

نقش پایه گرافیتی بر تشکیل ساختار گرا دیان ترکیبی C/SiC طی فرایند سمانتاسیون توده‌ای

جلیل پوراسد^{۱*}، ناصر احسانی^۲، سید علی خلیفه سلطانی^۳

۱- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

*jpourasad@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۲۴، تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۲/۱۰)

چکیده

گرافیت به طور گسترده در ساختارهای دمای بالا مورد استفاده قرار گرفته است با این حال، گرافیت از دمای حدود ۴۰۰ درجه سانتیگراد، به آسانی با اکسیژن واکنش می‌دهد. کاربرد سیلیسیم (SiC) با تغییر تدریجی ترکیب در مقیاس میکروسکوپی به عنوان بهترین ماده برای جلوگیری از اکسیداسیون گرافیت شناخته شده است. در این پروژه پوشش SiC بر پنج نوع گرافیت مختلف به روش سمانتاسیون توده‌ای اعمال گردید و رابطه بین ریزساختار و خواص پایه گرافیتی و ساختار پوشش SiC با یافته‌های آزمایشگاهی و محاسبات تئوری بررسی شد. آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان می‌دهد که در روش سمانتاسیون توده‌ای، پوشش کاربرد سیلیسیم با تراکم مناسب با ترکیب Si، C و β -SiC ایجاد می‌شود. نوع گرافیت و خواص آنها نقش مهمی در ریزساختار پوشش تدریجی ایفا می‌کند، به طوری که پوشش تدریجی SiC تنها بر گرافیت با چگالی بالا، گرافیت شده خوب، تداخل مناسب و با توزیع اندازه حفرات در محدوده ۷۱۰-۶۰۰ نانومتر تشکیل می‌شود.

واژه‌های کلیدی:

سمانتاسیون توده‌ای، پوشش کاربرد سیلیسیم تدریجی، پایه گرافیتی.

۱- مقدمه

می‌باشد [۱-۳]. بهترین روش برای تقویت مقاومت به اکسیداسیون گرافیت برای دماهای کاربرد بیش از ۱۰۰۰°C استفاده از کاربرد سیلیسیم است که دارای مزایای زیادی جهت استفاده در دماهای بالا می‌باشد. به طوری که کاربرد سیلیسیم تا دمای ۲۷۰۰°C در اتمسفر خنثی پایدار است و در اتمسفر اکسیدی، با ایجاد لایه محافظ تا حد قابل توجهی از نفوذ اکسیژن به درون زمینه کربنی جلوگیری می‌کند. با این حال طی افزایش

کاربرد مواد کربنی از جمله گرافیت در محیط غیراکسیدی و تحت سایش مکانیکی و شوک حرارتی در دماهای بالا به دلیل حفظ خواص حرارتی و مکانیکی آنها تحت حرارت زیاد، گسترش یافته است. از طرفی دیگر مشکل اصلی آنها، شروع اکسیداسیون از دمای حدود ۴۰۰°C در محیط اکسیدی می‌باشد. به طوری که طول عمر قطعه کربنی در دمای ۵۰۰°C در محیط غیراکسیدی ۴۰۰ ساعت و در شرایط اکسیدی نزدیک به صفر

مختلف با کدهای #۵، #۳، #۴، #۲ و #۱ تهیه شده و چگالی ظاهری، چگالی بالک و تحلیل ظاهری آنها به روش ارشمیدس و براساس استاندارد ASTM C373 [۹] بدست آمد. آنالیز فازی موجود، درجه گرافیتاسیون و مؤلفه‌های کریستالی گرافیت‌های پایه با استفاده از طیف پراش اشعه ایکس (XRD) با گام ۰/۰۲ درجه از زاویه 2θ در فاصله ۵ تا ۹۰ درجه حاصل شد. از قانون براگ^۶ طبق رابطه (۱) برای محاسبه فاصله صفحات کریستالی گرافیت در جهت اصلی (002) ($d_{(002)}$) بر حسب نانومتر استفاده شد [۱۰].

$$d_{(002)} = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \quad (1)$$

برای محاسبه متوسط ارتفاع (ضخامت) کریستالی گرافیت (L_c) بر حسب نانومتر از معادله شرر^۵ طبق رابطه (۲) استفاده شد:

$$L_c = \frac{0.89\lambda}{\beta(002).\sin\theta} \quad (2)$$

برای محاسبه متوسط قطر کریستالی گرافیت (L_a) بر حسب نانومتر از قانون شرر طبق رابطه (۳) استفاده شد [۱۱-۱۲].

