

УДК 678.84

Ю.А. Ивахненко<sup>1</sup>, Н.М. Варрик<sup>1</sup>, В.Г. Максимов<sup>1</sup>**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ РАДИОПРОЗРАЧНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБТЕКАТЕЛЕЙ АНТЕНН И ДРУГИХ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-5-5

*Рассмотрены разработанные в настоящее время высокотемпературные материалы для защиты от внешних воздействий радиотехнических систем, размещенных на летательных аппаратах и наземных радиолокационных установках. Показаны тенденции развития радиопрозрачных материалов. Изучены научные литературные источники об используемых в настоящее время радиопрозрачных обтекателях на основе полимерных, кварцевых, стеклокерамических и керамических материалов. Сделан вывод о перспективности разработки новых композиционных материалов на основе высокотемпературных оксидных керамических матриц.*

*Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 14.2. «Новые технологии получения сверхвысокотемпературных керамических и металлических композиционных материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»)* [1].

**Ключевые слова:** радиопрозрачный огнеупорный материал, тугоплавкие волокна, теплозащитный материал.

*The recent developed high-temperature materials for protection against external influences of the radio engineering systems placed on aircraft and land radar installations are considered. Tendencies of development of radiotransparent materials are shown, scientific sources of information about existing radiotransparent radomes based on polymeric, quartz, glass-ceramic and ceramic materials are reviewed, the conclusion is drawn on prospects of development of new composite materials based on high-temperature ceramic matrixes.*

*Work is executed within implementation of the complex scientific direction 14.2. «New technologies of receiving superhigh-temperature ceramic and metal composite materials» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030»)* [1].

**Keywords:** radiotransparent fire-resistant material, refractory fibers, heat insulation.

---

<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

Радиопрозрачные материалы – это диэлектрики, которые не изменяют амплитуду электромагнитной волны, проходящей через них, и не вызывают хаотичного изменения ее фазы. Прозрачность этих материалов для радиоволн означает, что в интервале рабочих температур они имеют очень малые диэлектрические потери и практически не отражают радиоволн.

Возрастающие скорости летательных аппаратов, повышение их маневренности и дальности поражения целей, возможность их применения при любых погодных условиях, повышение требований к радиотехническим характеристикам обусловили потребность в радиопрозрачных обтекателях антенн летательных аппаратов, обладающих рядом механических, тепловых и радиотехнических свойств.

При маневрировании летательного аппарата в конструкции антенного обтекателя возникают высокие механические и термические напряжения, однако требования по радиопрозрачности исключают возможность применения металлов и многих других конструкционных материалов. Используемые для этих целей диэлектрические материалы должны обладать целым комплексом свойств, таких как устойчивость к аэродинамическим нагрузкам, эрозионная стойкость, стойкость к тепловым нагрузкам. В настоящее время разработчики разных стран уделяют большое внимание проблеме получения материалов для изготовления таких обтекателей, обладающих высокой прочностью, высокой эрозионной стойкостью, радиопрозрачностью и отсутствием абляции при высоких температурах, т. е. уноса массы с поверхности обтекателя высокотемпературным скоростным газовым потоком под воздействием тепла, механических сил и агрессивных сред этого потока [1–5].

Широко распространенный класс проницаемых для радиоволн материалов, предназначенных для использования при умеренных температурах, представляют композиционные материалы на основе полимерных матриц. В качестве примера (рис. 1) таких материалов можно привести продукцию АО «ИМЦ Концерна «Вега» (Россия) [6].



Рис. 1. Серийно выпускаемые антенные обтекатели на основе полиимидных материалов (а) и полимерных пен (б) [6]

Радиопрозрачные материалы предназначены для изготовления защитных укрытий антенных систем различного назначения от воздействия внешних факторов, например, обтекателей и укрытий для различных типов антенных систем наземного, воздушного и морского базирования. Предприятие производит композиционные полимерные материалы с низкими значениями тангенса угла диэлектрических потерь ( $<0,01$ ) на основе стеклотканей и полимерных матриц. Прочностные характеристики обеспечивают устойчивость укрытия при скорости ветра до 50 м/с. В качестве полимерных матриц используют полимерные пены и полиимидные материалы. Применение полимерных пен в качестве заполнителя стенок многослойной структуры позволяет получать конструкции, отличающиеся изотропностью радиотехнических характеристик, высокими показателями прозрачности и улучшенными физико-механическими свойствами. Полиимидные материалы обладают высокими диэлектрическими свойствами и механическими показателями: диэлектрическая постоянная  $\epsilon'$  не превышает 3,6; тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  составляет от 0,005 до 0,006; предел прочности при растяжении – от 80 до 100 МПа.

