



اعمال پوشش لایه‌ای سد حرارتی و مقاوم به اکسیداسیون SiC/YSZ/Mullite بر روی کامپوزیت کربن-کربن به روش رسوب‌دهی الکتروفوریتیک (EPD)

علی گلشانی عجب‌شیر^۱، محمد جعفرپور^۱، سهند بهرنگی^۱، حسین آقاچانی^۲

^۱. گروه مهندسی مواد، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران (دانشجوی کارشناسی ارشد)

^۲. گروه مهندسی مواد، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران (استادیار)

چکیده

در این پژوهش پایداری سوسپانسیون نانوذرات کاربید سیلیسیم (SiC)، زیر کونیای پایدار شده با ۳ درصد مولی ایتریا (YSZ) و مولایت در حلال‌های آلی بررسی شده و پوشش‌دهی آن‌ها بر روی کامپوزیت کربن-کربن به روش رسوب‌دهی الکتروفوریتیک انجام گرفته است. بدین منظور ابتدا پایداری سوسپانسیون نانوذرات SiC و مولایت در حضور پلی اتیلن ایمین (PEI) در حلال اتانول و پایداری سوسپانسیون نانوذرات YSZ در حضور ید در حلال دو جزئی اتانول و استیل استون با نسبت حجمی ۵۰ درصد مورد بررسی قرار گرفت. اندازه‌گیری مقادیر پتانسیل زتا و متوسط اندازه‌ی ذرات نشان داد که نانوذرات SiC در حضور ۶ درصد وزنی PEI، نانوذرات مولایت در حضور ۱/۵ درصد وزنی PEI و نانوذرات YSZ در حضور ۰/۵ گرم بر لیتر ید پایداری بهتری دارند. در ادامه پوشش نانوذرات SiC، YSZ و مولایت در شرایط مختلف ولتاژ و زمان بر روی زیر لایه اعمال شد. بررسی‌های انجام شده توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که پوشش ایجاد شده از نانوذرات SiC در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان ۵۰ ثانیه، پوشش ایجاد شده از نانوذرات YSZ در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان ۳ دقیقه و پوشش ایجاد شده از نانوذرات مولایت در ولتاژ ۱۰ ولت و زمان ۶۰ ثانیه از کیفیت بهتری برخوردار هستند. در نهایت پوشش لایه‌ای SiC/YSZ/Mullite بر روی کامپوزیت کربن-کربن اعمال شد.

واژه‌های کلیدی: نانوذرات SiC؛ نانوذرات YSZ؛ نانوذرات مولایت؛ پتانسیل زتا؛ اندازه‌ی ذرات؛ رسوب‌دهی الکتروفوریتیک.

^۱. a_golshani1988@yahoo.com

مقدمه

کامپوزیت‌های کربن-کربن به دلیل خواص منحصربه‌فرد خود مثل نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت در برابر شوک حرارتی بالا و پایین بودن ضریب انبساط حرارتی، یکی از مناسب‌ترین مواد برای استفاده در صنایع هوافضا محسوب می‌شوند. اکسیداسیون این مواد در دماهای بالای 500°C و در اتمسفر اکسیدی موجب محدودیت کاربرد آن‌ها در موارد مختلف می‌شود. بنابراین برای استفاده از این مواد در دماهای بالا باید میزان مقاومت به اکسیداسیون این مواد را افزایش داد [۱]. سیستم‌های پوشش‌دهی مختلفی برای محافظت مواد کربنی در برابر اکسیداسیون پیشنهاد شده است که در بین آن‌ها پوشش SiC به‌طور وسیعی به کار گرفته شده است. البته پوشش‌های تک لایه توانایی زیادی به‌منظور محافظت از مواد کربنی در زمان‌های طولانی ندارند. بنابراین پوشش‌های چندلایه‌ی پایه سیلیکونی مورد مطالعه قرار گرفتند. در پوشش‌های چندلایه، SiC به دلیل سازگاری فیزیکی و شیمیایی مناسب با مواد کربنی به‌عنوان لایه‌ی پیوندی (اتصال) به کار می‌رود. همچنین مواد بورایدی، سیلیکاتی و اکسیدی به‌عنوان لایه‌ی محافظ در برابر نفوذ اکسیژن بر روی SiC اعمال می‌شوند. در بین این مواد زیرکونیای پایدار شده با ایتریا (YSZ) به دلیل مقاومت بالا در برابر شوک حرارتی و مقاوم بودن در برابر فرسایش حرارتی باعث بهبود عملکرد دما بالای پوشش-های مقاوم در برابر اکسیداسیون می‌شود [۲]. همچنین مولایت به دلیل نقطه‌ی ذوب بالا، پایداری خوب، نفوذپذیری پایین اکسیژن در دماهای بالا، مقاومت در برابر فرسایش خوب، مقاومت در برابر انتشار ترک و مقاومت در برابر شوک حرارتی به‌عنوان لایه‌ی خارجی در پوشش‌ها به کار می‌رود [۳ و ۴].

