

ایجاد پوشش کامپوزیتی YSZ/Al بر روی سوپرآلیاژ اینکولوی ۸۲۵ به روش رسوب دهی الکتروفوریتیک

مجتبی احمدی^۱، حسین آقاجانی^{۲*}

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

*عهده دار مکاتبات: h_aghajani@tabrizu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۱۴)

چکیده: در این پژوهش، شرایط ایجاد پوشش کامپوزیتی YSZ/Al بر روی سوپرآلیاژ اینکولوی ۸۲۵ به روش رسوب دهی الکتروفوریتیک مورد مطالعه قرار گرفته است. پایداری سوسپانسیون ذرات YSZ و Al در استون و در حضور پراکنده ساز ید با اندازه گیری اندازه ذرات موجود در سوسپانسیون و پتانسیل زتا مطالعه شد. بر اساس نتایج به دست آمده، سوسپانسیون حاوی g/l ۱/۲ ید به منظور رسوب دهی الکتروفوریتیک هم زمان دو پودر انتخاب شد. میانگین اندازه ذرات YSZ و Al در این سوسپانسیون به ترتیب برابر ۱۱۱/۶ nm و ۲/۶۵۸ μm و مقدار پتانسیل زتا برای دو پودر به ترتیب برابر ۵۰/۲ و ۱۶ mV اندازه گیری شد. به منظور بررسی تاثیر ولتاژ اعمالی و زمان رسوب دهی بر روی کیفیت رسوب تشکیل شده از لحاظ یکنواختی و وجود یا عدم وجود ترک، رسوب دهی در ولتاژها و زمان های رسوب دهی مختلف انجام شد. نتایج نشان داد که رسوب تشکیل شده در ولتاژ ۶ V و زمان رسوب دهی ۳ دقیقه دارای سطح یکنواخت و عاری از ترک است. تصویر به دست آمده از SEM نشان داد که این پوشش دارای ضخامت ۱۹/۶۳ μm است.

واژه های کلیدی:

YSZ، آلومینوم، رسوب دهی الکتروفوریتیک، پتانسیل زتا.

۱- مقدمه

(۲) نداشتن استحاله فازی در محدوده دمای اتاق تا دمای کارکرد، (۳) هدایت حرارتی کم، (۴) خنثی بودن شیمیایی، (۵) تطابق ضریب انبساط حرارتی با زمینه فلزی، (۶) چسبندگی مناسب با زمینه فلزی و (۷) نرخ تف جوشی کم ریزساختار متخلخل. این ویژگی ها باعث شده است تا تعداد موادی که در این زمینه می توانند به کار روند، محدود شود [۴]. رایج ترین ماده برای ایجاد پوشش های سد حرارتی، زیرکونیای پایدار شده با ایتریا (YSZ) است که شامل زیرکونیای آلائیده شده با ایتریا است [۱].

پوشش های سد حرارتی گروهی از پوشش های سرامیکی هستند که بر روی سطح سوپرآلیاژ اعمال می شوند و دمای کار موتور را افزایش می دهند. این پوشش ها از رسیدن دمای سوپرآلیاژ به نقطه ذوب جلوگیری کرده و همچنین از آن در برابر خستگی و خزش حرارتی و اثرات اکسید کننده سولفات ها و ترکیبات حاوی اکسیژن دیگر در گازهای احتراقی حفاظت می کنند. مهم ترین نقش این پوشش ها کاهش دمای زیرلایه است [۱-۳]. مواد مورد استفاده در پوشش های سد حرارتی باید ویژگی هایی داشته باشند که مهم ترین آن ها عبارتند از: (۱) نقطه ذوب بالا،

تراکم ذرات و چسبندگی مناسب پوشش و زمینه حاصل شود. دمای عملیات حرارتی باید در حدی باشد که تف جوشی ذرات پوشش سرامیکی اتفاق بیفتد. یکی از مشکلات عملیات حرارتی تف جوشی پس از فرآیند EPD این است که دمای تف جوشی به طور معمول، بیش از 1200°C است و این دمای بالا در اغلب موارد باعث آسیب رسیدن به زمینه فلزی می شود. یکی از روش های رایج برای کاهش صدمات ناشی از عملیات حرارتی تف جوشی استفاده از برخی مواد کمک سینتر است که باعث کاهش دمای تف جوشی ذرات سرامیکی می شوند. یکی از افزودنی های کمک سینتر که می تواند در کاهش دمای تف جوشی پوشش YSZ مؤثر باشد، آلومینیوم است. ذرات آلومینیوم به دلیل نقطه ذوب پایین می توانند در حین عملیات حرارتی تف جوشی باعث بهبود رفتار سینترینگ ذرات YSZ و ایجاد پوشش متراکم در دمای پایین تری شوند [۱۵-۱۶].

در این پژوهش شرایط رسوب دهی الکتروفوریتیک پوشش کامپوزیتی YSZ/Al از حلال استون و در حضور پراکنده سازید بررسی شده است. بدین منظور ابتدا ترکیب سوسپانسیون پایدار برای هر دو پودر مطالعه شده و سپس شرایط رسوب دهی مناسب برای ایجاد پوشش کامپوزیتی حاوی دو پودر مورد بررسی قرار گرفته است.

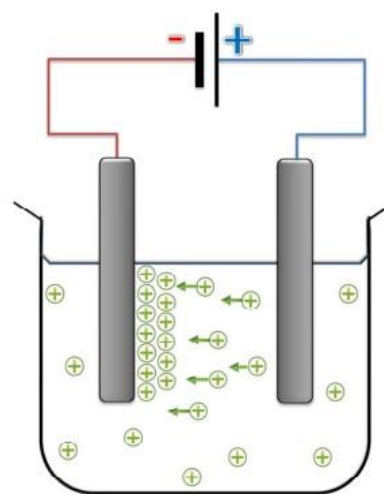
۲- مواد و روش انجام تحقیق

در این پژوهش از پودر YSZ (3 mol% Y_2O_3 , Sigma-Aldrich) با خلوص ۹۹٪ و میانگین اندازه ذرات ۵۰ nm و پودر آلومینیوم (Sigma-Aldrich) با خلوص ۹۹/۵٪ به شکل پولکی و با اندازه ذرات $2-10\ \mu\text{m}$ به عنوان مواد اولیه پوشش استفاده شد. همچنین از پودر YSZ (Carlo Erba) با خلوص ۹۹/۸٪ به عنوان پراکنده ساز و استون (دکتر مجللی) با خلوص ۹۹٪ به عنوان حلال استفاده شد.

