

На правах рукописи

Атрощенко Ирина Григорьевна

**Термостойкий многослойный радиопрозрачный композиционный
материал для элементов летательных аппаратов**

Специальность 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2023

Работа выполнена в Обнинском институте атомной энергетики - филиале федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (ИАТЭ НИЯУ МИФИ).

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент
Степанов Петр Александрович

Официальные
оппоненты: **Дуб Алексей Владимирович,**
доктор технических наук, профессор,
АО «Наука и инновации» Государственной
корпорации «Росатом», первый
заместитель генерального директора

Сивак Александр Борисович,
кандидат физико-математических наук,
ФГБУ Национальный исследовательский
центр «Курчатовский институт»,
Отделение токамаков Курчатовского
комплекса термоядерной энергетики и
плазменных технологий, начальник
расчетно-теоретической лаборатории
Отдела термоядерных реакторов

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-
производственное предприятие «Радар ммс»

Защита диссертации состоится «07» июня 2023 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.331.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» по адресу: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д.2, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайтах <https://bmstu.ru/>, <https://kf.bmstu.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета:
кандидат технических
наук, доцент



Лоскутов Сергей Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из важных элементов современных ракет, управляемых методом радиолокационного наведения, является радиопрозрачный обтекатель (РПО), который защищает антенный блок от аэродинамических факторов, принимает на себя основные тепловые и силовые нагрузки при маневрах, определяет точность наведения на цель. Для изготовления антенных обтекателей ракет применяются керамические и композиционные материалы (КМ). Радиопрозрачный обтекатель подвергается экстремальным нагрузкам со стороны набегающего аэродинамического потока, приводящего к значительному нагреву наружной поверхности керамической оболочки в течение всего времени полета. Для высокоскоростных ракет, температура на поверхности которых может достигать 1000 °С и выше, в качестве материала для обтекателя выбирают керамику. Температуры, воздействующие на элементы радиолокационной головки самонаведения (РГСН), могут достигать 600 °С и выше. Также из-за различных температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) материалов (металлы и керамика) в местах их соединения возникают высокие напряжения, приводящие к разрушению керамики в условиях эксплуатации.

Одной из эффективных мер по снижению тепловой нагрузки на элементах РГСН в конструкциях перспективных летательных аппаратов (ЛА) является использование радиотехнических теплозащитных экранов (ТЗЭ). Теплозащитные экраны могут представлять собой конструкции с теплозащитным силовым поясом для соединения керамической оболочки с металлическим шпангоутом. Использование термостойких КМ для изготовления ТЗЭ является перспективным в связи с возможностью комбинирования слоев материалов в зависимости от необходимых задач. Возможность реализации многослойной конструкции теплозащитных экранов из термостойких КМ обеспечит максимальные радиотехнические и теплозащитные характеристики, а применение термостойких КМ в качестве промежуточного слоя между материалом шпангоута и керамической оболочкой будет способствовать снижению скорости прогрева материала шпангоута, что значительно увеличит надежность и температурные диапазоны эксплуатации узлов соединения РПО и перспективных ЛА, в целом.

Степень разработанности темы диссертации. Существенный вклад в изучение фосфатных связующих внесли Ван Везер, В.А. Копейкин, А.П. Петрова, И.Л. Рашкован, М.М. Сычев и др. Их работы содержат фундаментальные основы, описывающие процессы, протекающие в фосфатных связующих (термические превращения, процессы дегидратации и др.).

Известны термостойкие КМ на основе неорганических (фосфатных) связующих и текстурированных тканевых наполнителей: материалы типа «СТАФ» (ГНЦ РФ «ВИАМ»), ХАФСкв (АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»), МСП-К (АО «Композит») и др., технологии и особенности их изготовления, физико-технические характеристики материалов. По комплексу физико-технических характеристик материал ХАФСкв (на основе кварцевой ткани ТС8/3К-ТО и алюмохромфосфатного связующего

(АХФС)) является наиболее перспективным для изготовления высоконагруженных элементов ЛА.

В литературе отсутствует информация по исследованию теплового расширения КМ перпендикулярно армирующим слоям, в качестве характеристики ТКЛР принято считать изменение длины образцов, не описаны микроструктурные изменения, протекающие в КМ на основе неорганических (фосфатных) связующих и тканевых наполнителей при различных термообработках, и их влияние на физико-технические характеристики КМ.

Исследования КМ ХАФСкв и изделий на его основе показали факт резкого увеличения геометрических размеров материала перпендикулярно армирующим слоям при нагреве выше максимальной температуры термообработки, в процессе проведения наземных испытаний, имитирующих режим высокоскоростного прогрева при эксплуатации, происходили разрушения керамических элементов РПО, вызванные распором конструкции соединения из-за теплового расширения теплозащитного экрана, изготовленного из материала ХАФСкв.

Данный факт поставил под сомнение возможность использования стандартных решений и применения металлических материалов (сплавов) и КМ в конструкциях соединений РПО для перспективных ЛА.

Целью диссертационной работы была разработка многослойного композиционного материала на основе алюмохромфосфатного связующего и технологии его изготовления с регулируемым анизотропным термическим расширением, разработка на основе композиционного материала теплозащитного экрана головного элемента летательного аппарата.

Для достижения данной цели были сформулированы и решались следующие **задачи**:

1. Исследование особенности микроструктуры, элементного и фазового состава композиционного материала на основе неорганического алюмохромфосфатного связующего; исследование взаимосвязи изменений микроструктуры связующего и композиционного материала на его основе с изменениями физико-технических характеристик материала.

2. Исследование термического расширения композиционного материала на основе неорганического связующего перпендикулярно армирующим слоям материала. Проведение оценки анизотропии термического расширения композиционного материала при использовании различных наполнителей (тканевых, цельнотканых).

3. Разработка многослойного композиционного материала на основе алюмохромфосфатного связующего и технологии его изготовления с регулируемым анизотропным термическим расширением. Исследование физико-технических характеристик нового многослойного композиционного материала.

4. Разработка на основе многослойного композиционного материала теплозащитного экрана головного элемента летательного аппарата. Разработка технологии изготовления теплозащитного экрана на основе многослойного композиционного материала с оптимизированными физико-техническими характеристиками.

5. Проведение испытаний теплозащитного экрана, определение критериев по максимально допустимому значению термического расширения композиционного материала для узла соединения элемента летательного аппарата. Проведение комплекса испытаний, имитирующих условия эксплуатации, оценка эффективности снижения тепловой нагрузки, подтверждение работоспособности и эксплуатационной надежности теплозащитного экрана и головного элемента перспективного летательного аппарата.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые:

1. Установлен процесс фрагментации фаз ($AlPO_4$) в композиционном материале на основе неорганического алюмохромфосфатного связующего и текстурированных наполнителей (кварцевой и многослойной кремнеземной ткани).

2. Выявлено необратимое термическое расширение композиционного материала на основе алюмохромфосфатного связующего перпендикулярно армирующим слоям. Установлена связь между температурой термообработки композиционного материала и началом необратимого термического расширения материала (выход реакционно связанной воды и фрагментация фаз в композиционном материале).

3. Показано, что фазовая фрагментация в алюмохромфосфатном связующем приводит к увеличению физико-механических свойств композиционного материала в области более высоких температур.

4. Показана перспективность применения комбинации различных текстурированных наполнителей для оптимизации термических и физико-механических характеристик термостойкого композиционного материала на основе алюмохромфосфатного связующего.

Физико-механические характеристики многослойного КМ в температурном диапазоне 450 – 600 °С в направлении основы кварцевой ткани выше, чем у материала ХАФСкв (предел прочности при изгибе на 28 – 69 %, при сжатии на 5 - 14%), в температурном диапазоне 20 – 600 °С в направлении утка (система нитей, расположенных поперек нитей основы) кварцевой ткани (предел прочности при сжатии на 20 – 50 %, прочности при межслоевом сдвиге на 130 – 230 %). Тепловое расширение многослойного КМ перпендикулярно армирующим слоям уменьшилось на 55 % относительно материала ХАФСкв.

