

بررسی مسیر واکنشی تشکیل پوشش تدریجی SiC بر گرافیت با روش سمانتاسیون بسته‌ای و تأثیر نوع مواد اولیه

جلیل پوراسد^{۱*}، ناصر احسانی^۲، سید علی خلیفه‌سلطانی^۳
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۲۹، ش.ص ۳۹-۴۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۳۱)

چکیده

با توجه به آن که مواد کربنی از جمله گرافیت به طور گسترده در ساختارهای دمای بالا مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛ اما مشکل اصلی آن‌ها، شروع اکسیداسیون از دمای حدود 400°C در محیط اکسیدی می‌باشد، بهترین روش برای تقویت مقاومت به اکسیداسیون گرافیت، استفاده از کاربید سیلیسیم با ساختار تدریجی است که به دلیل پایداری حرارتی مناسب و تطابق فیزیکی، شیمیایی و ضریب انبساط حرارتی مناسب با زیرلایه کربنی کاربرد گسترده‌ای یافته است. در پژوهش حاضر به دلیل مزایایی نظیر هزینه کم‌تر، سهولت بکارگیری و قابلیت صنعتی‌سازی، روش سمانتاسیون بسته‌ای در دمای 1600°C برای تشکیل پوشش SiC تدریجی بکار گرفته شد. آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان می‌دهد که پوشش حاصل به صورت تدریجی تشکیل یافته و شامل فاز $\alpha\text{-SiC}$ و $\beta\text{-SiC}$ با تراکم مناسب می‌باشد. مکانیزم تشکیل پوشش SiC بر گرافیت با آنالیز ترمودینامیکی و محاسبات تعادل شیمیایی حاصل از نرم‌افزار HSC Chemistry 6.0 تشریح می‌شود. مکانیزم مسیر واکنشی نشان می‌دهد، در مراحل ابتدایی واکنش، فازهای گازی SiO و CO طی واکنش Al_2O_3 با Si و C تشکیل شده و دو واکنش $\text{Si} + \text{C} \rightarrow \text{SiC}$ و $\text{SiO}(\text{g}) + 2\text{C} \rightarrow \text{SiC} + \text{CO}(\text{g})$ به عنوان واکنش‌های اصلی تشکیل پوشش معرفی می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب مواد اولیه در روش سمانتاسیون بسته‌ای تأثیر زیادی بر ساختار پوشش کاربیدسیلیسیم ندارد و در نهایت نتایج تجربی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی را تأیید می‌کند. در واقع، پژوهش حاضر روشی را برای تحلیل و شبیه‌سازی واکنش‌های سمانتاسیون بسته‌ای با نرم‌افزار ترمودینامیکی HSC Chemistry ارائه می‌دهد و در نهایت نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی تأیید شد.

واژه‌های کلیدی: گرافیت، کاربید سیلیسیم، مکانیزم تشکیل، نرم‌افزار HSC Chemistry، سمانتاسیون بسته‌ای.

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

^۲ - استاد تمام، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، لویزان، تهران

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

*- نویسنده مسئول مقاله: jpourasad@gmail.com

پیشگفتار

سیلیسیم بررسی نشده است [۴-۶]، هر چند راجرز^۵ تنها واکنش‌های محتمل را بیان کرده است و موریموتو^۶ به احتمال واکنش Si با Al₂O₃ و تشکیل SiC با واکنش فاز گازی با C اشاره کرده است [۷-۸]. در این پژوهش به دلیل سهولت بکارگیری و قابلیت صنعتی‌سازی از روش سمانتاسیون بسته‌ای برای اعمال پوشش کاربرد سیلیسیم استفاده می‌شود و اثر ترکیب و نوع مواد اولیه بر تشکیل پوشش SiC بررسی می‌شود. ضمن آن‌که مکانیزم تشکیل پوشش، براساس قوانین ترمودینامیکی و پایداری فازی و با استفاده از نرم‌افزار HSC Chemistry واکنش‌های تشکیل آن، مورد بررسی قرار می‌گیرد [۹ و ۱۰].

مواد و روش‌ها

مواد اولیه مورد استفاده در این پروژه شامل پودر سیلیسیم (Si) از شرکت گودفلو^۷ با خلوص بیش از ۹۹٪، با اندازه اسمی ذرات ۱۵ میکرون، پودر کاربرد سیلیسیم (SiC) با خلوص بیش از ۹۹٪ و متوسط ابعاد ۱۰ میکرون ساخت شرکت گودفلو، پودر آلفا آلومینا (Al₂O₃) با خلوص بیش از ۹۹٪ و ابعاد متوسط کمتر از ۲۰ میکرون از شرکت پانادین^۸ و نیز پودر گرافیت با ابعاد کمتر از ۴۵ میکرون شرکت محصولات گرافیتی چانگی دونگلی^۹ می‌باشد. دو نوع ترکیب از مواد اولیه با کدهای C1 و C2 طبق جدول (۱) توزین شده و پس از قرار گرفتن در ظرف آب‌بند پلی‌اتیلنی حاوی گلوله‌های آلومینایی توسط بالمیل به مدت سه ساعت مخلوط شدند.

