

رسوب دهی الکتروفوریتیک (EPD) نانوذرات کاربید سیلیسیم (SiC)

علی گلشنی عجب شیر^۱، حسین آقاجانی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

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

*h_aghajani@tabrizu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۲۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۰۵)

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی پایداری نانوذرات SiC به منظور پوشش دهی بر روی کامپوزیت کربن - کربن به روش EPD می باشد. بدین منظور سوسپانسیون هایی در حلال های مختلف و در حضور پراکنده ساز PEI تهیه شدند. پایداری سوسپانسیون ها توسط تصاویر میکروسکوپی تهیه شده از آن ها پس از گذشت ۲۴ ساعت و اندازه گیری پتانسیل زتا و توزیع اندازه ذرات مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه پوشش مورد نظر از سوسپانسیون بهینه بر روی زیر لایه اعمال شد. نتایج نشان داد که سوسپانسیون تهیه شده در اتانول، در pH=10 و در حضور ۶ درصد وزنی PEI پایداری بهتری دارد. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که پوشش اعمال شده در ولتاژ ۳۰ ولت کیفیت بهتری داشته و دارای سطح یکنواخت و بدون حفره می باشد.

واژه های کلیدی:

رسوب دهی الکتروفوریتیک، نانوذرات SiC، کامپوزیت کربن - کربن، پایداری سوسپانسیون، پتانسیل زتا.

۱- مقدمه

بنابراین برای استفاده از این مواد در دماهای بالا باید میزان مقاومت به اکسیداسیون این مواد را افزایش داد. استفاده از پوشش های مقاوم در برابر اکسیداسیون می تواند راه - حل مناسبی برای جلوگیری از اکسیداسیون مواد کربنی باشد. برای این منظور در سال های اخیر پوشش های سرامیکی مختلفی مانند SiO_2 ، B_4C ، TiC ، SiC ، Si_3N_4 ، MoSi_2 و ... بررسی شده - اند [۱]. در این میان کاربید سیلیسیم به دلیل سازگاری شیمیایی و فیزیکی خوب با زمینه ی کربنی یکی از پوشش های مناسب برای مواد کربنی از جمله کامپوزیت کربن - کربن می باشد. کاربید سیلیسیم با تولید لایه ی نازکی از SiO_2 به عنوان یک سد در برابر

مواد پایه کربنی مثل گرافیت و کامپوزیت های کربن - کربن دارای خواص فوق العاده ای مانند حفظ خواص مکانیکی در دماهای بالا، دیرگدازی بالا، چگالی کم، نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به شوک حرارتی بالا، پایداری شیمیایی خوب، ضریب انبساط حرارتی پایین و هدایت حرارتی و الکتریکی مناسب هستند. این مواد کاربرد وسیعی در صنایع مختلف دارند؛ از جمله: پره توربین ها، نازل موشک ها، کلاهک موشک ها، ترمز هواپیما، راکتورهای دما بالا و المنت کوره ها. اکسیداسیون مواد کربنی در دماهای بالای 500°C و در اتمسفر اکسیدی موجب محدودیت کاربرد آن ها در موارد مختلف می شود [۱-۹].

(Stabilization) و (۳) پایدارسازی الکترواستریکی (Electrosteric Stabilization). در روش اول بار سطحی ذرات و نیروی دافعه حاصل از آن عامل اصلی پایداری است. در روش دوم عامل اصلی پایداری جذب پلیمر بدون بار بر روی سطح ذرات و نیروی دافعه حاصل از زنجیره‌های پلیمری است. روش سوم ترکیبی از روش‌های اول و دوم می‌باشد. در این روش از پلیمر باردار (پلی الکترولیت) به‌عنوان پراکنده‌ساز استفاده می‌شود [۳۰].

در این پژوهش تلاش شده است تا پایداری نانوذرات SiC در حلال‌های اتانول، متانول و ایزوپروپانول در حضور پراکنده‌ساز PEI و در pHهای مختلف بررسی شود. همچنین پوشش ایجاد شده به روش EPD از سوسپانسیون بهینه، در ولتاژهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

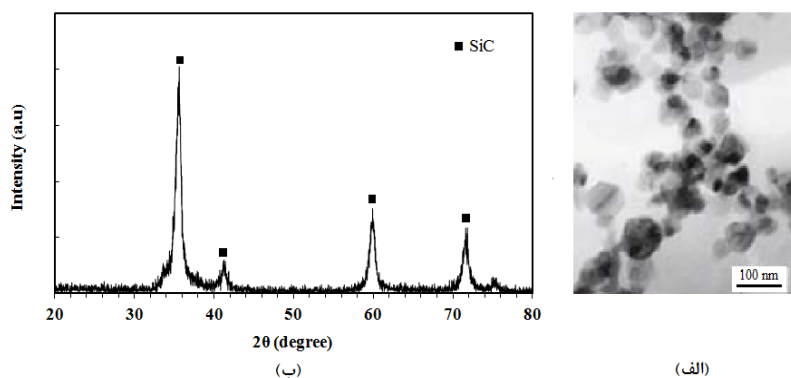
۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱ مواد مصرفی

در این پژوهش، پودر SiC با اندازه دانه‌ی کمتر از ۵۰ نانومتر و خلوص بالای ۹۹ درصد و حلال‌های اتانول، متانول و ایزوپروپانول با خلوص ۹۹/۶ درصد مورد استفاده قرار گرفتند. شکل (۱) تصویر TEM و الگوی XRD نانوذرات SiC را نشان می‌دهد. همچنین از (Sigma-Aldrich, average $M_w \sim 25000$) PEI (branched) به‌عنوان پراکنده‌ساز استفاده شد.

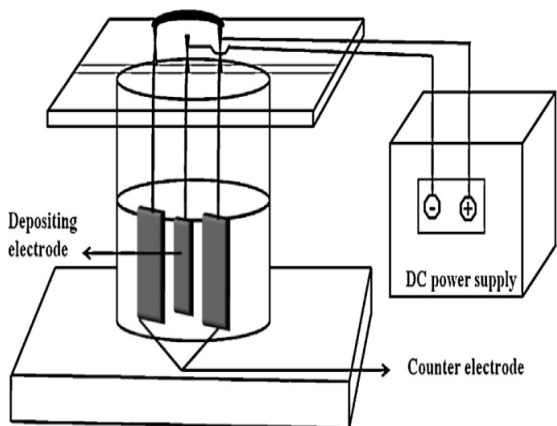
نفوذ اکسیژن تا دمای 1700°C عمل می‌کند [۲].

روش‌های مختلفی برای اعمال پوشش SiC بر روی کامپوزیت کربن - کربن وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش دوغابی - زینتری (Slurry-Sintering) [۱۰]، واکنش شیمیایی فاز بخار (Chemical Vapor Reaction) [۱۱]، رسوب‌دهی شیمیایی فاز بخار (Chemical Vapor Deposition) [۱۱-۱۲]، سماتاسیون جعبه‌ای (Pack Cementation) [۱۳-۱۶] و رسوب - دهی الکتروفوریتیک (EPD) [۱۶-۱۹] اشاره کرد. در بین این روش‌ها، روش EPD به‌دلیل ساده بودن تجهیزات، زمان کم فرآیند پوشش‌دهی و امکان پوشش‌دهی قطعات با شکل‌های هندسی پیچیده مورد توجه قرار گرفته است [۲۰-۲۲]. رسوب - دهی الکتروفوریتیک یک فرآیند کلوئیدی است که در آن ذرات باردار شده در داخل سوسپانسیون در اثر اعمال میدان الکتریکی بر روی الکترود رسانا پوشش داده می‌شوند [۲۳]. در روش EPD استفاده از آب به‌عنوان حلال به‌دلیل الکترولیز و تولید حباب‌های ریز در نزدیکی الکترود محدودیت دارد. بنابراین حلال‌های آلی مثل الکل‌ها برای آماده‌سازی سوسپانسیون استفاده می‌شوند [۲۴-۲۸]. یکی از مهم‌ترین مراحل در رسوب‌دهی الکتروفوریتیک ایجاد سوسپانسیون پایدار است که در آن ذرات در داخل حلال به خوبی پراکنده شده‌اند [۲۹]. به‌طور کلی سه روش برای پایدارسازی سوسپانسیون‌ها وجود دارد: (۱) پایدارسازی الکترواستاتیکی (Electrostatic Stabilization)، (۲) پایدارسازی استریکی (Steric



شکل (۱): (الف): تصویر TEM و (ب): الگوی XRD نانوذرات SiC

پوشش دهی از سوسپانسیون با غلظت ۵ g/l، در چهار ولتاژ متفاوت (۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ ولت) و زمان ۲ دقیقه انجام گرفت. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه خشک شدند. سپس کیفیت پوشش اعمال شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM, Mira3 Tescan) مورد بررسی قرار گرفت.



شکل (۲): طرح‌واره‌ای از سیستم پوشش دهی به روش EPD [۲۲]

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی پایداری سوسپانسیون‌ها

شکل (۳-الف) تصویر سوسپانسیون نانوذرات SiC را در اتانول و پس از گذشت ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص است که نانوذرات SiC در اتانول و در pH های ۲، ۴، ۶ و ۱۲ پایداری خوبی نداشته و پس از گذشت ۲۴ ساعت سوسپانسیون‌ها کاملاً شفاف شده‌اند ولی در pH های ۸ و ۱۰ از پایداری خوبی برخوردار هستند. شکل (۳-ب) تصویر سوسپانسیون نانوذرات SiC را در اتانول و در حضور ۳ درصد وزنی PEI، پس از ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، پایداری سوسپانسیون‌ها در pH های ۲، ۴، ۶ و ۸ مطلوب نبوده ولی در pH های ۱۰ و ۱۲ از پایداری خوبی برخوردار هستند. بنابراین افزودن ۳ درصد وزنی PEI به سوسپانسیون نانوذرات SiC در اتانول باعث بهبود پایداری آن در pH های ۱۰ و ۱۲ شده است.