در بین روش‌های مختلف پوشش‌دهی، روش EPD به دلیل ساده بودن تجهیزات، زمان کم فرآیند پوشش‌دهی و امکان پوشش‌دهی قطعات با شکل‌های هندسی پیچیده مورد توجه قرار گرفته است [۵ و ۶]. رسوب‌دهی الکتروفوریتیک (EPD)، به حرکت ذرات باردار معلق شده یا پخش شده داخل محیط مایع به طرف الکترود با بار مخالف و ایجاد رسوب روی آن به وسیله اعمال جریان الکتریکی را گویند [۵]. به طور کلی، می‌توان گفت EPD در دو مرحله انجام می‌گیرد: (۱) میدان الکتریکی اعمال شده و ذرات باردار معلق در سوسپانسیون پایدار به طرف الکترود با بار مخالف حرکت می‌کنند (الکتروفورسیس)؛ (۲) ذرات بر روی الکترود تجمع کرده، آگلومره شده و یک فیلم نسبتاً فشرده و همگن را ایجاد می‌کنند (رسوب نشانی) [۷].

در سوسپانسیون‌ها نیروی وزن ذرات و نیروی جاذبه‌ی واندروالس بین ذرات در پایداری سوسپانسیون نقش مهمی دارند. اگر اندازه‌ی ذرات از حد مجاز بیشتر باشد نیروی حاصل از وزن ذرات باعث ته‌نشینی و عدم پایداری سوسپانسیون خواهد شد. همچنین اگر نیروی جاذبه‌ی واندروالس خیلی بزرگ باشد باعث برخورد ذرات و چسبیدن آن‌ها به همدیگر و در نهایت ته‌نشینی آن‌ها می‌شود [۸]. روش‌های مختلفی وجود دارد که موجب غلبه بر این نیروها و ایجاد نیروی دافعه بین ذرات می‌شوند. این نیروی دافعه باید توانایی غلبه بر نیروی جاذبه را داشته باشد و مانع از به هم چسبیدن ذرات و افزایش پایداری سوسپانسیون‌ها شود.

پارامترهای تاثیرگذار در رسوب‌دهی الکتروفوریتیک به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: (۱) پارامترهای مربوط به سوسپانسیون که عبارتند از: ثابت دی‌الکتریک حلال (نوع حلال)، ویسکوزیته سوسپانسیون، پتانسیل زتا و غلظت

سوسپانسیون؛ ۲) پارامترهای مربوط به فرآیند رسوب‌دهی الکتروفوریتیک که عبارتند از: زمان رسوب‌دهی، ولتاژ رسوب‌دهی و رسانایی زیرلایه [۵]. محققین تاثیر این پارامترها را بر روی بازده رسوب مورد بررسی قرار داده‌اند. هاماکر^۱ رابطه زیر را برای محاسبه وزن پوشش در واحد سطح پیشنهاد داد [۹]:

$$m = C_s \mu S E t \quad (1)$$

در این رابطه C_s غلظت سوسپانسیون، μ مویلیته الکتروفوریتیک، E میدان الکتریکی و S مساحت سطح پوشش داده شده است. مویلیته الکتروفوریتیک ذرات از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۰]:

$$\mu = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \xi}{\eta} \quad (2)$$

در این رابطه ϵ_0 ثابت دی الکتریک خلاء، ϵ_r ثابت دی الکتریک حلال، ξ پتانسیل زتای ذرات و η ویسکوزیته محیط پراکنده‌ساز است. با توجه به این روابط مشخص است که زمان، میدان اعمال شده، پتانسیل زتا، ثابت دی الکتریک حلال و غلظت سوسپانسیون، رابطه‌ی مستقیم با وزن پوشش دارند و ویسکوزیته‌ی حلال، رابطه‌ی عکس با وزن پوشش دارد.

در این پژوهش تلاش شده است تا پایداری سوسپانسیون حاصل از نانوذرات SiC، YSZ و مولایت در حلال‌های الکلی بررسی شود. همچنین پوشش لایه‌ای سد حرارتی و مقاوم به اکسیداسیون SiC/YSZ/Mullite، به روش EPD از سوسپانسیون بهینه بر روی کامپوزیت کربن-کربن اعمال شده است.

مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، نانو پودرهای کاربید سیلیسیم (SiC) با اندازه‌ی ذرات حدود ۵۰ نانومتر و اکسید زیر کونیم پایدار شده با ۳ درصد مولی اکسید ایتريم (YSZ) با اندازه‌ی ذرات کمتر از ۱۰۰ نانومتر، خریداری شده از شرکت نوترینو و نانو پودر مولایت با اندازه‌ی ذرات کمتر از ۱۰۰ نانومتر، خریداری شده از شرکت لاگونا با خلوص بالای ۹۹ درصد استفاده شدند. حلال‌های اتانول (کیما الکل زنجان) با خلوص ۹۹/۶ درصد و استیل استون (Merck) با خلوص ۹۹ درصد مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین از (Sigma-Aldrich, average $M_w \sim 25000$) PEI (branched) و ید (Carlo Erba) به‌عنوان پراکنده‌ساز استفاده شد. تأثیر مقادیر مختلف PEI بر پایداری سوسپانسیون نانوذرات SiC و مولایت در اتانول و تأثیر مقادیر مختلف ید بر پایداری سوسپانسیون نانوذرات YSZ در حلال دو جزئی اتانول و استیل استون با نسبت حجمی ۵۰ درصد مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی پایداری سوسپانسیون‌های تهیه شده و انتخاب پایدارترین سوسپانسیون برای پوشش‌دهی، از دو پارامتر پتانسیل زتا و متوسط اندازه‌ی ذرات استفاده شد. مقدار پتانسیل زتا و متوسط اندازه‌ی ذرات برای سوسپانسیون‌ها توسط دستگاه زتامتر (Microtrac, Nanotrac Wave, USA) به دست آمد.

¹. Hamaker

برای پوشش‌دهی نانوذرات SiC، YSZ و مولایت، از کامپوزیت کربن - کربن با ابعاد 10×20 میلی‌متر مربع و ضخامت ۳ میلی‌متر به‌عنوان زیر لایه و از ورق فولاد زنگ‌نزن با ابعاد 20×30 میلی‌متر مربع و ضخامت ۱ میلی‌متر برای الکتروود با بار مخالف استفاده شد. کامپوزیت کربن - کربن به‌صورت موازی و به فاصله ۱ سانتی‌متر در بین دو ورق فولاد زنگ‌نزن قرار گرفت. پوشش‌دهی نانوذرات SiC از سوسپانسیون با غلظت 5 g/l در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان‌های ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ ثانیه، پوشش‌دهی نانوذرات YSZ از سوسپانسیون با غلظت 1 g/l ، در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ دقیقه و پوشش‌دهی نانوذرات مولایت از سوسپانسیون با غلظت 5 g/l در ولتاژ ۱۰ ولت و زمان‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ ثانیه انجام شد. کیفیت و ضخامت پوشش‌های اعمال شده توسط میکروسکوپ نوری (Lissview) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM, Mira3 Tescan) مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

با توجه به اهمیت پایداری سوسپانسیون‌ها در روش رسوب‌دهی الکتروفوریتیک، ابتدا پایداری نانوذرات SiC، YSZ و مولایت مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور مقادیر پتانسیل زتا (میزان بار سطحی ذرات) و متوسط اندازه‌ی ذرات سوسپانسیون‌ها در حضور پراکنده‌ساز PEI و ید محاسبه و سوسپانسیون‌های بهینه برای پوشش‌دهی نمونه‌ها انتخاب شدند. شکل (۱) نمودار مقادیر پتانسیل زتا را بر حسب مقدار PEI برای نانوذرات SiC در حلال اتانول نشان می‌دهد. طبق این نمودار با افزایش مقدار PEI از $1/5$ درصد وزنی به ۶ درصد وزنی مقدار پتانسیل زتا افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش در بار سطحی ذرات است. همچنین در مقادیر بالای ۶ درصد وزنی، مقدار پتانسیل زتا و در نتیجه میزان بار سطحی ذرات کاهش می‌یابد. شکل (۲) نمودار اندازه‌ی میانگین نانوذرات SiC بر حسب مقدار PEI را در اتانول نشان می‌دهد. با توجه به این نمودارها مشخص است که با افزایش مقدار پراکنده‌ساز از $1/5$ درصد وزنی به ۳ درصد وزنی، اندازه‌ی ذرات سوسپانسیون به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است. با افزایش مقدار PEI از ۳ درصد وزنی تا ۶ درصد وزنی، اندازه‌ی ذرات تقریباً ثابت بوده و تغییر چندانی نداشته است ولی افزایش مقدار پراکنده‌ساز به مقادیر بالای ۶ درصد وزنی باعث افزایش در اندازه‌ی ذرات سوسپانسیون شده است. بنابراین با توجه به شکل‌های (۱) و (۲) می‌توان نتیجه گرفت که کاهش یا افزایش بیش از اندازه‌ی مقدار PEI باعث آگلومره شدن، کاهش بار سطحی ذرات و در نتیجه ته‌نشینی نانوذرات SiC در سوسپانسیون می‌شود. با توجه به اینکه رسیدن به اندازه‌ی ذرات کوچک‌تر و بیشترین مقدار پتانسیل زتا دو شرط اساسی در پایداری سوسپانسیون‌ها و در نتیجه رسوب‌دهی الکتروفوریتیک ذرات است، مقدار ۶ درصد وزنی PEI به‌عنوان مقدار بهینه انتخاب شد. شکل (۳) نمودار مقادیر پتانسیل زتا را بر حسب مقدار ید برای نانوذرات YSZ در حلال دو جزئی اتانول و استیل استون با نسبت حجمی ۵۰ درصد نشان می‌دهد. افزایش غلظت ید تا $0/5$ گرم بر لیتر باعث افزایش پتانسیل زتا شده ولی با افزودن بیش از حد ید، مقدار پتانسیل زتا روند نزولی پیدا می‌کند. در مورد غلظت‌های پایین ید، علت عدم پایداری سوسپانسیون کاملاً واضح است. زیرا مقدار ید به حدی نیست که به مقدار کافی بار مثبت تولید کرده و

