

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ К ОКИСЛЕНИЮ И АБЛЯЦИИ УГЛЕРОД-КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. А. ДИДЕНКО, А. Н. АСТАПОВ, И. В. СУКМАНОВ

Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация

Углерод-керамические композиционные материалы (УККМ) являются перспективными высокотемпературными материалами, работоспособными в условиях аэрогазодинамического обтекания и нагрева при температурах до 2000 °С и выше. Их функционирование в кислородосодержащих средах может быть обеспечено путем защиты армирующих углеродных волокон от окисления за счет образования керамической матрицей газоплотного оксидного слоя, ограничивающего скорость диффузии кислорода. Однако композиты класса C_f/SiC характеризуются быстрой абляцией при указанных температурах, поскольку окисление карбида кремния переходит в активный режим, что приводит к потере его защитных свойств по отношению к углеродным волокнам [1–3]. Увеличение рабочих температур и улучшение работоспособности в окислительных средах должны быть обеспечены путем модификации композитов C_f/C , C_f/SiC и $C_f/C-SiC$ тугоплавкими соединениями, поэтому поиск эффективных составов матриц УККМ является одной из приоритетных задач современного материаловедения.

Одним из подходов, позволяющих улучшить эксплуатационные свойства композитов с керамической матрицей, является создание самовосстанавливающихся керамических материалов, характеризующихся формированием жидких оксидных фаз в широком диапазоне температур, способных заполнять трещины и защищать углеродные волокна. Для этих целей в состав композитов вводят компоненты, содержащие бор, эффективные при низкотемпературном (500–1000 °С) окислении за счет образования B_2O_3 , а также соединения, окисление которых обеспечивает формирование диоксида кремния, отвечающего за окислительную стойкость при температурах 1200–1500 °С [4].

Для достижения самовосстановления керамических материалов при более высоких температурах в их состав необходимо вводить тугоплавкие компоненты, способные к образованию жидких оксидных фаз. Цирконий и гафний являются наиболее широко изучаемыми добавками для углерод-керамических композитов из-за высоких температур плавления их карбидов и боридов и, что более важно, оксидов. Хорошо известно, что стойкость к окислению и абляции во многом зависит от состава и микроструктуры образующихся оксидных слоев, способных защищать композиты от воздействия агрессивных сред [5]. Однако процесс низкотемпературного окисления приводит к образованию пористых структур ZrO_2 и HfO_2 , которые могут обеспечивать формирование диффузионных каналов для проникновения кислорода в композиты [6]. Для повышения стойкости к абляции при сверхвысоких температурах возможным подходом могло бы стать введение в композиты C_f/C многофазной матрицы на основе ультравысокотемпературной керамики (УВТК) [7, 8].

Существует большое количество исследований, изучающих влияние состава матрицы на свойства ультравысокотемпературных композитов с керамической матрицей (УВТККМ). Среди других факторов, влияющих на стойкость УВТККМ к окислению и абляции, можно выделить тип волокна, его содержание [9, 10], структуру преформы или ее состав [6, 11], наличие интерфазы [12]. Способ получения и особенности синтеза также оказывают существенное влияние на структуру и фазовый состав конечного продукта и, как следствие, на его работоспособность в условиях окисления и абляции [13, 14]. Особенности высокотемпературного поведения изучаются также при придании композитам особой структуры путем их модификации различными добавками (наночастицами, нанопроволоками, стержнями, похожими на Z-образные штыри, и т. д.) [15–17].

Значительное количество исследований подтверждает перспективность УВТККМ, которые в настоящее время рассматриваются как потенциальные кандидаты для применения в теплонагруженных конструкциях и стойких к абляции элементах гиперзвуковых аппаратов. А привлекательность инновационных достижений в области УВТККМ и необходимость эксплуатации в более экстремальных условиях будут по-прежнему стимулировать исследования в этой области.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-10258-П.

