

Радиопрозрачные высокотемпературные композитные материалы для изготовления наукоемких изделий для нужд аэрокосмической промышленности

Э.Р. ЖДАНОВ,
канд. физ.-мат. наук,
А.В. КРЮКОВ,
О.С. ХАРИНА,
канд. экон. наук,
Д.С. СТЕПЫНИН,
А.В. ВОЛКОВ,
канд. техн. наук
(ФГБОУ ВО «МИРЭА –
Российский технологический
университет», Москва)
zhdanov@ufanet.ru

Рассмотрены разработанные в настоящее время высокотемпературные материалы для защиты от внешних воздействий радиотехнических систем, размещенных на современных летательных аппаратах, скорость полета которых многократно превышает скорость звука. Использование деталей, изготовленных из рассмотренных композиционных материалов, обеспечивает увеличение рабочих температур элементов конструкции летательных аппаратов при одновременной защите антенных систем от воздействий аэродинамической среды, что способствует повышению точности наведения на цель. Сделан вывод о перспективности разработки композиционных материалов российского производства на основе высокотемпературных матриц из кремнеземных нитей, пропитанных фталонитрильным связующим.

Радиопрозрачные композитные материалы, огнеупорные керамические материалы, высокотемпературные радиопрозрачные композиционные материалы, тугоплавкие волокна, радиопрозрачные обтекатели

Радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов подвергаются экстремальным нагрузкам со стороны набегающего аэродинамического потока и должны обеспечивать защиту антенных систем в течение всего срока эксплуатации (времени полета). При полете высокоскоростных летательных аппаратов со скоростью выше 6 М температура на поверхности защитных обтекателей, выходящих на их внешний обвод, может достигать 600 °С и выше.

Зарубежная практика производства радиопрозрачных обтекателей базируется на использовании керамических материалов на основе нитрида кремния, например, материала IRBAS (Lockheed Martin Corporation, США). По прочностным характеристикам данный материал превосходит плавленый кварц, широко применявшийся на более ранних этапах. Диэлектрическая постоянная материала IRBAS относительно стабильна при повышении температуры, однако тангенс угла диэлектрических потерь стремительно растет после 1000 °С.

В связи с этим отметим, что при маневрировании на защитный обтекатель, особенно на сверхзвуковых скоростях, воздействуют высокие механические и термические нагрузки, при этом требования к радиопрозрачности исключают возможность применения металлов и многих других конструкционных материалов [1]. Применение керамических материалов для этих изделий не всегда оптимально или возможно. Существенный недостаток керамических материалов – возникновение высоких напряжений в местах соединения металлических и керамических элементов конструкции, вызванных различными температурными коэффициентами линейного расширения, из-за чего могут разрушиться керамические элементы изделия в условиях эксплуатации.

Устранить указанные недостатки возможно использованием высокотемпературных композиционных радиопрозрачных материалов для изготовления радиопрозрачных обтекателей, поскольку свойства композиционного материала могут регулироваться за счет послойного комбинирования исходных компонентов, выбираемых с учетом специфики задач конкретного летательного аппарата.

Изготовление радиопрозрачных обтекателей многослойной конструкции из термостойких композиционных материалов позволит обеспечить максимальные радиотехнические и теплозащитные характеристики, а применение данных материалов в качестве промежуточного слоя между радиопрозрачными обтекателями, изготовленными из керамических материалов, и металлом за счет упругих свойств композиционных материалов на тканой основе будет способствовать снижению скорости прогрева материала оболочки (обеспечит отсутствие растрескивания в местах стыка металла с термостойким композиционным материалом). Кроме того, благодаря данному решению возможно значительно увеличить надеж-

ность и диапазон рабочих температур при эксплуатации изделий в узлах соединения радиопрозрачных обтекателей с элементами корпуса, изготовленными из металла.

