



Д. Т. Н. М. Ю. Русин, К. Х. Н. В. В. Василенко, К. Т. Н. В. Г. Ромашин,
К. Ф.-М. Н. П. А. Степанов (✉), И. Г. Атрощенко, О. В. Шуткина

ГНЦ РФ ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск Калужской обл., Россия

УДК 678.067

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РАДИОПРОЗРАЧНЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Рассмотрен широкий спектр композиционных материалов, разработанных и используемых в ОНПП «Технология» для производства радиопрозрачных обтекателей летательных аппаратов различных типов. На предприятии проводится теоретическая и экспериментальная отработка и определяются оптимальные структуры стенки антенного обтекателя из различных композиционных материалов с учетом комплекса эксплуатационных воздействий на летательные аппараты, обеспечивающих создание широкополосных радиолокационных систем с повышенной конструкционной прочностью не менее чем на 10 %; производится выбор оптимальных технологических способов и схем изготовления сложнопрофильных обтекателей, в том числе на основе многослойных конструкций из термостойких радиопрозрачных композиционных материалов.

Ключевые слова: радиопрозрачные обтекатели, композиционный материал, стеклопластик, неорганическое связующее, трехслойная конструкция.

ВВЕДЕНИЕ

Современные летательные аппараты (ЛА) представляют собой весьма сложный технический комплекс. В настоящее время в мировой практике самолетостроения наблюдается стойкая тенденция к увеличению скоростей и маневренности, базирующаяся на жесткой конкуренции среди производителей самолетной, вертолетной и ракетной техники на общемировом рынке гражданской и военной техники. Это влечет за собой постоянное увеличение требований, предъявляемых к радиопрозрачным элементам конструкции, прежде всего к антенным обтекателям ЛА.

С учетом функционального назначения к радиопрозрачным обтекателям (РПО) предъявляется достаточно большой комплекс постоянно ужесточающихся требований, который, как правило, является сложным в силу действующих противоречий. Например, удовлетворение требований по радиотехническим характеристикам (РТХ), обеспечиваемых определенной толщиной стенки по образующей оболочки обтекателя, соответственно, накладывает некоторые ограничения по прочностным и теплозащитным характеристикам обтекателя и наоборот.

Существующий системный подход к разработке конструкции обтекателя вызывает необходимость решения комплекса вопросов:

– выбора материала оболочки с учетом требуемых РТХ и условий эксплуатации обтекателя;

- разработки способов обеспечения заданных РТХ;
- выбора материалов деталей узла соединения и разработки его конструкции;
- выбора влагозащитного покрытия в случае использования для оболочки пористой керамики или КМ;
- разработки методики для имитации заданных режимов эксплуатации обтекателя при наземных испытаниях.

Разработка конструкций обтекателей на всех этапах выполняется с учетом высоких требований к уровню и стабильности диэлектрических свойств радиопрозрачных материалов и к конструкции стенки оболочки обтекателей, обеспечивающих минимальное искажение электромагнитного поля в заданном спектре частот и во всех условиях эксплуатации. Учитывая необходимость обеспечения рабочей температурной среды, окружающей радиотехническую аппаратуру в носовом отсеке ЛА, материалы обтекателей должны обладать хорошими теплоизолирующими свойствами, основными из которых являются низкая теплопроводность и относительно высокая теплоемкость. Обтекатели ЛА воздушного базирования подвержены интенсивной пылевой и дождевой эрозии. Это может существенно изменить качество антенных обтекателей за счет изменения толщины, а также вследствие накопления влаги в порах, что ухудшает радиотехнические характеристики. При сверхзвуковых скоростях полета имеют место термоциклические нагрузки, которые в совокупности с указанными выше явлениями снижают надежность агрегата. В связи с этим особое значение приобретают влагозащитные и антиэрозионные покрытия, физико-



П. А. Степанов
E-mail: pstep@mail.ru



механические свойства которых необходимо подбирать достаточно тщательно путем согласования их диэлектрических характеристик, теплопроводности, термостойкости и температурных коэффициентов линейного расширения.