Список литературы

- 1 Promising ultra-high-temperature ceramic materials for aerospace applications / E. P. Simonenko [et al.] // Russ. J. Inorg. Chem. 2013. – Vol. 58, no. 14. – P. 1669–1693. – DOI : 10.1134/S0036023613140039.
- 2 **Jacobson, N.** Active oxidation of SiC / N. Jacobson, D. L. Myers Oxid. Met. – 2011. – Vol. 75. – P. 1–25. – DOI : 10.1007/s11085-010-9216-4.
- 3 Theoretical investigation for the active-to-passive transition in the oxidation of silicon carbide / J. Wang [et al.] // Am. Ceram. Soc. – 2008. – Vol. 91. – P. 1665–1673. – DOI : 10.1111/j.1551-2916.2008.02353.x.
- 4 Preparation and hydrothermal corrosion behavior of C_f/SiCN and C_f/SiHfBCN ceramic matrix composites / J. Yuan // J. Eur. Ceram. Soc. – 2015. – Vol. 35, no. 12. – P. 3329–3337.
- 5 Advances in ultra-high temperature ceramics, composites, and coatings / D. Ni [et al.] // J. Adv. Ceram. – 2022. – Vol. 11. – P. 1–56. – DOI : 10.1007/s40145-021-0550-6.
- 6 Microstructure and ablation behavior of C/C-SiC-(Zr_xHf_{1-x})C composites prepared by reactive melt infiltration method / Z. Liu [et al.] // Materials. – 2023. – Vol. 16. – P. 2120. – DOI : 10.3390/ma16052120.
- 7 Ultra-high-temperature ablation behavior of SiC-ZrC-TiC modified carbon/carbon composites fabricated via reactive melt infiltration / Y. Zeng [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. – 2020. – Vol. 40, is. 3. – P. 651–659. – DOI : 10.1016/j.jeurceramsoc.2019.10.027.
- 8 Effects of LaB₆ on composition, microstructure and ablation property of the HfC-TaC-SiC doped C/C composites prepared by precursor infiltration and pyrolysis / C. Fang [et al.] // Corros. Sci. – 2021. – Vol. 184. – P. 109347. – DOI : 10.1016/j.corsci.2021.109347.
- 9 Effect of PAN-based and pitch-based carbon fibres on microstructure and properties of continuous C_f/ZrB₂-SiC UHTCMCs / D. Sciti [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. 2021. – Vol. 41. – Es. 5. – P. 3045–3050. – DOI : 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.05.032.
- 10 Ablation behavior and thermal conduction mechanism of 3D ZrC-SiC-modified carbon/carbon composite having high thermal conductivity using mesophase-pitch-based carbon fibers and pyrocarbon as heat transfer channels / D. Huang [et al.] // Composites Part B. – 2021. – Vol. 224. – P. 109201. – DOI : 10.1016/j.compositesb.2021.109201.
- 11 Influence of carbon preform density on the microstructure and ablation resistance of CLVD-C/C-ZrC-SiC composites / Q. He [et al.] // Corros. Sci. – 2021. – Vol. 190. – P. 109648. – DOI : 10.1016/j.corsci.2021.109648.
- 12 Effect of PyC interface phase on the cyclic ablation resistance and flexural properties of two-dimensional C_f/HfC composites / T. Feng [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. – 2021. – Vol. 41. – Es. 1. – P. 158–166. – DOI : 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.08.049.
- 13 The effect of carbon source addition order during sol-gel process on the properties of C/C-ZrC-SiC composites / C. Zeng [et al.] // Ceram. Int. – 2021. – Vol. 47, is. 24. – P. 35366–35377. – DOI : 10.1016/j.ceramint.2021.09.080.
- 14 Microstructural regulation, oxidation resistance, and mechanical properties of C_f/SiC/SiHfBOC composites prepared by chemical vapor infiltration with precursor infiltration pyrolysis / Y. Lyu [et al.] // J. Adv. Ceram. – 2022. – Vol. 11. – P. 120–135. – DOI : 10.1007/s40145-021-0521-y.
- 15 Microstructure, mechanical and anti-ablation properties of SiC_{nw}/PyC core-shell networks reinforced C/C-ZrC-SiC composites fabricated by a multistep method of chemical liquid-vapor deposition / Q. He [et al.] // Ceram. Int. – 2019. – Vol. 45. – P. 20414–20426. – DOI : 10.1016/j.ceramint.2019.07.018.
- 16 Structural characteristics and ablative behavior of C/C-ZrC-SiC composites reinforced with "Z-pins like" Zr-Si-B-C multiphase ceramic rods / X. Qing [et al.] // Ceram. Int. – 2020. – Vol. 46. – P. 18895–18902. – DOI : 10.1016/j.ceramint.2020.04.211.
- 17 Improved microstructure and high temperature mechanical properties of C/C-SiC composites by introduction of ZrC nanoparticles / J. J. Sha [et al.] // Ceram. Int. – 2020. – Vol. 46. – Is. 6. – P. 8082–8091. – DOI : 10.1016/j.ceramint.2019.12.034.

УДК 536.24

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ВНУТРИ ЭКРАННО-ВАКУУМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ С УЧЕТОМ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА ВНУТРИ СЛОЕВ

М. С. ЕГОРОВА, О. В. ТУШАВИНА

Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация

С развитием ракетно-космической индустрии возрастают требования к защите космических аппаратов от избыточного тепла и различного рода излучений. Экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ) является одним из материалов, которые обеспечивают эффективное терморегулирование в космических аппаратах. Уникальные теплоизоляционные характеристики ЭВТИ позволяют снизить интенсивность теплообмена элементов конструкции и оборудования космического аппарата с окружающей средой. Однако для эффективной работы ЭВТИ необходим учет скорости распространения тепла внутри слоев материала.

Математическое моделирование теплопереноса внутри ЭВТИ с учетом скорости распространения тепла внутри слоев материала является актуальной задачей для обеспечения эффектив-