Теоретическая и практическая значимость работы определяется следующим:

- разработан многослойный радиопрозрачный термостойкий композиционный материал на основе алюмохромфосфатного связующего с регулируемым анизотропным термическим расширением и стабильными физико-техническими характеристиками в широком диапазоне температур;

- подтверждена эффективность применения многослойного термостойкого композиционного материала для теплозащитного экрана головного элемента перспективного летательного аппарата для снижения тепловой нагрузки на антенном оборудовании, работоспособность конструкции в условиях высокоскоростного нагрева;

- разработаны методики по оценке относительного удлинения образцов композиционного материала перпендикулярно армирующим слоям, по определению прочности при межслоевом сдвиге композиционных материалов в широком диапазоне температур;

- разработана методика по определению теплового расширения теплозащитного экрана.

Методология и методы исследования. Работа выполнена с использованием современных физических методов исследования (микроструктурный и рентгеноспектральный микроанализ, рентгенофазовый анализ АХФС и КМ, физико-механические, теплофизические, диэлектрические измерения КМ), что наряду с подробным теоретическим обоснованием наблюдаемых закономерностей свидетельствует о высокой степени достоверности полученных результатов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты микроструктурных исследований алюмохромфосфатного связующего и композиционного материала на его основе с разными температурами термообработки.

2. Результаты исследований необратимого относительного расширения композиционного материала перпендикулярно армирующим слоям в широком температурном диапазоне.

3. Экспериментальные результаты определения физико-технических характеристик композиционного материала, связанные с фазовой фрагментацией алюмохромфосфатного связующего в материале, в широком температурном диапазоне.

4. Экспериментальные результаты применения многослойного композиционного материала для моделирования и реализации конструкции теплозащитного экрана головного элемента летального аппарата.

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием комплекса различных экспериментальных исследований, теоретического обоснования и подтверждена положительными результатами проведения комплекса наземных испытаний, имитирующих условия эксплуатации головного элемента перспективного летательного аппарата.

Личный вклад автора. Автор лично участвовал в постановке задач, проведении экспериментов, проводил анализ полученных результатов. Автором разработана технология изготовления термостойкого многослойного материала, технологический процесс изготовления изделия с применением разработанного материала.

Постановка задач и анализ результатов решения проведены совместно с научным руководителем Степановым П.А. Основные результаты диссертационного исследования получены автором самостоятельно.

Научно-исследовательская работа проводилась на базе отделения лазерных и плазменных технологий Обнинского института атомной энергетики – филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (ИАТЭ НИЯУ МИФИ).

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XIII международном семинаре «Структурные основы модифицирования материалов» (Обнинск, 2015 г.), международной конференции «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов» (Обнинск 2017 г.), Всероссийской молодежной конференции «Новые материалы и технологии для ракетно-космической и авиационной техники» (Звездный городок, 2018 г), Всероссийском молодежном конкурсе научно-технических работ в рамках Всероссийской конференции «Орбита молодежи и перспективы развития российской космонавтики» (Красноярск, 2018 г.), международной конференции «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций» (Москва, 2018 г.), VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные технологии композиционных материалов» (Уфа, 2021).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 11 работах, в том числе в 3 статьях в ведущих рецензируемых журналах из перечня ВАК, 2 патентах, в 6 работах в иностранных журналах и тезисах докладов международных научно-технических конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 153 страницы, включая 56 рисунков и 13 таблиц. Список литературы содержит 85 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках диссертации, формулируются цели, задачи, научная новизна и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе описаны процессы формирования КМ, стадии формирования межфазных соединений, рассмотрены имеющиеся к настоящему времени результаты экспериментальных и теоретических исследований фосфатных связующих, процессы дегидратации и термических превращений, протекающие в них, описаны виды и свойства наполнителей, которые могут быть применены в радиопрозрачных КМ. Приведены разработанные к настоящему времени термостойкие КМ на основе неорганических (фосфатных) связующих.

Композиционные материалы – гетерогенные (гетерофазные) системы, образованные объемным сочетанием двух или более разнородных по химической природе компонентов с четкой границей раздела между ними. На формирование свойств КМ оказывает влияние матрица (связующее), наполнитель, а также характер межфазного взаимодействия компонент. Зона на границе раздела «матрица-наполнитель» имеет структуру и свойства, отличные от основных фаз.

Особенностью фосфатных связующих является их способность к образованию полисоединений, стойких в водных растворах, а также способность образовывать достаточно прочные структуры при относительно

невысоких температурах и сохранять прочностные характеристики при нагревании. Эти факты обусловлены неупорядоченной структурой фосфатов с сохранением объемной непрерывности, а также определенной «гибкостью» и адгезией к наполнителю.

Алюмофосфатные связующие (АФС) метастабильны, материалы на их основе имеют недостаточную прочность. Алюмохромфосфатные связующие являются более стабильными в процессе хранения и также имеют высокую термическую стойкость, хорошую совместимость с различными наполнителями.

Характер термических превращений АХФС отличается от превращений АФС прежде всего тем, что аморфная фаза существует не в узком интервале (250 – 280 °С), а занимает всю температурную область до 800 °С. Именно этим можно объяснить более высокие технологические свойства АХФС, которые можно отнести к классу неорганических полимеров с температурой работы выше 1500 °С.

В качестве наполнителей для высокотермостойких радиопрозрачных КМ используются стекло-, кремнеземные и кварцевые волокна. Термостойкость кремнеземного волокна до 1100 °С, волокон из кварцевого стекла до 1200 °С.

Использование многослойных тканей упрощает технологию изготовления крупногабаритных изделий, устраняет ряд недостатков, присущих стеклопластикам на основе однослойных тканей (увеличение сопротивления сдвигу, отрыву, скалыванию, торцевому удару и др.).

С целью защиты наполнителей от агрессивного воздействия кислой среды фосфатных связующих необходимо применение аппретов на основе кремнийорганических смол и различных растворителей.

Разработаны термостойкие КМ на основе неорганических (фосфатных) связующих: стеклотекстолиты «СТАФ», радиотехнический материал МСП-К, радиотехнический материал ХАФСкв, изготавливаемые различными методами формования. В качестве наполнителя в них применяются стеклянные, кварцевые и кремнеземные ткани.

Во второй главе описаны методы исследования особенностей микроструктуры, элементного и фазового состава неорганического алюмохромфосфатного связующего и КМ на его основе (дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), термогравиметрического анализа (ТГА), рентгенофазовый, микроструктурный анализ, рентгеноспектральный микроанализ материала и его компонентов), методы определения прочностных, теплофизических, структурных и диэлектрических характеристик КМ, а также применяемое при исследованиях оборудование.

В литературных источниках в качестве характеристики расширения КМ указано изменение длины образцов. Для исследования КМ ХАФСкв была разработана методика по определению относительного удлинения КМ в широком температурном диапазоне (от 20 до 1500 °С), в которой учтена возможность определения расширения перпендикулярно армирующим слоям.

Для исследований был использован составной образец, состоящий из нескольких образцов КМ, испытания проводили на автоматическом горизонтальном дилатометре. В процессе проведения испытаний

регистрировали увеличения геометрических размеров образцов при непрерывном изменении температуры с заданной скоростью нагрева или охлаждения.

В ходе выполнения работ была разработана методика по определению прочности при межслоевом сдвиге КМ в температурном диапазоне от 20 до 600 °С. Сущность метода заключается в нагружении образца с двойным надрезом равномерной ширины сжимающей нагрузкой до разрушения между двумя надрезами, выполненными в половину толщины и расположенными на заданном расстоянии от противоположных торцов. Для оценки прочности при межслоевом сдвиге при повышенных температурах образец нагревали и выдерживали в климатической камере до достижения необходимой температуры.

В третьей главе приведены результаты исследования свойств связующего АХФС, КМ на основе АХФС и различных тканевых наполнителей, описана разработка многослойного термостойкого КМ на основе АХФС и комбинации кварцевого и многослойного кремнеземного наполнителя, технология изготовления многослойного КМ с учетом оптимизации термических и физико-механических свойств КМ.