جدول ۱- ترکیب مواد اولیه در دو کد مختلف

C2		C1		کد ترکیب
درصد مولی	درصد وزنی	درصد مولی	درصد وزنی	
۶۳/۲	۷۳	۶۱/۹	۵۰	Si
۰	۰	۳۴/۷	۴۰	SiC (α)
۳۴/۴	۱۷	۰	۰	C
۲/۴	۱۰	۳/۴	۱۰	Al ₂ O ₃ (α)

مواد کربنی از جمله گرافیت‌ها و کامپوزیت‌های کربن-کربن، علیرغم داشتن مزایای بسیاری مانند مقاومت خزشی بیش‌تر در دماهای بالا، دانسیته پایین، هدایت حرارتی بالا، تحمل حرارتی بالا، مقاومت به سایش حرارتی مکانیکی، مدول الاستیسیته بالا، قابلیت ماشینکاری مناسب، ضریب اصطکاک مناسب، ضریب انبساط حرارتی پایین، شوک‌پذیری مناسب، عدم واکنش‌پذیری در محیط‌های غیراکسیدی و شیمیایی و حفظ خواص فیزیکی و مکانیکی در گسترده بالایی از دما، دارای مشکل اکسیداسیون در دمای بالاتر از ۵۰۰°C در محیط اکسیدی می‌باشند [۱، ۲].

بهترین روش برای بهبود مقاومت به اکسیداسیون گرافیت، استفاده از پوشش هدفمند تدریجی کاربرد سیلیسیم است که به دلیل پایداری حرارتی مناسب و تطابق فیزیکی، شیمیایی و ضریب انبساط حرارتی مناسب با زیرلایه کربنی کاربرد گسترده‌ای یافته است. روش‌های متنوعی برای اعمال پوشش SiC پیشنهاد شده است، در حالی که انجام برخی از آن‌ها نظیر رسوب بخار فاز شیمیایی^۱ (CVD) و واکنش بخار شیمیایی^۲ (CVR) مستلزم صرف هزینه اولیه بالا برای ساخت دستگاه‌ها می‌باشد [۳-۵]. همچنین برخی از این روش‌ها، نظیر زینتر فعال پرس گرم^۳ (HPRS) برای اعمال پوشش بر قطعات با اشکال پیچیده عملی نیست و تنها برای قطعات با شکل منتظم بکار می‌رود، ضمن آن‌که هزینه استفاده از آن بالا است. در حالی که روش سمانتاسیون بسته‌ای^۴ در مقایسه با سایر روش‌ها، دارای مزایایی نظیر هزینه کم‌تر، سهولت بکارگیری بدون نیاز به الزامات خاص برای هر شکلی از مواد کربنی، قابلیت صنعتی‌سازی، دستیابی به دستگاه‌ها و مواد در داخل کشور و ایجاد لایه‌های مختلف در یک فرایند با ماهیت هدفمندی و تدریجی می‌باشد [۵-۳].

علیرغم فعالیت‌هایی که برای تشکیل پوشش SiC بر گرافیت انجام شده است، مکانیزم تشکیل پوشش کاربرد

5 -Rogers

6 -Morimoto

7 -Good fellow

8 -Panadyne

9 -Changyi Dongli Graphite Products

1 -Chemical Vapor Deposition

2 -Chemical Vapor Reaction

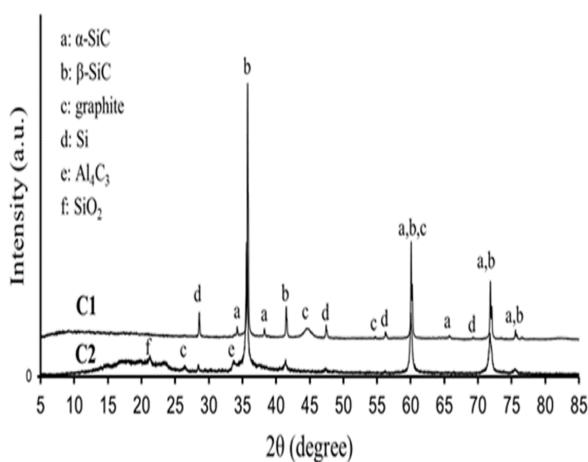
3 -Hot-Pressing Reactive Sintering

4 -pack cementation

روش حداقل انرژی آزاد گیبس برای تعیین ترکیب تعادلی استفاده می‌شود [۱۴].