Недостатком материалов этого класса является недостаточно высокая температура эксплуатации – не более 500°C, обусловленная низкими температурами плавления полимерных компонентов композиционного материала.

Существует большое количество высокотемперостойких материалов, устойчивых в окислительных и восстановительных средах, со стабильными диэлектрическими ха-

рактиками как при низких, так и при высоких температурах, на основе кварцевой керамики и стеклокерамических материалов. Так, основными материалами головных антенных обтекателей высокоскоростных летательных аппаратов радиолокационного наведения являются кварцевая керамика, алюмосиликатная керамика, стеклокерамика литий-алюмосиликатного состава и термостойкие стеклокристаллические материалы (ситаллы и ситаллокерамика) [7].

Кварцевая керамика из-за наличия пористости используется в обтекателях летательных аппаратов, эксплуатация которых предусматривает транспортно-пусковые контейнеры.

Стеклокристаллические материалы (ситаллы) в настоящее время являются наиболее широко применяемыми материалами для высокотемпературных обтекателей антенн и радиопрозрачных окон. Ситаллы получают при введении в расплавленное стекло специальных добавок (тонкоизмельченных порошков благородных металлов, меди, диоксида титана). Вокруг зерен этих добавок, которые становятся центрами кристаллизации стекла, происходит рост кристаллов стекла при охлаждении его расплава. Высокопрочные ситаллы получают главным образом на основе стекол систем  $MgO-Al_2O_3-SiO_2$  (кордиеритовые составы) и  $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2$  (нефелиновые составы) путем их объемной регулируемой кристаллизации при термической обработке. В США ситаллы известны под названием Piroceram. Впервые они были разработаны фирмой Dow Corning. В настоящее время материал марки Piroceram 9606 используют для изготовления обтекателей антенн приборов наземного и морского базирования. Этот материал представляет собой стеклокерамику магниев-алюмосиликатной системы с диоксидом титана в качестве катализатора. Кордиерит как главная кристаллическая фаза обеспечивает высокую проницаемость для радиоволн, стойкость к термоудару, высокую прочность. Благодаря высокой твердости, отсутствию пористости и тщательной шлифовке поверхности, материал обладает высокой стойкостью к эрозии, устойчивостью к воздействию морской воды.

Улучшенный материал класса ситаллов разработан российским предприятием ОНПП «Технология». Синтезированный на этом предприятии стеклокерамический материал ОТМ-357 на основе закристаллизованного литий-алюмосиликатного стекла обеспечил требуемые диэлектрические и прочностные характеристики обтекателей в температурном диапазоне от  $-60$  до  $+1000^\circ C$  и показал существенное превосходство по совокупности физико-технических свойств по сравнению с ранее известными ситаллами и пирокерамами, что позволило принять обоснованное решение о создании нового семейства радиопрозрачных обтекателей для летательных аппаратов воздушного базирования на его основе. Технология формования оболочек методом шликерного литья в гипсовые формы (в отличие от традиционного в производстве обтекателей из ситаллов центробежного литья) позволила достичь лучших характеристик по термостойкости, большей адаптивности к условиям мелкосерийного производства. Вместе с тем данная технология оказалась чувствительной к образованию трещин вследствие влаготермусадок и газовыделений в процессе формования и обжига, а также обусловила неравномерность физико-технических характеристик материала по высоте оболочки.

По изготовлению изделий из стеклокерамики в последние годы накоплен определенный опыт, решены многие материаловедческие проблемы, что позволяет находить новые по сравнению с другими материалами конструктивные решения. Антенные обтекатели из ситалла применяют при скоростях  $>3M$ , этот материал может выдерживать перепад температур со скоростью нагрева  $250-300^\circ C/c$ . Однако применяемые в настоящее время ситаллы обладают недостаточными термостойкостью и диэлектрическими характеристиками для условий эксплуатации при температуре на поверхности  $>1100^\circ C$ . Это связано с тем, что температура размягчения стеклокерамических материалов не превышает  $1500^\circ C$ . Дальнейшее улучшение характеристик изделий из стеклокерамических материалов и совершенствование технологического процесса их

изготовления является одним из главных направлений дальнейшего развития в области создания обтекателей для перспективных летательных аппаратов. В настоящее время внимание разработчиков привлекают тугоплавкие материалы с температурами плавления 2000°C и выше. Поэтому для обтекателей высокоскоростных ракет все чаще предлагаются керамические материалы, не подверженные тепловой эрозии, – например нитридкремниевая и алюмооксидная керамика.