Для определения причин разрушения макета головного элемента ЛА с теплозащитным экраном из материала ХАФСкв по разработанной методике было определено относительное изменение геометрических размеров материала перпендикулярно армирующим слоям (Рисунок 1, оранжевый). Значительное изменение геометрических размеров материала ХАФСкв в процессе нагрева выше температуры термообработки привело к «распуханию» конструкции, и, соответственно, к разрушению узла соединения оболочка-экран-шпангоут.

На Рисунке 1 показано, что начало расширения материала ХАФСкв перпендикулярно армирующим слоям соотносится с началом потери массы образцов связующего при нагреве, сопровождающейся эндотермическим эффектом в температурном диапазоне.

Результаты проведения качественного рентгенофазового анализа (РФА) связующего АХФС показало, что в температурном диапазоне выше температуры термообработки (350 °С) происходит выход из материала связующего связанной воды (дегидратация). Данный факт подтверждается данными ИК-спектроскопии (уменьшение интенсивности пиков в диапазоне 3600 – 3090 см⁻¹, ответственных за связанную воду, при увеличении температуры термообработки) и результатами РФА (исчезновение фазы алюмооксигидрата $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{11}(\text{H}_2\text{O})_{1.79}$ при повышении температуры термообработки). С увеличением температуры термообработки АХФС наблюдается исчезновение фазы $(\text{NH}_4)_{0.33}\text{Al}_{0.89}(\text{HPO}_4)\text{H}_2\text{O}$ с увеличением содержания AlPO_4 с триклинной, кубической и орторомбической кристаллическими решетками.

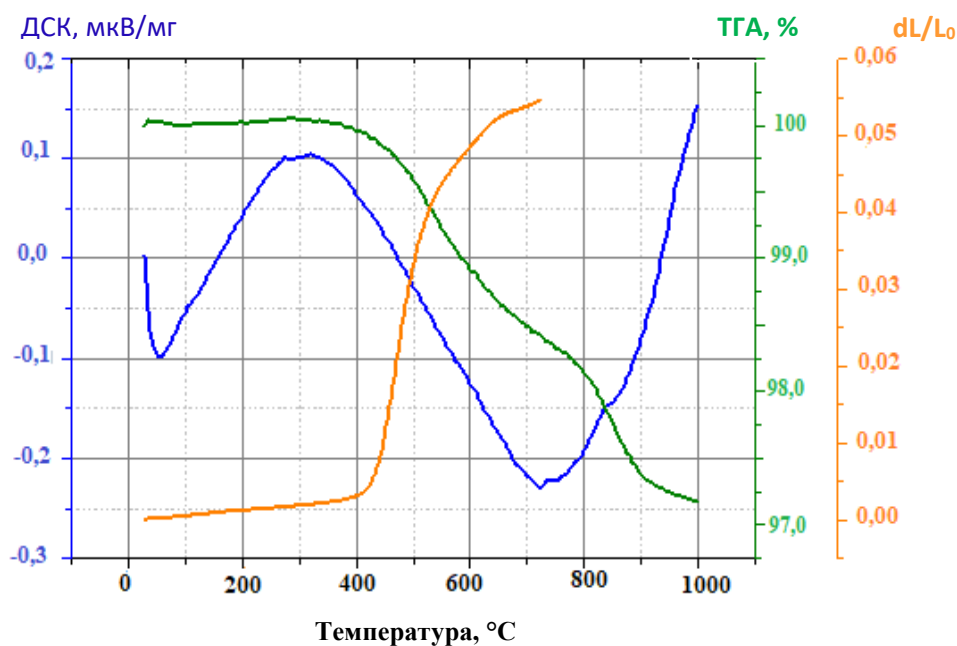
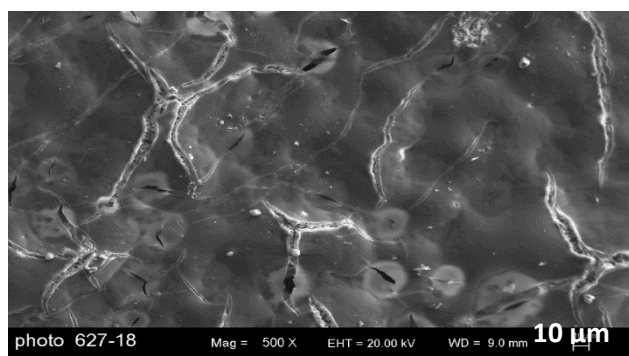
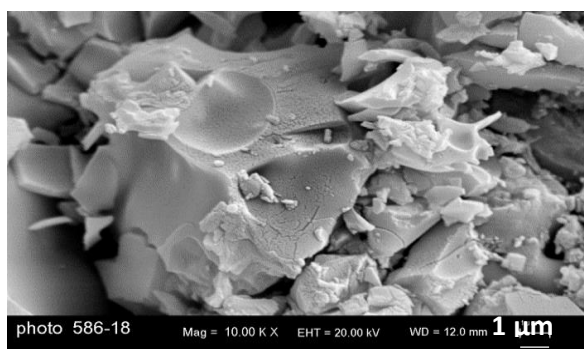


Рисунок 1. График сопоставления кривых ДСК, ТГА АХФС и относительного удлинения образцов ХАФСкв (dL/L_0) перпендикулярно армирующим слоям

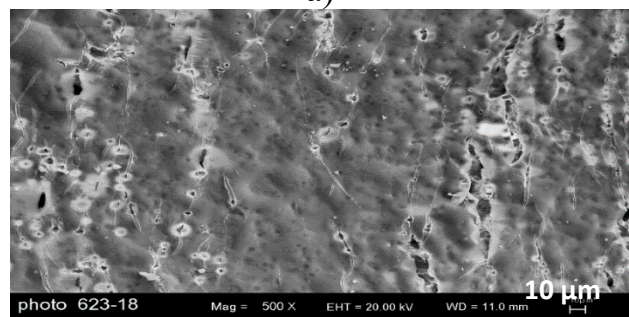
Проведенный микроструктурный и рентгеноспектральный микроанализ образцов АХФС показал неравномерность распределения соединений, содержащих основные элементы связующего по объему образца (поверхность, скол) у образцов с термообработкой 350 °C, распределение аналогичных соединений по объему образца после термообработки 450 °C более равномерное (Рисунок 2, Таблица 1).



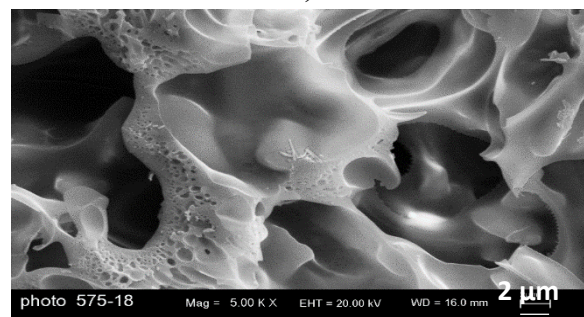
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2. Микроструктура участков поверхности (а, в) и сколов (б, г) образцов АХФС после термообработки 350 °C (а, б) и 450 °C (в, г)

Элементный состав связующего АХФС

Образец АХФС	Элементный состав связующего АХФС, масс %										
	O	Al	P	Cr	Si	Na	Fe	Ti	K	Mg	S
350 °С(поверхность)	35,35	13,18	28,16	4,22	0,19	0,42	0,97	0,25	0,49	0,31	0,50
350 °С (скол)	33,02	20,09	16,08	2,70	-	-	0,55	0,19	-	-	0,85
450 °С(поверхность)	40,94	13,49	24,91	4,25	0,13	0,46	0,96	0,22	0,44	0,43	0,58
450 °С (скол)	43,99	15,58	22,49	3,27	-	0,43	0,96	0,18	-	0,29	1,00

На Рисунке 3 показано, что процесс изменения геометрических размеров КМ ХАФСкв при нагреве является необратимым, о чем свидетельствует практически полное отсутствие уменьшения размеров образца при охлаждении, при повторном нагреве этого же образца увеличения геометрических размеров не происходит.