به منظور بررسی پایداری، سوسپانسیون‌هایی با غلظت ۵ g/l در حلال‌های اتانول، متانول و ایزوپروپانول و در pH های ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ تهیه شد. برای تغییر pH از HCl و NaOH استفاده شد و pH نمونه‌ها توسط pH متر قلمی AZ (Model:8685) تنظیم گردید. به منظور بررسی تأثیر پراکنده‌ساز PEI بر پایداری، مقدار ۳ درصد وزنی PEI (بر حسب درصد وزنی پودر خشک) به این سوسپانسیون‌ها اضافه شد. همچنین تأثیر مقادیر مختلف PEI بر پایداری سوسپانسیون نانوذرات SiC در اتانول مورد بررسی قرار گرفت. روند تهیه سوسپانسیون‌ها به شرح زیر می‌باشد:

۱- پودر SiC به آرامی به حلال اضافه شد و به مدت ۱ ساعت روی همزن مغناطیسی قرار گرفت. در سوسپانسیون‌هایی که حاوی پراکنده‌ساز بودند ابتدا PEI به مدت نیم ساعت در حلال و بر روی همزن مغناطیسی حل شد و سپس پودر SiC به آن اضافه و به مدت ۱ ساعت روی همزن مغناطیسی مخلوط شدند.

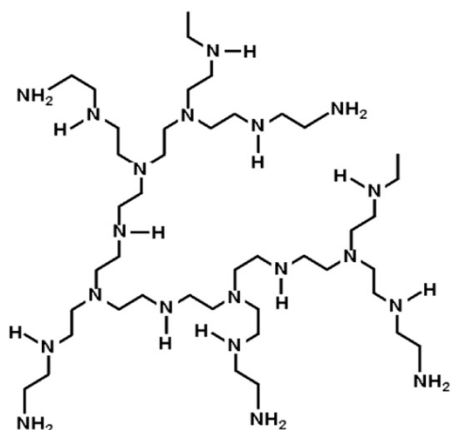
۲- سوسپانسیون مورد نظر به مدت نیم ساعت در حمام التراسونیک قرار گرفت.

۳- pH نمونه‌ها تنظیم و پس از آن سوسپانسیون‌ها به مدت ۱۲ ساعت در همزن مغناطیسی مخلوط شدند.

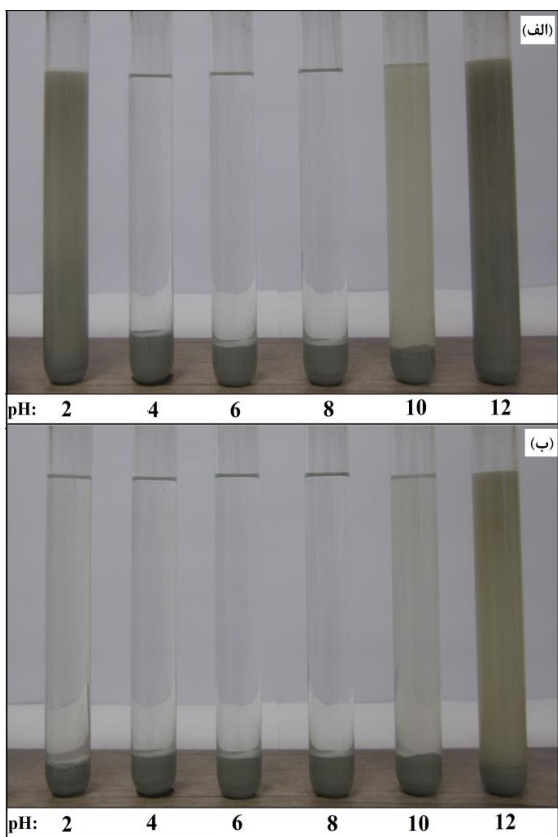
در ادامه سوسپانسیون‌ها داخل لوله‌ی آزمایش ریخته شدند و پس از گذشت ۲۴ ساعت از آن‌ها عکس گرفته شد. توزیع اندازه ذرات و مقدار پتانسیل زتا برای سوسپانسیون‌ها توسط دستگاه زتامتر (Microtrac, Nanotrac Wave, USA) به دست آمد.

۲-۲- پوشش دهی الکتروفوریتیک

برای پوشش دهی نانوذرات کاربید سیلیسیم، از کامپوزیت کربن-کربن با ابعاد ۱۰×۲۰ میلی‌متر مربع و ضخامت ۳ میلی‌متر به عنوان زیر لایه و از ورق فولاد زنگ‌نزن با ابعاد ۲۰×۳۰ میلی‌متر مربع و ضخامت ۱ میلی‌متر برای الکتروود با بار مخالف استفاده شد. کامپوزیت کربن-کربن به صورت موازی و به فاصله ۱ سانتی‌متر در بین دو ورق فولاد زنگ‌نزن قرار گرفت. شکل (۲) طرح‌واره‌ای از سیستم پوشش دهی به روش EPD را نشان می‌دهد.