نتایج و بحث

الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) پوشش SiC در ترکیب‌های C1 و C2 طبق شکل (۱) نشان می‌دهد که فاز اصلی پوشش، ترکیب β -SiC با ساختار مکعبی می‌باشد، همچنین فازهای Si با ساختار مکعبی، فاز گرافیت با ساختار هگزاگونال و فاز SiO_2 با ساختار تتراگونال به مقدار کم در کنار فاز اصلی کاربید سیلیسیم حضور دارند. در نمونه C1 بر خلاف نمونه C2، فاز α -SiC نیز حضور دارد که می‌تواند ناشی از حضور کاربید سیلیسیم اولیه از نوع α -SiC در ترکیب C1 باشد. با توجه به پایداری ترمودینامیکی دو ترکیب Al_2O_3 و SiC، واکنشی در مراحل اولیه برقرار نیست. بنابراین، برای بررسی مکانیزم تشکیل پوشش واکنش Al_2O_3 با Si و C و همچنین واکنش محصولات آن‌ها با Si و C بررسی می‌شود [۱۵].



شکل ۱- الگوی پراش اشعه ایکس پوشش کاربید سیلیسیم بر گرافیت در دو ترکیب مختلف

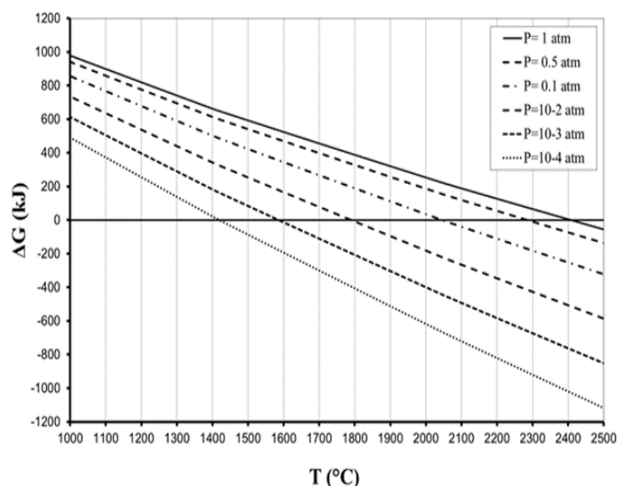
در نمودارهای تعادلی تغییرات مقدار تعادلی فازها برحسب دما نمایش داده می‌شود. نمودار تعادلی سیستم Al-O-Si با نسبت $\text{Si}:\text{Al}_2\text{O}_3=3:1$ در فشار سیستم ۱ atm طبق شکل (۲) نشان می‌دهد که واکنش اصلی آلومینا با سیلیسیم طی رابطه (۱) رخ داده و فاز میانی $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{g})$ نیز می‌تواند تشکیل شود که در مراحل بعدی به Al احیا می‌شود.

برای بیان دلیل انتخاب درصد مواد اولیه، لازم به ذکر است که در مطالعات دیگران درصدهای متنوعی از مواد اولیه ذکر شده است؛ اما مقایسه‌ای از تأثیر مواد اولیه انجام نگرفته است. بدین ترتیب برای مقایسه اثر ترکیب مواد اولیه بر پوشش کاربید سیلیسیم ترکیب C1 با افزودن مقدار بیشتر SiC بدون C و ترکیب C2 با افزودن مقدار بیشتر C بدون SiC انتخاب شد.

از سوی دیگر، از گرافیت پلی کریستال با دانسیته ظاهری 2.04 g/cm^3 ، دانسیته بالک 1.80 g/cm^3 و تخلخل ظاهری 12.03% درصد، نمونه‌هایی به ابعاد $3 \times 3 \times 1$ سانتی‌متر مکعب بریده شده و پس از آماده‌سازی سطح در خشک‌کن حرارتی به دمای 110°C به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند. پوشش کاربید سیلیسیم بر قطعات گرافیتی با فرایند سمانتاسیون بسته‌ای انجام شد، بدین ترتیب که قطعات گرافیتی در بستری از مخلوط پودری سیلیسیم، آلومینا و گرافیت قرار گرفت و بوتله حاوی نمونه‌ها، تحت عملیات حرارتی در محیط آرگون با متوسط نرخ 6°C درجه بر دقیقه و توقف در دمای 1450°C به مدت ۲ ساعت به منظور یکنواخت شدن دمای کوره و ذوب سیلیسیم [۱۱] و سپس دمای 1600°C به مدت 1.5 ساعت قرار گرفت [۱۲ و ۱۳].