سطح همه ذرات را پوشاند. با افزایش غلظت ید و رسیدن به یک مقدار معین و کافی، مقدار پروتون‌ها به حدی می‌رسد که بیش‌ترین پایداری را برای سوسپانسیون فراهم سازد. بعد از عبور از مقدار بهینه ید، پتانسیل زتای ذرات، پایداری سوسپانسیون و در نتیجه فشردگی لایه مضاعف الکتریکی کاهش می‌یابد [۱۱ و ۱۲]. شکل (۴) نمودار متوسط اندازه‌ی ذرات YSZ بر حسب مقدار ید را در حلال دو جزئی اتانول و استیل استون با نسبت حجمی ۵۰ درصد، نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار مشخص است که با افزایش مقدار ید از ۰/۱ گرم بر لیتر به ۰/۵ گرم بر لیتر، اندازه‌ی ذرات سوسپانسیون به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است. افزایش مقدار ید به مقادیر بالای ۰/۵ گرم بر لیتر باعث افزایش در اندازه‌ی ذرات سوسپانسیون شده است. بنابراین مقدار ۰/۵ گرم بر لیتر ید به‌عنوان مقدار بهینه انتخاب شد. همچنین شکل (۵) نمودار مقادیر پتانسیل زتا را بر حسب مقدار PEI و شکل (۶) نمودار اندازه‌ی میانگین نانوذرات مولایت بر حسب مقدار PEI را در اتانول نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص است که نانوذرات مولایت در حضور ۱/۵ درصد وزنی PEI دارای بیشترین مقدار پتانسیل زتا و کمترین مقدار اندازه‌ی ذرات هستند. بنابراین مقدار ۱/۵ درصد وزنی PEI به‌عنوان مقدار بهینه برای پایدارسازی نانوذرات مولایت انتخاب شد.

پوشش نانوذرات SiC از سوسپانسیونی با غلظت ۵ گرم بر لیتر در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان‌های مختلف بر روی کامپوزیت کربن-کربن اعمال شد. شکل (۷) تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های پوشش داده شده در ولتاژ ۲۰ ولت و زمان‌های ۱۰، ۳۰، ۷۰ و ۹۰ ثانیه را نشان می‌دهد. تصاویر نشان می‌دهند که در زمان‌های ۱۰ و ۳۰ ثانیه، ذرات SiC تقریباً تمام سطح گرافیت را پوشانده‌اند ولی حفره‌های ریزی بر روی نمونه‌ها مشاهده می‌شود. وجود این حفره‌ها نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که زمان‌های اعمال شده برای این نمونه‌ها به‌منظور ایجاد پوشش یکنواخت و عاری از حفره کافی نیست. همچنین تصاویر نمونه‌های پوشش داده شده در زمان‌های ۷۰ و ۹۰ ثانیه نشان می‌دهد که با افزایش زمان ترک‌هایی در پوشش ایجاد شده است که دلیل آن افزایش بیش از اندازه‌ی ضخامت پوشش و افزایش انقباض حاصل از خشک شدن نمونه‌ها پس از فرآیند پوشش‌دهی است. با توجه به شکل مشخص است که در یک ولتاژ ثابت، با افزایش زمان اندازه‌ی ترک‌ها بزرگ‌تر می‌شود. در بین نمونه‌های پوشش‌دهی شده در زمان‌های مختلف، نمونه‌ی پوشش داده شده در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان ۵۰ ثانیه کیفیت بهتری دارد و پوشش ایجاد شده در این شرایط دارای سطح صاف و یکنواختی است. شکل (۸) تصویر SEM این نمونه را نشان می‌دهد. سطح این نمونه عاری هرگونه حفره و ترک است.