به منظور به دست آوردن سوسپانسیون مناسب برای رسوب دهی هم زمان پودرهای YSZ و آلومینیوم، ابتدا پایداری سوسپانسیون حاوی پودرهای مذکور به صورت جداگانه و در حضور مقادیر

روش های مختلفی برای اعمال پوشش های YSZ به کار گرفته شده است که از جمله آن ها می توان به رسوب دهی الکتروشیمیایی فاز بخار^۱ [۵]، رسوب دهی شیمیایی فاز بخار^۲ [۶]، رسوب دهی فیزیکی فاز بخار^۳ [۷]، رسوب دهی پاششی الکترواستاتیک^۴ [۸]، فرآیند سل ژل^۵ [۹] و رسوب دهی الکتروفوریتیک^۶ [۱۰] اشاره کرد. در میان این روش ها، روش EPD به دلیل ساده بودن تجهیزات، زمان کم فرآیند پوشش دهی، امکان پوشش دهی قطعات با شکل های هندسی پیچیده و کنترل آسان ضخامت پوشش مورد توجه قرار گرفته است [۱۱-۱۳].

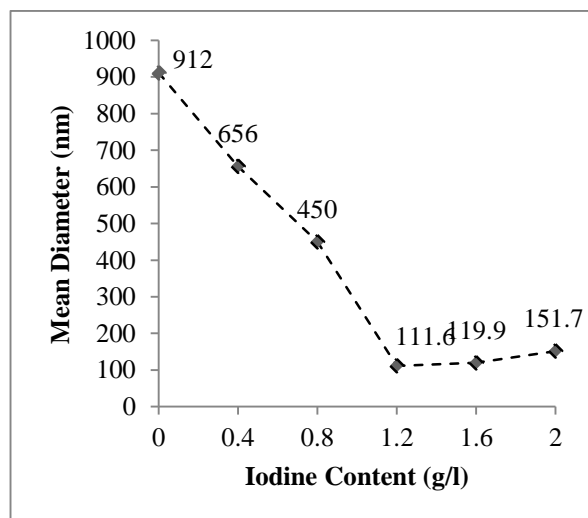
روش EPD یکی از فرآیندهای کلونیدی در ساخت سرامیک هاست که در تولید پوشش های متراکم با ضخامت های مختلف به کار می رود. در فرآیند EPD، ذرات پودری باردار که در یک محیط مایع پایدار یا معلق شده اند، با اعمال میدان الکتریکی بر روی یک زمینه رسانا با بار الکتریکی مخالف رسوب داده می شوند [۱۱]. شکل (۱) طرح واره ای از فرآیند رسوب دهی الکتروفوریتیک را نشان می دهد.



شکل (۱): طرح واره ای از سیستم رسوب دهی الکتروفوریتیک [۱۴]

به طور معمول، پس از فرآیند رسوب دهی الکتروفوریتیک انجام عملیات حرارتی متناسب با خواص پوشش مورد نیاز است تا

مقدار ید را نشان می دهد. نیروی وزن ذرات موجود در سوسپانسیون باعث ته نشینی ذرات و عدم پایداری سوسپانسیون می شود. بنابراین اگر نیروی دافعه کافی بین ذرات ایجاد نشود، ذرات از طریق نیروی جاذبه واندروالسی به هم متصل شده و آگلومره های درشتی را در داخل سوسپانسیون تشکیل می دهند. در نتیجه، در اثر تشکیل آگلومره، نیروی وزن ذرات افزایش یافته و سوسپانسیون ناپایدار می شود. بنابراین، جلوگیری از تشکیل آگلومره و رسیدن به اندازه ذرات کوچک تر در داخل سوسپانسیون یکی از شروط لازم و اساسی برای به دست آوردن سوسپانسیون پایدار و مناسب برای فرآیند EPD است. بر اساس این نمودار میانگین اندازه ذرات برای سوسپانسیون بدون پراکنده ساز برابر ۹۱۲ nm است که با افزودن ید تا مقدار ۱/۲ g/l این مقدار کوچک تر می شود و در ۱/۲ g/l به مقدار ۱۱۱/۶ nm می رسد. افزودن بیش از این مقدار ید به سوسپانسیون باعث افزایش اندازه متوسط ذرات موجود در سوسپانسیون می شود.



شکل (۲): نمودار میانگین اندازه ذرات YSZ در استون بر حسب مقدار ید

پارامتر دیگری که نقش مهم و کلیدی در پایداری سوسپانسیون دارد، پتانسیل زتا است. به عبارت دیگر، اندازه ذرات کوچک تر و پتانسیل زتای بیش تر دو شرط اساسی برای پایداری سوسپانسیون های به کار رفته در فرآیند EPD هستند. شکل (۳)

مختلف ید بررسی شد. برای این منظور، سوسپانسیون هایی با غلظت پودر اولیه ۱۰ g/l حاوی مقادیر مختلف ۰/۴، ۰/۸، ۱/۲، ۱/۶ و ۲ g/l در استون تهیه شد. به منظور اندازه گیری میانگین اندازه ذرات و پتانسیل زتا برای هر سوسپانسیون از دستگاه زتامتر استفاده شد.

رسوب دهی الکتروفوریتیک بین زمینه سوپرآلیاژ اینکولوی ۸۲۵ با ابعاد ۱۲×۱۲×۳ mm به عنوان کاتد که در بین دو الکتروود فولاد زنگ نزن با ابعاد ۲۰×۳۰×۱ mm به عنوان آنود و به فاصله ۱ cm از هر کدام قرار گرفته بود، انجام گرفت. رسوب دهی در ولتاژهای مختلف ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ V و زمان های رسوب دهی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ دقیقه انجام گرفت. سپس نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه خشک شدند. به منظور بررسی تغییرات وزن پوشش با ولتاژ و زمان رسوب دهی، وزن هر نمونه یک بار قبل از رسوب دهی و یک بار پس از رسوب دهی اندازه گیری شد و وزن پوشش از تفاضل وزن نمونه ها قبل و بعد از رسوب دهی محاسبه شد. بررسی کیفیت پوشش های خام ایجاد شده توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام شد.