$$L_a = \frac{1.84\lambda}{\beta(110).\sin\theta} \quad (3)$$

درجه گرافیتاسیون^۶ (g) که معیاری از نزدیکی ساختار کریستالی گرافیت نمونه به گرافیت ایده‌آل می‌باشد، از رابطه (۴) بدست آمد:

$$g = \frac{3.440 - d_{(002)}}{3.440 - 3.354} \times 100 \quad (4)$$

همچنین متوسط تعداد لایه‌های آروماتیکی (N) از رابطه (۵) محاسبه شد [۱۱-۱۲].

$$N = \frac{L_c}{d_{(002)}} \quad (5)$$

در روابط فوق، λ : طول موج پراش اشعه $K\alpha_1$ مس بوده و برابر با ۰/۱۵۴۰۵۹۸ nm است، θ : زاویه پراش اشعه ایکس بر حسب رادیان می‌باشد، $\beta(002)$: عرض ارتفاع پیک پراش^۷ صفحه (002) در زاویه پراش 2θ بر حسب رادیان و $\beta(110)$: عرض ارتفاع پیک پراش صفحه (110) در زاویه پراش 2θ بر حسب رادیان است که طبق استاندارد ISO 20203 [۱۳] بدست می‌آید.

دما و زمان اکسیداسیون، به دلیل ناهمخوانی ضریب انبساط حرارتی بین پوشش SiC و گرافیت، منافذی برای نفوذ اکسیژن به زیرلایه کربنی ایجاد شده و منجر به شکست پوشش می‌شود. یکی از روش‌های حل این مسأله، استفاده از مواد با ماهیت تدریجی هدفمند (FGM) است که امروزه به دلیل تغییر تدریجی در ریزساختار و ترکیب و تحمل مناسب شوک حرارتی در دماهای بالا، مورد توجه قرار گرفته‌اند [۴-۸].

کیم^۱ و همکارانش پوشش تدریجی SiC را بر کامپوزیت کربن - کربن به روش رسوب بخار فاز شیمیایی^۲ (CVD) اعمال کرده‌اند. آنها نشان دادند که در طرح ترکیب تدریجی، تنش حرارتی باقیمانده در بین لایه C/SiC به بهترین نحو توزیع شده و حداقل تنش در لایه پوشش ایجاد می‌شود [۷]. همچنین ژانگ^۳ و همکارانش با اعمال پوشش SiC بر کامپوزیت کربن - کربن به روش سمانتاسیون توده‌ای، نشان دادند که کامپوزیت کربن - کربن با پوشش غیرتدریجی SiC پس از ۹ ساعت در دمای ۱۵۰۰°C به افت وزنی ۲/۹۳ درصد می‌رسد، در حالی که در همین شرایط، افت وزنی برای پوشش با ماهیت تدریجی تنها ۰/۱۸ درصد می‌باشد. ضمن آنکه توزیع تدریجی عناصر Si و C سبب بهبود خواص مقاومت به شوک حرارتی پوشش می‌شود، به طوری که نمونه می‌تواند تعداد ۱۱ چرخه حرارتی از دمای ۱۵۰۰°C تا دمای محیط را بدون کاهش وزن تحمل کند [۸]. از این رو هدف از این مقاله بررسی ساخت پوشش با ماهیت هدفمند و تدریجی بر انواع پایه گرافیتی و بررسی خواص آنها می‌باشد.

۲- مواد و روش انجام تحقیق

پودرهای سیلیسیم (Si) با مش ۸۰۰، پودر گرافیت با مش ۴۰۰ و پودر گرافیت با مش ۴۰۰ با خلوص آزمایشگاهی، مواد اولیه مورد استفاده در این پروژه می‌باشند. ترکیب ۷۵-۷۰ درصد وزنی پودر سیلیسیم، ۲۰-۱۵ درصد وزنی گرافیت و ۱۰ درصد وزنی آلومینا توزین شده و پس از قرار گرفتن در ظرف آب‌بند پلی‌اتیلنی حاوی گلوله‌های آلومینایی توسط بالمیل به مدت سه ساعت مخلوط شدند. در این پروژه تعداد پنج نوع گرافیت

مورفولوژی سطحی، ضخامت پوشش و توزیع عناصر استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

در جدول (۱) نتایج چگالی ظاهری، چگالی بالک، تخلخل ظاهری و درجه گرافیتاسیون گرافیت‌های پایه آمده است.

