

سأنرد بهين سمينار ملى مهندسي تطح

بهمنماه ۱۳۹۴

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

على كلشنى عجب شير'، محمد جعفر پور'، سهند بهرنگى'، حسين آقاجانى'

۲. 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)

چکیدہ

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 پوشش دهی آنها بر روی کامپوزیت کربن-کربن به روش رسوب دهی الکتروفور تیک 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 XSZ در حضور ید در حلال دو جزئی اتانول و استیل استون با نسبت حجمی ۵۰ درصد مورد بررسی قرار گرفت. اندازه گیری مقادیر پتانسیل زتا و متوسط اندازه ی ذرات نشان داد که نانوذرات SiC در حضور ۶ درصد وزنی PEI، نانوذرات مولایت در حضور مار درصد وزنی PEI و نانوذرات XSX در حضور ۵/۰ گرم بر لیتر ید پایداری بهتری دارند. در ادامه پوشش نانوذرات SiC SiZ و مولایت در شرایط مختلف ولتاژ و زمان بر روی زیر لایه اعمال شد. بررسیهای انجام شده توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SiC) نشان داد که پوشش ایجاد شده از نانوذرات SiZ در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان ۵۰ ثانیه، پوشش ایجاد شده از نانوذرات XSX در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان از نانوذرات SiZ در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان ۵۰ ثانیه، پوشش ایجاد شده از نانوذرات SiZ در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان از نانوذرات SiX در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان ۵۰ ثانیه، پوشش ایجاد شده از نانوذرات SiX در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان ایزانوذرات SiX در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان ۵۰ ثانیه، پوشش ایجاد شده از نانوذرات SiX در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان در موردار

**واژدهای کلیدی:** نانوذرات SiC؛ نانوذرات YSZ؛نانوذرات مولایت؛ پتانسیل زتا؛ اندازهی ذرات؛ رسوبدهی الکتروفورتیک.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>. a\_golshani1988@yahoo.com

مقدمه

کامپوزیتهای کربن-کربن بهدلیل خواص منحصربهفرد خود مثل نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت در برابر شوک حرارتی بالا و پایین بودن ضریب انبساط حرارتی، یکی از مناسب ترین مواد برای استفاده در صنایع هوافضا محسوب می شوند. اکسیداسیون این مواد در دماهای بالای ۲<sup>° ۵۰</sup> و در اتمسفر اکسیدی موجب محدودیت کاربرد آنها در موارد مختلف می شود. بنابراین برای استفاده از این مواد در دماهای بالا باید میزان مقاومت به اکسیداسیون این مواد را افزایش داد [۱]. سیستمهای پوشش دهی مختلفی برای محافظت مواد کربنی در برابر اکسیداسیون پیشنهاد شده است که در بین آنها پوشش SiC به طور وسیعی به کار گرفته شده است. البته پوششهای تک لایه توانایی زیادی به منظور محافظت از مواد کربنی در زمانهای طولانی ندارند. بنابراین پوششهای چندلایه ی پایه سیلیکونی مورد مطالعه قرار گرفتند. در پوشش های چندلایه، SiC به دلیل ساز گاری فیزیکی و شیمیایی مناسب با مواد کربنی به عنوان لایه ی پیوندی (اتصال) به کار می رود. همچنین مواد بورایدی، سیلیکاتی و اکسیدی به عنوان لایه ی محافظ مقاومت بالا در برابر شوک حرارتی و مقاوم بودن در برابر فرسایش حرارتی باعث بهبود عملکرد دما بالای پوشش -مقاومت به اکسیزان کر روی SiC اعمال می شوند. در بین این مواد زیر کونیای پایدار شده با ایتریا (لایه) به دلیل مقاومت بالا در برابر اکسیداسیون می شود [۲]. همچنین مولایت به دلیل نقطهی ذوب بالا، پایداری خوب، نفوذ پذیری مقاومت بالا در برابر اکسیداسیون می شود [۲]. همچنین مولایت به دلیل نقطهی ذوب بالا، پایداری خوب، نفوذ پذیری این اکسیژن در دماهای بالا، مقاومت در برابر فرسایش حرارتی باعث بهبود عملکرد دما بالای پوشش -مش در حرارتی در درابر مالا، مقاومت در برابر فرسایش حرارتی باعث بهبود مملکرد دما بالای پوش -شرین اکسیژن در دماهای بالا، مقاومت در برابر فرسایش حرارتی باعث بهبود ملکرد دما بالای پوش ا