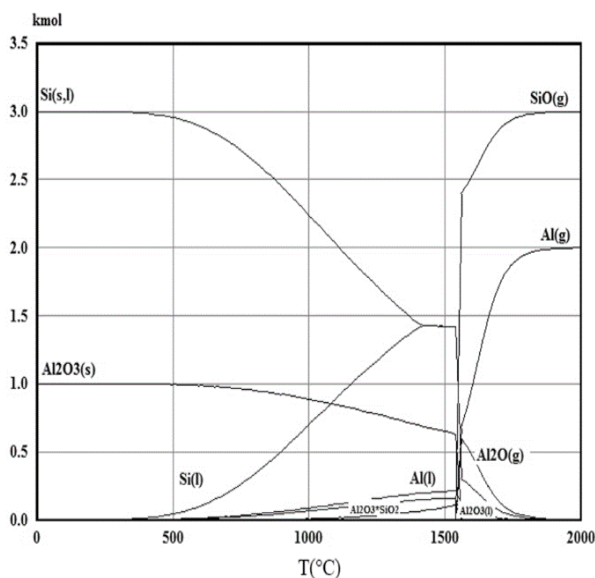
آنالیز فازی گرافیت پایه با دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD, PANalytical, X'Pert Pro MPD) انجام شد و نرم‌افزار X'Pert Highscore برای شناسایی فازها استفاده شد. برای بررسی ریزساختار پوشش، نمونه‌ها در جهت عمود بر وجه پوشش داده شده، برش خورده و از سطح مقطع در مانت گرم قرار گرفت. سپس سطح آن‌ها به صورت خشک با سنباده‌های کاغذی از جنس کاربید سیلیسیم به ترتیب با شماره‌های ۲۲۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۱۲۰۰ و ۲۰۰۰ صیقل داده شدند. از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, Philips, XL30) با ولتاژ اعمالی ۲۰KV و دارای آنالیز تفکیک انرژی (EDS)، مجهز به آشکارساز الکترون ثانویه (SE) و الکترون پراکنده شده برگشتی (BSE) برای بررسی مورفولوژی سطحی، ضخامت پوشش و توزیع عناصر استفاده شد و همچنین برای محاسبات ترمودینامیکی نظیر انرژی آزاد گیبس واکنش‌ها و نمودار تعادل فازی از نرم‌افزار HSC Chemistry نسخه 6.0 استفاده شد. در این نرم‌افزار از

شکل (۴) انرژی آزاد گیبس واکنش (۱) را در فشارهای مختلف نشان می‌دهد. با توجه به تشکیل پوشش SiC طی فرایند سمانتاسیون بسته‌ای در دمای ۱۶۰۰°C، شکل (۴) نشان می‌دهد که در دمای ۱۶۰۰°C واکنش (۱) در فشار کل ۰/۰۰۱ atm به تعادل می‌رسد؛ بنابراین تشکیل فازها در این فشار نیز بررسی می‌شود.

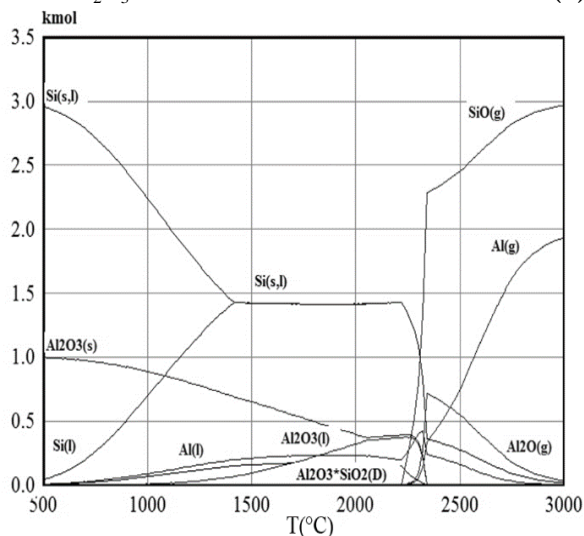
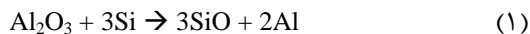


شکل ۴- انرژی آزاد گیبس استاندارد واکنش $Al_2O_3 + 3Si \rightarrow 3SiO + 2Al$ در فشارهای مختلف حاکم (P) بر آن

نمودار تعادلی سیستم Al-O-Si با نسبت $Si:Al_2O_3=3:1$ در فشار سیستم ۰/۰۰۱ atm طبق شکل (۵) نشان می‌دهد که واکنش (۱) در دمای حدود ۱۶۰۰°C انجام خواهد شد.

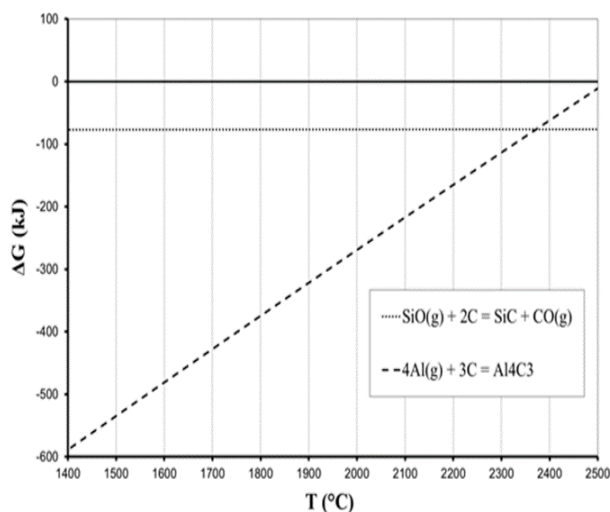


شکل ۵- نمودار تعادلی سیستم Al-O-Si در فشار ۱ atm با نسبت $Si:Al_2O_3=3:1$ با نرم افزار HSC