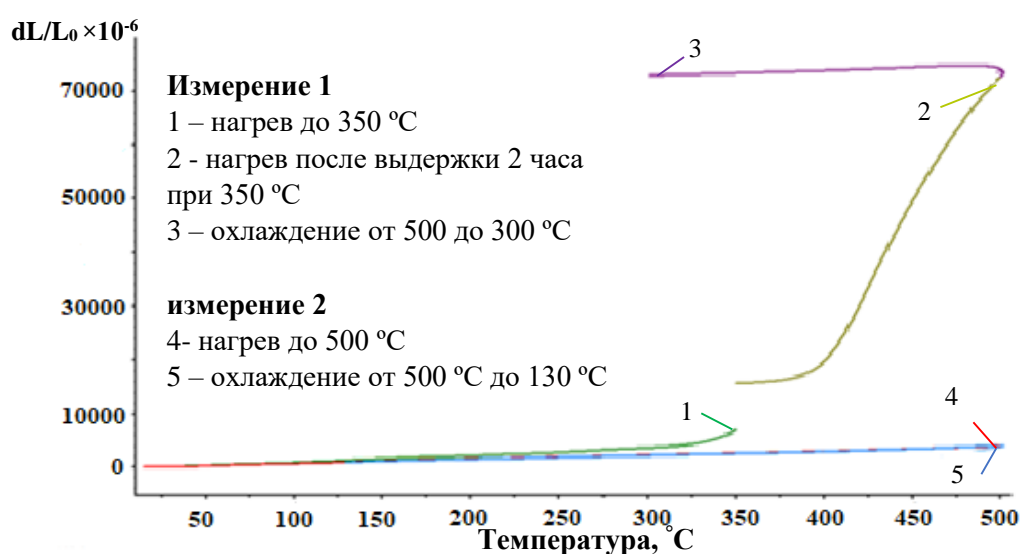


Рисунок 3. Относительное удлинение образца материала ХАФСкв при нагреве и охлаждении в результате первичного и повторного нагрева

По результатам микроструктурного и рентгеноспектрального микроанализа образцов КМ установлено, что в образцах ХАФСкв с температурой термообработки 350 °С локализация Si в волоконных жгутах, распределение остальных элементов по объему образца достаточно равномерное, для образца ХАФСкв с термообработкой 450 °С характерна локализация фазовых составляющих, содержащих Al между волоконными жгутами (Рисунок 4).

По данным литературного обзора, в качестве материала наполнителя в радиотехнических термостойких КМ может быть использована многослойная кремнеземная ткань (МКТ).

По результатам микроструктурного и рентгеноспектрального микроанализа образцов КМ установлено, что в образцах ХАФСмкт после термообработки 350 °С, локализация соединений Al и P происходит, преимущественно, на границах волокон (жгутов наполнителя) в областях размером ~ 400 мкм, а при дополнительной термообработке при 450 °С происходит равномерное перераспределение соединений и молекулярных

комплексов, содержащих Al и P, в объеме материала на масштабах ~ 800 – 900 мкм (Рисунки 5, 6).

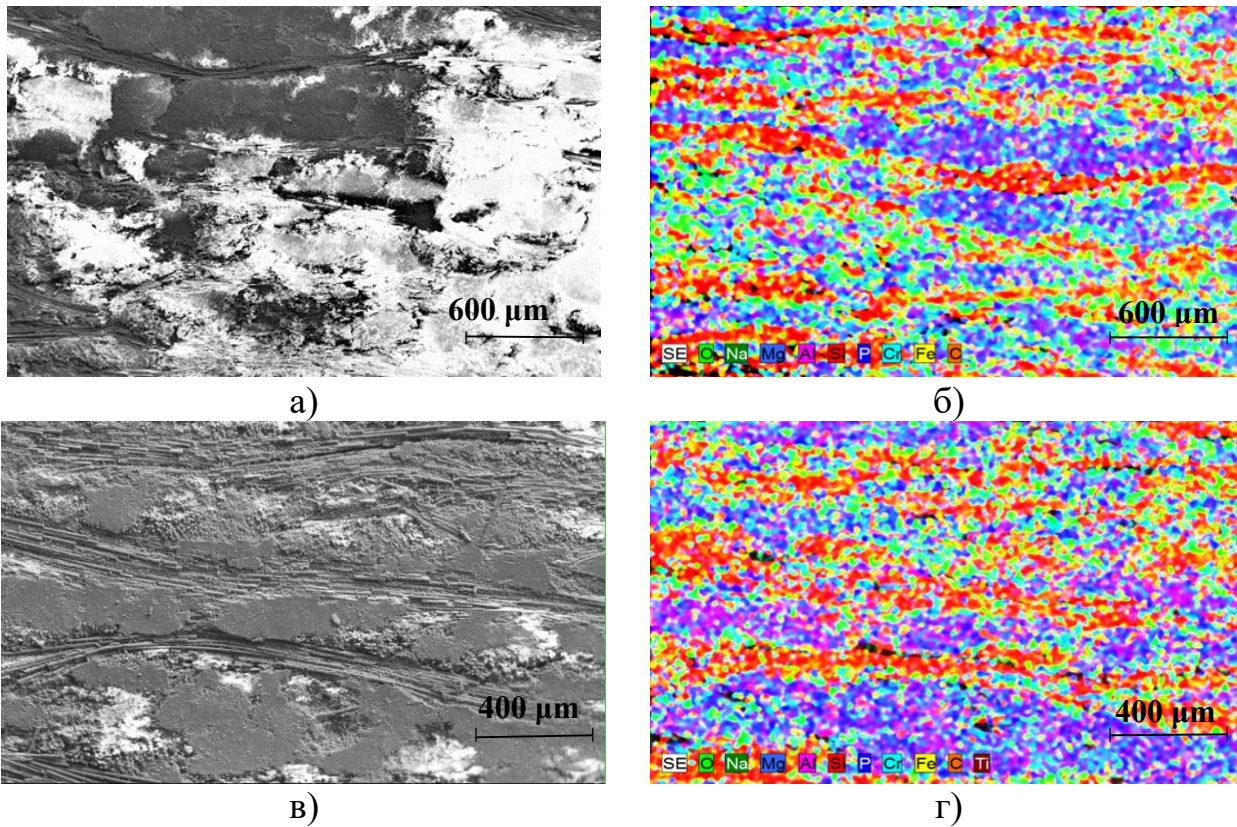


Рисунок 4. Микроструктура и картограмма распределения элементного состава образцов ХАФСкв с термообработкой 350 °С (а, б) и 450 °С (в, г)