При полете ЛА на сверхзвуковых скоростях интенсивно протекает процесс тепловой эрозии обтекателя, вследствие чего изменяются его радиотехнические и теплопрочностные свойства. Поэтому при проектировании обтекателя необходимо учитывать и это явление путем соответствующего выбора материалов и прогнозирования их свойств в соответствии с технологией изготовления и конструктивными параметрами оболочки. Требования к обтекателю варьируются также в зависимости от класса ракеты, для которой применяется обтекатель (земля – воздух, воздух – воздух и др.). Так, если обтекатель применяется для защиты радиолокационной станции (РЛС) ракеты класса земля – воздух, то при хранении и эксплуатации он подвергается циклическому воздействию температуры от -60 до $+60$ °С, нагрузкам при транспортировании и нагрузкам при применении по основному назначению, в то время как обтекатели ракет класса воздух – воздух дополнительно к указанным подвергаются воздействиям при эксплуатации на подвеске носителя — вибродинамическим нагрузкам и циклическому изменению температур при взлете и посадке носителя и при совместном полете. Температура прогрева обтекателей ракет, устанавливаемых на перспективные носители, при совместном полете превышает 250 °С.

Анализируя весь комплекс требований, предъявляемых к современным антенным обтекателям ракет, и выделяя их противоречивый характер, исследования необходимо проводить индивидуально для каждого конкретного обтекателя в процессе создания его конструкции и технологии изготовления.

Одной из главных проблем при создании обтекателей является выбор материалов или их разработка под конкретные условия эксплуатации обтекателей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Из всего многообразия конструкционных материалов для изготовления ЛА следует выделить стеклопластики — композиционные материалы (КМ) на основе неорганических ориентированных тканевых кварцевых, стеклянных и кремнеземных наполнителей, широко применяемые в конструкциях узлов авиационной и ракетной техники. Для самолетов, ракет и двигателей нового поколения применение стеклопластиков позволяет кардинально снизить массу изделий, а значит, повысить топливную эффективность самолетов и увеличить полезную нагрузку.

Стеклопластики — один из наиболее распространенных композиционных материалов, сочетающих высокую прочность, небольшую плотность, хорошие диэлектрические свойства и приемлемую цену. Использование различных со-

четаний армирующих и связующих компонентов позволяет создавать материалы с широким диапазоном регулируемых свойств, что предопределяет большое разнообразие сфер применения стеклопластиков. В частности, стеклопластики широко применяются как в России, так и за рубежом для изготовления РПО и укрытий приемопередающих радиотехнических комплексов для авиакосмической, морской, сухопутной техники гражданского и специального назначения [1–3].

К радиопрозрачным изделиям (РПИ) из стеклопластиков предъявляется комплекс противоречивых требований. РПИ должны обладать в первую очередь заданными радиотехническими характеристиками, от которых зависит дальность действия, точность и надежность работы радиолокационного оборудования и средств связи. Одновременно РПИ должны быть достаточно прочными и надежно защищать находящиеся под ними антенны и радиолокационное оборудование от внешних воздействий (силовых, климатических и др.) на протяжении всего срока эксплуатации.

В настоящее время наибольшее применение при изготовлении РПИ (РПО) нашли эпоксидные, фенольные, кремнийорганические, полиимидные, полиэфирные связующие, в основном разработки ГНЦ РФ ВИАМ [1, 4].

Связующие на основе эпоксидных смол занимают одно из ведущих мест в производстве изделий радиотехнического назначения. Эпоксидные полимеры обладают хорошими механическими и диэлектрическими свойствами при нормальных условиях и сохраняют их при повышенной влажности и воздействии других климатических факторов. На сегодняшний день ОНПП «Технология» имеет большой опыт в производстве РПО из композиционных материалов на основе эпоксидных связующих типа ЭДТ-10 (рис. 1) для применения в качестве укрытий и головных обтекателей для ракетных комплексов (прежде всего противокорабельных и морского базирования).

