

Информация, на основе которой проводится адаптация РЛС, должна включать в себя не только обнаруженные цели и их координаты, результаты распознавания классов целей, но и результаты более глубокой, интеллектуальной обработки получаемой информации. Эти результаты должны реализовываться в распознавании тактических ситуаций и различных вариантов внешних условий.

Список литературы

- 1 Татузов, А. Л. Нейронные сети в задачах радиолокации. Кн. 28 / А. Л. Татузов. – М. : Радиотехника, 2024. – 432 с.
- 2 Радиолокационные системы : учеб. для вузов. – М. : Радиотехника, 2023. – 440 с.
- 3 Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. – М. : Радиотехника, 2007. – 512 с.

УДК 666.762+539.422.5

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ УГЛЕРОД-КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ К ОКИСЛЕНИЮ И АБЛЯЦИИ

А. А. ДИДЕНКО, А. Н. АСТАПОВ, И. В. СУКМАНОВ
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Поиск новых сверхвысокотемпературных конструкционных материалов обусловлен постоянной необходимостью улучшения тактико-технических характеристик скоростных изделий ракетной и аэрокосмической техники. Армированные углеродными волокнами композиты с керамической матрицей на основе SiC являются перспективными материалами для высокотемпературных применений, работающими в условиях аэрогазодинамического потока [1]. Их функционирование в кислородсодержащих средах обеспечивается защитой углеродных волокон от окисления вплоть до 1700 °С за счет формирования матрицей газонепроницаемого оксидного слоя, препятствующего диффузии кислорода вглубь материала. Повышение температуры приводит к выделению газообразной монооксида кремния и потере сплошности оксидного слоя. В результате защитная способность таких композитов по отношению к углеродным волокнам снижается из-за перехода пассивного окисления в активное, наблюдаемого для SiC при этих температурах [2]. Поэтому значительный интерес представляют исследования, которые направлены на создание жаропрочных углеродсодержащих композитов, способных обеспечить работоспособность изделий из них при температурах выше 1700 °С.

Эффективным методом модификации композитов, армированных углеродными волокнами, представляется введение в матрицу тугоплавких компонентов, в качестве которых применяют ультравысокотемпературную керамику (УВТК). Zr и Hf являются наиболее широко изученными добавками для углерод-керамических композиционных материалов благодаря высоким температурам плавления их карбидов, боридов и, что более важно, оксидов. К сожалению, процесс окисления приводит к образованию пористых структур ZrO₂ и HfO₂, которые могут служить диффузионными каналами для проникновения кислорода внутрь композитов [3]. Для повышения стойкости к абляции при сверхвысоких температурах возможным подходом может стать создание многофазных матриц из УВТК, о чем свидетельствует значительное количество исследований влияния состава матриц на свойства получаемых композитов [4, 5].

При разработке эффективной системы защиты необходимо учитывать не только температуру плавления формирующихся оксидов, но и особенности морфологии оксидной пленки, поэтому оптимизация состава и микроструктуры оксидного слоя имеет большое значение. Грамотно организованная защитная пленка должна одновременно препятствовать интенсивному массопереносу реагентов, ослаблять действие теплового потока, а также снижать механическую эрозию и денудацию. В то же время для формирования пленки, способной улучшить стойкость композита к окислению и абляции, необходимо достаточное количество керамической составляющей, которая обеспечивает образование большого количества продуктов окисления. Равномерно распределенные частицы керамики способны создать гетерогенный оксидный слой, который предотвращает диффузию окислителей (за счет высокой газоплотности, вызванной наличием фаз в вязко-текучем состоянии) и противостоит механическому оголению (за счет каркасности структуры, обеспеченной частичным спеканием зерен тугоплавких фаз). Кроме

того, пористость и размер керамических частиц также являются важными факторами, влияющими на стойкость к абляции. Во время огневого воздействия поры служат каналами для диффузии окислителей, что влияет на скорость образования оксидной пленки. Дисперсность керамических частиц влияет на скорость их окисления, размер формирующихся частиц оксидных фаз, способность к агломерации и спеканию, что обуславливает морфологию структуры оксидной пленки.