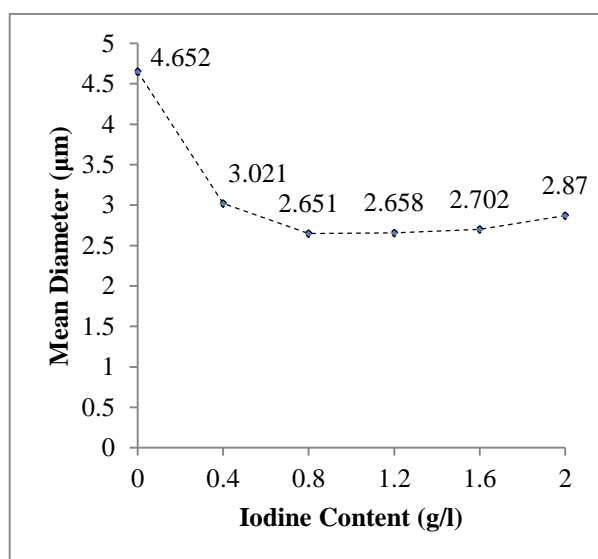
۳- نتایج و بحث

پایداری سوسپانسیون یکی از عوامل مهم و کلیدی در فرآیند رسوب دهی الکتروفوریتیک است. برای به دست آوردن پوشش کامپوزیتی YSZ/Al با استفاده از روش رسوب دهی الکتروفوریتیک باید سوسپانسیونی تهیه شود که هر دو پودر Al و YSZ در آن پایدار باشند تا امکان رسوب دهی هم زمان آنها وجود داشته باشد. بنابراین، ابتدا رفتار ذرات Al و YSZ به طور جداگانه در استون و در حضور مقادیر مختلف ید بررسی شد تا با تلفیق نتایج به دست آمده، ترکیب مناسب سوسپانسیون برای پایداری سازی و رسوب دهی هم زمان دو پودر تعیین شود. برای این منظور، سوسپانسیون هایی با ترکیب ۱۰ g/l پودر و حاوی مقادیر مختلف ۰/۴، ۰/۸، ۱/۲، ۱/۶ و ۲ g/l ید تهیه شد.

شکل (۲) نمودار میانگین اندازه ذرات YSZ در استون بر حسب

افزایش مقدار ید تا $1/2 \text{ g/l}$ باعث کاهش آگلومره شدن و اندازه متوسط ذرات و افزایش بار سطحی و پتانسیل زتا می‌شود. اما وقتی تعداد این یون‌ها بیش از حد افزایش یابد، به دلیل به هم فشردگی لایه دوگانه الکتریکی، ذرات آگلومره شده و پتانسیل زتا کاهش می‌یابد [۱۷].

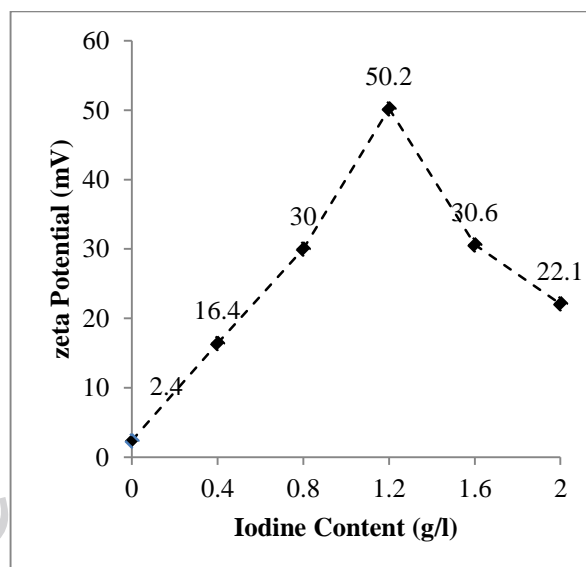
شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب نمودارهای اندازه متوسط ذرات و مقدار پتانسیل زتا را برای ذرات آلومینیوم در استون بر حسب مقدار ید نشان می‌دهند.



شکل (۴): نمودار اندازه متوسط ذرات Al در استون در حضور مقادیر مختلف ید

با توجه به شکل (۴) با افزایش مقدار ید از ۰ تا $0/8 \text{ g/l}$ ، میانگین اندازه ذرات موجود در سوسپانسیون کاهش و سپس با بیش‌تر شدن میزان ید، میانگین اندازه ذرات به صورت جزئی افزایش یافته است. به علاوه با توجه به شکل (۵) افزایش مقدار ید از ۰ تا $0/8 \text{ g/l}$ ، باعث افزایش مقدار پتانسیل زتا شده است. اما افزایش بیش‌تر مقدار ید باعث کاهش جزئی مقدار پتانسیل زتا می‌شود. بنابراین کوچک‌ترین اندازه ذرات و بیش‌ترین مقدار پتانسیل زتا برای ذرات Al در استون، به سوسپانسیون حاوی $0/8 \text{ g/l}$ ید مربوط می‌شود. با توجه به این‌که تفاوت سوسپانسیون‌های حاوی $0/8$ و $1/2 \text{ g/l}$ ید از لحاظ میانگین اندازه ذرات و مقدار پتانسیل

نمودار تغییرات پتانسیل زتا بر حسب مقدار ید را برای سوسپانسیون نانوذرات YSZ در استون نشان می‌دهد. طبق این نمودار با افزایش مقدار ید تا $1/2 \text{ g/l}$ مقدار پتانسیل زتا افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش بار سطحی ذرات است. اما در مقادیر بیش‌تر از $1/2 \text{ g/l}$ مقدار پتانسیل زتا و بار سطحی ذرات کاهش می‌یابد.