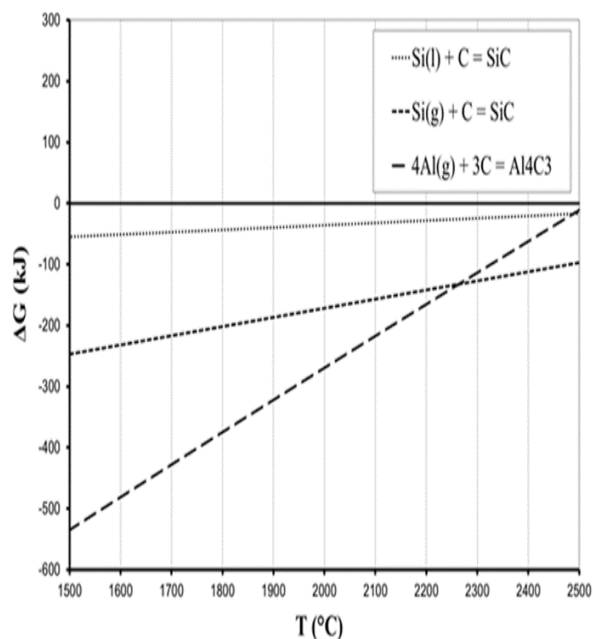
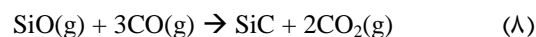
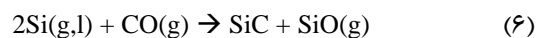


شکل ۲- نمودار تعادلی سیستم Al-O-Si در فشار ۱ atm با نسبت $Si:Al_2O_3=3:1$ با نرم افزار HSC

از سوی دیگر در سیستم کلی سمانتاسیون بسته‌ای، کربن نیز در کنار زیرسیستم Al-O-Si وجود دارد که با توجه به شکل (۳) می‌تواند به طور خود به خود با $Al(g)$ و $SiO(g)$ واکنش داده و مقدار مواد در طرف راست رابطه (۱) را کاهش دهد. با کاهش مقدار مواد در سمت راست، فشار بخار محصولات و در نتیجه فشار کلی حاکم بر زیر سیستم واکنش (۱) کاهش می‌یابد [۱۶]، بنابراین واکنش (۱) باید در فشارهای مختلف تنها حاکم بر این واکنش بررسی شود. این فشارها، فشار کل کوره نیست؛ بلکه فشار کل ناشی از کاهش فشار جزیی محصولات می‌باشد.

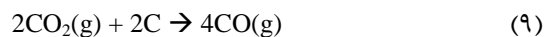


شکل ۳- انرژی آزاد گیبس استاندارد واکنش کربن با $Al(g)$ و $SiO(g)$ در فشار ۱ atm



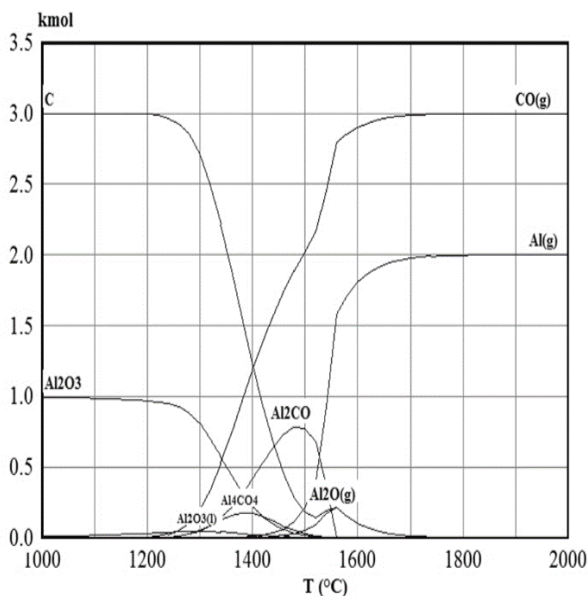
شکل ۷- انرژی آزاد گیبس استاندارد واکنش Si و Al با C در سیستم Al-Si-C در فشار ۱atm

و از سوی دیگر در صورت وجود C در سیستم، گاز $\text{CO}_2(\text{g})$ حاصل نیز می‌تواند طبق رابطه (۹) با C واکنش داده و به گاز $\text{CO}(\text{g})$ تبدیل شود [۱۶]:



نمودار انرژی آزاد گیبس واکنش‌های سیستم Si-O-C در فشار ۱atm طبق شکل (۸) نشان می‌دهد که با وجود کربن در سیستم، تشکیل SiC در گستره وسیعی از دما، به صورت خود به خود قابل انجام است. بدین ترتیب با توجه به مقدار کافی Si در هر دو ترکیب C1 و C2 طبق جدول (۱) به نظر می‌رسد، فاز SiC در هر دو ترکیب تشکیل شود که مطابق نتایج الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) در شکل (۱) است.

