



УДК 666.7

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-8-8

**КЕРАМИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
С ВЫСОКОЙ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СТОЙКОСТЬЮ  
ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ  
(ОБЗОР)**

О.Ю. Сорокин

*кандидат технических наук*

Д.В. Гращенко

*кандидат технических наук*

С.Ст. Солнцев

С.А. Евдокимов

**Июнь 2014**

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 666.7

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-8-8

*О.Ю. Сорокин<sup>1</sup>, Д.В. Гращенков<sup>1</sup>, С.Ст. Солнцев<sup>1</sup>, С.А. Евдокимов<sup>1</sup>*

## **КЕРАМИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ВЫСОКОЙ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СТОЙКОСТЬЮ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ (ОБЗОР)**

*Показана перспективность создания материалов нового поколения для изготовления конструкций на их основе для авиационной техники, способных работать в окислительных средах при высоких температурах. Рассмотрены основные направления создания новых высокотемпературных композиционных материалов со сверхвысокотемпературной керамической матрицей.*

**Ключевые слова:** *окислительная стойкость, высокотемпературные композиционные материалы, керамика, матрица.*

*O.Ju. Sorokin, D.V. Grashhenkov, S.St. Solncev, S.A. Evdokimov*

## **CERAMIC COMPOSITE MATERIALS WITH HIGH OXIDATION RESISTANCE FOR THE NOVEL AIRCRAFTS (REVIEW)**

*Future prospect of novel oxidation-resistant materials for aviation purposes was highlighted. The key methods of their processing with ultra-high temperature ceramic matrix (UHTC) were discussed.*

**Keywords:** *oxidation resistance, composite, ceramics, matrix.*

---

<sup>1</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Актуальность создания высокотемпературных материалов и теплонагруженных конструкций на их основе, способных работать в окислительной среде при температуре 2000°C и выше, обусловлена созданием авиационных и ракетных двигателей нового поколения с повышенными тактико-техническими, экологическими и экономическими показателями [1].

Одним из направлений создания данного класса материалов является разработка композитов, в которых в качестве матричного материала применяется сверхвысокотемпературная керамика (ultra high temperature ceramics) на основе диборидов, карбидов, нитридов таких элементов, как Hf, Zr, Ti, Ta, а также карбида кремния, которые, согласно данным таблицы, имеют наиболее высокие температуры плавления ( $T_{пл}$ ).

### Некоторые свойства высокотемпературных соединений [2]

Материал	Кристаллическая структура	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Температура плавления, °С
HfB <sub>2</sub>	Гексагональная	11,2	3380
HfC	Гранецентрированная кубическая	12,76	3900
HfN	Гранецентрированная кубическая	13,9	3385
ZrB <sub>2</sub>	Гексагональная	6,1	3245
ZrC	Гранецентрированная кубическая	6,56	3400
ZrN	Гранецентрированная кубическая	7,29	2950
TiB <sub>2</sub>	Гексагональная	4,52	3225
TiC	Кубическая	4,94	3100
TiN	Гранецентрированная кубическая	5,39	2950
TaB <sub>2</sub>	Гексагональная	12,54	3040
TaC	Кубическая	14,50	3800
TaN	Кубическая	14,30	2700
SiC	Полиморфная	3,21	Диссоциация при 2545°С

Из данных таблицы следует, что перечень материалов с температурой плавления >3000°С насчитывает лишь ограниченное количество неоксидных соединений. Более того, высокая температура плавления является лишь одним из требований к композициям на основе сверхвысокотемпературной керамики. Среди прочих требований следует рассматривать такие свойства материала, как прочность при высокой температуре, высокий коэффициент теплопроводности, низкий температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), плотность, а также стоимость исходных компонентов и технологию его получения [3–5]. Одновременно с этим композиционные материалы со сверхвысокотемпературной керамической матрицей должны обладать высокими удельными прочностными характеристиками, что может быть достигнуто путем использования в качестве армирующего элемента различных волокон (например, углеродных), нанотрубок, вискеров, ультрадисперсных порошков и других наполнителей.