جدول (۱): چگالی بالک، چگالی ظاهری، تخلخل ظاهری و درجه

گرافیتاسیون گرافیت‌های پایه

کد گرافیت	چگالی ظاهری، (gr/cm ³)	چگالی بالک، (gr/cm ³)	تخلخل ظاهری، (%)	درجه گرافیتاسیون، (%)
#۱	۲/۰۷	۱/۷۷	۱۴/۵۶	۸۵/۵۵
#۲	۲/۰۴	۱/۸۰	۱۲/۰۳	۹۲/۰۸
#۳	۱/۸۶	۱/۷۰	۸/۵۳	۹۷/۸۶
#۴	۲/۰۸	۱/۷۸	۱۴/۴۴	۸۷/۰۰
#۵	۲/۰۸	۱/۶۱	۲۲/۷۵	۲۴/۲۷

چگالی ظاهری چهار گرافیت #۱، #۲، #۴ و #۳ نزدیک بهم و نزدیک به چگالی گرافیت ایده‌آل تک کریستال (gr/cm³) (۲/۲۶۵) [۱۰] می‌باشد که حاکی از خلوص بالای آنهاست. اما گرافیت #۳ دارای کمترین چگالی ظاهری است که نشان می‌دهد احتمالاً موادی نظیر کربن شیشه‌ای حاصل از رزین با چگالی کمتر از گرافیت خالص در ترکیب آن موجود است، به طوری که تخلخل‌های باز را بسته و موجب دستیابی به کمترین تخلخل ظاهری نیز شده است. البته نمودار پراش اشعه ایکس گرافیت #۳ نشان داد، این گرافیت علاوه بر فاز اصلی گرافیت دارای مقدار کمی فاز کوآرتز (SiO₂) نیز بوده و به نظر می‌رسد دارای کربن آمورف یا فاز شیشه‌ای SiO₂ نیز باشد. مقایسه چگالی بالک و تخلخل ظاهری گرافیت‌ها، نشان می‌دهد که سه گرافیت #۱، #۲ و #۴ دارای نتایج مشابه می‌باشند اما گرافیت #۵ با اینکه دارای چگالی ظاهری نزدیک به سه گرافیت #۱، #۲ و #۴ می‌باشد، از چگالی بالک کمتری برخوردار است که به دلیل تخلخل بالای آن می‌باشد. الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) گرافیت‌های پایه در شکل (۱) آمده است. نتایج آنالیز

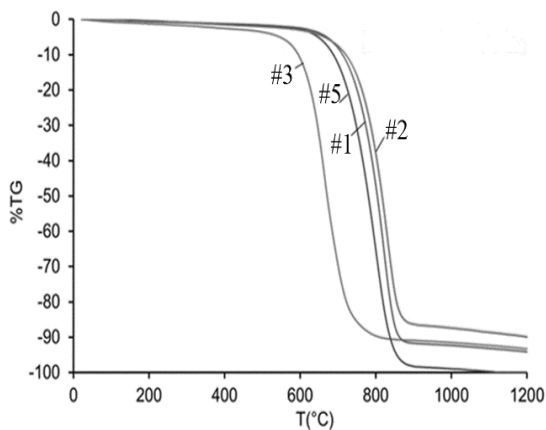
پس از آماده‌سازی سطح گرافیت‌های پایه با سنباده کاربرد سیلیسیم به شماره‌های ۸۰ و ۲۲۰ و شستشو با اتانول، در دمای ۱۱۰°C به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. نمونه‌های گرافیت خشک شده در بستری از مخلوط پودرها در دمای ۱۶۰۰°C و محیط ارگون به مدت ۲ ساعت قرار گرفتند تا پوشش SiC به روش سماتاسیون توده‌ای بر آنها تشکیل شود.

توزیع اندازه حفرات پایه گرافیتی با استفاده از دستگاه تخلخل سنجی جیوه (Carlo Erba Porosimeter 2000) براساس استاندارد ASTM D4284 [۱۴] بدست آمد. در این روش، جیوه با فشار بالا تا حدود ۲۰۰۰ bar وارد تخلخل‌های نمونه گرافیت شده و با اندازه‌گیری میزان فشار لازم برای مقابله با کشش سطحی جیوه و ورود آن به تخلخل، اندازه تخلخل طبق رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$d = \frac{-4\gamma \cdot \cos\theta}{P} \quad (6)$$