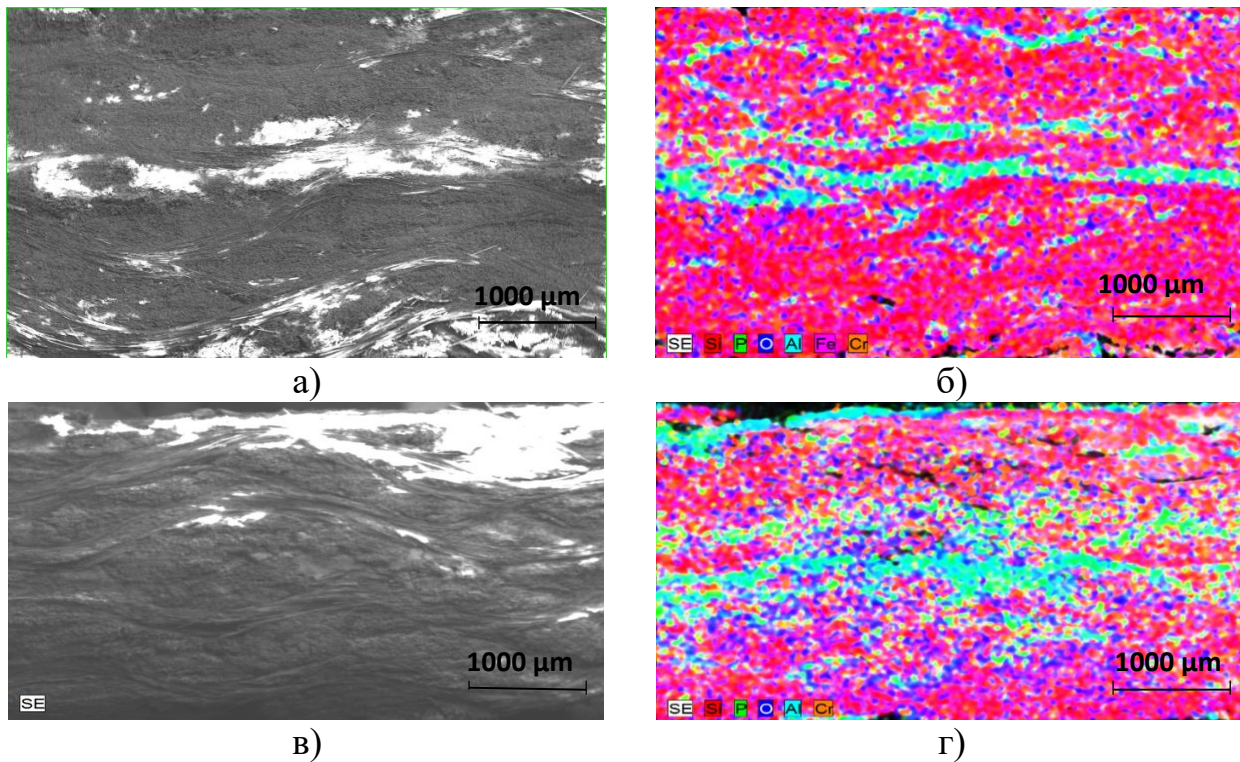


Рисунок 5. Микроструктура и картограмма распределения элементного состава образцов ХАФСмкт - 350 °С (а, б), 450 °С (в, г)

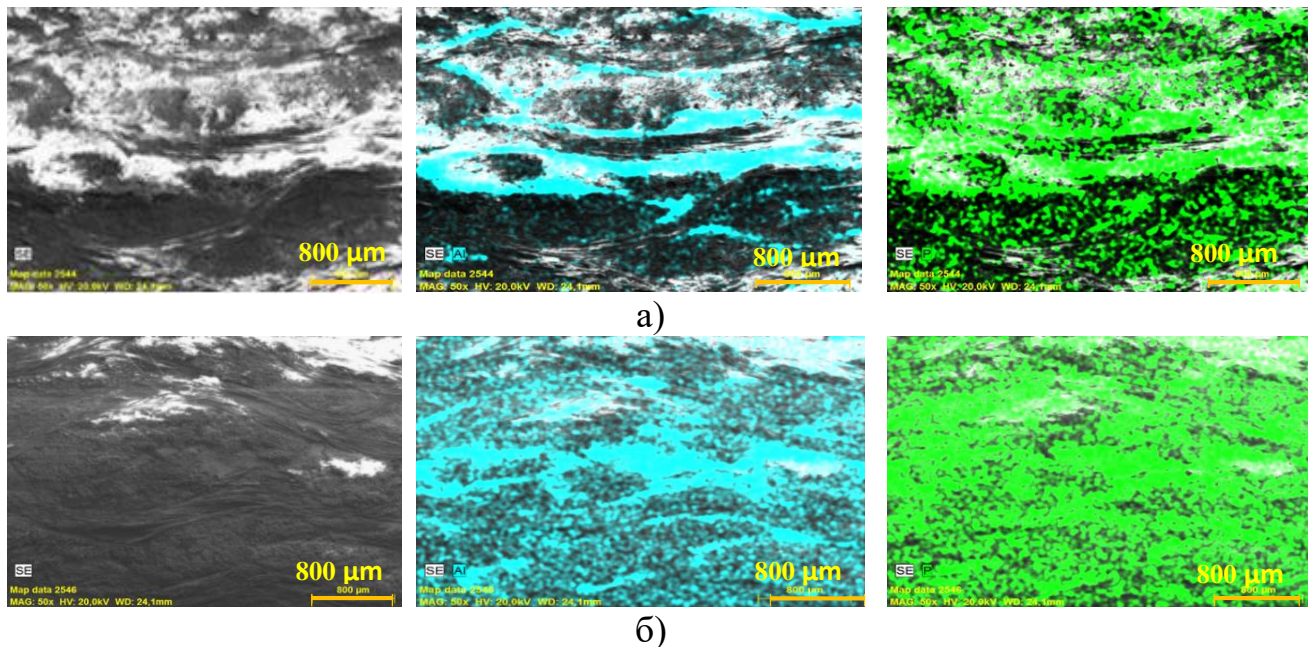


Рисунок 6. Микроструктура и картограмма распределения элементов Al (голубой), P (зеленый) в соединениях по объему образцов материала ХАФСмкт с термообработкой 350 °С (а) и 450 °С (б)

Таким образом, процессы фрагментации фазовых составляющих, содержащих Al и P в объеме образца в алюмохромфосфатном КМ, имеют место и для ХАФСкв и для ХАФСмкт.

Определение относительного удлинения КМ ХАФСкв и ХАФСмкт показало, что увеличение максимальной температуры термообработки образцов материалов сдвигает температуру начала необратимого увеличения относительного удлинения перпендикулярно армирующим слоям в область более высоких температур, при этом для образцов материала ХАФСмкт изменение геометрических размеров происходит медленнее, чем для материала ХАФСкв (Рисунок 7).

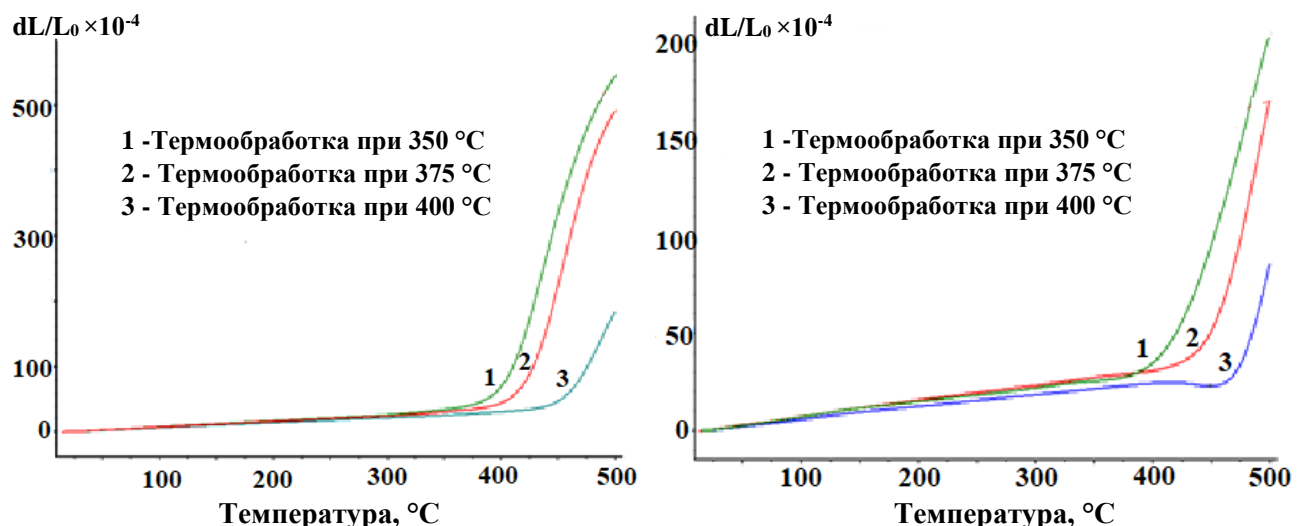


Рисунок 7. График изменения относительного удлинения образцов материала ХАФСкв (слева) и ХАФСмкт(справа) перпендикулярно армирующим слоям с разными режимами термообработки

Таким образом, установлено, что комбинация слоев кварцевой и кремнеземной ткани МКТ в многослойном КМ, а также увеличение режима термообработки до 450 °С позволит компенсировать расширение алюмохромфосфатного связующего при нагреве материала за счет пространственно-объемного плетения ткани МКТ и сохранить прочностные характеристики материала за счет слоев кварцевой ткани.