پوشش نانوذرات YSZ از سوسپانسیونی با غلظت ۱۰ گرم بر لیتر در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ دقیقه بر روی کامپوزیت کربن-کربن اعمال شد. به دلیل ضخامت کم پوشش‌های تشکیل شده در زمان‌های پایین‌تر از ۲ دقیقه، این زمان‌ها گزینه‌های مناسبی برای ایجاد پوشش برای حفاظت کامل زیرلایه به نظر نمی‌رسند. در زمان‌های بالاتر از ۴ دقیقه نیز ترک‌های ماکروسکوپی (که با گذشت زمان عریض‌تر و عمیق‌تر می‌شدند) موجب می‌شوند که پوشش‌های ضخیم ایجاد شده کارایی خاصی نداشته باشند. شکل (۹) تصویر SEM نمونه پوشش داده شده در زمان ۴ دقیقه را نشان می‌دهد. پوشش ایجاد شده در زمان ۳ دقیقه دارای ضخامت مناسب و سطح یکنواخت

است که به‌عنوان پوشش بهینه در این مرحله انتخاب شد. شکل (۱۰) تصویر SEM این نمونه را نشان می‌دهد. همچنین پوشش‌دهی نانوذرات مولایت در ولتاژ ۱۰ ولت و زمان‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ ثانیه نشان داد که نانوذرات مولایت در ولتاژهای پایین به‌طور کامل سطح نمونه را پوشش نمی‌دهند. شکل (۱۱) تصویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های پوشش‌داده شده در زمان‌های ۲۰ و ۴۰ ثانیه را نشان می‌دهد. همچنین افزایش بیش از اندازه‌ی زمان باعث بوجود آمدن ترک‌هایی در پوشش می‌شود که دلیل آن افزایش بیش از اندازه‌ی ضخامت پوشش و افزایش انقباض حاصل از خشک شدن نمونه‌ها پس از فرآیند پوشش‌دهی است. شکل (۱۱) تصویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های پوشش‌داده شده در زمان‌های ۸۰ و ۱۰۰ ثانیه را نشان می‌دهد. در بین نمونه‌های پوشش‌دهی شده در زمان‌های مختلف، نمونه‌ی پوشش‌داده شده در ولتاژ ۱۰ ولت و زمان ۶۰ ثانیه کیفیت بهتری دارد و پوشش ایجاد شده در این شرایط دارای سطح صاف و یکنواختی است (شکل (۱۲)).

با انتخاب شرایط بهینه برای پوشش‌دهی نانوذرات SiC، YSZ، و مولایت، پوشش لایه‌ای SiC/YSZ/Mullite در این شرایط بر روی کامپوزیت کربن-کربن اعمال شد. شکل (۱۳) تصویر SEM از مقطع عرضی این نمونه را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص است که پوشش سه لایه به ضخامت ۵۳/۱۱ میکرومتر بر روی کامپوزیت کربن-کربن تشکیل شده است.

نتیجه‌گیری

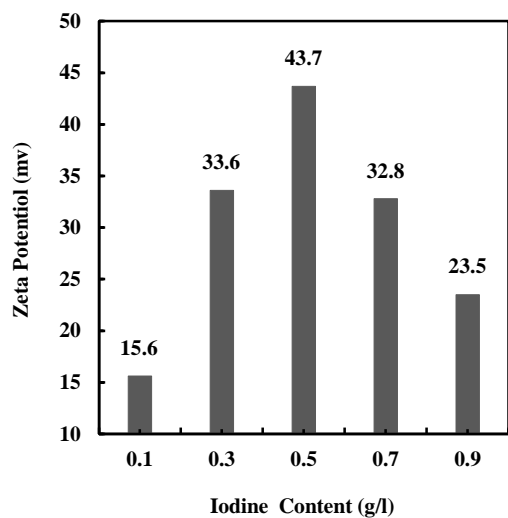
اعمال پوشش لایه‌ای سد حرارتی و مقاوم به اکسیداسیون SiC/YSZ/Mullite به روش EPD راه حل مناسبی برای حفاظت کامپوزیت کربن - کربن در دماهای بالاست. در روش EPD ابتدا باید ذرات به خوبی در داخل حلال مناسب پراکنده شوند. سپس این ذرات در حضور میدان الکتریکی بر روی زیر لایه پوشش داده می‌شوند. در این پژوهش ابتدا پایداری نانوذرات SiC و مولایت در حلال اتانول در حضور پراکنده‌ساز PEI و پایداری نانوذرات YSZ در حلال دو جزئی اتانول و استیل استون با نسبت حجمی ۵۰ درصد در حضور پراکنده‌ساز ید مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- ۱) نانوذرات SiC در حلال اتانول و در حضور ۶ درصد وزنی PEI پایداری بهتری داشتند.
- ۲) نانوذرات مولایت در حلال اتانول و در حضور ۱/۵ درصد وزنی PEI پایداری بهتری داشتند.
- ۳) نانوذرات YSZ در حلال دو جزئی اتانول و استیل استون با نسبت حجمی ۵۰ درصد و در حضور ۰/۵ گرم بر لیتر ید پایداری بهتری داشتند.