Другими способами повышения стойкости ультравысокотемпературных керамоматричных композитов к окислению и абляции являются использование различных типов волокон [6] или варьирование их доли [7], модификация структуры преформы или ее состава [3, 8], наличие интерфазы [9]. Методы получения и особенности синтеза [10, 11], как и модификация композитов различными добавками (наночастицами, нановолокнами, «Z-образными штифтами» и т. д.) или придание им особой структуры [12], также оказывают существенное влияние на структуру и фазовый состав конечного продукта и, как следствие, на его поведение при высоких температурах.

Хотя большое разнообразие методов, применяемых для улучшения высокотемпературных свойств углерод-керамических композитов, делает сравнение результатов весьма сложным, общие рекомендации по улучшению стойкости к окислению и абляции могут быть следующими. Ключом к улучшению антиабляционных характеристик является обеспечение защитной способности матрицы и теплопроводности композитов. Для повышения способности матрицы к самозащите необходимо обеспечить ее сплошность, низкую пористость и равномерное распределение УВТК, а также учесть состав формирующихся оксидных слоев, способных изолировать матрицу и волокна от пламени. Для обеспечения эффективной защиты необходима газоплотная оксидная пленка, ограничивающая массоперенос реагентов [13, 14]. Равномерное распределение продуктов окисления УВТК в стеклообразной фазе с невысокой вязкостью имеет решающее значение для предотвращения бурного испарения газов и повышения защитной способности пленки. Поэтому очень важно повысить термохимическую стабильность защитных слоев путем оптимизации их состава и микроструктуры, что обеспечивается тщательным контролем процесса производства. Высокая теплопроводность и высокая плотность композитов являются решающими факторами для организации теплопереноса в них.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00352.

Список литературы

- 1 A comprehensive study of ceramic matrix composites for space applications / S. Dhanasekar [et al.] // Adv. Mater. Sci. Eng. – 2022. – Vol. 2022. – Article ID 6160591.
- 2 **Chen, S. Y.** Chemical equilibrium analysis of silicon carbide oxidation in oxygen and air / S.Y. Chen, I. D. Boyd // J. Am. Ceram. Soc. – 2019. – Vol. 102. – P. 4272–4284.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 Microstructure, thermophysical properties, and ablation resistance of C/HfC-ZrC-SiC composites / Y. Chen [et al.] // Ceram. Int. – 2019. – Vol. 45. – P. 4685–4691.
- 6 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. – P. 3045–3050.
- 7 **Zoli, L.** Efficacy of a ZrB₂-SiC matrix in protecting C fibres from oxidation in novel UHTCMC materials / L. Zoli // Mater. Des. – 2017. – Vol. 113. – P. 207–213.
- 8 Effects of preform structures on the mechanical and ablation properties of C/ZrC-SiC composites / X. Yang [et al.] // Int. J. Appl. Ceram. Technol. – 2020. – Vol. 17. – P. 1582–1600.
- 9 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. – P. 158–166.
- 10 Microstructure and ablation property of C/C-ZrC-SiC composites fabricated by chemical liquid-vapor deposition combined with precursor infiltration and pyrolysis / Q. He [et al.] // Ceram. Int. – 2019. – Vol. 45. – P. 3767–3781.
- 11 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.
- 12 Effect of surface structure unit of 3D needled carbon fiber preform on the ablation improvement of "Z-pins like" V_{0.9}-Si_{0.1} rod for C/C-ZrC-SiC / T. Tian [et al.] // Ceram. Int. – 2021. – Vol. 47. – P. 33463–33475.
- 13 **Astapov, A. N.** Review of domestic designs in the field of protecting carbonaceous materials against gas corrosion and erosion in high-speed plasma fluxes / A. N. Astapov, V. S. Terent'eva // Russ. J. Non-Ferrous Met. – 2016. – Vol. 57, no. 2. – P. 157–173.
- 14 **Терентьева, В. С.** Концептуальная модель защиты особожаропрочных материалов в гиперзвуковых потоках окислительного газа / В. С. Терентьева, А. Н. Астапов // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2017. – № 3. – С. 51–64.