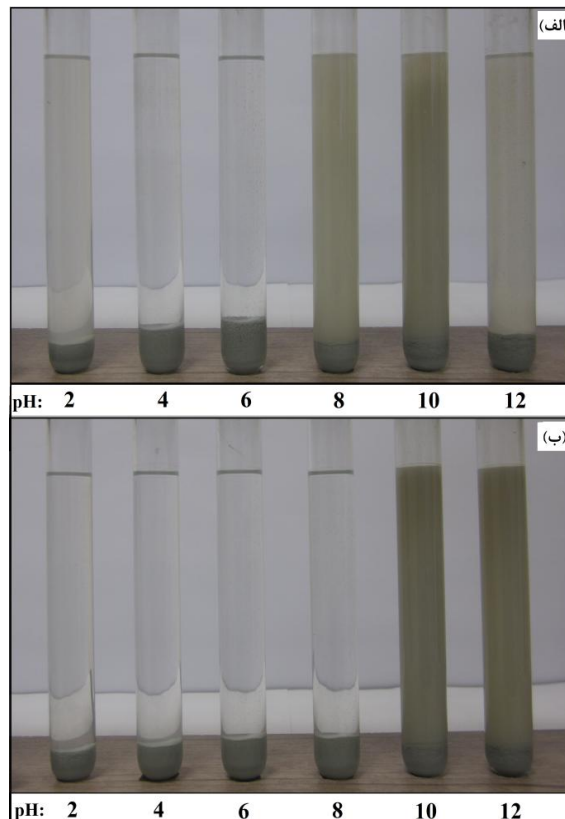


شکل (۴): طرح‌واره‌ای از ساختار PEI [۳۳]



شکل (۵): تصاویر تهیه شده از نمونه‌ها در pHهای مختلف و در حلال متانول پس از گذشت ۲۴ ساعت: (الف): بدون PEI و (ب): در حضور ۳٪ PEI

بهبود پایداری نانوذرات SiC در حلال‌های متانول و ایزوپروپانول نداشته و باعث تسریع در ته‌نشینی این سوسپانسیون‌ها می‌شود.

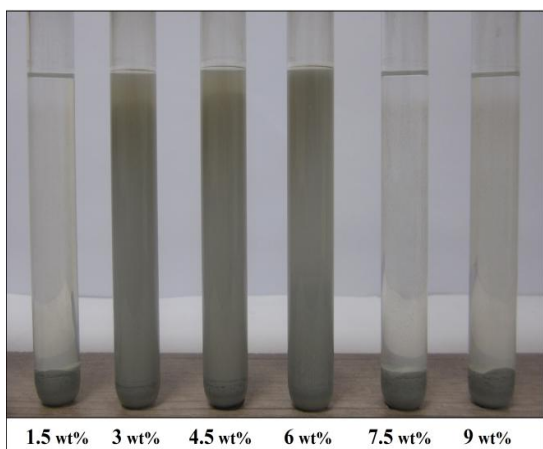


شکل (۳): تصاویر تهیه شده از نمونه‌ها در pHهای مختلف و در حلال اتانول پس از گذشت ۲۴ ساعت: (الف): بدون PEI و (ب): در حضور ۳٪ PEI

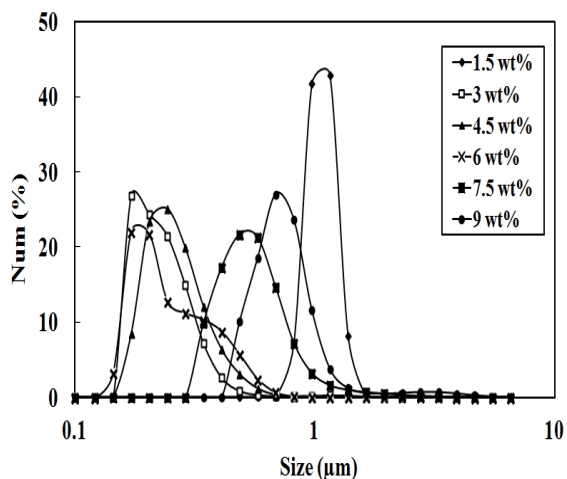
PEI برای آماده‌سازی سوسپانسیون ذرات SiC با اندازه‌ی زیر میکرومتر و پوشش‌دهی الکتروفورتیک این ذرات به کار برده می‌شود [۳۱]. شکل (۴) ساختار شاخه‌ای PEI را نشان می‌دهد. PEI یک پراکنده‌ساز پلیمری کاتیونی است و برای پراکنده کردن ذرات سرامیکی در حلال‌های آلی به کار می‌رود. این ماده باعث ایجاد پایداری الکترواستریکی در سوسپانسیون و ایجاد دافعه بین ذرات سوسپانسیون می‌شود [۳۲].