Интерес разработчиков к проблеме создания радиопрозрачных материалов с температурами эксплуатации до 2000°C очевиден. В научно-технической литературе существует большое количество сообщений и охранных документов на материалы для радиопрозрачных окон и антенных обтекателей. Как правило, материалы такого назначения представляют собой порошковую керамику на основе тугоплавких соединений, таких как оксиды, нитриды, бориды, возможно, упрочненную волокнами тугоплавких оксидов. Современные технологии позволяют получать большой диапазон свойств за счет изготовления материалов различной пористости (от плотных до высокопористых) и путем модифицирования их различными добавками для придания специальных свойств, а именно – с повышенной излучающей способностью, регулируемой диэлектрической проницаемостью и повышенной термоэрозионной устойчивостью. Слоистая керамика может содержать наружные плотные слои и внутренний пористый слой, а также различные виды керамики [7].

Серию материалов на основе нитрида кремния разработала фирма Ceradyne Inc. Компания производит несколько видов антенных обтекателей из таких материалов, как плавленый кварц, IRBAS, Ceralloy 147-31N и Ceralloy 147-01EXP. Эти материалы используют в ракетных системах, подверженных высоким механическим и термическим нагрузкам, их диэлектрические свойства устойчивы вплоть до 1400°C [8]. На рис. 2 представлен внешний вид обтекателей из плавленого кварца (белого цвета) и материала IRBAS из нитрида кремния (серого цвета). Плавленый кварц ( $\text{SiO}_2$ ) обладает низкими теплопроводностью и температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), проявляет высокую стойкость к термоудару, однако его прочностные свойства невысоки, а температура эксплуатации не превышает 1100°C. Обтекатель из материала IRBAS изготовлен из нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), его прочностные свойства намного выше, чем у плавленого кварца, диэлектрическая постоянная относительно стабильна при повышении температуры, однако тангенс угла диэлектрических потерь стремительно растет после 1000°C. Материал Ceralloy® 147-31N ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) имеет более высокую чистоту, чем материал IRBAS, лучшие прочностные свойства и более стабильные электрические характеристики. Материал Ceralloy® 147-01EXP представляет собой реакционно-спеченный нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), его прочностные свойства выше, чем у кварца, однако ниже, чем у материала 147-31N, но он хорош тем, что его диэлектрические свойства остаются стабильными до 1400°C.

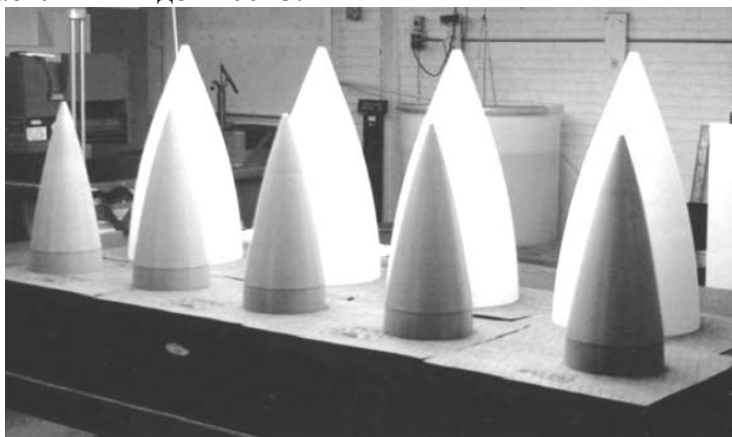


Рис. 2. Антенные обтекатели из плавленого кварца (белые) и материала IRBAS на основе нитрида кремния (серые), производимые компанией Ceradyne Thermo Materials [8]

Компания Ceradyne Inc. и его подразделение Ceradyne Thermo Materials производят обтекатели для ракетного вооружения. Технология их получения включает приготовление порошковой смеси, формование заготовки, ее обжиг и механическую обработку. Основные свойства этой серии радиопрозрачных материалов представлены в таблице.

