

Композиционные материалы, армированные волокнистыми наполнителями

Н. Е. Щеголева, Д. В. Гращенков, М. Л. Ваганова, С. С. Солнцев

Рассмотрены результаты применения различных армирующих наполнителей для стеклокерамических композиционных материалов конструкционного назначения. Обсуждены технологические подходы получения и свойства стеклокерамических композиционных материалов на основе углеродной лентой “Кулон” и муллитокремнеземистого волокна. Показана перспективность применения золь-гель метода для синтеза стеклокерамических матриц разработанных композиционных материалов.

Ключевые слова: композиционный материал, стеклокерамическая матрица, армирующий наполнитель, углеродная лента, муллитокремнеземистое волокно, золь-гель метод, алюмосиликатная система.

Введение

Развитие авиационной и космической техники, химической промышленности, автомобилестроения, тепло- и атомной энергетики невозможно без создания новых конструкционных материалов, пригодных для работы в экстремальных условиях — при воздействии высоких температур и давлений, динамических нагрузок, различных агрессивных сред, высоких скоростей газовых и жидкостных потоков и других факторов [1, 2].

Одним из основных способов разработки новых материалов в настоящее время является комбинирование различных веществ и создание композиционных материалов [3, 4]. Композиционные материалы представляют собой гетерогенные (гетерофазные) системы, образованные объемным сочетанием двух или более разнородных по химической природе компонентов с четкой границей раздела между ними. Матрица обеспечивает монолитность композита, фиксирует форму изделия и взаимное расположение армирующего компонента, распределяет действующие напряжения по объему материала. Природа матрицы определяет уровень рабочих температур композита, устойчивость композита к воздействию внешней среды, химическую стойкость, теплофизические, электрические и другие свойства.

Армирующие компоненты, применяемые в конструкционных композитах, должны удовлетворять

комплексу технологических и эксплуатационных требований, к которым относятся требования по прочности, жесткости, плотности, стабильности свойств в определенном температурном интервале, химической стойкости и т. п. [5 – 8].

Важнейшим преимуществом композиционных материалов является возможность создания материалов, соответствующих условиям работы конструкций. Многообразие наполнителей и матричных материалов, а также схем армирования, методов получения композитов позволяет осуществлять направленное регулирование прочности, трещиностойкости, термических свойств и других характеристик путем подбора состава, изменения соотношения компонентов, микро- и макроструктуры композита [9].

Цель работы — разработка стеклокерамических композиционных материалов конструкционного назначения на основе различных армирующих наполнителей с применением золь-гель метода для синтеза стеклокерамических матричных компонентов.

Применение стеклокристаллических и стеклокерамических материалов в качестве матриц композитов

Использование стекол, стеклокристаллических и стеклокерамических материалов в качестве матриц композитов открывает возможность варьирования в

широких пределах химическим и фазовым составом материала и, соответственно, физико-химическими и термическими свойствами (плотностью, термическим расширением, прочностью, модулем упругости, температурой деформации).

В США, Германии, Франции, Японии, Китае, России и других странах проводятся разработки стеклокерамических композиционных материалов — стекло- и стеклокристаллических матриц, армированных непрерывными и дискретными наполнителями на основе углерода, карбида кремния, нитрида бора и других тугоплавких соединений.

Основные достоинства как стекловидных, так и стеклокерамических матриц заключаются в следующем:

— стеклокерамическая матрица в отличие от металлических и керамических матриц вследствие специфических вязкостных свойств и хорошей текучести при повышенных температурах (800–1400 °С) может быть уплотнена при повышенных температурах без деформации и нарушения сплошности волокон;

— плотность большинства стеклокерамических матриц имеет значение 2,2–3,0 г/см³, поэтому и композиционный материал имеет низкую плотность;

— матрицы на основе стеклообразующих соединений имеют высокую стойкость при температурах, близких к 1000 °С и выше;

— стеклокерамическая матрица обеспечивает уникальные возможности для получения композиционного материала в стеклообразном состоянии с последующей кристаллизацией матрицы для достижения его более высокой термостойкости.

Отличительной особенностью композиционных материалов на основе стекловидных матриц является возможность формирования из них изделий сложной

формы. Учитывая преимущественно высокотемпературное применение композиционных материалов, в качестве стекловидных матриц, как правило, используют стекла с высокой температурой начала деформации: кварцевое, бесщелочное боросиликатное, алюмоборосиликатное и др.

В качестве стекловидных и стеклокерамических матриц используют стекла с повышенным содержанием кремнезема — боросиликатные стекла с низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) (Пирекс или Дюран — стекла системы $B_2O_3 - Na_2O - SiO_2$) и стеклокристаллические материалы алюмосиликатных систем: $Li_2O - Al_2O_3 - SiO_2$ (LAS), $CaO - Al_2O_3 - SiO_2$ (CAS), $BaO - Al_2O_3 - SiO_2$ (BAS), $MgO - Al_2O_3 - SiO_2$ (MAS) и комбинации этих матриц, например MLAS и BMAS или стронций-цельзиановые ($BaO - SrO - Al_2O_3 - SiO_2$). В процессе термообработки стекла кристаллизуются и в зависимости от основного состава выделяют следующие фазы: эвкрипит ($Li_2O_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), сподумен ($Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$), петалит ($Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 8SiO_2$), кордиерит ($2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$), муллит ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), осумилит бария ($BaMg_2Al_6Si_9O_{30}$), цельзиан ($BaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$).