مشابه سیستم Al-O-Si نیز در سیستم Al-O-C طبق شکل (۶) با واکنش Al_2O_3 با فازهای نهایی $\text{CO}(\text{g})$ ، $\text{Al}(\text{g})$ و فاز میانی $\text{Al}_2\text{O}(\text{g})$ طی واکنش (۲) تشکیل می‌شوند:



شکل ۶- نمودار تعادلی سیستم Al-O-C در فشار atm ۱ با نسبت ۱:۳ C:Al₂O₃ با نرم افزار HSC ۰/۰۰۱

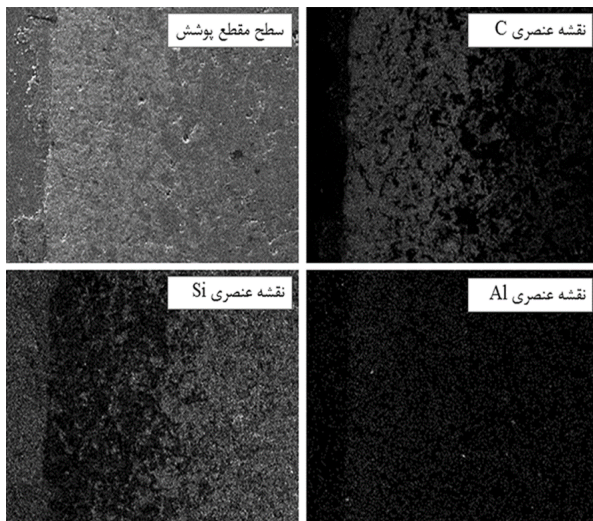
بررسی سیستم Al-Si-C نیز نشان می‌دهد که طبق شکل (۷) واکنش Si و Al با C در گستره وسیعی از دمای واکنش، به صورت خود به خود قابل انجام است؛ در نتیجه انتظار می‌رود فازهای SiC و Al_4C_3 طبق واکنش‌های ذیل تشکیل شود که در مطالعات دیگران نیز حضور کاربید آلومینیوم تأیید شده است [۱۷].



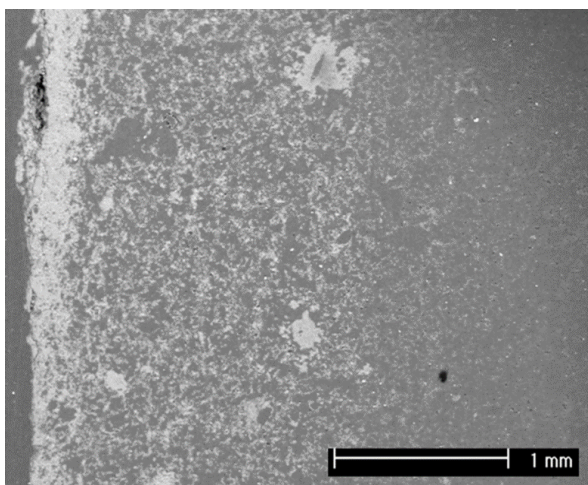
با توجه به اینکه مقدار آلومینا در ترکیب C1 بیش از C2 است، انتظار می‌رود، فاز Al_4C_3 در ترکیب C1 تشکیل شود که الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) در شکل (۱) مؤید آن است.

با انجام واکنش‌های Al_2O_3 با Si و C در سیستم‌های Al-O-Si و Al-O-C و نیز واکنش‌های سیستم Al-Si-C فازهای $\text{Si}(\text{g,l})$ ، C، $\text{SiO}(\text{g})$ ، $\text{CO}(\text{g})$ باقی می‌ماند که فاز SiC می‌تواند طی واکنش‌های ذیل تشکیل شود:

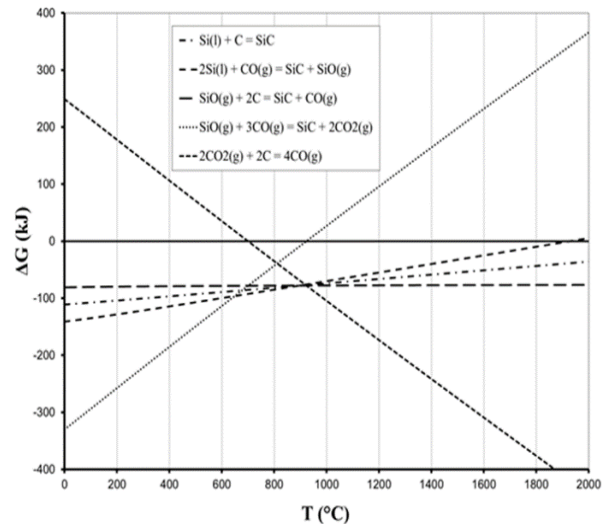
طبق تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در شکل‌های (۱۱) و (۱۲)، پوشش SiC داری ضخامت بیش از ۵۰۰ میکرون بوده و از ساختار تدریجی مناسبی برخوردار است؛ به طوری که فاز SiC از سطح تا عمق به تدریج کاهش می‌یابد. تنها زمانی پوشش تدریجی SiC تشکیل می‌شود که سرعت رخنه‌دهی Si مذاب به درون گرافیت پایه کم‌تر از سرعت واکنش شیمیایی Si با C باشد. به نظر می‌رسد در گرافیت پایه، به دلیل مناسب بودن اندازه حفرات، سرعت رخنه‌دهی Si کم‌تر از سرعت واکنش شیمیایی بوده و در نتیجه Si تا عمق معینی رخنه‌دهی شده و پوشش تدریجی SiC تشکیل داده است [۱۸].