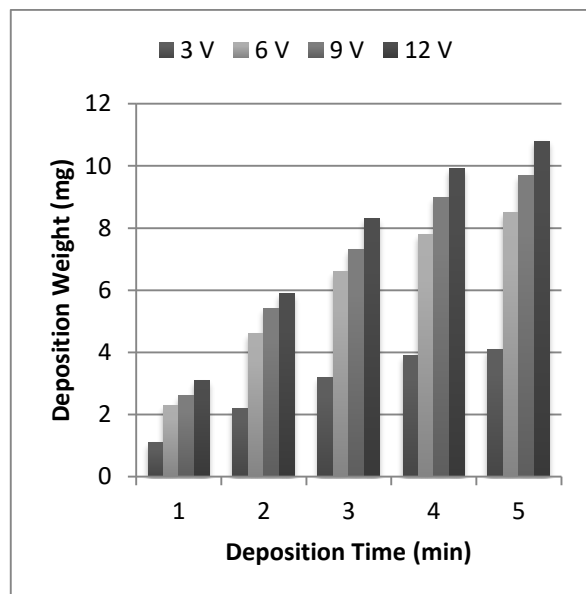
شکل (۳): نمودار تغییرات پتانسیل زتا بر حسب مقدار ید برای سوسپانسیون نانوذرات YSZ در استون

دلیل این رفتار به تجمع یون‌های H^+ در سطح ذرات برمی‌گردد. در اثر افزودن ید به سوسپانسیون با حلال استون، یون‌های H^+ طبق واکنش (۱) تولید می‌شوند.



در بیش‌تر مواقع، سطح ذرات YSZ دارای گروه‌های هیدروکسیل است که از رطوبت هوا جذب شده است. این گروه‌های هیدروکسیل، یون‌های H^+ را جذب می‌کنند و این امر باعث ایجاد بار مثبت در سطح ذرات YSZ می‌شود. با افزایش مقدار ید تعداد یون‌های H^+ تولید شده افزایش یافته و در نتیجه بار ایجاد شده در سطح ذرات YSZ افزایش می‌یابد. بنابراین

پوشش به عنوان تابعی از ولتاژ اعمالی و زمان رسوب‌دهی در شکل (۶) نشان داده شده است.

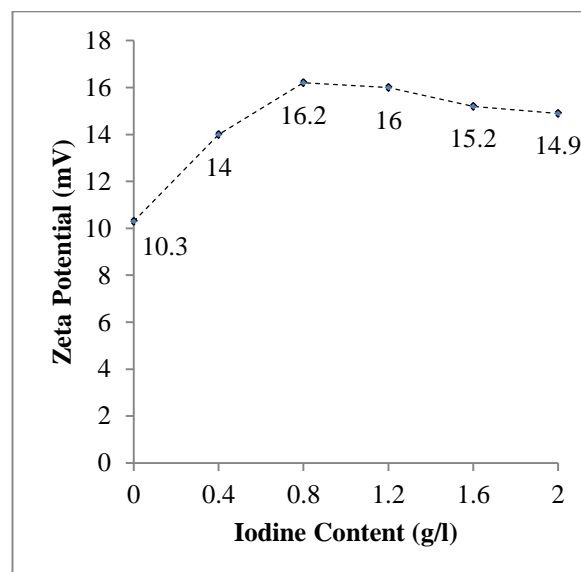


شکل (۶): نمودار تغییرات وزن پوشش به عنوان تابعی از ولتاژ اعمالی و زمان رسوب‌دهی

همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، با ثابت نگه داشتن زمان رسوب‌دهی، در ولتاژهای اولیه با افزایش مقدار ولتاژ اعمالی وزن پوشش به سرعت افزایش می‌یابد، اما رفته رفته نرخ افزایش وزن کاهش می‌یابد. علت این رفتار را می‌توان به سرعت زیاد ذرات در ولتاژهای بالا نسبت داد. سرعت بالای حرکت ذرات مانع از آرایش منظم ذرات در سطح الکتروود و ایجاد پوشش متراکم می‌شود [۱۱]. به علاوه، برخورد ذرات با سرعت بالا به ذرات از قبل رسوب کرده بر روی سطح الکتروود، باعث کنده شدن برخی از این ذرات شده و نرخ افزایش وزن را کاهش می‌دهد [۱۸].

به علاوه، با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌شود که با ثابت نگه داشتن ولتاژ اعمالی، در زمان‌های رسوب‌دهی اولیه، با افزایش زمان رسوب‌دهی، وزن رسوب به سرعت افزایش می‌یابد. اما با افزایش زمان، نرخ افزایش وزن کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که با افزایش زمان یک لایه عایق از رسوب بر روی