Одним из наиболее важных требований к современным керамическим композиционным материалам является высокая окислительная стойкость при температуре 2000°С и выше. Композиционные материалы класса C–SiC, применяемые ранее в качестве теплозащиты наиболее теплонапряженных участков корпуса (кромки крыла, носовой кок) орбитального корабля «Буран», способны работать при температуре до 1650°С и, по всей видимости, неприменимы или требуют серьезной доработки, в том числе – применения специальных покрытий [4, 6–11].

В отличие от традиционной технологии получения материала класса C–SiC, предусматривающей проведение жидкофазной пропитки углеродного каркаса кремнием и сплавами на его основе, необходимо в качестве импреганта использовать сплавы на основе более высокотемпературных материалов, например, циркония – с образованием

ZrC ( $T_{пл}=3400^{\circ}\text{C}$ ). Для снижения температуры проведения пропитки до  $1200^{\circ}\text{C}$  авторами работы [12] предлагается использовать сплав системы Zr–Cu.

С другой стороны, как показывают результаты работ [2, 13], увеличение окислительной стойкости возможно путем применения одновременно сразу нескольких высокотемпературных соединений – добавление элементов с высокой температурой плавления, таких как Nb, V и других, а также соединений редкоземельных элементов. Так, в работе [2] использованы порошки диборида гафния (1,99 мкм) и циркония (8,17 мкм), карбида кремния (0,60 мкм), силицида тантала (6,54 мкм) для получения композиций: ZrB<sub>2</sub>–SiC, ZrB<sub>2</sub>–SiC–TaSi<sub>2</sub> и HfB<sub>2</sub>–SiC–TaSi<sub>2</sub>. Смешивание порошков проводили в шаровой мельнице для дальнейшего измельчения компонентов и получения однородной пресс-массы. Для получения монолитных образцов порошки подвергались горячему прессованию при температуре  $1800^{\circ}\text{C}$  и давлении 27 МПа с выдержкой в течение 2 ч. Проведенные авторами работы [2] испытания на окислительную стойкость при  $1500^{\circ}\text{C}$  показали, что максимальная потеря массы образцов не превышает 0,33% (по массе), что гораздо выше, чем для C–SiC композитов.

Данные работы [14] также подтверждают правомерность использования порошка SiC в количестве 20% (по массе), который до температуры  $1700^{\circ}\text{C}$  играет роль пассивного защитного барьера и позволяет получить максимально возможное значение окислительной стойкости в системе ZrB<sub>2</sub>(HfB<sub>2</sub>)–SiC. При температурах  $2300\text{--}2400^{\circ}\text{C}$  на поверхности материала образуется защитная пленка из HfO<sub>2</sub>. Дальнейшее повышение температуры ограничено заметным окислением SiC. В системе ZrB<sub>2</sub>–SiC с повышением температуры до  $1500^{\circ}\text{C}$  защитным барьером служит боросиликатное стекло, образующееся на поверхности в результате взаимодействия ZrB<sub>2</sub> и SiC с кислородом [15].

Необходимо также подчеркнуть, что применение субмикронных порошков высокой чистоты позволяет значительно увеличить окислительную стойкость материала, также как физико-механические и теплофизические характеристики.

Для улучшения окислительной стойкости материала предлагаются следующие направления дальнейшей работы [16]:

– увеличение вязкости боросиликатного стекла, которое возможно путем введения таких добавок, как Cr, Ti, Ta, Nb и V, с образованием диборидов соответствующих элементов. Причем наилучшие результаты получены при использовании Ta. Однако, как следует из сведений, приведенных в работе [14], данный прием повышения окислительной стойкости работоспособен при температурах  $<2000^{\circ}\text{C}$ ;

– предотвращение полиморфного превращения  $ZrO_2$ , так как основной особенностью соединения  $ZrO_2$  является структурный переход моноклинной фазы в тетрагональную при температуре  $1147^\circ C$ , что сопровождается изменением объема на 4,7% [16]. Замена катиона  $Zr$  катионом более высокой валентности, например  $Ta$ , приводит к образованию более тугоплавкого оксида  $Ta_2O_5$  с температурой плавления  $1880^\circ C$  и снижению диффузии углерода;

– применение других кремнийсодержащих соединений (не  $SiC$ ). В качестве альтернативы  $SiC$  в работе [2] предлагается использовать  $Ta_5Si_3$ , обладающий более высокой температурой плавления;

– формирование тугоплавких фаз на поверхности при высоких температурах.