در بین روش های مختلف پوشش دهی، روش EPD به دلیل ساده بودن تجهیزات، زمان کم فر آیند پوشش دهی و امکان پوشش دهی قطعات با شکل های هندسی پیچیده مورد توجه قرار گرفته است [۵ و۶]. رسوب دهی الکتروفور تیک (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، می توان گفت EPD در دو مرحله انجام می گیرد: ۱) میدان الکتریکی اعمال شده و ذرات باردار معلق در سوسپانسیون پایدار به طرف الکترود با بار مخالف حرکت می کنند (الکتروفورسیس)؛ ۲) ذرات بر روی الکترود تجمع کرده، آگلومره شده و یک فیلم نسبتا فشر ده و همگن را ایجاد می کنند (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 تاثیر گذار در رسوبدهی الکتروفورتیک به دو دسته تقسیمبندی میشوند: ۱) پارامترهای مربوط به سوسپانسیون که عبارتند از: ثابت دیالکتریک حلال (نوع حلال)، ویسکوزیته سوسپانسیون، پتانسیل زتا و غلظت شانزدهمين سمينار ملي مهندسي سطح

در این رابطه Csغلظت سوسپانسیون، µ موبیلیته الکتروفور تیک، E میدان الکتریکی و S مساحت سطح پوشش داده شده است. موبیلیته الکتروفور تیک ذرات از رابطه زیر بهدست میآید [۱۰]:

$$\mu = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \xi}{\eta} \tag{(Y)}$$

در این رابطه <sub>60</sub> ثابت دی الکتریک خلاء، ε<sub>r</sub> ثابت دی الکتریک حلال، ζ پتانسیل زتای ذرات و η ویسکوزیته محیط پراکنده ساز 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 YSZ ،SiC 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 تحقيق

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 ایتریم (YSZ) با اندازهی ذرات کمتر از ۱۰۰ نانومتر، خریداری شده از شرکت لاگونا با خلوص بالای ۹۹ و نانوپودر مولایت با اندازه ی ذرات کمتر از ۱۰۰ نانومتر، خریداری شده از شرکت لاگونا با خلوص بالای ۹۹ درصد استفاده شدند. حلالهای اتانول (کیمیا الکل زنجان) با خلوص ۹۹/۶ درصد و استیل استون (Merck) با کلوص بالای ۹۹ درصد استفاده شدند. حلالهای اتانول (کیمیا الکل زنجان) با خلوص ۹۹/۶ درصد و استیل استون (Merck) با خلوص ۹۹/۶ درصد و استیل استون (Merck) با خلوص ۹۹/۶ درصد مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین از ( 2000~ ۹۹ درصد و استیل استون (Merck) با خلوص ۹۹/۶ درصد و استیل استون (Merck) با حلوص ۹۹/۶ درصد و استیل استون (Merck) با حلوص ۹۹/۶ درصد مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین از ( Sigma-Aldrich, average M<sub>w</sub> درصد و استیل استون (Merck) با حلوص ۹۶ درصد مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین از ( Sigma-Aldrich, average M<sub>w</sub> مقادیر مختلف PEI (branched VSZ) و مولایت در اتانول و تأثیر مقادیر مختلف ید بر پایداری سوسپانسیون نانوذرات Sigma-Sigma و مولایت در اتانول و تأثیر مقادیر مختلف ید بر پایداری سوسپانسیون نانوذرات Sigma-Aldrich, مورد بررسی قرار گرفت. برای برسی پایداری سوسپانسیون نانوذرات Sigma-Sigma و مولایت در اتانول و تأثیر مقادیر مختلف ید بر پایداری سوسپانسیون نانوذرات Sigma-Sigma و مولایت در اتانول و تأثیر مقادیر مختلف ید بر پایداری سوسپانسیون نانوذرات Sigma-Sigma-Sigma و مولایت در اتانول و تأثیر مقادیر مختلف ید بر پایداری سوسپانسیون نانوذرات Sigma-Sigma-Sigma و مولایت مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی پایداری سوسپانداری سوسپانسیون های ته در در تانول و استیل استون با نسبت حجمی ۵۰ درصد مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی پایداری سوسپانداری موسول در مولی در ای برای پوشش دهی، از دو پارامتر پتانسیل زتا و متوسط در ازه در تاری در تاری سوسپانسیون ها توسط دستگاه زتامتر (Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Sigma-Si