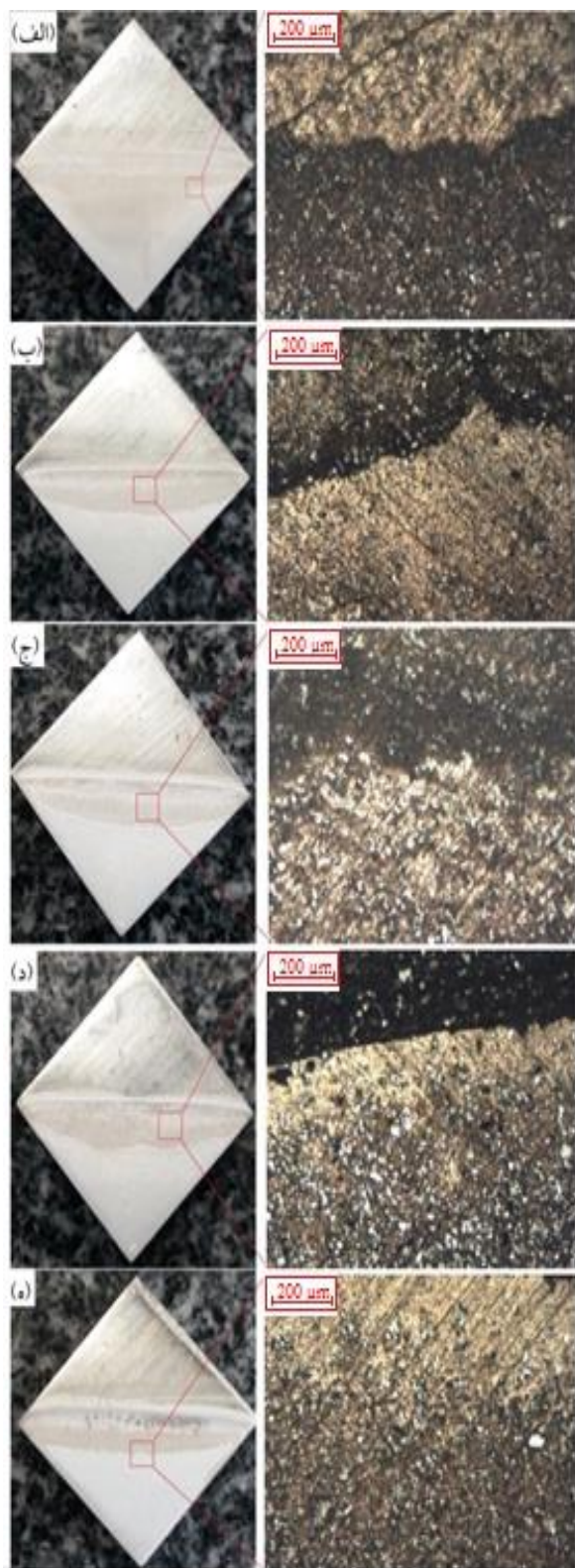
زتا جزئی است و مقدار $1/2$ g/l مقدار بهینه برای ذرات YSZ می‌باشد، مقدار $1/2$ g/l ید برای رسوب‌دهی هم زمان دو پودر انتخاب شد.



شکل (۵): نمودار مقدار پتانسیل زتا برای ذرات Al در استون در حضور مقادیر مختلف ید

با توجه به نتایج به دست آمده، سوسپانسیون حاوی هر دو پودر YSZ و آلومینیوم تهیه شد. غلظت پودر برای YSZ برابر 10 g/l و برای Al برابر 2 g/l در نظر گرفته شد. به منظور همگن‌سازی اختلاط دو پودر، مخلوط پودرها پس از توزین با نسبت‌های مذکور به مدت دو ساعت در یک محفظه پلی‌اتیلنی با گلوله‌های زیرکونیایی با سرعت 1000 rpm آسیاب خشک شد. فرآیند رسوب‌دهی در ولتاژهای 3 ، 6 ، 9 ، 12 و 15 V و زمان‌های 1 ، 2 ، 3 و 4 دقیقه انجام شد تا شرایط بهینه پوشش‌دهی مشخص شود.

از آنجا که فرآیند تشکیل رسوب بر روی الکتروود یک پدیده سینتیکی است، نرخ رسوب ذرات رفتار چگالش آن‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱۱]. بنابراین، برای به دست آوردن رسوبی با چگالی و ضخامت مناسب، پارامترهای فرآیند از قبیل ولتاژ اعمالی و زمان رسوب‌دهی باید بهینه‌سازی شوند. تغییرات وزن



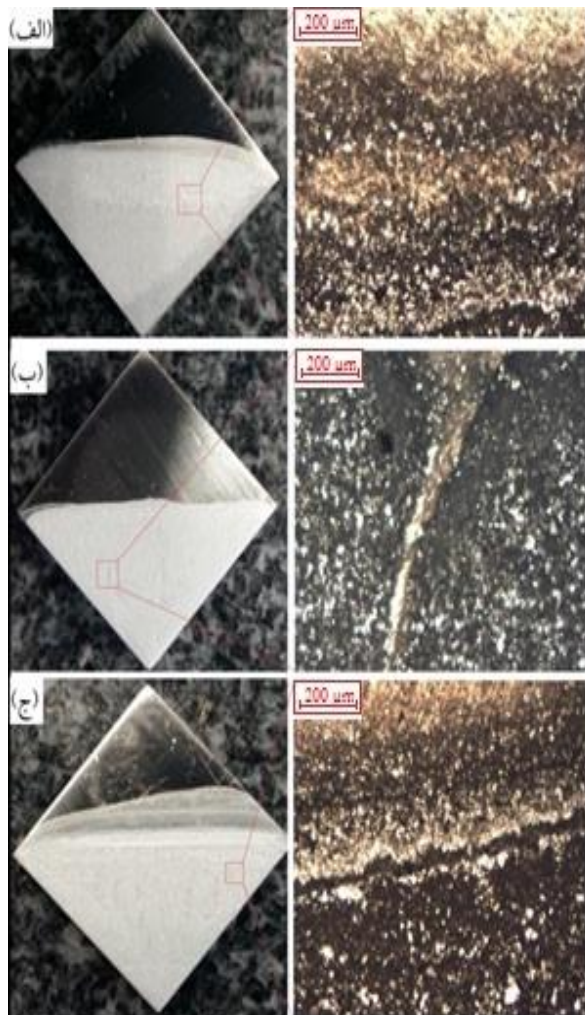
شکل (۷): تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپ نوری از مورفولوژی سطح پوشش‌های تشکیل شده در ولتاژ ۳ V و زمان رسوب‌دهی: (الف): ۱ دقیقه، (ب): ۲ دقیقه، (ج): ۳ دقیقه، (د): ۴ دقیقه و (ه): ۵ دقیقه

الکتروود رسانا تشکیل می‌شود و باعث افت میدان الکتریکی در سیستم می‌شود [۱۹]. همچنین با افزایش زمان رسوب‌دهی، غلظت پودر در سوسپانسیون کاهش می‌یابد که در زمان‌های رسوب‌دهی طولانی این امر نیز می‌تواند دلیلی برای کاهش نرخ افزایش وزن باشد.