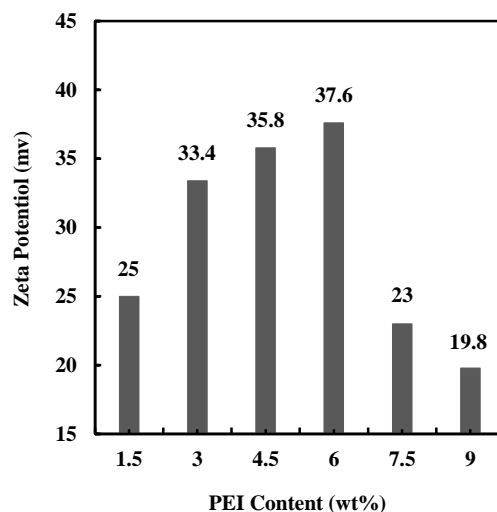
همچنین پوشش‌دهی نمونه‌ها توسط سوسپانسیون‌های بهینه انجام شد و نتایج نشان داد که پوشش ایجاد شده از نانوذرات SiC در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان ۵۰ ثانیه، پوشش ایجاد شده از نانوذرات YSZ در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان ۳ دقیقه و پوشش ایجاد شده از نانوذرات مولایت در ولتاژ ۱۰ ولت و زمان ۶۰ ثانیه کیفیت بهتری دارند. بنابراین پوشش لایه‌ای SiC/YSZ/Mullite به ضخامت ۵۳/۱۱ میکرومتر در این شرایط بر روی کامپوزیت کربن-کربن اعمال شد.

مراجع

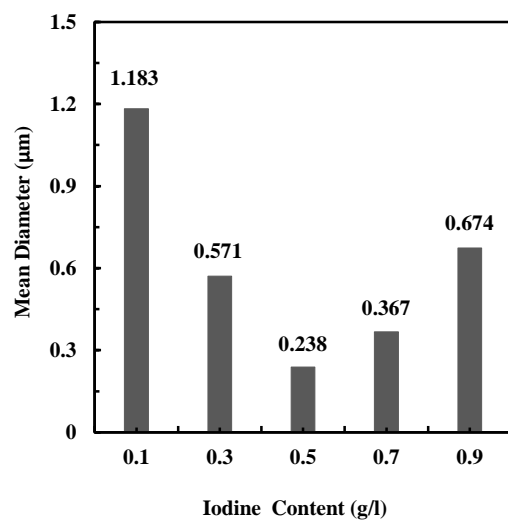
1. Tao, Feng, Li He-Jun, Fu Qian-Gang, Zhang Yu-Lei, and Shi Xiao-Hong. "Microstructure and anti-oxidation properties of multi-composition ceramic coatings for carbon/carbon composites." *Ceramics international* 37, no. 1 (2011): 79-84.
2. Zeng, Yi, Xiang Xiong, Shun Guo, and Wu-zhuang Zhang. "SiC/SiC-YAG-YSZ oxidation protective coatings for carbon/carbon composites." *Corrosion Science* 70 (2013): 68-73.
3. Wang, Kai-Tong, Li-Yun Cao, Jian-Feng Huang, and Jie Fei. "A mullite/SiC oxidation protective coating for carbon/carbon composites." *Journal of the European Ceramic Society* 33, no. 1 (2013): 191-198.
4. Ma, Chao, Hejun Li, Heng Wu, Qiangang Fu, Can Sun, Xiaohong Shi, Yulei Zhang, Zhengzhong Zhang, Jun Tao, and Zhihai Han. "Mullite oxidation resistant coating for SiC-coated carbon/carbon composites by supersonic plasma spraying." *Journal of Materials Science & Technology* 29, no. 1 (2013): 29-33.
5. Besra, Laxmidhar, and Meilin Liu. "A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD)." *Progress in materials science* 52, no. 1 (2007): 1-61.
6. Boccaccini, Aldo R., and Igor Zhitomirsky. "Application of electrophoretic and electrolytic deposition techniques in ceramics processing." *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 6, no. 3 (2002): 251-260.
7. Corni, Ilaria, Mary P. Ryan, and Aldo R. Boccaccini. "Electrophoretic deposition: from traditional ceramics to nanotechnology." *Journal of the European Ceramic Society* 28, no. 7 (2008): 1353-1367.
8. Rahaman, M. N, Ceramic Processing and Sintering, 2003, New York, NY: Marcell Dekker, Inc.
9. Ferrari, Begoña, and Rodrigo Moreno. "EPD kinetics: a review." *Journal of the European Ceramic Society* 30, no. 5 (2010): 1069-1078.
10. Farrokhi-Rad, Morteza, and Taghi Shahrabi. "Effect of suspension medium on the electrophoretic deposition of hydroxyapatite nanoparticles and properties of obtained coatings." *Ceramics International* 40, no. 2 (2014): 3031-3039.
11. Das, Debasish, and Rajendra N. Basu. "Suspension chemistry and electrophoretic deposition of zirconia electrolyte on conducting and non-conducting substrates." *Materials Research Bulletin* 48, no. 9 (2013): 3254-3261.
12. Talebi, Tahereh, Babak Raissi, and Amir Maghsoudipour. "The role of addition of water to non-aqueous suspensions in electrophoretically deposited YSZ films for SOFCs." *international journal of hydrogen energy* 35, no. 17 (2010): 9434-9439.