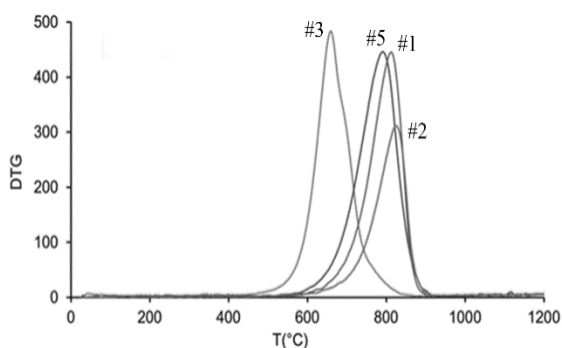
که در آن: d معادل قطر حفره، γ کشش سطحی جیوه برابر ۴۸۰ mN/m، θ زاویه تماس بین جیوه و پایه گرافیت برابر ۱۴۱ درجه و P فشار مطلق برای نفوذ جیوه می‌باشد [۱۴-۱۵]. طیف آنالیز فازی گرافیت‌های پایه و پوشش حاصل، توسط دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD, PANalytical, X'Pert Pro MPD) با منبع Cu بدست آمد و از نرم‌افزار X'Pert Highscore برای شناسایی فازی و مؤلفه‌های کریستالی استفاده شد. برای بررسی وزن‌سنج گرمایی (TGA) و آنالیز حرارتی تفاضلی (DTA) گرافیت‌های پایه از دستگاه آنالیز حرارتی همزمان (STA, Perkin-Elmer, Pyris) با نرخ حرارتی ۱۰°C/min در محیط هوا استفاده شد. برای بررسی ریزساختار پوشش، نمونه‌ها در جهت عمود بر وجه پوشش داده شده، برش خورده و از سطح مقطع در مانت گرم قرار گرفت. سپس سطح آنها به صورت خشک با سنباده‌های کاغذی از جنس کاربیدسیلیسیم صیقل داده شدند. از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, Philips, XL30) با ولتاژ اعمالی ۲۰KV برای بررسی

بررسی آنالیز حرارتی طبق شکل (۳)، نشان می‌دهد که گرافیت #۳ دارای کمترین مقاومت به اکسیداسیون در هوا می‌باشد و به نظر می‌رسد دارای خلوص کمتری است اما گرافیت‌های #۱ و #۲ و #۵ دارای رفتار حرارتی مشابهی بوده و به نظر می‌رسد از خلوص مناسبی برخوردار باشند.



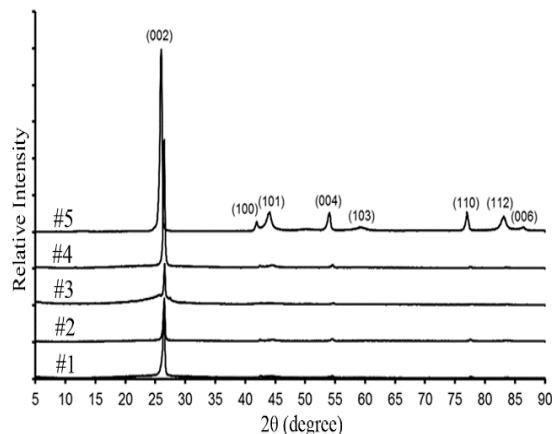
شکل (۳): آنالیز وزن‌سنجی گرمایی گرافیت‌های پایه

شکل (۴) مشتق آنالیز وزن‌سنجی گرمایی (DTG) گرافیت‌های پایه را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود نرخ کاهش وزن گرافیت #۳ بیشترین مقدار و نرخ کاهش وزن گرافیت #۲ کمترین مقدار می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که پیک مربوط به گرافیت‌های #۱، #۲ و #۵ نسبتاً متقارن بوده ولی عدم تقارن پیک گرافیت #۳ به وضوح قابل مشاهده است که نشان می‌دهد دارای حداقل دو نوع ماده با خواص حرارتی متفاوت می‌باشد.



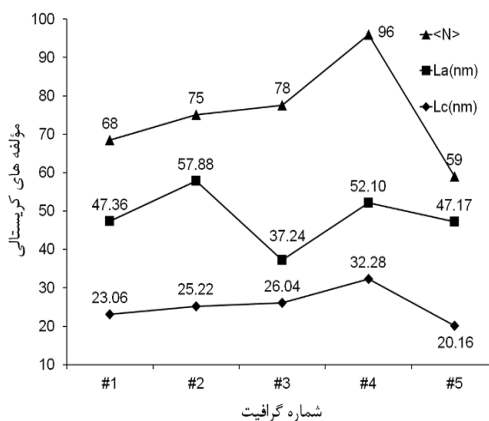
شکل (۴): مشتق آنالیز وزن‌سنجی گرمایی (DTG)

فازی نشان می‌دهد که ساختار فاز گرافیتی چهار نمونه #۱، #۲، #۳ و #۴ از نوع هگزاگونال می‌باشد.