Перспективными радиопрозрачными полимерными КМ являются синтактные пенопласты (СП) и синтактные полимерные КМ, состоящие из тканевых и полых сферических наполнителей в полимерной матрице.

Микросферостеклотекстолиты имеют ряд технологических преимуществ при изготовлении однослойных и многослойных конструкций. Главным преимуществом является возможность их изготовления за одну операцию при низких давлениях в жестких пресс-формах или методами вакуумного и автоклавного формования. При этом обеспечивается точная толщина стенки. Получаемые изделия при малой массе обладают высокими показателями прочности и жесткости, надежны в эксплуатации, обеспечивают высокие диэлектрические характеристики. В ОАО «ОНПП «Технология» были разработаны состав синтактного стеклопрепрега и технология его получения. Полученный матери-



Рис. 1. Макет РПО на основе эпоксидного связующего

ал типа ССПР обладает низкой плотностью ($1,0\text{--}1,4\text{ г/см}^3$) в сочетании с варьируемыми в широком диапазоне диэлектрическими характеристиками (диэлектрическая проницаемость $1,5\text{--}3,0$, тангенс угла диэлектрических потерь $(100\text{--}140)\cdot 10^{-4}$).

Такие материалы перспективны при изготовлении крупногабаритных радиопрозрачных (многослойных) конструкций для самолетов наземного и морского базирования, так как позволяют снизить массу, улучшить радиотехнические характеристики и повысить эксплуатационную надежность.

Фенолоформальдегидные (фенолальдегидные, фенольные) смолы применяются для изготовления стеклопластиков радиотехнического назначения типа ФНст.кв благодаря низкой стоимости и удовлетворительным физико-механическим свойствам. Стеклопластики на основе фенолоформальдегидных связующих относятся к термостойким, обладающим высокими прочностными характеристиками и способностью работать длительно при температурах, достигающих $350\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако все возрастающим требованиям к изделиям, в частности к разрабатываемым РПО, работающим в условиях интенсивного нагрева до $800\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, не удовлетворяют существующие виды термостойких связующих.

В ОАО «ОНПП «Технология» разработан метод повышения термостойкости (сохранения высокого уровня механических характеристик при повышенных температурах) и конструкционной жесткости изделий путем дополнительной пропитки их кремнийорганической смолой с последующей полимеризацией. Способ позволил повысить термостойкость изделий из стеклопластиков, работающих в условиях интенсивного нагрева, с сохранением высоких прочностных свойств и диэлектрических характеристик до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (кратковременно) [5].

Для дополнительной пропитки использовали высокотермостойкие кремнийорганические смолы: продукты типа МФСС-8 и типа ТМФТ. Продукт МФСС-8 (метилфенилспироксилан) — олигомер с молярной массой 2200 выпускается в виде ацетонового раствора плотностью $0,91\text{--}0,97\text{ г/см}^3$, не содержит функциональных групп и отверждается без выделения побочных веществ. Продукт МФСС-8 — типичный представитель полиорганосилоканов спироциклического строения. Продукт ТМФТ

(тетракс (метилфенилсилоксангидрокси) — титан) — полимер крестообразного строения с высокой степенью стойкости к термической и термоокислительной деструкциям.

Для сохранения высоких показателей физико-технических свойств и надежности работы элементов теплонагруженных конструкций в процессе эксплуатации необходимо использование КМ, работоспособных в области высоких температур: $600\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$ длительно, $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ кратковременно. Одним из решений данной проблемы является использование неорганического связующего, например фосфатных связующих. Фосфатные связующие представляют собой водные растворы кислых фосфорнокислых солей. Особое место среди различных фосфатных связующих занимает алюмохромофосфатное. Благодаря высокой температуре плавления фосфатов алюминия на его основе удается получить изделия, пригодные для службы вплоть до температуры окружающей среды около $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В ОНПП «Технология» методами вакуумного и контактного формования производится композиционный материал ХАФСкв на основе неорганического (алюмохромофосфатного) связующего и текстурированного тканевого наполнителя.