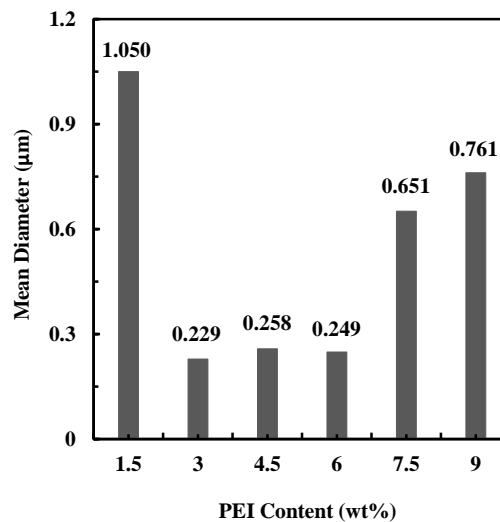
شکل (۳): نمودار پتانسیل زتا بر حسب مقدار ید برای نانوذرات YSZ در حلال دو جزئی اتانول و استیل استون با نسبت حجمی ۵۰ درصد.



شکل (۱): نمودار پتانسیل زتا بر حسب مقدار PEI برای نانوذرات SiC در حلال اتانول.

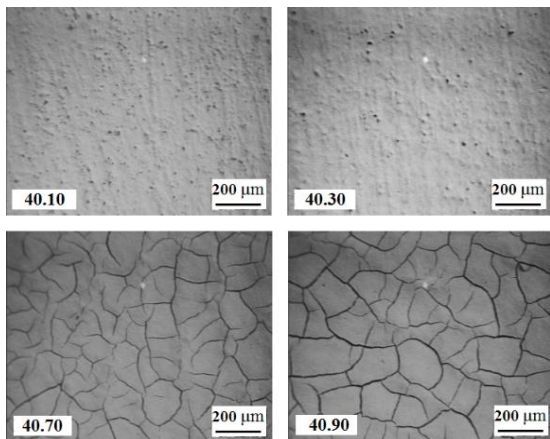


شکل (۴): نمودار متوسط اندازه‌ی ذرات بر حسب مقدار ید برای نانوذرات YSZ در حلال دو جزئی اتانول و استیل استون با نسبت حجمی ۵۰ درصد.

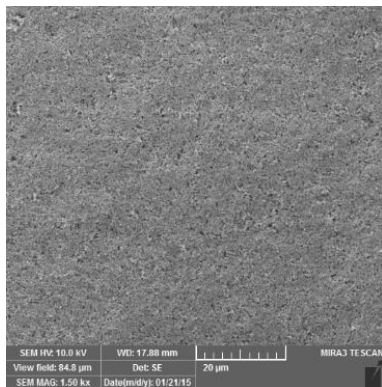


شکل (۲): نمودار متوسط اندازه‌ی ذرات SiC در حلال اتانول و در حضور مقادیر مختلف PEI.

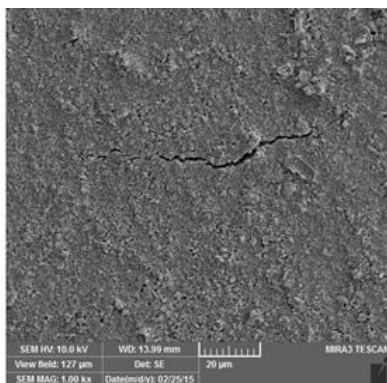
شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح



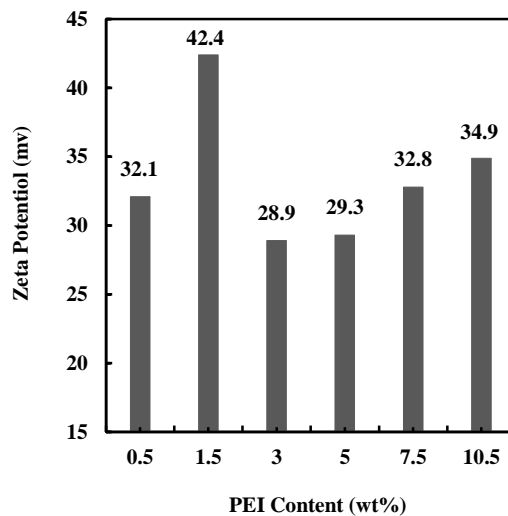
شکل (۷): تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌های پوشش داده شده با نانوذرات SiC در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان‌های ۱۰، ۳۰، ۷۰ و ۹۰ ثانیه.