Смещение начала потери массы образца ХАФСкв с термообработками 350 и 450 °С соотносится с наблюдаемым расширением материала (Рисунок 8).

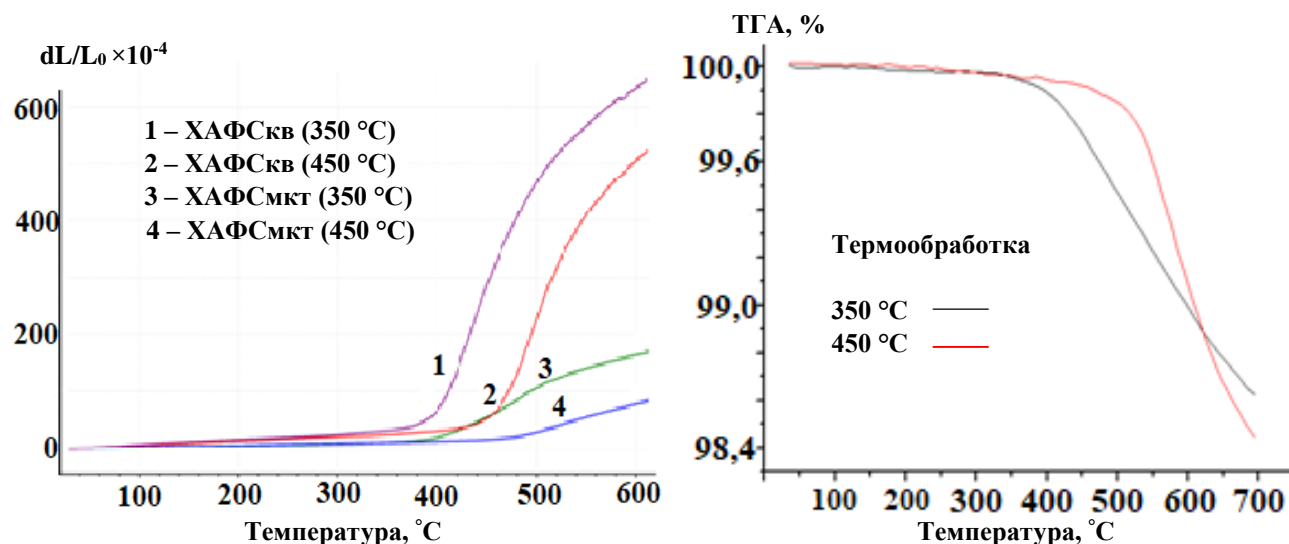


Рисунок 8. Относительное удлинение материала ХАФСкв и ХАФСмкт с термообработкой 350 и 450 °С в результате нагрева до 600 °С (слева) и результаты ТГА образцов ХАФСкв с термообработкой 350 и 450 °С (справа)

Разработан многослойный термостойкий КМ. Подобрана оптимальная схема чередования и соотношения количества слоев кварцевой и кремнеземной ткани в многослойном КМ (ХАФСкв+мкт). Результаты определения прочностных характеристик в широком температурном диапазоне представлены на Рисунках 9, 10.

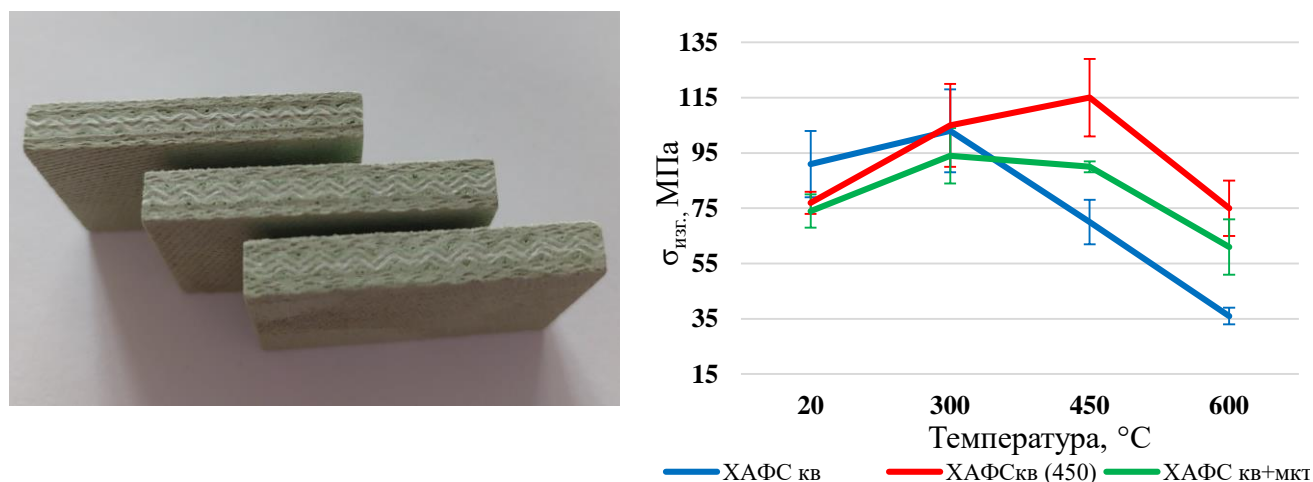


Рисунок 9. Фотография образцов многослойного КМ (слева) и график зависимости изгибающего напряжения при разрушении ($\sigma_{\text{изг.}}$, МПа) КМ в направлении основы от температуры испытания (справа)