Эксперименты показали, что материал на основе кремнеземных или кварцевых тканей и неорганического связующего (фосфатного, хром-алюмофосфатного) имеет высокий уровень прочности, повышенную ударную вязкость, низкий температурный коэффициент линейного расширения, обладают стабильными теплофизическими свойствами при высоких температурах и сохраняет диэлектрические свойства в условиях повышенных температур.

В различных отраслях промышленности, особенно в авиастроении, судостроении, ракетостроении, гражданском строительстве широко применяют конструкции с заполнителями (интегральные конструкции). Они обладают, как правило, высокими параметрами жесткости, удельной прочности, вибростойкости, хорошими тепло- и звукоизоляционными свойствами, специальными свойствами (радиопрозрачность конструкций из диэлектрических материалов). Несущие слои, подкрепленные заполнителем, воспринимают высокие напряжения сжатия, иногда превышающие предел упругости материала.

В зависимости от условий эксплуатации теплонагруженных конструкций их перспективно выполнять из термостойких композиционных материалов (армированных пластиков), например на основе эпоксидных, полиимидных, кремнийорганических и неорганических связующих. В связи со спецификой области применения в качестве армирующего наполнителя необходимо использовать кварцевую стеклоткань, так как материалы на ее основе наиболее радиопрозрачны и термостойки.

В ходе работ в ОНПП «Технология» было разработано несколько различных видов многослой-



ных конструкций. Первый вариант многослойной конструкции представлял собой опытный образец, обшивки которого были выполнены из композиционного материала, а средний слой — из стеклотопласта типа ССП (сотовый наполнитель на основе электроизоляционной ткани и бакелитового лака). Вторым вариантом конструкции была модель, обшивки которой были выполнены из композиционного материала, а в качестве среднего слоя использован теплоизоляционный материал на основе кремнеземных, глиноземных или базальтовых волокон марок АТМ или ВР-300.

РЕЗУЛЬТАТЫ И МЕТОДЫ

Как уже отмечалось, эксплуатационная термостойкость фенольных и фенолоформальдегидных (например, типа ФН-А) смол не очень высока, однако они имеют существенное преимущество перед другими термоотверждаемыми связующими — большой коксовый остаток, 50–60 %. Это обеспечивает применение фенольных смол и композиционных материалов на их основе в изделиях, для которых важна устойчивость к абляции, прежде всего в изделиях ракетного назначения. Многообещающим направлением повышения эксплуатационных свойств КМ является модифицирование (импрегнирование) фенолоформальдегидных стеклопластиков кремнийорганическими олигомерами (МФСС-8, ТМФТ). При этом возможно увеличение значения таких физико-технических характеристик, как влагостойкость, ударная вязкость и термостойкость. В данной области в ОНПП «Технология» сделан довольно существенный задел.

На рис. 2 представлена зависимость предела прочности при изгибе от температуры для стеклопластика ФНст.кв без обработки, а также пропитанного МФСС-8 с последующей термообработкой.

Технологическая операция дополнительного импрегнирования олигомером МФСС-8 реализована при разработке ряда изделий в рамках опытно-конструкторских работ, что позволило поднять термостойкость и теплопрочностную устойчивость (сохранение жесткости конструкции при повышенных температурах) изделий до требований технического задания.

Результаты исследований показали высокую эксплуатационную надежность в зоне повышен-

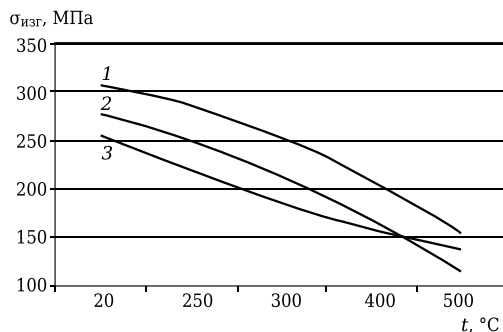


Рис. 2. Зависимость предела прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ стеклопластика ФНст.кв (1) и стеклопластика ФНст.кв, пропитанного продуктом МФСС-8 с последующей термообработкой при 250 (2) и 320 °C (3), от температуры t