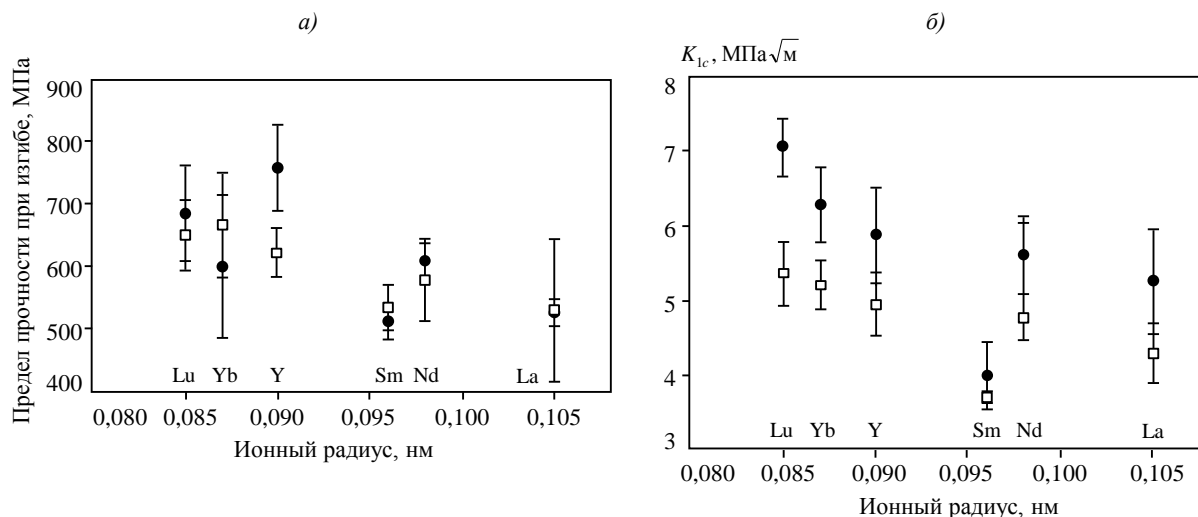
Наиболее перспективным направлением является применение редкоземельных элементов и их соединений (например  $LaB_6$ ,  $La_2O_3$ ,  $Gd_2O_3$ ), которые при окислении образуют тугоплавкие оксиды (циркониты вида  $Re_2Zr_2O_7$ ), способные образовывать защитный барьерный слой толщиной  $>100$  мкм при окислении вплоть до температур  $2300\text{--}2400^\circ C$ , т. е. гораздо более высоких температур плавления по сравнению с такой для боросиликатного стекла. Кроме того, добавка  $LaB_6$  также способствует предотвращению структурного перехода  $ZrO_2$ , о котором упоминалось ранее. Вместе с тем увеличение содержания  $LaB_6$  с 10 до 20% (по массе), как отмечают авторы работы [17], приводит к значительному снижению окислительной стойкости материала, что противоречит данным работы [18].

В работе [19] исследовалась окислительная стойкость керамики вида  $SiC\text{--}AlN\text{--}RE_2O_3$ , в которой  $RE$ :  $Y$ ,  $Lu$ ,  $Er$ ,  $Yb$ ,  $Ce$ ,  $Ho$ ,  $Sm$ . Отмечается, что введение добавок редкоземельных элементов улучшает спекаемость образцов, повышает их плотность, а также предотвращает рост зерна. Проведенные испытания образцов на окислительную стойкость в печи с нагревателем из дисилицида молибдена при температуре  $1500^\circ C$  показали наилучшие результаты для элементов  $Ho$ ,  $Er$ ,  $Lu$ .

