



بررسی مقاومت به خوردگی داغ کامپوزیت Mullite-12Yb₂SiO₂ به عنوان ماده سد حرارتی EBC توسط نمک مذاب CMAS در دمای ۱۳۰۰ °C

علیرضا حسینی عارفی^۱، سیده مهلا سیف زاده عمرانی^۱، سید عبدالکریم سجادی^۲، مجید محمدی^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه صنعتی شاهرود

Alireza.Hasaniarefi@mail.um.ac.ir – mahla.seifzadeh@mail.um.ac.ir – Sajjadi@um.ac.ir –
Majid.mohammadi@shahroodut.ac.ir

چکیده

پوشش‌های سد محیطی (EBCs) به‌عنوان پوشش محافظ اجزای سیلیسیمی در موتورهای توربین گازی برای جلوگیری از واکنش سطحی با بخار آب آزاد شده حاصل از احتراق محصولات هیدروکربنی استفاده می‌شوند. واکنش‌های ترموشیمیایی بین کلسیم-منیزیم-آلومیناسیلیکات (CMAS) بر پایه ماسه و خاکستر آتشفشانی در دماهای بالاتر از ۱۳۰۰ °C منجر به تخریب اجزای سرامیکی می‌شوند. در این پژوهش، پودرهای مونوسیلیکات ایتربیم (Yb₂SiO₅) و مولایت (3Al₂O₃.2SiO₂) سنتز و با درصد مشخصی باهم مخلوط شدند تا به عنوان پوشش سد محیطی بررسی شوند. جهت بررسی رفتار خوردگی داغ، پودر CMAS سنتز و در دمای ۱۳۰۰ °C برای زمان‌های مختلف روی نمونه کامپوزیتی قرار داده شد. شناسایی فازهای موجود در پودرهای سنتز شده اولیه و فازهای تشکیل شده روی سطح نمونه‌ها تحت خوردگی داغ، با استفاده از تکنیک پراش اشعه ایکس (XRD) صورت گرفت. از میکروسکوب الکترونی روبشی جهت بررسی مورفولوژی و مشاهده سطح مقطع نمونه‌های خورده شده استفاده شد. نتایج نشان داد که رفتار خوردگی پوشش کامپوزیتی بعد از ۴۸ ساعت واکنش با CMAS در دمای ۱۳۰۰ °C قابل قبول می‌باشد به طوری که رشد پوسته واکنشی بعد از گذشت این مدت به یک حالت پایدار رسید.

کلمات کلیدی: خوردگی داغ، سد پوشش حرارتی، نمک خورنده، SiC

۱- مقدمه

نگرانی‌های اقتصادی و محیطی، بهره‌وری و نفوذ بالاتر و کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای دلیل نیاز روزافزون توسعه توربین‌های گازی دمای بالا می‌باشد. بهبود تکنولوژی خنک کاری، انتخاب مواد و پوشش‌دهی برای رسیدن به دمای ورودی بالا ضروری است [۱]. کامپوزیت سرامیکی SiC/SiCf جزء مواد امیدوار کننده با ظرفیت دمایی و ساختاری مناسب برای پاسخ‌گویی به نیازهای نسل بعدی موتورهای توربین گازی می‌باشد [۲]. یکی از موانع عمده در اجرای بخش داغ اجزاء کامپوزیت‌های سرامیکی، عدم دوام زیست محیطی در محیط‌های احتراق است [۳]. EBC نیاز حفاظت کامپوزیت‌های سرامیکی در برابر تخریب ناشی از بخار آب را پاسخ می‌دهد. نیاز کلیدی برای پوشش EBC موفقیت آمیز شامل: پایداری زیست محیطی، چسبندگی، سازگاری شیمیایی و کاهش تنش‌ها است [۴]. با توجه به نیازهای روز افزون هوا فضا و انرژی، پژوهش‌های فراوانی در زمینه‌ی پوشش‌های سطوح سرامیکی بر پایه کاربرد سیلیسیم (SiC) انجام شده است. هدف اصلی این پژوهش‌ها بهبود مقاومت به خوردگی سرامیک‌ها در مقابل نمک مذاب بوده است [۵].

۲- روش پژوهش

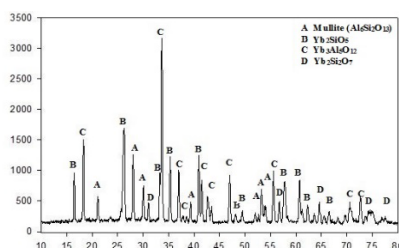
در این پروژه، قرص‌های متراکم از پودرهای M-12Yb در دمای ۱۵۵۰ °C و فشار ۵۵ MPa تحت فشار تک محوری پخت شدند. مواد مورد استفاده به عنوان نمک مذاب 35CaO-10MgO-7Al₂O₃-48SiO₂ همراه پلی اتیلن و گلوله‌های Al₂O₃ به