**Свойства радиопрозрачных материалов компании Ceradyne Inc. [8]**

| Свойства                            | Значения свойств материала |                                |                                |                                                     |
|-------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------|
|                                     | Плавленный кварц           | IRBAS                          | Ceralloy® 147-31N              | Ceralloy® 147-01EXP                                 |
| Состав материала                    | SiO <sub>2</sub>           | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | Реакционно-спеченный Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> |
| Плотность, г/см <sup>3</sup>        | 2                          | 3,18                           | 3,21                           | 1,8–2,5                                             |
| Предел прочности при изгибе, МПа    | 43                         | 550                            | 800                            | 180                                                 |
| Модуль упругости при изгибе, ГПа    | 37                         | 280                            | 310                            | 50–200                                              |
| Теплопроводность, Вт/(м·К)          | 0,8                        | 20                             | 25                             | 6                                                   |
| Диэлектрическая проницаемость       | 3,3                        | 7,6                            | 8                              | 4–6                                                 |
| Тангенс угла диэлектрических потерь | 0,003                      | 0,002                          | 0,002                          | 0,002–0,005                                         |

В патенте 5103239 (фирма Secretary of the Air Force, США) предложено изделие из нитрида кремния Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с зонами разной плотности. Монолитный обтекатель имеет переднюю, заднюю и переходную часть. Плотность передней части 0,75–1 г/см<sup>3</sup>, плотность задней части 1,6–2 г/см<sup>3</sup>, а переходная часть имеет возрастающую плотность. Способ получения обтекателя включает наполнение и компактирование формы частицами кремния, нитрида кремния и фугитивными порообразующими добавками, удаление сформованного компакта из формы, возгонку фугитивных добавок для образования пористой структуры и взаимодействие с азотом для превращения пористой структуры в структуру, содержащую «усы» на основе α-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [9].

В патенте 5573986 (фирма Secretary of the Navy, США) электромагнитное окно изготовлено из керамики состава Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, а в качестве связующего использованы соединения AlPO<sub>4</sub>, ZrP<sub>2</sub>O<sub>7</sub> или их смесь [10].

Из всех используемых в настоящее время материалов лучшими диэлектрическими характеристиками обладает нитрид бора: тангенс угла диэлектрических потерь при 1500°C остается <0,001, а изменение диэлектрической проницаемости спеченного нитрида бора при изменении температуры с 20 до 1350°C не превышает 3%. Однако нитрид бора обладает низкими значениями прочности и твердости, поэтому его применяют в качестве компонента композиционных материалов.

В патенте 4304870 (фирма Secretary of the Navy, США) предложен прочный, стойкий к эрозии диэлектрический керамический композиционный материал, получаемый по порошковой технологии. Композит содержит дискретную фазу нитрида бора, распределенную в матрице Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Частицы BN имеют размер 3–5 мкм и способны выдерживать термические нагрузки без разрушения материала [11].

Материал системы AlN–BN для радиопрозрачных окон высокоскоростных летательных аппаратов и способ его получения запатентованы компанией General Electric (США) [12]. Материал содержит от 0,001 до 35% нитрида бора, до 2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или SiO<sub>2</sub>, остальное – нитрид алюминия. Способ получения конструкционного керамического изделия, такого как электромагнитное окно, включает перемешивание исходных компонентов в виде порошковой смеси, ее формование и уплотнение. Видно (рис. 3),

что диэлектрические свойства получаемого композита при содержании нитрида бора от 5 до 35% незначительно меняются в диапазоне температур – от 0 до 1400°C.

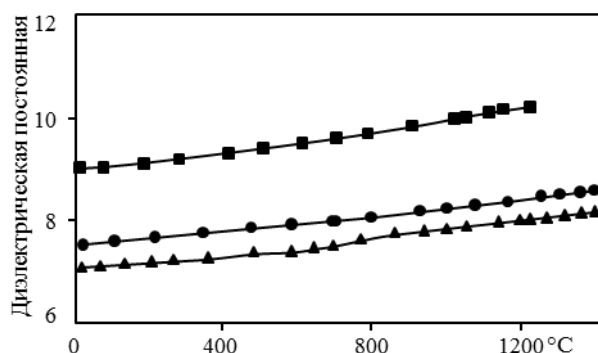


Рис. 3. Температурная зависимость [12] диэлектрической постоянной материала AlN–BN при содержании BN: 5 (■), 25 (●) и 35% (▲)

Корпорация Loral Vought Systems (США) предложила способ получения материала для антенного обтекателя (патент 5627542), который включает перемешивание порошковой смеси, содержащей 20–60% (по массе)  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , 12–40% (по массе) BN и 1–20% (по массе) кислородсодержащей спекающей добавки; формование полученной смеси и ее горячее прессование. В качестве спекающих добавок используют  $\text{MgO}$ ,  $\text{CeO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  или их смесь. Полученный этим способом радиопрозрачный материал имеет плотность 2,4–2,9 г/см<sup>3</sup>, диэлектрическую постоянную 4,5–7 и тангенс угла диэлектрических потерь <0,001. По утверждению заявителей материал способен работать при температурах >2000°C и проявляет склонность к абляции лишь при температуре 2500°C [13].