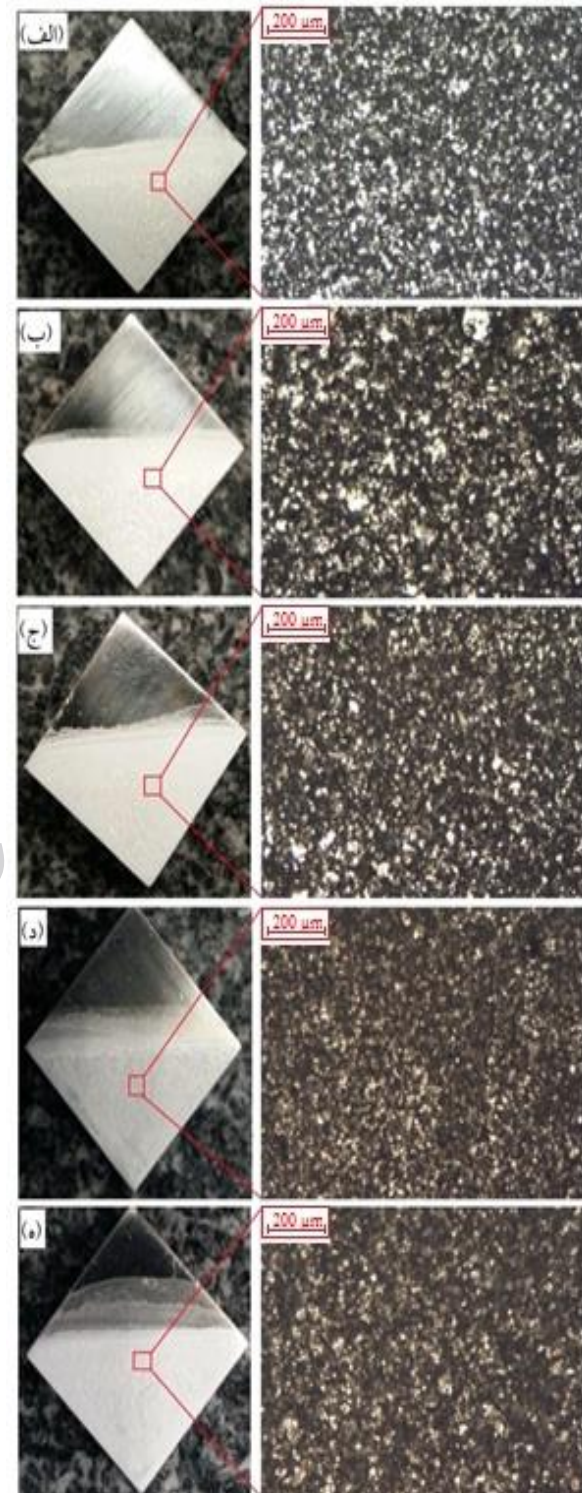
شکل (۷) تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپ نوری از مورفولوژی سطح پوشش‌های تشکیل شده در ولتاژ ۳ V و در زمان‌های رسوب‌دهی مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصاویر مشخص است، با افزایش زمان رسوب‌دهی مقدار پوشش تشکیل شده بر روی الکتروود زمینه افزایش یافته است، اما در هیچ کدام از پوشش‌های تشکیل شده در ولتاژ ۳ V ذرات به طور کامل سطح الکتروود را پوشش نداده‌اند. حتی در زمان ۵ دقیقه علی‌رغم تشکیل پوشش در قسمت‌های پایینی الکتروود، پوشش تشکیل شده در قسمت‌های بالایی غیریکنواخت بوده و بعضی مناطق بدون پوشش باقی مانده‌اند. در واقع در این ولتاژ ذرات نیروی محرکه کافی برای حرکت در داخل سوسپانسیون به سمت الکتروود را ندارند.

تصویر پوشش‌های تشکیل شده در ولتاژ ۶ V و در زمان‌های مختلف رسوب‌دهی در شکل (۸) نشان داده شده است. در بین نمونه‌های پوشش داده شده در ولتاژهای مختلف، بهترین کیفیت متعلق به پوشش‌های تشکیل شده در ولتاژ ۶ V است. پوشش‌های تشکیل شده در این ولتاژ عاری از هرگونه ترک و حفره در سطح خود هستند. اما با افزایش رسوب‌دهی به مقادیر بیش از ۳ دقیقه، به دلیل افزایش بیش از حد ضخامت پوشش قسمت‌هایی از آن کنده می‌شود.

باعث آرایش نامنظم ذرات و ایجاد پوشش غیرمتراکم می‌شود. در نتیجه سطح پوشش ایجاد شده ناصاف و غیریکنواخت خواهد بود. شکل (۹) پوشش‌های تشکیل شده در ولتاژهای ۹، ۱۲ و ۱۵V و زمان رسوب دهی ۱ دقیقه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود این پوشش‌ها دارای سطح غیریکنواخت و دارای ترک هستند. علاوه بر پوشش‌های تشکیل شده در زمان رسوب-دهی ۱ دقیقه، همه پوشش‌های تشکیل شده در این ۳ ولتاژ دارای سطح غیریکنواخت و ترک‌دار بودند.



شکل (۹): تصاویر پوشش‌های تشکیل شده در ولتاژهای: (الف): ۹ V، (ب): ۱۲ V و (ج): ۱۵ V، در زمان رسوب دهی ۱ دقیقه

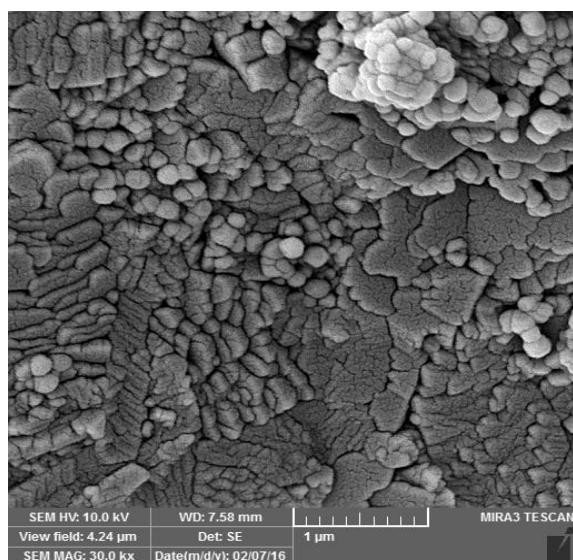


شکل (۸): تصاویر پوشش‌های تشکیل شده در ولتاژ ۶ V و زمان رسوب دهی: (الف): ۱ دقیقه، (ب): ۲ دقیقه، (ج): ۳ دقیقه، (د): ۴ دقیقه و (ه): ۵ دقیقه

با توجه به نتایج به دست آمده، پوشش ایجاد شده در ولتاژ ۶ V

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، افزایش بیش از حد ولتاژ اعمالی

شکل (۱۱) ریزساختار نمونه بهینه تف‌جوشی شده در دمای 1000°C را نشان می‌دهد. تشکیل گردنه و ایجاد مرزخانه بین ذرات تشکیل دهنده پوشش در این شکل مشهود است. این تصویر نشان می‌دهد که عملیات تف‌جوشی در دمای 1000°C به مدت ۲ ساعت، پیشروی خوبی داشته و باعث کاهش تخلخل-ها و افزایش چسبندگی بین ذرات تشکیل‌دهنده پوشش شده است.