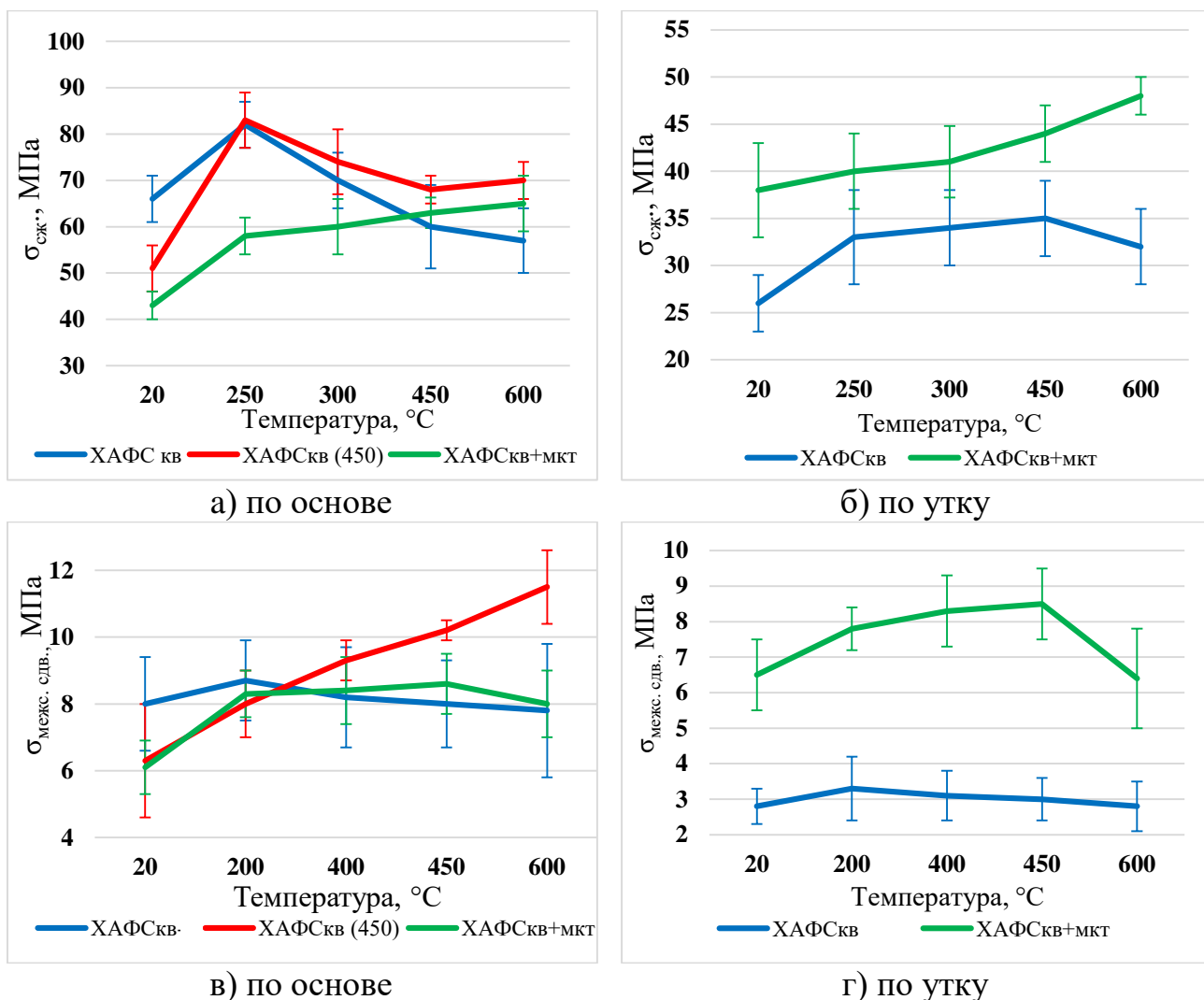


Рисунок 10. Графики зависимости прочности при сжатии ($\sigma_{сж.}$) (а, б) и прочности при межслоевом сдвиге ($\sigma_{межсл. сдв.}$) (в, г) образцов КМ

Увеличение максимальной температуры термообработки КМ на основе АХФС и кварцевого наполнителя, а также многослойного КМ с 350 до 450 °С приводит к увеличению прочностных характеристик в температурном диапазоне свыше 450 °С в направлении основы кварцевой ткани ($\sigma_{изг.}$ на 28 – 69%, $\sigma_{сж.}$ на 5 – 14%), во всем температурном диапазоне в направлении утка ($\sigma_{сж.}$ на 20 – 50%, $\sigma_{межсл. сдв.}$ на 130 – 230%) относительно материала ХАФСкв. Данный факт объясняется более равномерным перераспределением соединений и молекулярных комплексов, содержащих Al и P в материале с максимальной температурой термообработки 450 °С, и внесением в стенку многослойного КМ слоя кремнеземной ткани МКТ-2,5, имеющей объемно пространственное плетение.

Многослойный КМ имеет более низкие значения пористости и водопоглощения, относительно материала ХАФСкв.

В четвертой главе приведен обзор развития отечественного производства теплоизоляционных материалов. Теплозащитные материалы (ТМ) характеризуются минимальной плотностью, низкой теплопроводностью, малой термической усадкой. Для использования в качестве теплоизоляции в элементах ЛА используются ТМ на основе базальтовых, кварцевых,

мулиттокремнеземных волокон, волокон на основе оксида алюминия. Материалы могут быть пропитаны различными связующими, неорганическими системами, модифицированы порошковыми добавками на основе микросфер, полимеров, различных органических и неорганических пород и материалов.

Необходимость снижения тепловой нагрузки на антенном оборудовании, а также сохранение высоких и стабильных радиотехнических характеристик в температурном диапазоне эксплуатации определяет актуальность разработки термостойкой трехслойной конструкции, обшивки которой целесообразно выполнять из термостойкого КМ, а средний слой – из материала с низкими значениями тепло- и температуропроводности.

Показаны результаты проведенных исследований (микроструктурных, синхронный термический анализ, определение теплофизических и диэлектрических характеристик) различных теплоизоляционных материалов

По комплексу свойств, полученных при проведении исследований, материал ВР-300 характеризуется устойчивостью к термодеструкции в широком диапазоне температур (20 – 900 °С), обладает стабильными диэлектрическими характеристиками и низкой теплопроводностью. В процессе проведения сушки материал ВР-300 принимает требуемую форму и конфигурацию, сокращая технологическое время на изготовление изделий сложной формы. Материал ВР-300 может быть использован в качестве среднего слоя при разработке термостойкой трехслойной конструкции радиотехнического назначения, с целью снижения тепловой нагрузки на оборудование, располагающееся под конструкцией.

В пятой главе описана конструкция и технология изготовления теплозащитного экрана головного элемента перспективного ЛА. Разработанная конструкция ТЗЭ состоит из трехслойной радиотехнической части и силового пояса, обеспечивающего крепление экрана к металлическому шпангоуту и керамической оболочке (Рисунок 11).

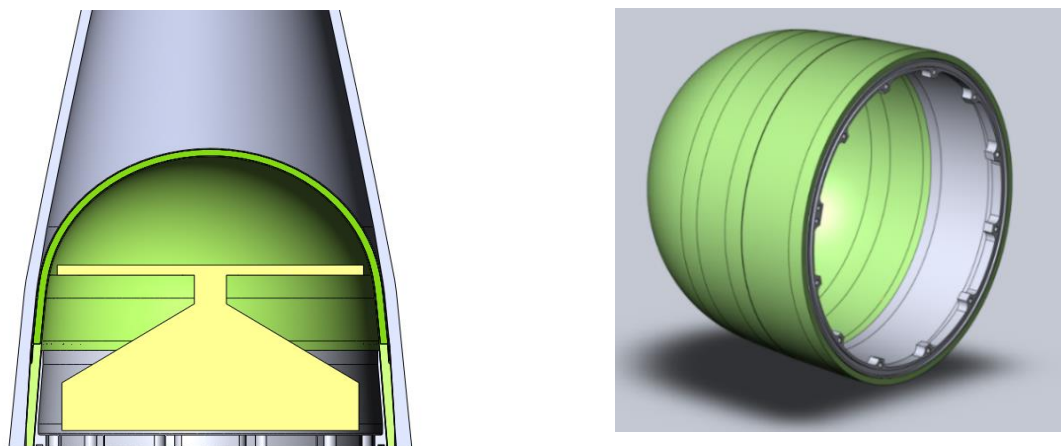


Рисунок 11. Фрагмент головного элемента ЛА с теплозащитным экраном (слева), теплозащитный экран (справа)

В качестве материала силового пояса был использован разработанный термостойкий многослойный КМ, в качестве материалов обшивок трехслойной радиотехнической части – материал ХАФСкв, материал среднего слоя –

теплоизоляционный материал ВР-300. Разработана технология изготовления ТЗЭ, включающая в себя отдельное формование заготовок кожухов, ТМ и последующую сборку трехслойной радиотехнической стенки.

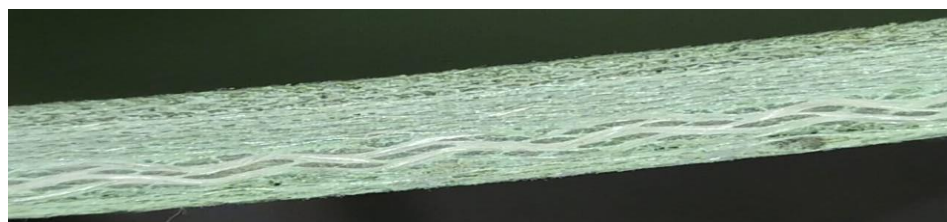


Рисунок 12. Фотография фрагмента силового пояса ТЗЭ (многослойный термостойкий КМ ХАФСкв+мкт)

Для оценки теплового расширения ТЗЭ была разработана методика по определению радиальных перемещений наружной поверхности силового пояса экрана. В результате испытаний измеряется тепловое расширение силового пояса экрана в каждом из четырех направлений контрольного сечения и путем сравнения этих значений определяется максимальное значение.

Таблица 2.