شکل ۱۰- نقشه توزیع عناصر با آنالیز EDS برای پوشش تدریجی SiC با ترکیب C2

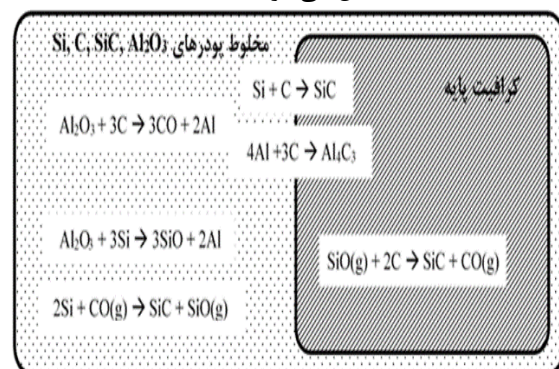


شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) پوشش تدریجی SiC با ترکیب C1



شکل ۸- انرژی آزاد گیبس استاندارد واکنش‌های سیستم Si-O-C در فشار ۱atm

در شکل (۹) شماتیکی از مجموعه واکنش‌های تشکیل پوشش SiC با مواد اولیه Al_2O_3 , Si, C, SiC آورده شده است. می‌توان به طور خلاصه بیان کرد که در مراحل ابتدایی واکنش، Al_2O_3 با Si و C واکنش داده و گازهای SiO، CO، Al_2O به همراه Al تشکیل می‌شود که در مراحل بعدی، Al_2O نیز به Al احیا شده و Al توسط C به Al_4C_3 تبدیل می‌شود.



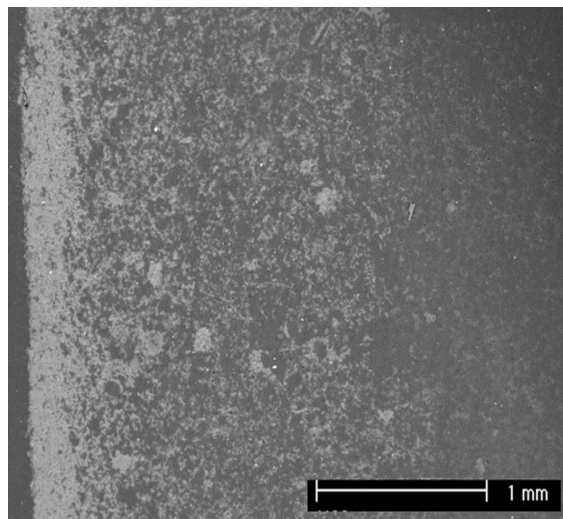
شکل ۹- شماتیک مکانیزم تشکیل پوشش SiC در روش سمانتاسیون بسته‌ای

نقشه توزیع عناصر با آنالیز EDS برای پوشش تدریجی SiC با ترکیب C2 در شکل (۱۰) نشان داده شده است. طبق آنالیز تفکیک انرژی (EDS) در تصاویر ریزساختاری پوشش، قسمت‌های تیره غنی از کربن، خاکستری غنی از SiC و سفید غنی از Si می‌باشد. ضمن آن‌که عنصر Al هم با مقدار کم در ترکیب پوشش وجود دارد.

روشی مناسب برای تشکیل پوشش تدریجی SiC بر گرافیت می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب مواد اولیه در روش سمانتاسیون بسته‌ای تأثیر زیادی بر ساختار پوشش کاربید سیلیسیم ندارد، به طوری که دو نوع ترکیب C1 (حداکثر SiC اولیه بدون پودر گرافیت) و C2 (حداکثر پودر گرافیت اولیه بدون کارسیلیسیم)، دارای نتایج مشابه آنالیز فازی و ریزساختاری هستند. فاز SiC پوشش حاصل از فرایند سمانتاسیون بسته‌ای از نوع β -SiC می‌باشد که در کنار آن فاز Si نیز به مقدار کم حضور دارند. نتایج تجربی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزار HSC Chemistry را تأیید می‌کند. به طوری که بررسی ترمودینامیکی تشکیل پوشش نشان می‌دهد، پوشش کاربید سیلیسیم با رخنه‌دهی Si و SiO به درون خلل و فرج گرافیت و انجام دو واکنش اصلی شامل $\text{Si} + \text{C} \rightarrow \text{SiC}$ و $\text{SiO}(\text{g}) + 2\text{C} \rightarrow \text{SiC} + \text{CO}(\text{g})$ تشکیل می‌شود و با کم بودن سرعت رخنه‌دهی نسبت به سرعت واکنش در گرافیت پایه، پوشش تدریجی تا عمق حدود ۵۰۰ میکرون تشکیل می‌دهد. در واقع پژوهش حاضر روشی را برای تحلیل و شبیه‌سازی واکنش‌های سمانتاسیون بسته‌ای با نرم‌افزار ترمودینامیکی HSC Chemistry ارائه می‌دهد و در نهایت نتایج تجربی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی را تأیید می‌کند.