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>. Hamaker

برای پوشش دهی نانوذرات SiC ، SiC و مولایت، از کامپوزیت کربن - کربن با ابعاد ۲۰×۱۰ میلی متر مربع و ضخامت ۳ میلی متر به عنوان زیر لایه و از ورق فولاد زنگنزن با ابعاد ۳۰×۲۰ میلی متر مربع و ضخامت ۱ میلی متر برای الکترود با بار مخالف استفاده شد. کامپوزیت کربن - کربن به صورت موازی و به فاصله ۱ سانتی متر در بین دو ورق فولاد زنگنزن قرار گرفت. پوشش دهی نانوذرات SiC از سوسپانسیون با غلظت ا/g ۵ در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان های ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ ثانیه، پوشش دهی نانوذرات SIZ از سوسپانسیون با غلظت ا/g ۱، در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان های ۱، ۲، ۳۰، ۴۰، ۴۰، ۹۰ و ۵ دقیقه و پوشش دهی نانوذرات مولایت از سوسپانسیون با غلظت ا/g ۵ در ولتاژ ۱ ولت و زمان های ۱، ۲، ۳۰، ۴۰، ۴۰، ۵۰ مو ۱۰ ثانیه، پوشش دهی نانوذرات مولایت از سوسپانسیون با غلظت ا/g ۵ در ولتاژ ۱ ولت و زمان های ۲۰، ۴۰، ۴۰، ۴۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ثانیه انجام شد. کیفیت و ضخامت پوشش های اعمال شده توسط میکروسکوپ نوری (Lissview) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM, Mira3 Tescan) مورد بررسی قرار گرفت.

## نتايج و بحث

با توجه به اهمیت پایداری سوسپانسیونها در روش رسوبدهی الکتروفورتیک، 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 سوسیانسیونها در حضور براکندهساز PEI و ید محاسبه و سوسیانسیونهای بهینه برای یوشش دهی نمونه ها انتخاب شدند. شکل (۱) نمودار مقادیر پتانسیل زتا را بر حسب مقدار PEI برای نانوذرات SiC در حلال اتانول نشان می دهد. طبق این نمودار با افزایش مقدار PEI از ۱/۵ درصد وزنی به ۶ درصد وزنی مقدار پتانسیل زتا افزایش می یابد که نشان دهنده افزایش در بار سطحی ذرات است. همچنین در مقادیر بالای ۶ درصد وزنی، مقدار یتانسیل زتا و در نتیجه میزان بار سطحی ذرات کاهش می یابد. شکل (۲) نمو دار اندازهی میانگین نانو ذرات SiC بر حسب مقدار PEI را در اتانول نشان مي دهد. با توجه به اين نمو دارها مشخص است كه با افزايش مقدار پر اكندهساز از ۱/۵ درصد وزنی به ۳ درصد وزنی، اندازهی ذرات سوسپانسیون به طور 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 افزايش مقدار پراكندهساز به مقادير بالاي ۶ درصد وزني باعث افزايش در اندازهي ذرات سوسپانسيون شده است. بنابراین با توجه به شکلهای (۱) و (۲) می توان 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 سوسیانسیون می شود. با توجه به اینکه رسیدن به اندازه ی ذرات کو چک تر و بیشترین مقدار پتانسیل ز تا دو شرط اساسی در پایداری سوسپانسیون-ها و در نتیجه رسوبدهی الکتروفورتیک ذرات است، مقدار ۶ درصد وزنی PEI به عنوان مقدار بهینه انتخاب شد. شکل (۳) نمودار مقادیر یتانسیل زتا را بر حسب مقدار ید برای نانوذرات YSZ در حلال دو جزئی اتانول و استیل استون با نسبت حجمي ٥٠ درصد نشان مي دهد. افزايش غلظت يد تا ٢/٥ گرم بر ليتر باعث افزايش پتانسيل زتا شده ولي با افزودن بيش از حد يد، مقدار پتانسيل زتا روند نزولي پيدا مي كند. در مورد غلظت هاي پايين يد، علت عدم پايداري سوسپانسيون كاملا واضح است. زيرا مقدار يد به حدي نيست كه به مقدار كافي بار مثبت توليد كرده و