شکل (۱): الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) گرافیت‌های پایه

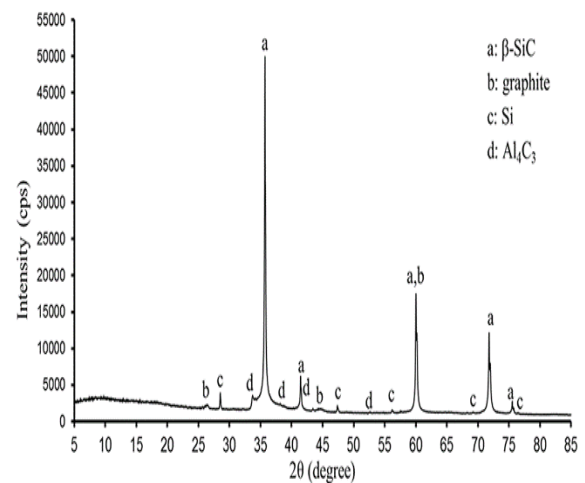
با مقایسه درجه گرافیتاسیون گرافیت‌های پایه طبق جدول (۱)، ملاحظه می‌شود که چهار گرافیت #۱، #۲، #۳ و #۴ از درجه گرافیتاسیون بالایی در حدود ۸۶ تا ۹۸ درصد برخوردار هستند که نشان می‌دهد فاصله صفحات کریستالی آنها تا حد امکان به گرافیت ایده‌آل نزدیک شده است، اما درجه گرافیتاسیون #۵ کمتر از ۲۵ درصد است که بیانگر آن است که عملیات گرافیتاسیون آن به طور کامل انجام نگرفته است. مقایسه‌ی مؤلفه‌های کریستالی گرافیت‌های پایه طبق شکل (۲) نشان می‌دهد که به صورت نسبی، گرافیت‌های #۴، #۲ و #۱ به ترتیب دارای بیشترین نظم دامنه بلند هستند و گرافیت‌های #۱ و #۳ به ترتیب دارای کمترین نظم دامنه کوتاه می‌باشند.



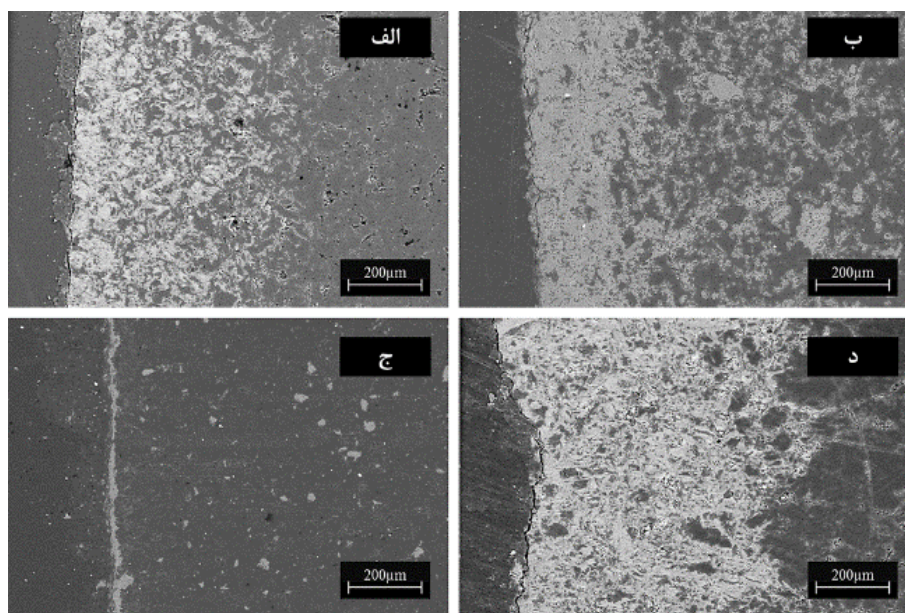
شکل (۲): مقایسه‌ی مؤلفه‌های کریستالی گرافیت‌های پایه