شکل (۵) و (۶) پایداری سوسپانسیون نانوذرات SiC را پس از گذشت ۲۴ ساعت در متانول و ایزوپروپانول نشان می‌دهد. نانوذرات SiC در متانول و در pHهای ۲ و ۱۲ پایداری بهتری دارند. همچنین سوسپانسیون نانوذرات SiC در ایزوپروپانول و در pH=6 از پایداری خوبی برخوردار است. با توجه به این شکل‌ها مشخص است که افزودن مقدار ۳ درصد وزنی PEI تأثیری بر

شکل (۸) نمودار توزیع اندازه ذرات پودر SiC را در حلال اتانول و در حضور مقادیر مختلف PEI در pH=10 نشان می‌دهد. با افزایش مقدار پراکنده‌ساز از ۱/۵٪ به ۳٪، اندازه ذرات سوسپانسیون به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است. با افزایش مقدار PEI از ۳٪ تا ۶٪، اندازه ذرات تقریباً ثابت بوده و تغییر چندانی نداشته است ولی افزایش مقدار پراکنده‌ساز به مقادیر بالای ۶٪ باعث افزایش در اندازه ذرات سوسپانسیون شده است.

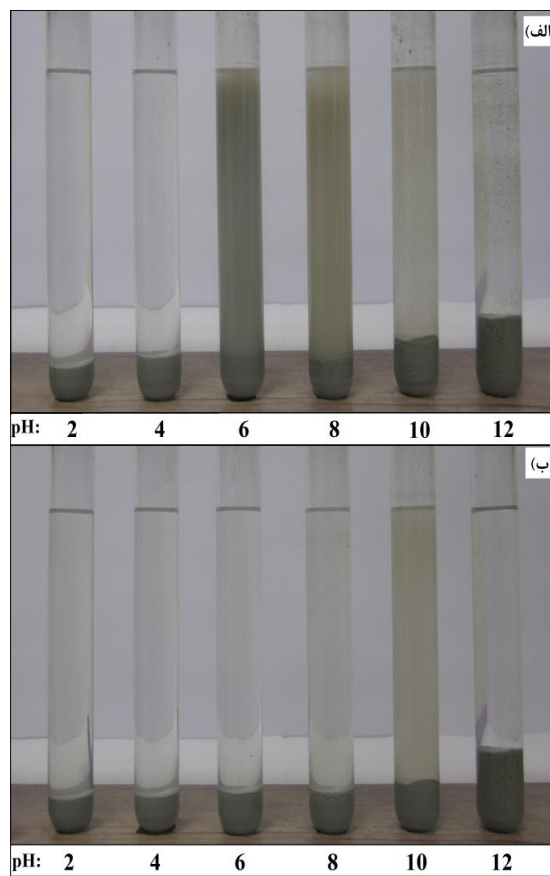


شکل (۷): تصویر تهیه شده از نمونه‌ها در حضور مقادیر مختلف PEI و در حلال اتانول در pH=10 پس از گذشت ۱۲ روز



شکل (۸): نمودار توزیع اندازه ذرات پودر SiC در حلال اتانول و در حضور مقادیر مختلف PEI در pH=10

شکل (۹) نمودار مقادیر پتانسیل زتا را بر حسب مقدار PEI برای

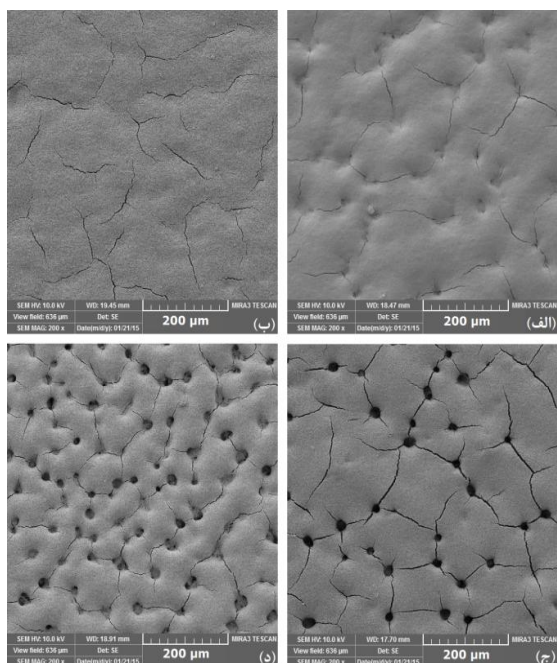


شکل (۶): تصاویر تهیه شده از نمونه‌ها در pHهای مختلف و در حلال ایزوپروپانول پس از گذشت ۲۴ ساعت: (الف): بدون PEI و (ب): در حضور PEI ۳٪