Изменение диаметра наружной поверхности экранов

Особенности	0 °	45 °	90 °	135 °
ТЗЭ (силовой пояс ХАФСкв+мкт)	361 мкм	380 мкм	328 мкм	308 мкм
ТЗЭ (силовой пояс ХАФСкв(350 °С))	106 мкм	833 мкм	635 мкм	62 мкм

По полученным результатам, представленным в Таблице 2, рассчитаны значения коэффициента расширения материала стенки теплозащитного экрана в радиальном направлении ($\alpha = 6,2 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ для ХАФСкв, $\alpha = 2,8 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ для многослойного КМ), используя которое можно рассчитать максимальные напряжения в керамической оболочке. Определены критерии по максимально допустимому значению перемещения наружной поверхности ТЗЭ для узла соединения (470 мкм). Значения, полученные для ТЗЭ, силовой пояс которого выполнен из многослойного КМ существенно меньше расчетного максимально допустимого значения перемещения наружной поверхности (Таблица 2).

Проведены теплопрочностные испытания макетов головных элементов ЛА с ТЗЭ в сборе. Макет элемента ЛА с ТЗЭ с силовым поясом, выполненным из многослойного КМ, выдержал испытания без разрушения, что подтвердило эксплуатационную надежность конструкции.

Проведены испытания на воздействие кинетического нагрева макетов элемента ЛА в сборе с ТЗЭ. При максимальной температуре окружающей среды до 1500 °С, фронтальной температуре до 1050 °С на керамической оболочке, температура в центре имитатора антенного оборудования составила 100 °С, на шпангоуте - 200 °С. Таким образом, подтверждена эффективность снижения тепловой нагрузки на антенном оборудовании с помощью разработанного ТЗЭ и правильность выбора конструкции и материалов ТЗЭ.

Измерения радиотехнических характеристик показали, что ТЗЭ не оказывает негативного влияния на радиотехнические характеристики изделия в целом, уровень характеристик изделия в сборе и соответствует требованиям, предъявляемым к элементу ЛА.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, состоящие в следующем:

1. Проведены исследования микроструктуры, элементного и фазового состава композиционного материала на основе неорганического связующего. Установлена связь изменения микроструктуры алюмохромфосфатного связующего и КМ на его основе (фрагментация фазовых составляющих, содержащих Al и P в объеме материала) после термообработки при 450 °С с изменением физико-технических свойств КМ.

2. Впервые проведена оценка относительного удлинения КМ на основе неорганического связующего перпендикулярно армирующим слоям. Установлена связь между увеличением температуры термообработки алюмохромфосфатного КМ и смещением начала необратимого термического расширения композиционного материала в область более высоких температур.

3. Установлен факт уменьшения необратимого термического расширения при применении многослойной кремнеземной ткани в качестве наполнителя. Разработан многослойный композиционный материал на основе алюмохромфосфатного связующего и комбинации кварцевого и многослойного кремнеземного наполнителя и технология его изготовления с учетом оптимизации термических и физико-механических свойств за счет фрагментации фаз при применении многослойной кремнеземной ткани.

4. Показано увеличение прочностных характеристик многослойного КМ в температурном диапазоне свыше 450 °С относительно свойств материала ХАФСкв в направлении основы кварцевой ткани ($\sigma_{изг.}$ на 28 - 69%, $\sigma_{сж.}$ на 5 - 14%). Прочностные характеристики многослойного КМ в температурном диапазоне 20 – 600 °С в направлении утка кварцевой ткани выше характеристик материала ХАФСкв. ($\sigma_{сж.}$ на 20 - 50%, $\sigma_{межсл. сдв.}$ на 130 - 230%).

5. Реализована конструкция ТЗЭ головного элемента ЛА, где в качестве материала силового пояса использован разработанный многослойный термостойкий композиционный материал. Разработана технология изготовления теплозащитного экрана с повышенными эксплуатационными характеристиками и методы контроля его характеристик.

6. Проведены испытания и разработана методика по оценке теплового расширения силового пояса теплозащитного экрана из многослойного композиционного материала на основе алюмохромфосфатного связующего, проведены расчеты и определены критерии по максимально допустимому значению теплового расширения для узла соединения элемента летательного аппарата с теплозащитным экраном ($\alpha < 3,0 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$).

7. Подтверждена эффективность снижения тепловой нагрузки на антенном оборудовании с помощью разработанного теплозащитного экрана, работоспособность и эксплуатационная надежность проведенными комплексами испытаний ТЗЭ и макетов головного элемента, имитирующие режим.

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Разработка высокотемпературных композиционных материалов теплозащитного и радиотехнического назначения / И.Г. Атрощенко [и др.] // Перспективные материалы. 2014. №10. С. 17 - 21 (0,58 п.л. / 0,18 п.л.).
2. Композиционные материалы для радиопрозрачных обтекателей летательных аппаратов / И.Г. Атрощенко [и др.] // Новые огнеупоры. 2014. №10. С.19-23 (Composite Materials for Aircraft Radioparent Domes / I.G. Atroshchenko [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. 2015. V.55. №5. P.391-395) (0,58 п.л. / 0,29 п.л.).
3. Радиопрозрачное термостойкое покрытие на основе неорганического связующего / И.Г. Атрощенко [и др.] // Новые огнеупоры. 2017. №4 С.50-52 (Radioparent Heat-Resistant Coating Based on Inorganic Binder / I.G. Atroshchenko [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. 2017. V.58. №2. P.239-241) (0,38 п.л. / 0,12 п.л.).
4. Stepanov P.A., Atroshchenko I.G., Nikulina O.V. Ceramic matrix composite materials for structural elements of aviation and rocket-space equipment // IOP Conference series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 934. Article 012058. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/934/1/012058> (0,81 п.л. / 0,35 п.л.).
5. Способ получения многослойного термостойкого радиотехнического материала: патент на изобретение №2785836 РФ / И.Г. Атрощенко [и др.]. Заявл. 08.04.2022; опубл. 14.12.2022. Бюл. №35 (0,23 п.л. / 0,14 п.л.).
6. Способ получения термостойкого радиотехнического материала: патент на изобретение №2788505 РФ / И.Г. Атрощенко [и др.] Заявл. 18.07.2022; опубл. 20.01.2023. Бюл. №2 (0,24 п.л. / 0,14 п.л.).
7. Исследование теплозащитных материалов для перспективного радиопрозрачного обтекателя летательного аппарата / И.Г. Атрощенко [и др.] // Структурные основы модифицирования материалов (МНТ-ХIII): Тезисы докладов международного семинара. Обнинск, 2015. С. 80-81 (0,13 п.л. / 0,05 п.л.).
8. Разработка новых термостойких композиционных материалов для радиопрозрачных конструкций летательных аппаратов / И.Г. Атрощенко [и др.] // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: Тезисы докладов XXI международной научно-технической конференции. Обнинск, 2017. С. 272-274 (0,35 п.л. / 0,10 п.л.).
9. Разработка термостойких многослойных конструкций из композиционных материалов для летательных аппаратов / И.Г. Атрощенко [и др.] // Новые материалы и технологии для ракетно-космической и авиационной техники: Сборник материалов молодежной конференции. Звездный городок, 2018. С. 10 - 15 (0,75 п.л. / 0,50 п.л.).
10. Расчетно-экспериментальное исследование температурного коэффициента линейного расширения элементов конструкции летательных аппаратов из высокотемпературного композиционного материала / И.Г. Атрощенко [и др.] // Деформирование и разрушение композиционных

материалов и конструкций: Труды Третьей международной конференции. Москва, 2018. С. 165 - 166 (0,25 п.л. / 0,08 п.л.).

11. Разработка и оптимизация термических характеристик термостойкого многослойного композиционного материала для применения в конструкциях элементов летательных аппаратов / И.Г. Атрощенко [и др.] // Современные технологии композиционных материалов: Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Уфа, 2021. С. 29 - 34 (0,35 п.л. / 0,18 п.л.).

Атрощенко Ирина Григорьевна

**ТЕРМОСТОЙКИЙ МНОГОСЛОЙНЫЙ РАДИОПРОЗРАЧНЫЙ
КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 05.04.2023 Формат 60×84 1/16
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л.1.0.
Усл. печ. л. 0,93. Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано ООО «Бизнесгрупп»
г. Обнинск ул. Калужская, 4, ИНН 4025077637