شکل (۵) الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) پوشش نمونه #۱ را نشان می‌دهند. فاز اصلی پوشش، ترکیب β -SiC با ساختار مکعبی می‌باشد و همچنین فازهای Si با ساختار مکعبی، فاز گرافیت با ساختار هگزاگونال و فاز Al_4C_3 با ساختار هگزاگونال به مقدار کم در کنار فاز اصلی کاربیدسیلیسیم حضور دارند. شکل (۶) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه‌های پوشش داده شده با کاربیدسیلیسیم که با آشکارساز الکترون پراکنده شده برگشتی (BSE) تهیه شده است را نشان می‌دهد. آنالیز تفکیک انرژی (EDS) پوشش SiC بیانگر آن است که در تصاویر ریزساختاری، قسمت‌های تیره غنی از کربن، خاکستری غنی از SiC و سفید غنی از Si می‌باشد. بررسی اثر نوع گرافیت پایه بر پوشش SiC نشان می‌دهد که گرافیت #۳ دارای پوشش کاربیدسیلیسیم غیریکنواخت با حداکثر ضخامت ۲۰ میکرون می‌باشد اما سه گرافیت #۱، #۲ و #۴ دارای پوشش مناسب کاربیدسیلیسیم با ضخامت بیش از ۱۰۰ میکرون می‌باشند. پوشش SiC گرافیت‌های #۲ و #۴ از ضخامت مناسبی برخوردار است اما دارای ساختار تدریجی نمی‌باشد با این حال به خوبی مشخص است که تنها گرافیت #۱ از ساختار تدریجی برخوردار است.

پس از خارج کردن بسته سماتاسیون توده‌ای از کوره و جداکردن نمونه‌ها از آن، مشاهده شد که گرافیت با کد #۵ به طور کامل رنگ قهوه‌ای و به قطعات کوچکتر متلاشی شد که به نظر می‌سد به دلیل تخلخل ظاهری بالا در حدود ۲۲ درصد، سیلیسیم به سرعت به داخل آن نفوذ کرده و طی واکنش با کربن، سبب کاهش استحکام و در نتیجه تخریب آن شده است [۱۶].

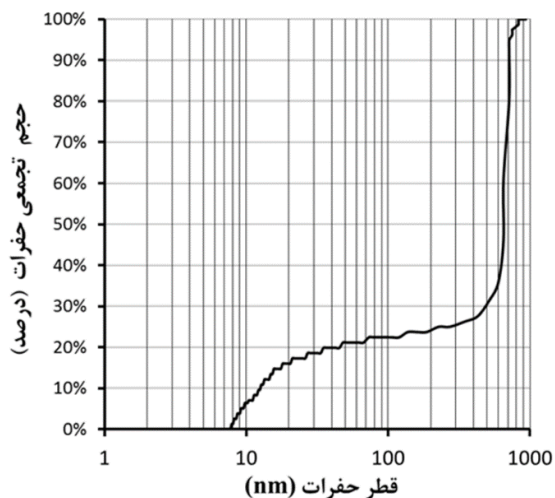


شکل (۵): الگوی پراش اشعه ایکس پوشش نمونه #۱



شکل (۶): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) پوشش SiC: الف) #۱، ب) #۲، ج) #۳، د) #۴

حفرات (r)، سرعت رخنه‌دهی Si کمتر از سرعت واکنش شیمیایی بوده و در نتیجه Si تا عمق معینی رخنه‌دهی شده و پوشش تدریجی SiC تشکیل می‌دهد. حجم تجمعی ابعاد حفرات طبق شکل (۷) و توزیع اندازه حفرات برای گرافیت #۱ طبق جدول (۲) نشان می‌دهد که نزدیک به ۷۰ درصد حفرات در محدوده ابعاد ۶۰۰ تا ۷۱۰ نانومتر می‌باشد. [۱۷] Zhu نشان داد که در گرافیت با ابعاد حفرات در حدود ۳۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر می‌توان به پوشش کاربرد سیلیسیم به شکل تدریجی دست یافت، همچنین ابعاد حفرات گرافیت در مطالعات [۱۸-۱۹] Zhao در حدود ۱۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر بود، بدین ترتیب نتیجه تحقیق حاضر مؤید نتایج سایر محققین می‌باشد.