شانزدهمين سمينار ملي مهندسي سطح

سطح همه ذرات را بپوشاند. با افزایش غلظت ید و رسیدن به یک مقدار معین و کافی، مقدار پروتونها به حدی می رسد که بیش ترین پایداری را برای سوسپانسیون فراهم سازد. بعد از عبور از مقدار بهینه ید، پتانسیل ز تای ذرات، پایداری سوسپانسیون و در نتیجه فشردگی لایه مضاعف الکتریکی کاهش می یابد [۱۱ و ۱۲]. شکل (۴) نمودار متوسط اندازه ی ذرات YSZ بر حسب مقدار ید را در حلال دو جزئی اتانول و استیل استون با نسبت حجمی ۵۰ درصد، نشان می دهد. با توجه به این نمودار مشخص است که با افزایش مقدار ید از ۲۰، گرم بر لیتر به ۰/۰ گرم بر لیتر، اندازه ی ذرات WSZ بر حسب مقدار ید را در حلال دو جزئی اتانول و استیل استون با نسبت حجمی ۵۰ گرم بر لیتر، اندازه ی ذرات سوسپانسیون به طور قابل توجهی کاهش یافته است. افزایش مقدار ید به مقادیر بالای ۵/۰ گرم بر لیتر باعث افزایش در اندازه ی ذرات سوسپانسیون شده است. بنابراین مقدار ۵/۰ گرم بر لیتر ید به مقادیر بالای ۵/۰ مقدار بهینه انتخاب شد. همچنین شکل (۵) نمودار مقادیر پتانسیل ز تا را بر حسب مقدار او ۹ قران (۶) نمودار اندازه ی مانگین نانوذرات مولایت بر حسب مقدار اعاد را اناول نشان می دهد. با توجه به این معدار اندازه ی مانگین نانوذرات مولایت بر حسب مقدار اعا را در اتانول نشان می دهد. با توجه به این شکل مشخص اندازه ی میانگین نانوذرات مولایت بر حسب مقدار اعا را در اتانول نشان می دهد. با توجه به این شکل مشخص اندازه ی ذرات هی در اندازه ۵/۱ درصد وزنی PEI را در اتانول نشان می دهد. با توجه به این شکل مشخص اندازه ی ذرات هدار می در از درصد وزنی PEI به عنوان مقدار بهینه برای پایدارسازی نانوذرات مولایت اندازه می ذرات هستند. بنابراین مقدار ۱۸ درصد وزنی PEI به عنوان مقدار بهینه برای پایدارسازی نانوذرات مولایت

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 می دهد. تصاویر نشان می دهند که در زمانهای ۱۰ و ۳۰ ثانیه، ذرات SiC تقریباً تمام سطح گرافیت را پوشاندهاند ولی حفرههای ریزی بر روی نمونهها مشاهده می شود. وجود این حفرهها نشاندهندهی این موضوع است که زمانهای اعمال شده برای این نمونهها به منظور ایجاد پوشش یکنواخت و عاری از حفره کافی نیست. همچنین تصاویر نمونههای پوشش داده شده در زمانهای ۷۰ و ۴۰ ثانیه نشان می دهد که با افزایش زمان ترکهایی در پوشش ایجاد شده است که دلیل آن افزایش بیش از اندازهی ضخامت پوشش و افزایش زمان ترکهایی در پوشش ایجاد شده است که دلیل آن افزایش بیش از اندازهی شکل مشخص است که در یک ولتاژ ثابت، با افزایش زمان اندازه ی ترکها بزر گنر می شود. در بین نمونههای پوشش دهی شده در زمانهای مختلف، نمونه یوشش داده شده در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان ۵۰ ثانیه کیفیت بهتری در اندازه می شده در زمانهای مختلف، نمونه یوشش داده شده است که دلیل آن افزایش بیش از اندازه ی شکل مشخص است که در یک ولتاژ ثابت، با افزایش زمان اندازه ی ترکها بزر گنر می شود. در بین نمونههای پوشش دهی شده در زمانهای مختلف، نمونه یوشش داده شده در ولتاژ ۴۰ ولت و زمان ۵۰ ثانیه کیفیت بهتری را نشان می دهد. سطح این نمونه عاری هر گونه حفره و تر کک 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 پوشش های تشکیل شده در زمانهای پایین تر از ۲ دقیقه، این زمانها گزینههای مناسبی برای ایجاد پوشش برای حفاظت کامل زیرلایه به نظر نمی رسند. در زمان-های بالاتر از ۴ دقیقه نیز ترک های ماکروسکوپی (که با گذشت زمان عریض تر و عمیق تر می شدند) موجب می شوند که پوشش های ضخیم ایجاد شده کارایی خاصی نداشته باشند. شکل (۹) تصویر SEM نمونه پوشش داده شده در زمان ۴ دقیقه را نشان می دهد. پوشش ایجاد شده در زمان ۳ دقیقه دارای ضخامت مناسب و سطح یکنواخت