Для изготовления радиопрозрачных обтекателей высокоскоростных и высокоманевренных летательных аппаратов используются материалы российского производства на основе неорганических ориентированных тканевых кварцевых, стеклянных и кремнеземных наполнителей, применяемые в конструкциях узлов авиационной и ракетной техники. Использование различных сочетаний армирующих и связующих компонентов позволяет создавать материалы с широким диапазоном регулируемых свойств, что предопределяет большое разнообразие их сфер применения. Наиболее распространенным типом композиционных материалов, сочетающих высокую прочность, небольшую плотность, хорошие диэлектрические свойства и приемлемую цену, являются стеклопластики. Применение стеклопластиков для изготовления радиопрозрачных обтекателей нового поколения позволяет кардинально снизить массу изделий [2]. На основе стекловолокон [3] разработан материал СТМ-К, представляющий собой высокотемпературный композиционный радиопрозрачный материал, предназначенный для изготовления радиопрозрачных деталей (окон, вставок, обтекателей), работающих без оплавления при температурах до 1400 °С. Данный материал изготавливается в форме плит или заготовок в соответствии с согласованной конструкторской документацией.

Приведем характеристики материала СТМ-К: плотность ρ – 1500–1600 кг/м³; разрушающее напряжение при изгибе $\delta_{изг}$ не менее 45 МПа; разрушающее напряжение при сжатии $\delta_{сж}$ не менее 50 МПа; диэлектрическая проницаемость ϵ при температуре 20 °С и частоте $1 \cdot 10^6$ Гц не более 3,2; тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ при температуре 20 °С и частоте $1 \cdot 10^6$ Гц не более 0,005; коэффициент теплопроводности λ при температуре 50 °С не более 0,45–0,5 Вт/(м·К); удельная теплоемкость при температуре 50 °С не менее 730 Дж/(кг·К).

Представим данные об основном сырье, материалах, а также документацию для их изготовления: кремнезоль-25 (ТУ 6-02-01), нить высокотемпературная КС-11-17х4х6-39 (ТУ 6-11-82), ацетон (ГОСТ 2768), тетраэтоксилан (ТУ 6-02-708), ткань кварцевая марки ИТМ (ТУ 5952-015-20524426).

Пример модели изделий из материала СТМ-К, применяющегося для изготовления радиопрозрачных обтекателей высокоскоростных летательных аппаратов, развивающих скорость свыше 6 М, представлен на рис. 1: *а* – обтекатель для защиты антенных элементов летательного аппарата; *б* – обтекатель с платформой [4].

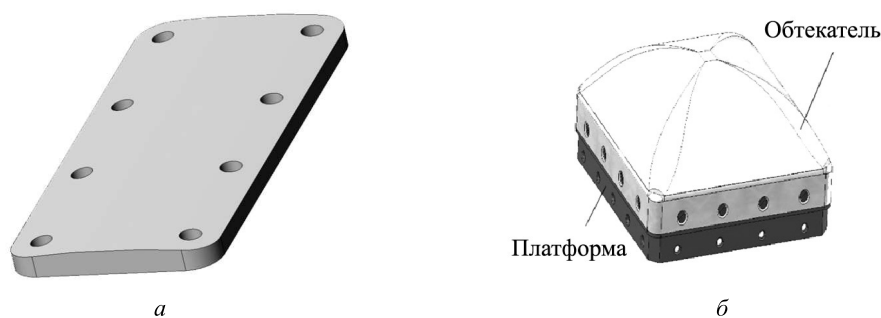


Рис. 1

Существенным недостатком материала СТМ-К является его пористость, в связи с чем возникают дополнительные требования по защите от внешних воздействующих факторов. В большинстве случаев для этой цели используются кремнеорганические материалы, которые ухудшают радиопрозрачность материала.

Еще одним перспективным материалом является высокотермостойкий радиопрозрачный композиционный материал ВРКМ-01 [5], использующийся при разработке монолитных радиопрозрачных конструкций для защиты антенного оборудования при эксплуатации в режимах одностороннего нагрева до 1400 °С. ВРКМ-01 изготавливается посредством автоклавного формования армирующего наполнителя в виде сплетенных в трикотажную ткань кремнеземных и арселеновой нитей, пропитанных порошкообразным фталонитрильным связующим ФНИ350. ВРКМ-01, аналогично материалу СТМ-К, изготавливается в форме плит или заготовок в соответствии с согласованной конструкторской документацией.