ных температур разработанного в ОНПП «Технология» нового композиционного материала ХАФСкв. Эксперименты показали, что композиционный материал на основе кремнеземных или высококачественных кварцевых тканей и неорганического связующего (фосфатного, хромалюмофосфатного) имеет высокий уровень прочности, повышенную ударную вязкость, низкий температурный коэффициент линейного расширения, обладает стабильными теплофизическими свойствами при высоких температурах и сохраняет диэлектрические свойства в условиях повышенных температур.

Термостойкость полученных образцов превышала 1200 °C (метод испытания ГОСТ 9.715). При этом изменение диэлектрических характеристик в диапазоне температур 20–800 °C не превысило 5 % при частоте $\sim 10^{10}$ Гц (рис. 3).

После дополнительной пропитки МФСС-8 материал ХАФСкв-2 показал в области температур 20–800 °C более высокие механические характеристики по сравнению с материалом ХАФСкв-1 (рис. 4), что позволяет использовать его в конструкциях, длительно работающих в условиях высоких нагрузок и повышенных температур.

Исследования механических характеристик КМ проводили по ГОСТ 4651 и ГОСТ 4648 на установках типа ИР и LFM-50, модуль упругости рассчитывали по ГОСТ 9550. Диэлектрические свойства КМ исследовали по методике составного резонатора ПМ 596.1549–2002, разработанной в ОНПП «Технология».

Разработанные многослойные композиционные материалы позволяют использовать уникальную возможность — варьировать величину диэлектрической проницаемости среднего слоя в диапазоне от 1,5 до 3,5 (при частоте 10^{10} Гц) в зависимости от предназначения конструкции. При этом КМ показывает удовлетворительные прочностные

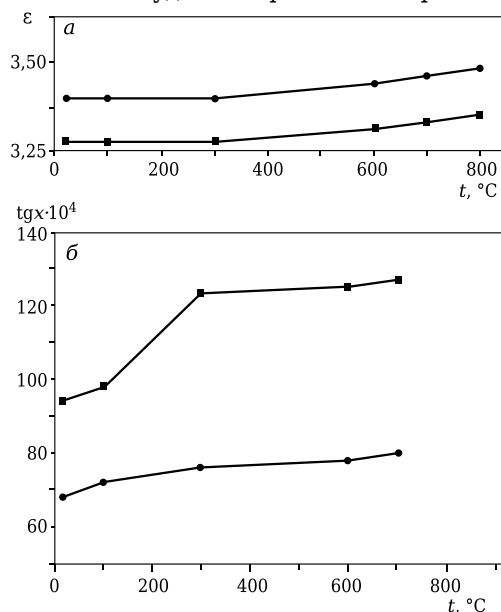


Рис. 3. Изменение диэлектрической проницаемости ϵ (а) и тангенса диэлектрических потерь $tgx \cdot 10^4$ (б) материалов марки ХАФСкв-1 (■) и ХАФСкв-2 (●) под действием температуры t

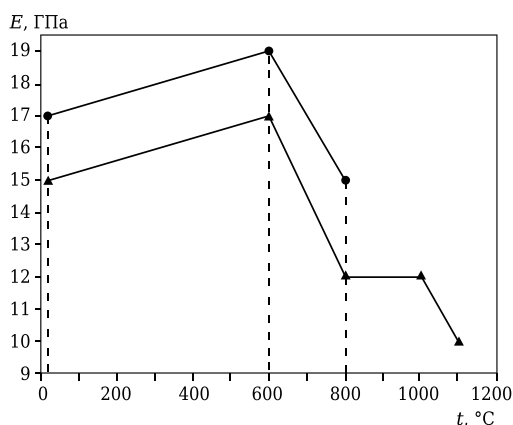


Рис. 4. Изменение статического модуля упругости E при изгибе материалов марки ХАФСкв-1 (▲) и ХАФСкв-2 (●) под действием температуры t