شکل (۱۱): تصویر SEM ریزساختار پوشش تف‌جوشی شده در دمای 1000°C به مدت ۲ ساعت

۴- نتیجه‌گیری

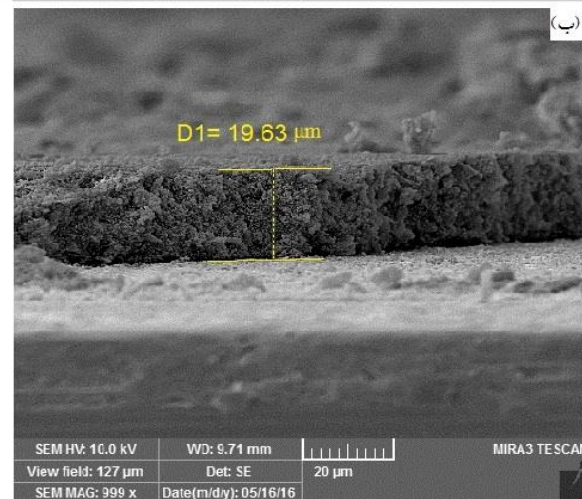
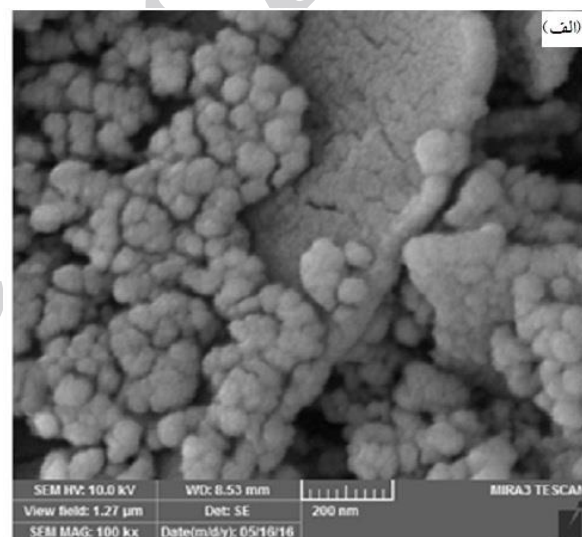
نتایج به دست آمده از این پژوهش را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۱- افزودن ید به سوسپانسیون ذرات YSZ و Al با حلال استون، باعث تولید یون‌های H^+ در سوسپانسیون می‌شود و جذب یون-های H^+ توسط اتم‌های اکسیژن موجود در سطح ذرات باعث بهبود پایداری ذرات در سوسپانسیون می‌شود.

۲- سوسپانسیون ذرات YSZ و Al در استون و در حضور g/l $1/2$ ید برای رسوب‌دهی هم‌زمان پودرهای YSZ و Al مناسب تشخیص داده شد. در این سوسپانسیون ذرات YSZ دارای اندازه

و زمان رسوب‌دهی ۳ دقیقه به عنوان پوشش خام بهینه انتخاب شد. تصویر SEM از ریزساختار و مقطع عرضی این پوشش در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که در تصویر مشخص است، ذرات Al در بعضی مناطق به صورت متمایز دیده می‌شوند که به دلیل مورفولوژی ورقه‌ای این ذرات و تفاوت اندازه ذرات Al و YSZ مورد استفاده است، اما سطح این نمونه عاری از هرگونه ترک و حفره است.

شکل (۱۰-ب) تصویر SEM مقطع عرضی این نمونه را نشان می‌دهد. بر اساس این تصویر ضخامت پوشش خام به دست آمده $19.63\ \mu\text{m}$ است.



شکل (۱۰): تصویر SEM از: (الف) ریزساختار و (ب) مقطع عرضی پوشش تشکیل شده در ولتاژ ۶ V و زمان رسوب‌دهی ۳ دقیقه

2208, 1993.

- [7] O. Unal, T. E. Mitchell & A. H. Heuer, "Microstructures of Y2O3-stabilized ZrO2 electron beam physical vapor deposition coating on Ni-based superalloys", *Journal of American Ceramic Society*, Vol. 77, pp. 984-992, 1994.
- [8] C. H. Chen, K. Nord-Varhaug & J. Schoonman, "Coating of yttria-stabilized zirconia (YSZ) thin films on Gadolinia-doped ceria (GCO) by the electrostatic spray deposition (ESD) technique", *Journal of Materials Synthesis and Processing*, Vol. 4, pp. 189-194, 1996.
- [9] K. Mehta, R. Xu & A. V. Virkar, "Two-layer fuel cell electrolyte structure by sol-gel processing", *Journal of Sol-gel Science and Technology*, Vol. 11, pp. 203-207, 1998.

[۱۰] ح. ملکی قلعه، ح. آقاجانی، م. محمودی، م. برجسته و ح. زمانی، "بررسی اتلاف حرارتی پوشش سد حرارتی نانو ساختار ساخته شده به روش EPD"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۸، شماره ۲، ص. ۱۰۴-۹۹، ۱۳۹۳.

- [11] L. Bersa, & L. Meilin, "A review on Fundamentals and Applications of Electrophoretic Deposition (EPD)", *Progress in Materials Science*, Vol. 52, No. 1, pp. 1-61, 2007.
- [12] A. R. Boccaccini & I. Zhitomirsky, "Application of electrophoretic and electrolytic deposition techniques in ceramics processing", *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 6, No. 3, pp. 251-260, 2002.