Приведем характеристики ВРКМ-01: плотность ρ – 1500–1600 кг/м³; разрушающее напряжение при изгибе $\delta_{изг}$ не менее 46 МПа; разрушающее напряжение при сжатии $\delta_{сж}$ не менее 144,7 МПа; диэлектрическая проницаемость ϵ при температуре 20 °С и частоте $1 \cdot 10^6$ Гц не более 4,4; тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ при температуре 20 °С и частоте $1 \cdot 10^6$ Гц не более 0,025; коэффициент теплопроводности λ при температуре 50 °С не более 0,20 Вт/(м·К); удельная теплоемкость C при температуре 50 °С не менее 730 Дж/(кг·К). При воздействии соляного (морского) тумана очаги разрушения (коррозия, вспучивание, растрескивание, расслоение, нарушение геометрии) отсутствуют. Воздействие плесневых грибов (грибостойкость материала) – 0 баллов.

Приведем основное сырье, материалы и документацию для изготовления ВРКМ-01: фталонитрильное связующее ФНИ350 (ТУ 20.14.43-002-73047899-2020), нить кремнеземная К11С6-170БА (ТУ 23.14.11-241-18087444-2018), нить арселеновая (ТУ РБ 200048573.142-2001).

Из ВРКМ-01 изготавливают радиопрозрачные обтекатели, по назначению аналогичные радиопрозрачным обтекателям из материала СТМ-К, для высокоскоростных летательных аппаратов со скоростью полета свыше 6 М. Недостатком ВРКМ-01 является неоднородность структуры из-за включения в структуру препрега арселеновой нити.

Актуальным вопросом на данном этапе развития технологий разработки высокотемпературных композиционных радиопрозрачных материалов является анализ результатов проведенных электродинамических испытаний материалов СТМ-К и ВРКМ-01 и последующая разработка нового материала ВРКМ-2. Для проведения данного исследования коэффициент усиления образцов пластин из материалов СТМ-К и ВРКМ-01, выраженный в децибелах (изотропный децибел – децибел относительно изотропного излучателя), определялся сравнением с опорной антенной.

В качестве опорной антенны использовался рупор Пб-124. Был выбран коэффициент усиления рупора с точностью ± 2 дБ. По результатам проведенных замеров и полученных значений построены диаграммы.

На рис. 2, а приведено сравнение материалов при частоте 4,5 ГГц, на рис. 2, б – при частоте 9 ГГц.

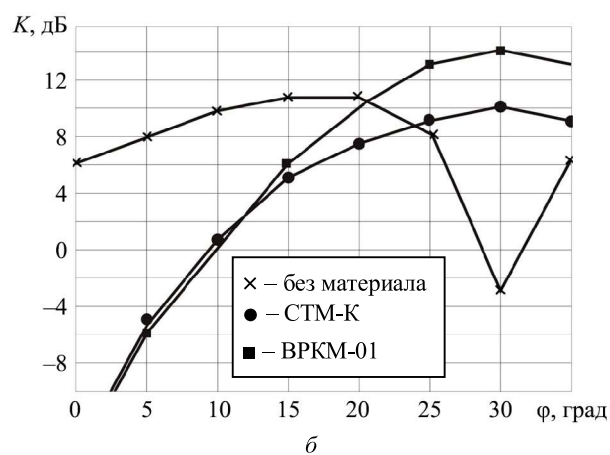
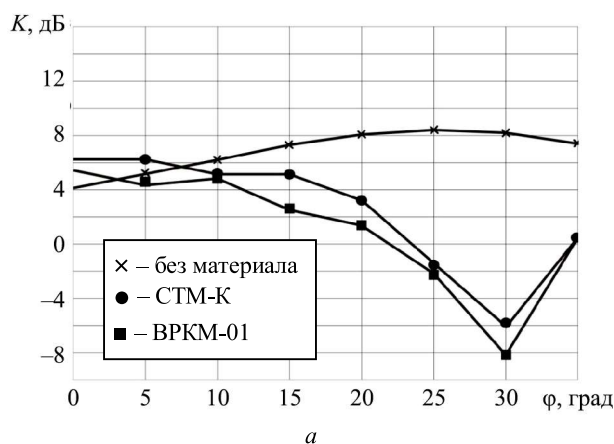


Рис. 2

Измерения диаграмм направленности блока в угломестной плоскости на вертикальной поляризации для трех случаев (двух с использованием материала и одного без его применения), проведенные в восьми точках с шагом 5°, показали значительное различие по форме и уровням в случае без материала и с материалом (см. рис. 2). Разница в значениях коэффициента усиления материалов СТМК и ВРКМ-01 по диаграммам направленности составляет до 4 дБ, при этом общая форма диаграмм сохраняется. Следует учесть, что в формировании диаграммы направленности блоков антенн участвуют не только сами антенные блоки, но и часть проводящей поверхности, по которой текут поверхностные токи, наводимые электромагнитными полями. Эти высокочастотные токи создают в пространстве вторичные электромагнитные поля, взаимодействующие с полями антенн, определяя суммарное электромагнитное поле вокруг летательных аппаратов.