характеристики в области повышенных температур. Полученный многослойный материал обладает также значительно меньшей средней плотностью, чем аналогичный однослойный материал, что в значительной мере позволяет снизить массу конструкции в целом. Кроме того, материал обладает прекрасными теплофизическими свойствами, что делает возможным его использование в теплоизолирующих элементах конструкции. В ходе испытаний, приближенных к условиям эксплуатации изделия, удалось снизить температуру, действующую на функциональный элемент внутри конструкции летательного аппарата до 100 °C при температуре окружающей среды на фронтальной поверхности около 1200 °C. На рис. 5 представлен макет подобного теплозащитного экрана.

Композиционный материал ХАФСкв может использоваться в теплонагруженных изделиях и конструкциях радиотехнического назначения, работающих при температурах от –60 до +800 °C длительно и до 1200 °C кратковременно в авиационной, космической и других областях специального машиностроения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К настоящему времени в России и за рубежом освоено промышленное производство широкого ассортимента термостойких композиционных материалов.

Использование новых конструкционных и функциональных композиционных материалов в узлах авиационной техники вместо металлов позволяет не только на 30–35 % снизить общую массу

Библиографический список

1. Гуртовник, И. Г. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков / И. Г. Гуртовник, В. И. Соколов, Н. Н. Трофимов [и др.] ; под ред. В. И. Соколова. — М. : Мир, 2003. — 368 с.
2. Шаяхметдинов, У. Ш. Композитные материалы на основе нитрида кремния и фосфатных связующих / У. Ш. Шаяхметдинов, И. Г. Гуртовник. — М. : СП «Интермент Инжиниринг», 1999. — 128 с.
3. Справочник по КМ в 2 т. Т. 1 / под ред. Дж. Любина ; пер. с англ. — М. : Машиностроение, 1988. — 467 с.



Рис. 5. Макет трехслойного теплозащитного экрана из неорганического стеклопластика

конструкции, но и существенно повысить надежность эксплуатации по сравнению с материалами на основе эпоксидных связующих. Перспективно применение термостойких термореактивных связующих и материалов на их основе для изготовления узлов трения, требующих смазки, и в качестве высокотемпературной теплоизоляции критически важных элементов аэрокосмической техники.

Не меньшее значение придается разработкам полимерных материалов конструкционного назначения, в том числе для судостроения. В область использования высокотемпературных термореактивных связующих входят системы энергообеспечения подводных и надводных судов, морских энергетических установок и буровых платформ с повышенной надежностью и увеличенным ресурсом работы, создание нового оборудования, судовых пожаробезопасных конструкций для снижения риска возникновения нештатных ситуаций.

В ОНПП «Технология» проводится теоретическая и экспериментальная отработка и определяются оптимальные структуры стенки антенного обтекателя из КМ с учетом комплекса эксплуатационных воздействий на ЛА, обеспечивающих создание широкополосных радиолокационных систем с повышенной конструкционной прочностью не менее чем на 10 %; производится выбор оптимальных технологических способов и схем изготовления сложнопрофильных обтекателей ЛА, в том числе на основе интегральных многослойных конструкций из радиопрозрачных КМ, обеспечивающих снижение разброса основных физико-механических и диэлектрических свойств материала не менее чем на 10 %.

4. Армированные пластики : справ. пособие / под ред. Г. С. Головкина. — М. : МАИ, 1997. — 404 с.

5. Альперин, В. И. Конструкционные стеклопластики / В. И. Альперин, Н. В. Корольков, А. В. Мотавкин. — М. : Химия, 1979. — 360 с. ■

Получено 03.09.14

© М. Ю. Русин, В. В. Василенко, В. Г. Ромашин,
 П. А. Степанов, И. Г. Атрощенко,
 О. В. Шуткина, 2014 г.