[۱۳] ع. گلشنی عجب شیر و ح. آقاجانی، "رسوب دهی الکتروفوریتیک (EPD) نانوذرات کاربید سیلیسیم (SiC)"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۱۰، شماره ۳، ص. ۱۱۱-۱۰۳، ۱۳۹۵.

- [14] K. K. Chew, S. H. Sharif Zein & A. L. Ahmad, "The corrosion scenario in human body: Stainless steel 316L orthopaedic implants", *Natural Science*, Vol. 4, No. 3, pp. 184-188, 2012.
- [15] De Riccardis & M. Federica, "Ceramic Coatings Obtained by Electrophoretic Deposition: Fundamentals, Models, Post-Deposition Processes and Applications", INTECH Open Access Publisher, 2012.

متوسط $111/6 \text{ nm}$ و پتانسیل زتای $50/2 \text{ mV}$ و ذرات Al دارای اندازه متوسط $2/658 \text{ }\mu\text{m}$ و پتانسیل زتای 16 mV هستند.

۳- با بررسی پوشش دهی در ولتاژها و زمان های مختلف مشخص شد که نمونه پوشش داده شده در ولتاژ 6 V و زمان رسوب دهی ۳ دقیقه نسبت به بقیه پوشش ها وضعیت بهتری داشته و دارای سطح عاری از ترک و حفره و ریز ساختار متراکم تری است.

۴- با بررسی سینتیکی رسوب دهی الکتروفوریتیک در ولتاژها و زمان های مختلف مشخص شد که در ولتاژ اعمالی ثابت با افزایش زمان رسوب دهی وزن پوشش با زمان افزایش می یابد، اما در زمان های رسوب دهی بیش تر، نرخ افزایش وزن کاهش می یابد. همچنین، در زمان رسوب دهی ثابت با افزایش ولتاژ اعمالی وزن پوشش با ولتاژ افزایش می یابد و با بیش تر شدن مقدار ولتاژ اعمالی، نرخ افزایش وزن پوشش کاهش می یابد.

۵- مراجع

- [1] A. P. Mouritz, "Introduction to Aerospace Materials", Woodhead Publishing, USA, 2012.
- [2] X. Q. Cao, R. Vassen & D. Stoeber, "Ceramic materials for thermal barrier coatings", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-10, 2004.
- [3] S. M. Meier, D. K. Gupta & K. D. Sheffler, "Ceramic thermal barrier coatings for commercial gas turbine engines", *Journal of Management*, Vol. 43, No. 3, pp. 50-53, 1991.
- [4] R. A. Miller, "Thermal barrier coatings for aircraft engines: history and directions", *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 6, No. 1, pp. 35-42, 1997.
- [5] U. B. Pal & S. C. Singhal, "Electrochemical vapor deposition of yttria-stabilized zirconia", *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 137, pp. 2937-2941, 1990.
- [6] G. Z. Cao, H. W. Brinkman, J. Meijerink, K. J. De Vries & A. J. Burggraaf, "Pore narrowing and formation of ultrathin yttria-stabilized zirconia layers in ceramic membranes by chemical vapor/electrochemical vapor deposition", *Journal of American Ceramic Society*, Vol. 76, pp. 2201-

- [16] Z. Wang, P. Xiao & J. Shemilt, "Fabrication of composite coatings using a combination of electrochemical methods and reaction bonding process", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 20, No, 10, pp. 1469-1473, 2000.
- [17] D. Das & R. N. Basu, "Suspension chemistry and electrophoretic deposition of zirconia electrolyte on conducting and non-conducting substrates", *Materials Research Bulletin*, Vol. 48, No. 9, pp. 3254-3261, 2013.
- [18] K. T. Sullivan, M. A. Worsley, J. D. Kuntz & A. E. Gash, "Electrophoretic deposition of binary energetic composites", *Combustion and Flame*, Vol. 159, No. 6, pp. 2210-2218, 2012.
- [19] F. Chen & M. Liu, "Preparation of yttria-stabilized zirconia (YSZ) films on La_{0.85}Sr_{0.15}MnO₃ (LSM) and LSM-YSZ substrates using an electrophoretic deposition (EPD) process", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 21, pp. 127-134, 2001.

۶- پی نوشت

-
- [1] Electrochemical Vapor Deposition
[2] Chemical Vapor Deposition
[3] Physical Vapor Deposition
[4] Electrostatic Spray Deposition
[5] Sol-gel
[6] Electrophoretic Deposition

Fabrication of YSZ/Al composite coating on Incoloy 825 superalloy using electrophoretic deposition

Mojtaba Ahmadi¹, Hossein Aghajani^{2,*}

1- M.Sc., Department of Materials Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Associate Professor, Department of Materials Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

*Corresponding author: h_aghajani@tabrizu.ac.ir

Abstract

In this research, Fabrication of YSZ/Al composite coating on Incoloy 825 superalloy using electrophoretic deposition has been investigated. Dispersion of YSZ and Al particles suspension in acetone in presence of iodine, as a dispersant, was studied by particle size and zeta potential measurement. According to the results, the suspension containing 1.2 g/l iodine has been chosen for electrophoretic co-deposition of YSZ and Al particles. Mean diameter of YSZ and Al particles in this suspension was measured 111.6 nm and 2.658 μm and zeta potential values of these particles were measured 50.2 and 16 mV, respectively. In order to investigate the influence of applied voltage and deposition time on the quality of formed deposit, electrophoretic co-deposition has been carried out at different voltages and deposition times. Results revealed that the deposit formed at voltage of 6 V and deposition time of 3 min had uniform and crack-free surface. SEM image showed that this coating had thickness of 19.63 μm .

Keywords: YSZ, Aluminum, Electrophoretic Deposition, Zeta Potential.

Journal homepage: ma.iaumajlesi.ac.ir

Please cite this article using:

Mojtaba Ahmadi, Hossein Aghajani, Fabrication of YSZ/Al composite coating on Incoloy 825 superalloy using electrophoretic deposition, in Persian, *New Process in Material Engineering*, 2019, 12(4), 129-139.