در بین سوسپانسیون‌های موجود در شکل‌های (۳)، (۵) و (۶) سوسپانسیون نانوذرات SiC در اتانول، در pH=10 و در حضور ۳٪ پراکنده‌ساز پایداری بهتری دارد. به‌منظور بررسی تأثیر مقدار PEI بر روی پایداری نانوذرات SiC در اتانول، مقادیر مختلف PEI (۱/۵، ۳، ۴/۵، ۶، ۷/۵ و ۹ درصد وزنی) در pH=10 مورد استفاده قرار گرفت. شکل (۷) تصویر این سوسپانسیون‌ها را پس از گذشت ۱۲ روز نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص است که با افزایش مقدار PEI از ۱/۵٪ تا ۶٪، میزان پایداری سوسپانسیون‌ها افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش بیشتر مقدار پراکنده‌ساز میزان پایداری سوسپانسیون‌ها افت کرده و نمونه‌ها پس از ۱۲ روز کاملاً شفاف شده‌اند.

۳-۲- پوشش دهی الکتروفوریتیک

به منظور پوشش دهی نانوذرات SiC بر روی کامپوزیت کربن - کربن سوسپانسیونی با اندازه ذرات کمتر و پایداری بیشتر انتخاب شد. با توجه به نتایج حاصل از شکل های (۷)، (۸) و (۹) سوسپانسیون حاصل از نانوذرات SiC در حضور ۶ درصد وزنی PEI، در حلال اتانول و pH=10 به عنوان سوسپانسیون بهینه انتخاب شد. مقدار پتانسیل زتای اندازه گیری شده برای این نمونه $+37/6$ میلی ولت می باشد. پوشش مورد نظر توسط این سوسپانسیون در ولتاژهای ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ ولت و زمان ۲ دقیقه بر روی الکتروود اعمال شد. شکل (۱۰) تصاویر SEM این نمونه -ها را نشان می دهد. با توجه به این شکل مشخص است که پوشش اعمال شده در ولتاژ ۳۰ ولت نسبت به ولتاژهای دیگر از کیفیت بهتری برخوردار بوده و فاقد حفره است. همان طوری که در شکل نیز مشخص است، این پوشش نیز دارای ترک هایی است که البته نسبت به نمونه های دیگر کوچک تر بوده و به صورت جدا از هم تشکیل شده اند.

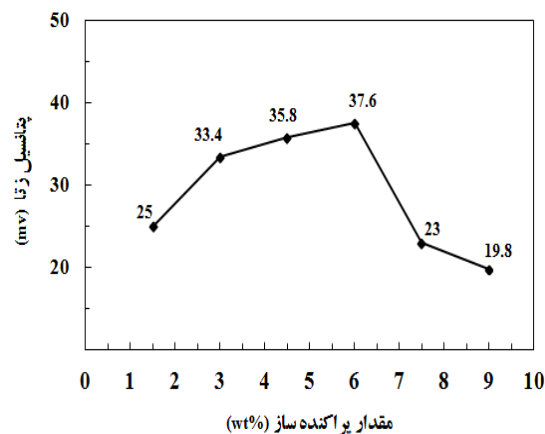


شکل (۱۰): تصاویر SEM تهیه شده از نمونه های پوشش داده شده در

ولتاژهای: (الف): ۲۰، (ب): ۳۰، (ج): ۴۰ و (د): ۵۰ ولت

این نمونه ها نشان می دهد. طبق این نمودار با افزایش مقدار PEI از ۱/۵٪ به ۶٪ مقدار پتانسیل زتا افزایش می یابد که نشان دهنده ی افزایش در بار سطحی ذرات است. همچنین در مقادیر بالای ۶٪ PEI مقدار پتانسیل زتا و در نتیجه میزان بار سطحی ذرات کاهش می یابد. بنابراین با توجه به شکل های (۸) و (۹) می توان نتیجه گرفت که کاهش یا افزایش بیش از اندازه ی مقدار PEI باعث آگلومره شدن و کاهش بار سطحی ذرات و در نتیجه ته نشینی ذرات SiC در سوسپانسیون می شود که این مسئله در شکل (۷) کاملاً مشخص است.

زمانی که مقادیر کمتری PEI در داخل سوسپانسیون وجود دارد (کمتر از ۶٪)، سطح ذرات SiC پراکنده شده در سوسپانسیون به طور کامل توسط PEI پوشانده نمی شود. در این حالت بخش -هایی از سطح ذرات که توسط PEI پوشانده نشده اند تمایل به جذب همدیگر و تشکیل آگلومره دارند. این مسئله باعث افزایش در اندازه ذرات، عدم پایداری و ته نشینی سوسپانسیون خواهد شد. همچنین در مقادیر بیشتر PEI (بیش تر از ۶٪) زنجیره های آزاد پلیمر که در داخل سوسپانسیون حضور دارند، در همدیگر قفل شده و ایجاد پل های پلیمری می کنند. این مسئله نیز منجر به ته نشینی و عدم پایداری سوسپانسیون ها می شود. بنابراین پلیمر مورد استفاده باید به مقدار مورد نیاز در داخل سوسپانسیون حضور داشته باشد چون مقادیر بیشتر و کمتر پلیمر باعث عدم پایداری سوسپانسیون ها می شود [۳۴].