Введение в систему  $Si_3N_4\text{--}SiC$  оксидов редкоземельных элементов  $La$ ,  $Nd$ ,  $Sm$ ,  $Y$ ,  $Yb$ ,  $Lu$  (см. рисунок) позволяет значительно улучшить физико-механические характеристики керамических материалов, в частности, предел прочности при изгибе и ударную вязкость [20].

Авторами работы [21] исследовалась окислительная стойкость широкого спектра материалов на основе:  $ZrB_2$ ,  $ZrB_2\text{--}SiC$  (20% по массе),  $HfB_2$ ,  $ZrB_2\text{--}SiC$  (20% по массе)– $LaB_6\text{--}La_2O_3\text{--}Gd_2O_3$ . Образцы из соответствующих порошков подвергали испытанию при температуре  $2700^\circ C$  в плазме, полученной с помощью кислородно-ацетиленовой

горелки. В целом керамика на основе  $\text{HfB}_2$  показала лучшие результаты, чем керамика на основе  $\text{ZrB}_2$ . Установлено, что наилучшие результаты получены на образцах системы  $\text{HfB}_2\text{--La}_2\text{O}_3$ , которые не подверглись какому-либо серьезному разрушению при испытаниях.



Изменение предела прочности при изгибе (а) и коэффициента интенсивности напряжений (б) в зависимости от добавления в материалы  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (●) и  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--SiC}$  (□) редкоземельных элементов с различными ионными радиусами

Вместе с тем в научной литературе существует некоторое противоречие относительно необходимости добавления редкоземельных элементов для увеличения работоспособности керамического материала при температуре  $>2000^\circ\text{C}$  [17, 22]. Однако мнение многих исследователей совпадает в том, что их применение действительно обоснованно при работе композиционного керамического материала при умеренных температурах.

В работе [21] также исследовались 2D композиты системы C–C, подвергшиеся трехкратной вакуумной пропитке суспензиями на основе вышеприведенных порошков, а также порошка  $\text{HfC}$ . Дополнительно к этому все образцы проходили процесс пироуплотнения. Как отмечают авторы работы, наилучшие результаты при температуре испытания  $2700^\circ\text{C}$  в течение 60 с получены на образцах систем C– $\text{HfB}_2$  и C– $\text{HfC}$ .

Интересными представляются результаты работы [23], в которой в качестве армирующего элемента в системах Si–C,  $\text{HfB}_2\text{--SiC}$ ,  $\text{HfC--SiC}$  и  $\text{ZrB}_2\text{--SiC}$  применены углеродные нанотрубки (УНТ) длиной 1–5 мкм (5–20 мкм) и диаметром 20–50 нм. Показано, что их введение в керамическую матрицу может значительно увеличить прочностные характеристики композита. Вместе с тем известно, что до настоящего времени проблема равномерного распределения УНТ по объему матричного материала остается

нерешенной [24]; каких-либо результатов по окислительной стойкости соединений авторы не приводят.

По всей видимости задачу увеличения термopрочности керамического материала, а также его прочностных характеристик, позволяет решить использование в качестве добавки углеродного порошка, представляющего собой пачки графеновых слоев (ПГС) [25]. Как отмечают авторы, добавка ПГС в керамику на основе  $ZrB_2$  в количестве 6% (по массе) позволяет увеличить предел прочности при сжатии в ~2 раза (с 162 до 316 МПа), улучшить спекаемость порошка и заметно приблизиться к теоретической плотности  $ZrB_2$  (с 85 до 97%).

### **Выводы**

Создание сверхвысокотемпературных композиционных материалов с керамической матрицей является сложной наукоемкой задачей, для решения которой необходимо проведение экспериментов с привлечением современных методов исследования (высокотемпературного ДТА, электронной микроскопии и т. д.), направленных на изучение механизмов окисления высокотемпературных соединений при температуре  $>2000^\circ\text{C}$ . Понимание этих механизмов позволит целенаправленно смоделировать структуру и свойства материала нового поколения для работы в окислительной среде при высоких температурах.