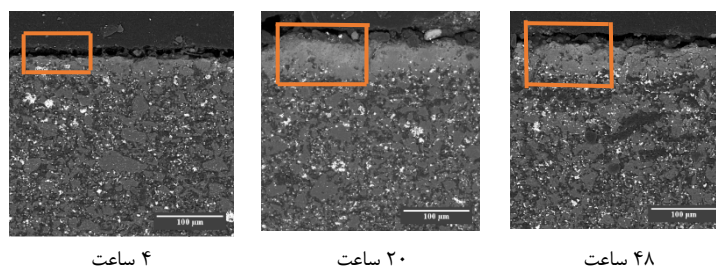
مدت ۴ ساعت برای داشتن مخلوط همگن آسیا شدند. در ادامه، به مدت ۱۰ ساعت در دمای اتاق خشک گردیدند. این مواد به عنوان پوشش بر روی نمونه‌های قرصی اعمال شدند و سپس به بررسی مقاومت به خوردگی داغ نمونه‌ها در دمای 1300°C در کوره تحت زمان‌های مختلف ۴، ۲۰ و ۴۸ ساعت پرداخته شد.

۳- نتایج، بحث و نتیجه گیری

در بررسی مقاومت خوردگی دمای بالای پوشش‌های EBC توسط نمک مذاب CMAS میزان رشد پوسته واکنشی در معرض نمک مذاب به عنوان معیار میزان مقاومت به خوردگی لحاظ می‌شود. شکل ۱ الگوی پراش اشعه ایکس کامپوزیت M-12Yb بعد تفجوشی در دمای 1550°C را نشان می‌دهد. طبق شکل ۱ فازهای اصلی، مولایت، مونوسیلیکات ایتربیم و بیشترین محصول بین ترکیب مولایت و مونوسیلیکات ایتربیم به جای دی‌سیلیکات ایتربیم فاز گارنت می‌باشد. شکل ۲ مورفولوژی خوردگی (لایه واکنشی) نمونه کامپوزیتی M-12Yb در دمای 1300°C تحت حمله نمک مذاب CMAS بعد از گذشت ۴، ۲۰ و ۴۸ ساعت را نمایش می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود بعد از گذشت مدت کوتاهی (۴ ساعت) در معرض نمک مذاب، لایه حاصل از واکنش، مولایت و مونوسیلیکات ایتربیم و سایر محصولات با نمک مذاب است. براساس اطلاعات جدول ۱، ترکیب شیمیایی در لایه واکنشی در قسمت‌های مشخص شده در شکل ۲ با افزایش زمان خوردگی داغ، تغییر می‌کند. بنابراین بعد از گذشت ۲۰ ساعت، Yb حل شده به حد ماکزیمم خود می‌رسد. اگرچه بعد از گذشت ۴۸ ساعت، میزان Yb در لایه واکنشی به کمتر از نمونه ۲۰ ساعت رسید. میزان Ca با افزایش زمان آنیل افزایش می‌یابد در حالی که میزان Al تغییرات زیادی نکرده است.



شکل ۱- الگو XRD پودر کامپوزیتی Mullite-12%wt Yb₂SiO₂ پس از تفجوشی در دمای 1550°C .



۴ ساعت

۲۰ ساعت

۴۸ ساعت

شکل ۲- تصویر SEM سطح مقطع نمونه بعد از ۴، ۲۰ و ۴۸ ساعت خوردگی داغ در معرض نمک مذاب CMAS در دمای 1300°C .



جدول ۱- ترکیب شیمیایی قسمت‌های مشخص شده در شکل ۱ با آنالیز EDS با افزایش زمان خوردگی داغ

درصد عناصر زمان	O	Mg	Al	Si	Ca	Yb
۴ ساعت	۴۹,۴۴	۰,۳۰	۱۷,۳۱	۸,۹۹	۲۲,۴۹	۱,۵۴
۲۰ ساعت	۳۴,۵۱	۰,۶۳	۲۱,۶۱	۹,۱۷	۲۵,۵۱	۸,۵۷
۴۸ ساعت	۳۷,۰۵	۰,۰۴	۲۰,۷۶	۷,۱۷	۳۲,۲۴	۲,۷۳

۴- مراجع

- 1- Hasani A, Mohammadi M, Hajian M, Nieai AA. Synthesis of spherical mullite/Yb₂SiO₅ composite EBC powder by using mechanical alloying and spray dry processes. International Journal of Materials Research. 113(7):626-34; 2022.
- 2- D. Anson and D. Richerson, "The benefits and challenges of the use of ceramics in gas turbines," Progress in Ceramic Gas Turbine Development, vol. 1, pp. 1-10, 2002.
- 3- E. J. Opila and R. E. Hann, "Paralinear oxidation of CVD SiC in water vapor," Journal of the American Ceramic Society, vol. 80, pp. 197-205, 1997.
- 4- K. N. Lee, "Current status of environmental barrier coatings for Si-based ceramics," Surface and Coatings Technology, vol. 133, pp. 1-7, 2000.
- 5- K. N. Lee, D. S. Fox, J. I. Eldridge, D. Zhu, R. C. Robinson, N. P. Bansal, et al., "Upper temperature limit of environmental barrier coatings based on mullite and BSAS," Journal of the American Ceramic Society, vol. 86, pp. 1299-1306, 2003.