شکل (۹): نمودار پتانسیل زتا بر حسب مقدار پراکنده ساز برای نانوذرات

SiC در حلال اتانول و pH=10

- [2] H. Jafari et al., "Nano-SiC/SiC Anti-Oxidant Coating on the Surface of Graphite", *Applied Surface Science*, Vol. 264, pp. 128–132, 2013.
- [3] J. F. Huang et al., "Microstructure and Anti-Oxidation Property of Mullite Oxidation Protective Coating Prepared by Hydrothermal Electrophoretic Deposition for SiC-C/C Composites", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 205, pp. 5077–5082, 2011.
- [4] J. Li et al., "Oxidation Behavior and Kinetics of SiC/Alumina-Borosilicate Coating for Carbon-Carbon Composites", *Applied Surface Science*, Vol. 255, pp. 1967–1974, 2008.
- [5] F. Q. Gang et al., "Oxidation Protective Glass Coating for SiC Coated Carbon/Carbon Composites for Application at 1773 K", *Materials Letters*, Vol. 60, pp. 431–434, 2006.
- [6] Y. Zeng et al., "SiC/SiC-YAG-YSZ Oxidation Protective Coatings for Carbon/Carbon Composites", *Corrosion Science*, Vol. 70, pp. 68–73, 2013.
- [7] F. Tao et al., "Microstructure and Anti-Oxidation Properties of Multi-Composition Ceramic Coatings for Carbon/Carbon Composites", *Ceramics International*, Vol. 37, pp. 79–84, 2011.
- [8] K. T. Wang et al., "Microstructure and Oxidation Resistance of C-AlPO₄-Mullite Coating Prepared by Hydrothermal Electrophoretic Deposition for SiC-C/C Composites", *Ceramics International*, Vol. 39, pp. 1037–1044, 2013.

[9] م. یاری و همکاران "تاثیر زمان لایه نشانی بر خواص ساختاری و فیزیکی پوشش‌های کربنی لایه‌نشانی شده با روش کندوپاش مگنترونی"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۵ شماره ۲، ص. ۱-۱۰، تابستان ۱۳۹۰.

[10] J. Zhao et al., "Microstructure and Property of SiC Coating for Carbon Materials", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 82, pp. 363–368, 2007.

[11] X. Yang et al., "A Double Layer Nanostructure SiC Coating for Anti-Oxidation Protection of Carbon/Carbon Composites Prepared by Chemical Vapor Reaction and Chemical Vapor Deposition", *Ceramics International*, Vol. 39, pp. 5053–5062, 2013.

۶- نتیجه گیری

اعمال پوشش مقاوم به اکسیداسیون SiC به روش EPD راه حل مناسبی برای حفاظت کامپوزیت کربن - کربن در دمای 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 در حلال‌های اتانول، متانول و ایزوپروپانول، بدون پراکنده‌ساز و همچنین در حضور پراکنده‌ساز PEI مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

۱- پایداری نانوذرات SiC در حلال‌های اتانول، متانول و ایزوپروپانول، بدون پراکنده‌ساز و همچنین در حضور پراکنده‌ساز PEI به شدت به مقدار pH سوسپانسیون وابسته است.

۲- افزودن ۳٪ PEI به سوسپانسیون نانوذرات SiC در اتانول باعث بهبود پایداری آن در pHهای ۱۰ و ۱۲ شده است.

۳- افزودن ۳٪ PEI به سوسپانسیون نانوذرات SiC در متانول و ایزوپروپانول تأثیری بر بهبود پایداری ندارد.

۴- افزایش مقدار پراکنده‌ساز در اتانول تا ۶٪ باعث کاهش اندازه ذرات سوسپانسیون و افزایش پتانسیل زتای ذرات و در نتیجه افزایش پایداری سوسپانسیون شده، ولی در مقادیر بیش‌تر از ۶٪ پایداری سوسپانسیون به دلیل افزایش اندازه ذرات سوسپانسیون و کاهش پتانسیل زتای ذرات کاهش می‌یابد.

همچنین پوشش‌دهی نانوذرات SiC بر روی کامپوزیت کربن - کربن در ولتاژهای ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ ولت و زمان ۲ دقیقه از سوسپانسیونی با غلظت ۵ g/l، در حضور ۶٪ PEI در حلال اتانول و در pH=10 نشان داد که پوشش ایجاد شده در ولتاژ ۳۰ ولت و زمان ۲ دقیقه کیفیت بهتری دارد.