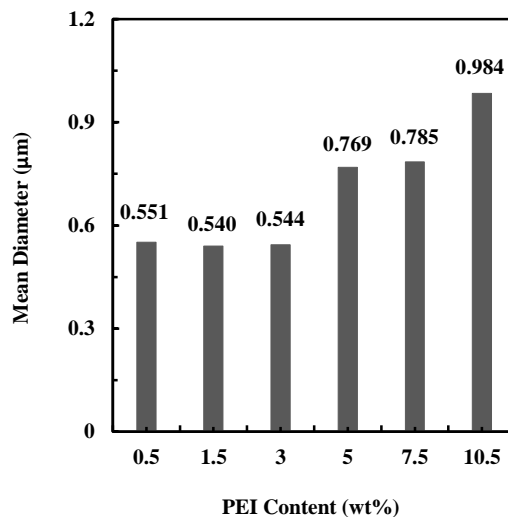
شکل (۸): تصویر SEM نمونه‌ی پوشش داده شده با نانوذرات SiC در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان ۵۰ ثانیه.



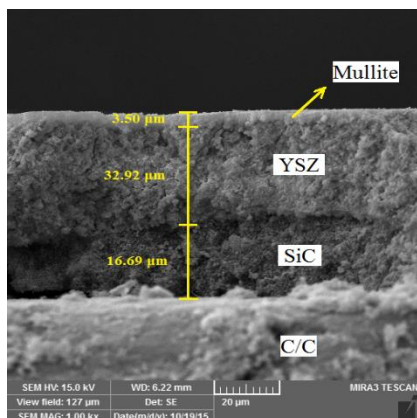
شکل (۹): تصویر SEM نمونه‌ی پوشش داده شده با نانوذرات YSZ در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان ۴ دقیقه.



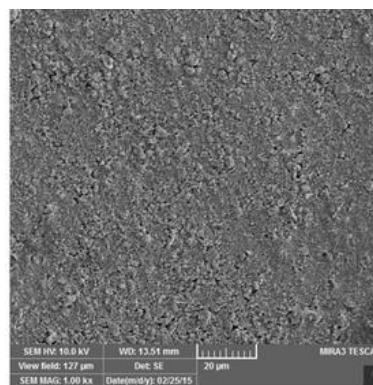
شکل (۵): نمودار پتانسیل زتا بر حسب مقدار PEI برای نانوذرات مولایت در حلال اتانول.



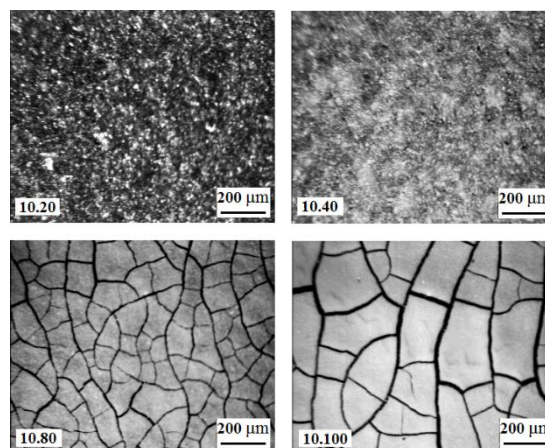
شکل (۶): نمودار متوسط اندازه‌ی ذرات مولایت در حلال اتانول و در حضور مقادیر مختلف PEI.



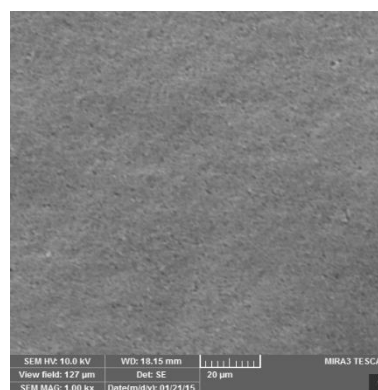
شکل (۱۳): تصویر SEM از مقطع عرضی پوشش سه لایه‌ی SiC/YSZ/Mullite بر روی کامپوزیت کربن-کربن.



شکل (۱۰): تصویر SEM نمونه‌ی پوشش داده شده با نانوذرات YSZ در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان ۳ دقیقه.



شکل (۱۱): تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌های پوشش داده شده با نانوذرات SiC در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان‌های ۱۰، ۳۰، ۷۰ و ۹۰ ثانیه.



شکل (۱۲): تصویر SEM نمونه‌ی پوشش داده شده با نانوذرات مولایت در ولتاژ ۱۰ ولت و زمان ۶۰ ثانیه.