پوشش دهی می توان گفت که پوشش های ایجاد شده در حضور الکترولیت های اتانولی دارای بیشترین ضخامت و در نتیجه بیشترین وزن نشست می باشند، همچنین با توجه به نویزهای موجود در منحنی ها، می توان گفت پوشش های ایجاد شده در حضور محیط های 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 زیرلایه های فولادی در شکل (۷) به صورت دو بعدی نشان داده شده است.

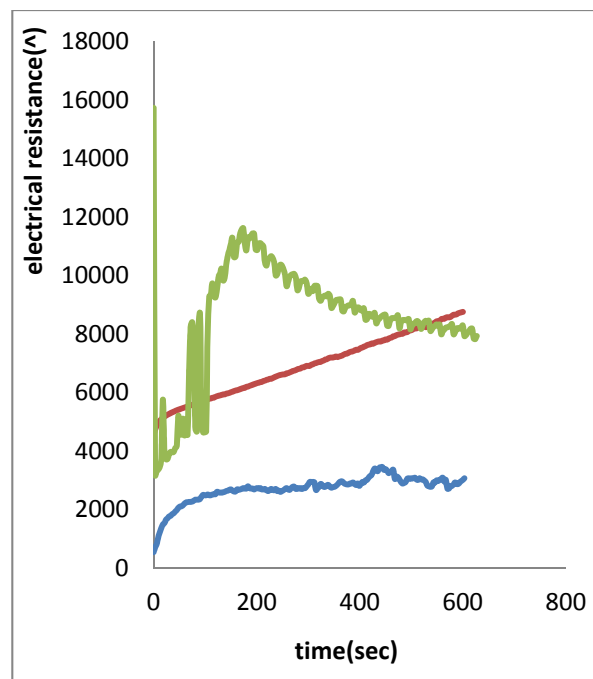


شکل ۷. تأثیر محیط های الکلی مختلف بر روی وزن نشست پودر $Al_2O_3-TiO_2$ ، در ولتاژ اعمالی ۶۰ ولت و زمان ۵ دقیقه.

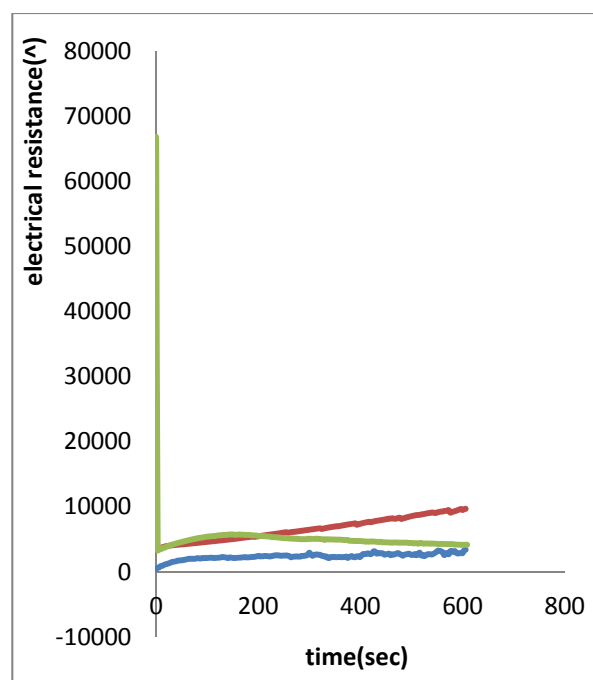
در جدول (۱)، خواص فیزیکی برخی از حلال های آلی (الکل ها) ارائه شده است.

جدول ۱. خواص فیزیکی حلال های 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



ج) اعمال ولتاژ ۵۰ ولت و در حضور محیط های اتانولی (—)، بوتانولی (—) و ایزوپروپانولی (—).



د) اعمال ولتاژ ۶۰ ولت و در حضور محیط های اتانولی (—)، بوتانولی (—) و ایزوپروپانولی (—).

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

از منحنی های شکل (۶) می توان دریافت که پوشش های ایجاد شده در محیط های اتانولی به جز در ولتاژهای پایین، کمترین مقاومت الکتریکی را دارند بنابراین با توجه به این منحنی ها و نمودارهای تغییرات وزن پوشش بر حسب زمان

نوع محیط، می توان پوشش هایی با کیفیت های مختلف به دست آورد. با توجه منحنی های مقاومت الکتریکی بر حسب زمان، پوشش های 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 همکاری شان 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: 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 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 electrolytic oxidation", *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

با توجه به رابطه هاماکر، وزن نشست رابطه مستقیمی با مویلیته (تحرك) مولکول های الکترولیت های الکلی دارد، مویلیته از رابطه زیر به دست می آید [۲۳، ۲۴]:

$$\mu = \varepsilon(\square) \zeta_r \varepsilon / \eta \quad (2)$$

در این رابطه μ مویلیته، ε_0 ضریب گذردهی الکتریکی خلاء (8.85×10^{-12} F/m)، ε ثابت دی الکتریک نسبی، ζ پتانسیل زتا و η ویسکوزیته (گرانروی) می باشد.

در رابطه (۲) که به رابطه هنری معروف است، تحرك (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 می باشد، بنابراین در ولتاژهای بالای پوشش دهی می توان مقدار زیاد پوشش ایجاد شده در محیط اتانولی را در مقدار زیاد نسبت ثابت دی الکتریک نسبی به ویسکوزیته و در نتیجه به تحرك زیاد پودر آلومینا - تیتانیا در این محیط نسبت داد. همچنین عوامل دیگری از جمله پتانسیل زتا نیز در مقدار تحرك و در نتیجه در مقدار پوشش ایجاد شده بر روی زیرلایه های فولادی مؤثر می باشد.

۴- نتیجه گیری

نتایج اندازه گیری وزن پوشش ها و مشاهده کیفی آنها نشان دادند که تغییرات وزن پوشش با ولتاژ (شدت میدان الکتریکی) و زمان از رابطه هاماکر پیروی می کنند. در منحنی های تغییرات وزن پوشش بر حسب زمان پوشش دهی مشاهده شد که در ولتاژهای پایین (۳۰ و ۴۰ ولت) بیشترین پوشش ایجاد شده در حضور سوسپانسیون بوتانولی می باشد در حالی که در ولتاژهای بالا (۵۰ و ۶۰ ولت) بیشترین پوشش در حضور محیط اتانولی ایجاد شده است. پارامتر متغیر در رابطه هاماکر، مویلیته است که تغییرات وزن پوشش سنتز شده را بر حسب زمان پوشش دهی مشخص می کند. وزن پوشش سنتز شده در محیط اتانولی با اعمال ولتاژهای بالا (۵۰ و ۶۰ ولت) به دلیل نسبت بیشتر ثابت دی الکتریک نسبی به ویسکوزیته (ε/η) در مقایسه با محیط های بوتانولی و ایزوپروپانولی بیشتر بود. بنابراین با توجه به عوامل ولتاژ (شدت میدان الکتریکی) و

18. A. R. Gardeshzadeh, B. Raissi, .Marzbanrad, "Fabrication of Resistive CO Gas Sensor based on SnO₂ 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, . anaglshta, 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.
- 2011) 7268–7275.
12. Ghasemi, V.S. Raja, C. Blawert, W. Dietzel, K.U. Kainer, "Study of the structure 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 TiO₂-Al₂O₃ nanocomposite coatings", *Applied Surface Science*. 353 (2015) 1242–1252.
16. A. R. Gardeshzadeh, B. Raissi, E. Marzban rad, "Electrophoretic Deposition of SnO₂ 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.