۷- مراجع

- [1] J. I. Kim et al., "Design of a C/SiC Functionally Graded Coating for the Oxidation Protection of C/C Composites", *Carbon*, Vol. 43, pp. 1749–1757, 2005.

- [23] M. Verde et al., "Electrophoretic Deposition of Transparent ZnO Thin Films from Highly Stabilized Colloidal Suspensions", *Colloid and Interface Science*, Vol. 373, pp. 27–33, 2012.
- [24] D. Das et al., "Suspension Chemistry and Electrophoretic Deposition of Zirconia Electrolyte on Conducting and Non-Conducting Substrates", *Materials Research Bulletin*, Vol. 48, pp. 3254–3261, 2013.
- [25] S. Mahmoodi et al., "Electrophoretic Deposition of Hydroxyapatite–Chitosan Nanocomposite Coatings in Different Alcohols", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 216, pp. 106–114, 2013.
- [26] M. Farrokhi-Rad et al., "Effect of Triethanolamine on the Electrophoretic Deposition of Hydroxyapatite Nanoparticles in Isopropanol", *Ceramics International*, Vol. 39, pp. 7007–7013, 2013.
- [27] M. Popa et al., "Influence of Ammonium Salt of Poly-Methacrylic Acid and Butylamine Addition on the Viscosity and Electrophoretic Deposition Behavior of Ethanol-Based Powder Suspensions", *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, Vol. 267, pp. 74–78, 2005.
- [28] M. F. De Riccardis et al., "A Novel Method for Preparing and Characterizing Alcoholic EPD Suspensions", *Colloid and Interface Science*, Vol. 307, pp. 109–115, 2007.
- [29] K. Wu et al., "Electrophoretic Deposition of TiO₂ and Composite TiO₂–MnO₂ Films Using Benzoic Acid and Phenolic Molecules as Charging Additives", *Colloid and Interface Science*, Vol. 352, pp. 371–378, 2010.
- [30] M. N. Rahaman, *Ceramic Processing and Sintering*, (New York, NY: Marcell Dekker, Inc), p.191, 2003.
- [31] Coupé et al., "Dispersion Behaviour of Laser-Synthesized Silicon Carbide Nanopowders in Ethanol for Electrophoretic Infiltration", *European Ceramic Society*, Vol. 32, pp. 3837–3850, 2012.
- [32] G. Jian et al., "Cobalt Ferrite Dispersion in Organic Solvents for Electrophoretic Deposition: Influence of Suspension Parameters on the Film Microstructure", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 143, pp. 653–660, 2014.
- [12] Y. Long et al., "The Effect of Substrate Position on the Microstructure and Mechanical Properties of SiC Coatings on Carbon/Carbon Composites", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 206, pp. 568–574, 2011.
- [13] Q. G. Fu et al., "Silicon Carbide Coating to Protect Carbon/Carbon Composites Against Oxidation", *Scripta Materialia*, Vol. 52, pp. 923–927, 2005.
- [14] J. Liu et al., "A ZrSiO₄/SiC Oxidation Protective Coating for Carbon/Carbon Composites", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 206, pp. 3270–3274, 2012.
- [15] X. Zou et al., "ZrB₂–SiC Coating to Protect", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 226, pp. 17–21, 2013.
- [16] H. J. Feng et al., "Influence of the Preparation Temperature on the Phase, Microstructure and Anti-Oxidation Property of a SiC Coating for C/C Composites", *Carbon*, Vol. 42, pp. 1517–1521, 2004.
- [17] L. Nobre et al., "Engineering Surface and Electrophoretic Deposition of SiC Powder", *Materials Letters*, Vol. 50, pp. 115–119, 2001.
- [18] S. Novak et al., "Electrophoretic Deposition in the Production of SiC/SiC Composites for Fusion Reactor Applications", *European Ceramic Society*, Vol. 28, pp. 2801–2807, 2008.
- [19] Ch. You et al., "SiC/TiC laminated Structure Shaped by Electrophoretic Deposition", *Ceramics International*, Vol. 30, pp. 813–815, 2004.
- [20] L. Besra et al., "A Review on Fundamentals and Applications of Electrophoretic Deposition (EPD)", *Progress in Materials Science*, Vol. 52, pp. 1–61, 2007.
- [21] R. Boccaccini et al., "Application of Electrophoretic and Electrolytic Deposition Techniques in Ceramics Processing", *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 6, pp. 251–260, 2002.
- [۲۲] ح. ملکی قلعه و همکاران "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. ۳۳–۱۰۴، تابستان ۱۳۹۳.

[34]X. Zhang et al., “Dispersion and co-dispersion of ZrB₂ and SiC nanopowders in ethanol”, *Ceramics International*, Vol. 38, pp. 2733–2741, 2012.

[33]R. He et al., “Preparation of High Solid Loading, Low Viscosity ZrB₂–SiC Aqueous Suspensions Using PEI as Dispersant”, *Ceramics International*, Vol. 39, pp. 2267–2274, 2013.