В патенте 2497783 (ОНПП «Технология», Россия) предложено теплозащитное покрытие для обтекателей, которое может быть использовано для нанесения на внешнюю или внутреннюю поверхность оболочек из нитрида кремния головных антенных обтекателей ракет. Теплозащитное покрытие включает кремнеземный наполнитель, алюмоборофосфатное связующее,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--}3\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--}2\text{SiO}_2$ , а также добавки оксидов натрия, магния и алюминия, нитрида кремния, оксида и нитрида бора в количестве 1–3% (по массе). Покрытие способствует повышению термостойкости и теплозащитных свойств изделий в условиях воздействия интенсивных тепловых и механических нагрузок без изменения диэлектрических характеристик [14].

Двухслойный материал для антенного обтекателя предложен компанией Hughes Missile Systems (США) в патенте 5457471. Материал имеет внутренний слой, выполненный из керамического радиопрозрачного материала, способный сохранять свою целостность в высокоскоростных потоках, и наружный абляционный слой, выполненный из диэлектрического материала, который теряет свою целостность и подвержен абляционному уносу в потоке газа в заранее заданном диапазоне температур [15].

В патенте 5891815 корпорацией Lockheed Martin (США) предложен мультифазный композит для радиопрозрачного окна [16]. Материал содержит (47–52%) AlN, (23–27%)  $\text{SiO}_2$ , (3–7%)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , остальное – BN, его получают методом реакционного спекания порошковой смеси [16]. В результате спекания нитрид алюминия, оксиды кремния и алюминия образуют продукты реакции при нагреве в виде оксинитридного соединения  $\text{Si}_2\text{Al}_4\text{O}_4\text{N}_4$ , называемого  $\beta$ -Sialon.

Следует отметить, что нитридные соединения, такие как нитриды кремния, бора и алюминия, а также оксинитридная керамика, такая как SiAlON, обладая превосходными радиопрозрачными, тепловыми и прочностными свойствами, имеет существен-

ный недостаток – склонность к окислению в высокотемпературных потоках кислородсодержащих газов. В процессе окисления наряду с проникновением кислорода вглубь материала происходит диффузия примесей к поверхности, в результате чего снижаются прочностные свойства материала.

Оксидная керамика обладает высокой стойкостью к окислению, высокими тепловыми и прочностными свойствами [17–21]. Наиболее тугоплавкими видами оксидной керамики являются оксиды алюминия ( $T_{пл}=2054^{\circ}\text{C}$ ), циркония ( $T_{пл}=2680^{\circ}\text{C}$ ) и магния ( $T_{пл}=2800^{\circ}\text{C}$ ). Поскольку испытательное оборудование для сверхвысоких температур в настоящее время мало разработано, то в научно-технической литературе недостаточно данных по поведению и свойствам материалов при температурах  $>2000^{\circ}\text{C}$ . Следует также отметить, что как теплопроводность, так и электропроводность материала повышаются с ростом температуры окружающей среды, поэтому теплоизолирующие и радиопрозрачные свойства материала с ростом температуры могут существенно меняться. В частности, радиопрозрачные свойства керамики на основе диоксида циркония снижаются с повышением температуры  $>800^{\circ}\text{C}$ , поэтому использование ее в качестве обтекателей радиоприборов при высоких температурах нецелесообразно. Однако в настоящее время керамика на основе оксидов алюминия и магния, а также композиционные материалы на их основе являются претендентами для использования в качестве материалов высокотемпературных обтекателей антенн и радиопрозрачных окон высокоскоростных летательных аппаратов. Несмотря на то что прочностные свойства этих керамических материалов могут уступать аналогичным свойствам бескислородной керамики, их стойкость к окислению и термоудару, а также стабильность диэлектрических характеристик в совокупности обеспечивают оптимальное сочетание свойств для развития в этом направлении данного класса материалов.