References:

- 1- E. Fitzer, Carbon reinforcements and carbon/carbon composites, 1st ed., pp. 281-294, Springer Science & Business Media, 1998.
- 2- C.R. Thomas, Essentials of carbon-carbon composites, 1st ed., pp. 204-212, Royal Society of Chemistry, Cambridge, 1993.
- 3- M. Albano, R. Morles, F. Cioeta and M. Marchetti, "Coating effects on thermal properties of carbon carbon and carbon silicon carbide composites for space thermal protection systems", Acta Astronautica, Vol. 99, pp. 276-282, 2014.



شکل ۱۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) پوشش تدریجی SiC با ترکیب C2

نتایج نشان می‌دهد که ترکیب مواد اولیه در روش سمانتاسیون بسته‌ای تأثیر زیادی بر ساختار پوشش کاربید سیلیسیم ندارد، به طوری که دو نوع ترکیب C1 و C2 با تفاوت در وجود SiC و C، دارای نتایج مشابه آنالیز فازی و ریزساختاری هستند.

نتیجه‌گیری

روش سمانتاسیون بسته‌ای در بستری از مخلوط پودری سیلیسیم، آلومینا و گرافیت و دمای 1600°C

- 4- 4-J. Kim, W.J. Kim, D. Choi, J. Park and 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.
- 5- P. Wang, W. Han, X. Zhang, N. Li, G. Zhao, S. Zhou, (ZrB₂-SiC)/SiC oxidation protective coatings for graphite materials, Ceramics International, Vol. 41, pp. 6941-6949, 2015.
- 6- Y. Zhang, Z. Hu, B. Yang, J. Ren, H. Li, Effect of pre-oxidation on the ablation resistance of ZrB₂-SiC coating for SiC-coated carbon/carbon composites, Ceramics International, Vol. 41, pp. 2582-2589, 2015.

- 7- D.C. Rogers, D.M. Shuford and J.I. Mueller, "Formation mechanism of a silicon carbide coating for a reinforced carbon-carbon composite", Proceedings 7th National SAMPE Technical Conference", Albuquerque, USA, pp. 319-337, 1975.
- 8- T. Morimoto, Y. Ogura, M. Kondo and T. Ueda, "Multilayer coating for carbon-carbon composites", Carbon, Vol. 33, pp. 51-357, 1995.
- 9- E. Balomenos, D. Panais, I. Paspaliaris, B. Friedrich, B. Jaroni, A. Steinflod, E. Guglielmini, M. Halmann, M. Epstein, I. Vishnevsky, Carbothermic reduction of alumina: a review of developed processes and novel concepts, Proceedings of EMC, pp. 729-743, 2011.
- ۱۰- م. سعیدی حیدری، ح. بهاروندی، ن. احسانی، تحلیل ترمودینامیکی سینتر بدون فشار نانوکامپوزیت B4C-Si به کمک نرم افزار Factsage، مجله علمی - پژوهشی مواد نوین، دوره ۴، شماره ۱۵، بهار ۱۳۹۳، صفحه ۷۹-۹۰.
- 11- J.F. Shackelford, W. Alexander, CRC Materials science and engineering handbook, p. 237, CRC press, , 2000.
- 12- X.-Y. Yao, H.-J. Li, Y.-L. Zhang, J.-J. Ren, D.-J. Yao, J. Tao, A SiC/ZrB₂-SiC/SiC oxidation resistance multilayer coating for carbon/carbon composites, Corrosion Science, Vol. 57, pp. 148-153, 2012.
- ۱۳- ح. جعفری، بررسی اثر پوشش‌های چندلایه ایجاد شده توسط پودرهای نانو بر خواص مقاومت به اکسیداسیون قطعات FGM بر پایه C/SiC، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ۱۳۹۰.
- 14- Roine, "HSC Chemistry for Windows, version 6.0, chemical reaction and equilibrium software with extensive thermochemical database", Outokumpu Research Oy, Pori, Finland, 2006. J. Ihle, M. Herrmann and J. Adler, "Phase formation in porous liquid phase sintered silicon carbide: Part I: Interaction between Al₂O₃ and SiC", Journal of the European Ceramic Society, Vol. 25, pp. 987-995, 2005.
- 15- D.R. Gaskell, Introduction to the Thermodynamics of Materials, 4th ed, pp. 375-377, Taylor and Francis, New York, 2003.
- 16- J.F. Huang, H.J. Li, X.R. Zeng, X.B. Xiong and K.Z. Li, "Influence of preparation technology on the microstructure and anti-oxidation property of SiC-Al₂O₃-mullite multi-coatings for carbon/carbon composites", Applied surface science, Vol. 252, pp. 4244-42449, 2006.
- 17- Q. Zhu, X. Qiu and C. Ma, "Oxidation resistant SiC coating for graphite materials", Carbon, Vol. 37, pp. 1475-1484, 1999.