Перспективным для получения высокотемпературных керамических композиционных материалов является применение порошков системы  $HfB_2-ZrB_2-HfC-TaC$  с возможной добавкой  $SiC-MoSi_2$ .

Для увеличения окислительной стойкости сверхвысокотемпературных композиционных материалов с керамической матрицей, а также улучшения спекаемости исходных порошков, предотвращения роста зерен при горячем прессовании, целесообразным является применение добавок редкоземельных элементов, влияние которых до конца остается неизученным.

Наличие в керамической матрице углеродных материалов может значительно повысить прочностные характеристики сверхвысокотемпературных композиционных материалов с керамической матрицей, значительно улучшить их стойкость к термоудару, скомпенсировать локальные расширения внутри материала, связанные со структурными переходами образующихся соединений, например:  $ZrO_2$  – переход моноклинной фазы в тетрагональную или  $SiC$  – переход кубической фазы в гексагональную. Необходимо также уделить особое внимание способам введения и контролю качества равномерного распределения углеродных материалов (особенно это касается нанотрубок и сажи).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Jastin J.F., Jankowiak A. Ultra high temperature ceramics: densification, properties and thermal stability //Aerospace Lab. 2011. №3. P. 1–11.
3. Matovic B., Yano T. Silicon Carbide and other carbides: from stars to the advanced ceramics /In: Handbook of advanced Ceramics. Chapter 3.1. 2013. P. 225–244.
4. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» /Под. ред. Е.Н. Каблова. М.: Фонд «Наука и жизнь». 2013. 128 с.
5. Гращенко Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 231–242.
6. Oreka M.M., Talmy I.G., Zaykoski J.A. Oxidation-based materials selection for 2000°C+hypersonic aerosurfaces: Theoretical considerations and historical experience //J. Mater. Sci. 2004. V. 39. P. 5887–5904.
7. Каблов Е.Н., Гращенко Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 20–24.
8. Лебедева Ю.Е., Попович Н.В., Орлова Л.А. Защитные высокотемпературные покрытия для композиционных материалов на основе SiC //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 06 (viam-works.ru).
9. Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Гаврилов С.В. Керамические покрытия для защиты высокопрочной стали при термической обработке //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 3–8.
10. Каблов Е.Н., Гращенко Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С., Севастьянов В.Г. Высокотемпературные конструкционные композиционные материалы на основе стекла и керамики для перспективных изделий авиационной техники //Стекло и керамика. 2012. №4. С. 7–11.
11. Симоненко Е.П., Симоненко Н.П., Севастьянов В.Г., Гращенко Д.В., Кузнецов Н.Т., Каблов Е.Н. Функционально градиентный композиционный материал SiC/(ZrO<sub>2</sub>–HfO<sub>2</sub>–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), полученный с применением золь-гель метода //Композиты и наноструктуры. 2011. Т. 4. С. 52–64.