### Заключение

В результате проведенного изучения научно-технической литературы установлено, что в настоящее время разработано большое количество радиопрозрачных материалов для обтекателей и укрытий радиолокационного оборудования. Для наземных установок воздушного и морского базирования широко используют композиционные материалы на основе полимерных матриц, таких как полимерные пены и полиимидные материалы. Однако, поскольку их температура использования не превышает  $500^{\circ}\text{C}$ , они не могут применяться для высокоскоростных летательных аппаратов.

Основными материалами головных антенных обтекателей высокоскоростных летательных аппаратов радиолокационного наведения являются кварцевая и алюмосиликатная керамика, стеклокерамика литий-алюмосиликатного состава и термостойкие стеклокристаллические материалы. Однако температура эксплуатации этого класса материалов не превышает  $1100^{\circ}\text{C}$ .

Более высокие рабочие температуры имеют высокотермостойкие керамические материалы на основе нитридов и оксидов. Однако нитридные материалы, такие как нитриды кремния, бора и алюминия, а также оксинитридная керамика типа соединения SiAlON, обладают склонностью к окислению при высоких температурах, что приводит к деградации материала.

Оксидная керамика (в частности оксиды алюминия и магния) и композиционные материалы на ее основе обладают высокой стойкостью к термоудару, высокой химической стойкостью и стабильными диэлектрическими свойствами. Поэтому, несмотря на то, что данный класс материалов несколько уступает по прочности бескислородной керамике, в настоящее время комплекс свойств в совокупности делает оксидную керамику и материалы на ее основе претендентами для изготовления из них высокотемпера-

турных обтекателей антенн и радиопрозрачных окон высокоскоростных летательных аппаратов с температурой эксплуатации 2000°C и выше.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 20–24.
3. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. информ. матер. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
4. Каблов Е.Н., Гращенков 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.
5. Русин М.Ю. Проектирование головных обтекателей ракет из керамических и композиционных материалов: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 64 с.
6. АО «ИМЦ Концерн «Вега»: офиц. сайт. URL: <http://www.imc-vega.ru> (дата обращения: 05.11.2015).
7. Суздальцев Е.И. Радиопрозрачные, высокотермостойкие материалы XXI века // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2002. №3. С. 42–50.
8. MatWeb [Электронный ресурс] // Online Materials Information Resource. URL: <http://www.matweb.com> (дата обращения: 15.04.2015).
9. Silicon nitride articles with controlled multi-density regions: pat. 5103239 US; publ. 07.04.92. 6 p.
10. Electromagnetic window: pat. 5573986 US; publ. 12.11.96. 5 p.
11. Ablative-resistant dielectric ceramic articles: pat. 4304870 US; publ. 08.12.81. 3 p.
12. Aluminum nitride-boron nitride composite article and method of making same: pat. 4666873 US; publ. 19.05.87. 10 p.
13. Method of making radar transparent window material operable above: pat. 5627542 US; publ. 06.05.97. 5 p.
14. Теплозащитное покрытие: пат. 2497783 Рос. Федерация; опубл. 10.11.13. Бюл. №31. 9 с.
15. Adaptively ablatable radome: pat. 5457471 US; publ. 10.10.95. 6 p.
16. Silica, boron nitride, aluminum nitride, alumina composite, article and method of making the same: pat. 5891815 US; publ. 06.04.99. 8 p.
17. Максимов В.Г., Басаргин О.В., Щеглова Т.М., Никитина В.Ю. О проявлении сверхпластичности в полидисперсной керамике муллит–оксид циркония с размером кристаллов более 10 мкм // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №6. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.11.2015).
18. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А. Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №2. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.11.2015).
19. Максимов В.Г., Гращенков Д.В., Ломовской В.А., Бабашов В.Г., Басаргин О.В., Колышев С.Г. Исследование высокотемпературной ползучести в полидисперсной керамике муллит–оксид циркония // *Стекло и керамика*. 2014. № 5. С. 36–40.
20. Гращенков Д.В., Ломовской В.А., Басаргин О.В., Балинова Ю.А., Бабашов В.Г., Максимов В.Г., Колышев С.Г. Исследование высокотемпературной ползучести в полидисперсной керамике на основе муллита, упрочненного диоксидом циркония // *Вестник РФФИ*. №1 (85). 2015. С. 47–53.
21. Варрик Н.М., Ивахненко Ю.А., Максимов В.Г. Оксид-оксидные композиционные материалы для газотурбинных двигателей (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №8. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.11.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-3-3.