Таким образом, из большого количества разработанных радиопрозрачных материалов лишь некоторые могут применяться для изготовления радиопрозрачных обтекателей перспективных летательных аппаратов, характеризующихся скоростями полета свыше 6 М. В большинстве случаев за рубежом применяются более дорогостоящие и менее технологичные высокотемпературные керамические материалы. Недостатком таких материалов является невозможность осуществления стыковки с металлическими оболочками летательных аппаратов напрямую из-за различных температурных коэффициентов материалов [6, 7].

В российской промышленности разработаны инновационные материалы, имеющие патентную защиту и утвержденные технические условия изготовления. Вместе с тем данные материалы имеют определенные недостатки.

Из-за пористой структуры деталей, изготовленных из материала СТМ-К, для обеспечения их устойчивости к внешним воздействующим факторам требуется нанесение защитных покрытий. Однако в большинстве случаев такие покрытия отрицательно влияют на диэлектрические свойства и, как следствие, ухудшают тактико-технические характеристики изделия в целом.

Свойства ВРКМ-01 неоднородны. Это обусловлено разнородностью физико-механических свойств кремнеземных и арселеновой нитей, применяемых для формирования ткани: в ткань из кремнеземной нити для повышения прочности добавлена арселеновая нить, что приводит к изменению диэлектрической проницаемости.

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (грант № 24-19-00328).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каблов Е.Н. и др. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы // Российский химический журнал. 2010. № 1. С. 20–24.
2. Русин М.Ю. и др. Композиционные материалы для радиопрозрачных обтекателей летательных аппаратов // Новые огнеупоры. 2014. № 10. С. 19–23.
3. Волков А.В., Крюков А.В., Цветков К.А. Проектирование радиопрозрачных обтекателей для средств радиоэлектронной борьбы из композиционных материалов на основе стекловолокна // Радиотехника. 2022. № 10. С. 72–78.
4. Жданов Э.Р. и др. Моделирование прочностных характеристик композитов при проектировании радиопрозрачных оболочек летательных аппаратов // Космические технологии-2024: Сб. тр. конф., г. Москва, 16–20 сент. 2024. М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2024. С. 165–172.
5. Высокотермостойкий радиопрозрачный композиционный материал: пат. 2830745 Рос. Федерация, № 2023121222, заявл. 11.08.2023; опубл. 25.11.2024, Бюл. 33.
6. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В. Новые термостойкие гетероциклические связующие и экологически безопасные технологии получения композиционных материалов // Российский химический журнал. 2010. № 1. С. 57–62.
7. Биалов Т.Р., Сабирова А.Д., Попова А.З. Возможности сверхкритических флюидных технологий в задаче модификации полимерных композитных материалов, применяемых в авиастроении // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 3. С. 135–138.

Поступила в редакцию 27.05.25

После доработки 1.06.25

Принята к публикации 5.06.25

Radio-Transparent High-Temperature Composite Materials for the Manufacture of High-Tech Products for Aerospace Industry

E.R. ZHDANOV, A.V. KRYUKOV, O.S. KHARINA,
D.S. STEPYNIN, AND A.V. VOLKOV

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

The paper considers the high-temperature materials currently developed for protection from external influences of radio engineering systems installed on modern aircraft, the flight speed of which is many times higher than the speed of sound. The use of parts made from the considered composite materials ensures an increase in the operating temperatures of aircraft structural elements while protecting antenna systems from the effects of the aerodynamic environment, which improves the accuracy of targeting. It is concluded that the development of domestic high-temperature composite radio-transparent materials based on high-temperature matrices made of silica filaments impregnated with a phthalonitrile binder is promising.

Radio-transparent composite materials, refractory ceramic materials, high-temperature radio-transparent composite materials, refractory fibers, radio-transparent fairings