12. Zhu Y., Wang S., Chen H. Effect of copper on microstructure and mechanical properties of Cf/ZrC composites fabricated by low-temperature liquid metal infiltration //Cer. Int. 2014. V. 40. P. 2793–2798.
13. Bongiorno A., Först C.J., Kalia R.K. A Perspective on Modeling Materials in Extreme Environments: Oxidation of Ultrahigh-Temperature Ceramics //MRS Bulletin. 2006. V. 31. P. 410–418.
14. Gasch M., Ellerby D., Beckman S. Processing, properties and arc jet oxidation of hafnium diboride/silicon carbide ultrahigh temperature ceramics //J. Mater. Sci. 2004. V. 39. P. 5925–5937.
15. Eakins E., Jayaseelan D.D., Lee W.E. Toward Oxidation-Resistant ZrB<sub>2</sub>-SiC Ultra High Temperature Ceramics //Metal. Mater. Trans. A. 2011. V. 42A. P. 878–887.
16. Ермоленко И.Н., Ульянова Т.М., Витязь П.А. Волокнистые высокотемпературные керамические материалы. М.: Наука и техника. 1991. 255 с.
17. Monteverde F., Alfano D., Savino R. Effects of LaB<sub>6</sub> addition on arc-jet convectively heated SiC-containing ZrB<sub>2</sub>-based ultra-high temperature ceramics in high enthalpy supersonic airflows //Corrosion Science. 2013. V. 75. P. 443–453.
18. Williams P.A., Sakidia R., Perepezko J.H. Oxidation of ZrB<sub>2</sub>-SiC ultra-high temperature composites over a wide range of SiC content //J. Eur. Cer. Soc. 2012. V. 32. P. 3875–3883.
19. Magnani G., Antolini F., Beaulardi L. Sintering, high temperature strength and oxidation resistance of liquid-phase-pressureless-sintered SiC-AlN ceramics with addition of rare-earth oxides //J. Eur. Cer. Soc. 2009. V. 29. P. 2411–2417.
20. Lojanová Š., Dusza J., Šajgalík P. Characterization of rare-earth doped Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiC micro/nanocomposites //Proc. and Appl. Of Cer. 2010. V. 4. №1. P. 25–32.
21. Paul A., Jayaseelan D.D., Venugopal S. UHTC composites for hypersonic applications //Am. Cer. Soc. Bul. 2012. V. 91. №1. P. 22–29.
22. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).
23. Stackpoole M., Rom G., Whitt J. UHTC composites with nanotube-reinforcement for advanced TPS applications /In: 3-rd Int. Planetary Probe Workshop. Anavyssos, Attiki. 2005.
24. Гуняев Г.М., Каблов Е.Н., Алексашин В.М. Модифицирование конструкционных углепластиков углеродными наночастицами //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 5–19.

25. Yadhukulakrishnan G.B., Karumuri S., Rahman A. Spark plasma sintering of graphene reinforced zirconium diboride ultra-high temperature ceramic composites //Cer. Int. 2013. №39. P. 6637–6646.

#### REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
2. Jastin J.F., Jankowiak A. Ultra high temperature ceramics: densification, properties and thermal stability //Aerospace Lab. 2011. №3. P. 1–11.
3. Matovic B., Yano T. Silicon Carbide and other carbides: from stars to the advanced ceramics /In: Handbook of advanced Ceramics. Chapter 3.1. 2013. P. 225–244.
4. Dosphehi dlja «Burana». Materialy i tehnologii VIAM dlja MKS «Jenergija–Buran» [Armor for the «Buran». Materials and technologies for VIAM ISS «Energia-Buran»] /Pod. red. E.N. Kablova. M.: Fond «Nauka i zhizn'». 2013. 128 s.
5. Grashhenkov D.V., Chursova L.V. Strategija razvitija kompozicionnyh i funkcional'nyh materialov [Development Strategy composite and functional materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 231–242.
6. Opeka M.M., Talmy I.G., Zaykoski J.A. Oxidation-based materials selection for 2000°C+hypersonic aerosurfaces: Theoretical considerations and historical experience //J. Mater. Sci. 2004. V. 39. P. 5887–5904.
7. Kablov E.N., Grashhenkov D.V., Isaeva N.V., Solncev S.S. Perspektivnye vysokotemperaturnye keramicheskie kompozicionnye materialy [Promising high-temperature ceramic composites] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 20–24.
8. Lebedeva Ju.E., Popovich N.V., Orlova L.A. Zashhitnye vysokotemperaturnye pokrytija dlja kompozicionnyh materialov na osnove SiC [Protective coatings for high-temperature composite materials based on SiC] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 06 (viam-works.ru).
9. Solncev S.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A., Gavrilov S.V. Keramicheskie pokrytija dlja zashhity vysokoprochnoj stali pri termicheskoj obrabotke [The ceramic coating to protect the high-strength steel during heat treatment] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №4. S. 3–8.