شکل (۷): درصد حجم تجمعی ابعاد حفرات گرافیت #۱

جدول (۲): توزیع اندازه حفرات گرافیت #۱

درصد حجمی حفرات	محدوده حفرات (نانومتر)
۲۳/۰۸	۰-۵۰
۱۲/۸۲	۵۰-۶۰۰
۲۵/۰۰	۶۰۰-۶۵۰
۳۳/۹۷	۶۵۰-۷۱۴
۵/۱۳	۷۱۴-۸۳۳

۴- نتیجه گیری

مطالعه حاضر نشان می‌دهد که روش سمانتاسیون توده‌ای در بستری از مخلوط پودری سیلیسیم، کاربرد سیلیسیم و آلومینا با

برای توجیه اثر نوع گرافیت بر ساختار پوشش SiC باید مکانیزم تشکیل پوشش از طریق مکانیزم رخنه‌دهی^۱ را بررسی کرد. برای ایجاد SiC در گرافیت پایه، ابتدا گاز SiO و مذاب Si به درون گرافیت رخنه‌دهی می‌شود، سپس با C واکنش داده و فاز SiC تشکیل می‌گردد. تنها زمانی پوشش تدریجی SiC تشکیل می‌شود که سرعت رخنه‌دهی Si مذاب به درون گرافیت پایه کمتر از سرعت واکنش شیمیایی Si با C باشد. با توجه به آنکه سرعت واکنش از سرعت واکنش شیمیایی Si با C تابعی از دما می‌باشد و هر چهار گرافیت در دمای حرارتی یکسانی قرار گرفتند، بنابراین سرعت واکنش شیمیایی در هر چهار گرافیت تقریباً یکسان خواهد بود. از طرفی دیگر سرعت رخنه‌دهی Si مذاب در گرافیت از رابطه (۷) حاصل می‌شود:

$$v = \frac{dl}{dt} = \frac{r \cdot \gamma_{lv} \cdot \cos\theta}{4\eta l} \quad (7)$$

که در آن: v: سرعت رخنه‌دهی Si مذاب در گرافیت، t: زمان رخنه‌دهی، l: طول رخنه‌دهی در زمان t، r: متوسط شعاع حفرات، γ_{lv} : کشش سطحی، θ : زاویه ترشوندگی مذاب Si با گرافیت و η : ویسکوزیته مذاب می‌باشد [۱۷-۱۸].

شناسایی گرافیت‌های پایه نشان می‌دهد که گرافیت #۳ ضمن دارا بودن کربن شیشه‌ای از کمترین تخلخل ظاهری برخوردار می‌باشد در نتیجه مذاب Si کربن شیشه‌ای موجود در گرافیت #۳ را کمتر از گرافیت‌های دیگر تر می‌کند و نفوذ کمتری خواهد داشت. در مورد گرافیت #۱، #۲ و #۴ با توجه به نتایج شناسایی گرافیت‌های پایه، می‌توان بیان کرد که نوع ماده پایه در هر سه گرافیت تقریباً یکسان است، بنابراین مقادیر کشش سطحی (γ_{lv})، زاویه ترشوندگی (θ) و ویسکوزیته مذاب (η) در سه گرافیت #۱، #۲ و #۴ تقریباً ثابت بوده و سرعت رخنه‌دهی Si متناسب با اندازه حفرات می‌باشد. به نظر می‌رسد در گرافیت‌های #۲ و #۴ به دلیل بالابودن اندازه حفرات (r)، سرعت رخنه‌دهی Si بیشتر از سرعت واکنش شیمیایی باشد، در نتیجه Si تا عمق بیشتری رخنه‌دهی می‌شود اما تشکیل پوشش تدریجی نداده است. در گرافیت #۱ به دلیل مناسب بودن اندازه

- [6] X. Yang, C. Zhao-hui & C. Feng, "High-temperature protective coatings for C/SiC composites", *Journal of Asian Ceramic Societies*, Vol. 2, pp. 305-309, 2014.
- [7] J. Kim, W.-J. Kim, D. Choi, J. Park & W. S. Ryu, "Design of a C/SiC functionally graded coating for the oxidation protection of C/C composites", *Carbon*, Vol. 43, pp. 1749-1757, 2005.
- [8] Y. L. Zhang, H. J. Li, Q. G. Fu, K. Z. Li, J. Wei & P. Y. Wang, "A C/SiC gradient oxidation protective coating for carbon/carbon composites", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 201, pp. 3491-3495, 2006.
- [9] ASTM C373, "Standard test method for water absorption, bulk density, apparent porosity and apparent specific gravity of fired whiteware products", *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2006.
- [10] P. Morgan, "Carbon fibers and their composites", *Taylor & Francis Boca Raton, FL*, 2005.
- [11] G. Savage, "Carbon-carbon composites", *Springer Science & Business Media*, 1993.
- [12] S. Rodrigues, M. Marques, I. Suárez-Ruiz, I. Camean, D. Flores & B. Kwiecinska, "Microstructural investigations of natural and synthetic graphites and semi-graphites", *International Journal of Coal Geology*, Vol. 111, pp. 67-79, 2013.
- [13] ISO 20203, "Carbonaceous materials used in the production of aluminium - Calcined coke - Determination of crystallite size of calcined petroleum coke by X-ray diffraction", *International Organization for Standardization*, Geneva, Switzerland, 2005.
- [14] ASTM D4284, "Standard Test Method for Determining Pore Volume Distribution of Catalysts by Mercury Intrusion Porosimetry", *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA, 2007.
- [15] K. Kaneko, "Determination of pore size and pore size distribution: 1. Adsorbents and catalysts", *Journal of membrane science*, Vol. 96, pp. 59-89, 1994.
- [16] R. Olesinski & G. Abbaschian, "The C-Si (Carbon-Silicon) system", *Journal of Phase Equilibria*, Vol. 5, pp. 486-489, 1984.