است که به عنوان پوشش بهینه در این مرحله انتخاب شد. شکل (۱۰) تصویر SEM این نمونه را نشان می دهد. همچنین پوشش دهی نانو ذرات مولایت در ولتاژ ۱۰ ولت و زمان های ۲۰، ۴۰، ۴۰، ۲۰، ۲۰۰ ثانیه نشان داد که نانو ذرات مولایت در ولتاژهای پایین به طور کامل سطح نمونه را پوشش نمی دهند. شکل (۱۱) تصویر میکروسکوپ نوری نمونه های پوشش داده شده در زمان های ۲۰ و ۴۰ ثانیه را نشان می دهد. همچنین افزایش بیش از اندازهی زمان باعث بوجود آمدن تر کهایی در پوشش می شود که دلیل آن افزایش بیش از اندازه ی ضخامت پوشش و افزایش انقباض حاصل از خشک شدن نمونه ها پس از فرآیند پوشش دهی است. شکل (۱۱) تصویر میکروسکوپ نوری نمونه های پوشش داده شده در زمان های ۲۰ و ۲۰ ثانیه را نشان می دهد. همچنین افزایش بیش پوشش و افزایش انقباض حاصل از خشک شدن نمونه ها پس از فرآیند پوشش دهی است. شکل (۱۱) تصویر میکروسکوپ نوری نمونه های پوشش داده شده در زمان های ۸۰ و ۱۰۰ ثانیه را نشان می دهد. در بین نمونه های پوشش دهی شده در زمان های مختلف، نمونه ی پوشش داده شده در ولتاژ ۱۰ ولت و زمان ۴۰ ثانیه کیفیت بهتری دارد و پوشش ایجاد شده در این شرایط دارای سطح صاف و یکنواختی است (۱۰۰). با انتخاب شرایط بهینه برای پوشش دهی نانوذرات SIS YSZ/Mullite در ایت (۱۳) تصویر این ای نمونه را نشان با انتخاب شرایط بهینه برای پوشش دهی نانوذرات Sis کی ۲۸ و ۱۳۰ تایه داز مقطع عرضی این نمونه را نشان باین شرایط بر روی کامپوزیت کرین –کرین اعمال شد. شکل (۱۳) تصویر MES 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.

نتيجه گيري

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 می شوند. در این پژوهش ابتدا پایداری نانوذرات SiC و مولایت در حلال اتانول در حضور پراکنده ساز PEI و پایداری نانوذرات SZ در حلال دو جزئی اتانول و استیل استون با نسبت حجمی ۵۰ درصد در حضور پراکنده ساز 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) نانو ذرات YSZ در حلال دو جزئی اتانول و استیل استون با نسبت حجمی ۵۰ درصد و در حضور ۰/۵ گرم بر لیتر ید یایداری بهتری داشتند.

همچنین پوشش دهی نمونه ها توسط سوسپانسیون های 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 لایه ای SiC/YSZ/Mullite به ضخامت ۵۳/۱۱ میکرومتر در این شرایط بر روی کامپوزیت کربن – کربن اعمال شد. شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

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.
- 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, <u>Ceramic Processing and Sintering</u>, 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 (۲): نمودار متوسط اندازهی ذرات SiC در حلال اتانول و در حضور مقادیر مختلف PEI.

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



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

كربن.



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



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