10. Kablov E.N., Grashhenkov D.V., Isaeva N.V., Solncev S.S., Sevast'janov V.G. Vysokotemperaturnye konstrukcionnye kompozicionnye materialy na osnove stekla i keramiki dlja perspektivnyh izdelij aviacionnoj tehniki [High-temperature structural composite materials based on glass and ceramic products for advanced aircraft] //Steklo i keramika. 2012. №4. S. 7–11.
11. Simonenko E.P., Simonenko N.P., Sevast'janov V.G., Grashhenkov D.V., Kuznecov N.T., Kablov E.N. Funkcional'no gradientnyj kompozicionnyj material SiC/(ZrO<sub>2</sub>-HfO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), poluchennyj s primeneniem zol'-gel' metoda [Functionally gradient composite material SiC/(ZrO<sub>2</sub>-HfO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), prepared using a sol-gel method] //Kompozity i nanostruktury. 2011. T. 4. S. 52–64.
12. Zhu Y., Wang S., Chen H. Effect of copper on microstructure and mechanical properties of Si/ZrC composites fabricated by low-temperature liquid metal infiltration //Cer. Int. 2014. V. 40. P. 2793–2798.
13. Bongiorno A., Först C.J., Kalia R.K. A Perspective on Modeling Materials in Extreme Environments: Oxidation of Ultrahigh-Temperature Ceramics //MRS Bulletin. 2006. V. 31. P. 410–418.
14. Gasch M., Ellerby D., Beckman S. Processing, properties and arc jet oxidation of hafnium diboride/silicon carbide ultrahigh temperature ceramics //J. Mater. Sci. 2004. V. 39. P. 5925–5937.
15. Eakins E., Jayaseelan D.D., Lee W.E. Toward Oxidation-Resistant ZrB<sub>2</sub>-SiC Ultra High Temperature Ceramics //Metal. Mater. Trans. A. 2011. V. 42A. P. 878–887.
16. Ermolenko I.N., Ul'janova T.M., Vitjaz' P.A. Voloknistye vysokotemperaturnye keramicheskie materialy [High temperature ceramic fiber material]. M.: Nauka i tehnika. 1991. 255 s.
17. Monteverde F., Alfano D., Savino R. Effects of LaB<sub>6</sub> addition on arc-jet convectively heated SiC-containing ZrB<sub>2</sub>-based ultra-high temperature ceramics in high enthalpy supersonic airflows //Corrosion Science. 2013. V. 75. P. 443–453.
18. Williams P.A., Sakidia R., Perepezko J.H. Oxidation of ZrB<sub>2</sub>-SiC ultra-high temperature composites over a wide range of SiC content //J. Eur. Cer. Soc. 2012. V. 32. P. 3875–3883.
19. Magnani G., Antolini F., Beaulardi L. Sintering, high temperature strength and oxidation resistance of liquid-phase-pressureless-sintered SiC-AlN ceramics with addition of rare-earth oxides //J. Eur. Cer. Soc. 2009. V. 29. P. 2411–2417.

20. Lojanová Š., Dusza J., Šajgalík P. Characterization of rare-earth doped Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiC micro/nanocomposites //Proc. and Appl. Of Cer. 2010. V. 4. №1. P. 25–32.
21. Paul A., Jayaseelan D.D., Venugopal S. UHTC composites for hypersonic applications //Am. Cer. Soc. Bul. 2012. V. 91. №1. P. 22–29.
22. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally i redkozemel'nye jelyenty – materialy sovremennyh i budushhih vysokih tehnologij [Rare metals and rare earth elements – materials of current and future high-tech] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 01 (viam-works.ru).
23. Stackpoole M., Rom G., Whitt J. UHTC composites with nanotube-reinforcement for advanced TPS applications /In: 3-rd Int. Planetary Probe Workshop. Anavyssos, Attiki. 2005.
24. Gunjaev G.M., Kablov E.N., Aleksashin V.M. Modificirovanie konstrukcionnyh ug-leplastikov uglerodnymi nanochasticami [Modification of structural carbon fiber with carbon nanoparticles] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 5–19.
25. Yadhukulakrishnan G.B., Karumuri S., Rahman A. Spark plasma sintering of graphene reinforced zirconium diboride ultra-high temperature ceramic composites //Cer. Int. 2013. №39. P. 6637–6646.