دمای 1600°C روشی مناسب برای تشکیل پوشش تدریجی SiC بر گرافیت می‌باشد. نتایج حاکی از آنست که در روش سماتاسیون توده‌ای، نوع گرافیت و خواص آنها نقش مهمی در ایجاد پوشش تدریجی ایفا می‌کند، به طوری که گرافیت #۵ با تخلخل بالا، طی فرایند پوشش‌دهی سست شده و از هم می‌پاشد. گرافیت #۳ با آنالیز فازی نامناسب، پوشش غیریکنواخت با ضخامت کمتر از ۲۰ میکرون می‌گیرد. گرافیت‌های #۴ و #۲ دارای پوشش مناسب با ضخامت حدود ۵۰۰ میکرون اما به صورت غیرتدریجی هستند و تنها گرافیت #۱ با تخلخل مناسب، از پوشش کاربیدسیلیسیم تدریجی با تراکم مناسب و ضخامت بیش از ۲۰۰ میکرون برخوردار است. به طوری که پوشش تدریجی SiC با توزیع اندازه حفرات در محدوده ۷۱۰-۶۰۰ نانومتر ایجاد شد.

۵- مراجع

- [1] E. Fitzer, "Carbon reinforcements and carbon/carbon composites", *Springer Science & Business Media*, 1998.
- [2] C. R. Thomas, "Essentials of carbon-carbon composites", *Royal Society of Chemistry*, Cambridge, 1993.
- [۳] س. نقیبی، ا. جمشیدی، ز. نعمتی و ح. پایدار، "تأثیر میزان گرافیت و رزین بر خواص دیرگدازهای دولوما گرافیتی"، فصلنامه علمی - پژوهشی فرایندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۴، شماره ۴، صفحه ۱۷-۲۴، زمستان ۱۳۸۹.
- [۴] م. قراخانی بنی، ن. احسانی، م. اسماعیلی و ی. صفایی نائینی، "بررسی ریزساختار و خواص کامپوزیت C/C-SiC دوبعدی ساخته شده با روش نوین تلقیح پلیمر و پیرولیز (PIP)"، فصلنامه علمی پژوهشی فرایندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۹، شماره ۲، صفحه ۱۵۷-۱۶۴، تابستان ۱۳۹۴.
- [5] A. Wu, W. Cao, C. Ge, J. Li & A. Kawasaki, "Fabrication and characteristics of plasma facing SiC/C functionally graded composite material", *Materials chemistry and physics*, Vol. 91, pp. 545-550, 2005.

carbon materials”, Fusion Engineering and Design, Vol. 82, pp. 363-368, 2007.

[19] J. Zhao, L. Liu, Q. Guo, J. Shi & G. Zhai, “Oxidation protective behavior of SiC/Si-MoSi₂ coating for different graphite matrix”, Materials Letters, Vol. 60, pp. 1964-1967, 2006.

[17] Q. Zhu, X. Qiu & C. Ma, “Oxidation resistant SiC coating for graphite materials”, Carbon, Vol. 37, pp. 1475-1484, 1999.

[18] J. Zhao, G. Wang, Q. Guo & L. Liu, “Microstructure and property of SiC coating for

۶- پی نوشت

- [1] Kim
- [2] Chemical vapor Deposition
- [3] Zhang
- [4] Bragg's Law
- [5] Scherrer's equation
- [6] Degree of Graphitization
- [7] Full Width at Half Maximum Height (FWHM)
- [8] Infiltration