В табл. 1 представлены составы стекол и стеклокерамических материалов, используемых в качестве матриц композиционных материалов [10].

Наполнители

Матрица должна быть хорошо совместима с волокном, поэтому при выборе составов важной характеристикой является значение ТКЛР.

В качестве упрочняющей фазы в композитах со стекло- и стеклокерамической матрицей применяются наполнители различной природы, представ-

Таблица 1

Составы стекол и стеклокерамических материалов, используемых в качестве матриц композиционных материалов

Тип матрицы	Основные компоненты	Добавки	Кристаллическая фаза	Максимальные рабочие температуры композита, °С
Стекла				
7740* Боросиликатное	B_2O_3, SiO_2	Na_2O, Al_2O_3	—	600
1723* Алюмосиликатное	Al_2O_3, MgO, CaO, SiO_2	B_2O_3, BaO	—	700
7930* Высококремнеземистое	SiO_2	$B_2O_3,$	—	1150
Стеклокерамика				
LAS – I	$Li_2O, Al_2O_3, MgO, SiO_2$	ZnO, ZrO_2, BaO	β-сподумен	1000
LAS – II	$Li_2O, Al_2O_3, MgO, SiO_2, Nb_2O_5$	ZnO, ZrO_2, BaO	β-сподумен	1100
LAS – III	$Li_2O, Al_2O_3, MgO, SiO_2, Nb_2O_5$	ZrO_2	β-сподумен	1200
MAS	MgO, Al_2O_3, SiO_2	BaO	Кордиерит	1200
BMAS	BaO, Al_2O_3, SiO_2	—	Осумилит бария	1250
BAS	BaO, Al_2O_3, SiO_2	—	Муллит	~ 1500
BAS	BaO, Al_2O_3, SiO_2	—	Цельзиан	~ 1600

*7740, 1723 и 7930 составы стекол фирмы Corning Glass Works

ленные в разнообразных формах — волокон, вискоз (усов), дискретных частиц или пластин. При создании стеклокерамических композиционных материалов необходимо сделать традиционно хрупкие материалы более прочными и трещиностойкими. Наибольший интерес как конструкционные материалы представляют керамоматричные композиты, армированные непрерывными волокнами, позволяющие реализовать более высокие механические характеристики в материале и обладающие ярко выраженной анизотропией свойств, обусловленной преимущественным расположением волокон в том или ином направлении.

По составу волокна делятся на две группы:

— неоксидные волокна (C, SiC, BN, Si₃N₄), обладающие высокой прочностью и способностью к пластической деформации, однако склонные к окислению при повышенных температурах;

— оксидные волокна (Al₂O₃, Al₂O₃ ZrO₂, муллит, иттрийалюминиевый гранат), характеризующиеся высокой стойкостью к окислению, но имеющие недостаточно хорошие деформационные свойства.

Производство композитов на основе стеклокерамических материалов

Производство композитов на основе стеклокерамических материалов, как правило, включает следующие основные этапы: 1) синтез прекурсора стеклокерамической матрицы; 2) укладка волокон и получение заготовки (препрега); 3) пропитка препрега прекурсором матричного компонента; 4) уплотнение матрицы; 5) высокотемпературная термообработка.

В настоящее время в ФГУП «ВИАМ» ведутся работы по созданию композиционных материалов на основе стеклокерамических матриц, которые обеспечивают:

- повышение эксплуатационных свойств;
- сочетание низкой плотности с высокой температуростойчивостью, термостойкостью, трещиностойкостью и механической прочностью;
- возможность получения разногабаритных изделий сложной формы, различных размеров;
- низкую энергоемкость процессов получения композиционных материалов;
- использование отечественного сырья.

Преимущества золь-гель метода

В настоящее время возрастает интерес к новым энергосберегающим технологиям получения высокотемпературных материалов, к числу которых отно-

сится золь-гель метод. По сравнению с другими методами синтеза золь-гель технология имеет следующие преимущества:

— высокая химическая однородность материалов (на молекулярном уровне), которая достигается за счет использования в качестве прекурсоров коллоидных золей или водно-спиртовых растворов алкоксидов металлов вместо твердых полидисперсных оксидов или других солей элементов, входящих в состав целевого материала;

— высокая поверхностная энергия гелей и порошков, что способствует понижению температуры спекания;

— снижение температуры синтеза, что дает возможность увеличить срок службы основного технологического оборудования [11].

Достижения последних лет в области золь-гель технологии убедительно показали перспективность ее применения как для получения тонкодисперсных порошков матричных компонентов, включая нанопорошки, так и для нанесения покрытий на волокна из золей прекурсоров [12].

Армирование волокнистыми наполнителями

Проведены исследования и разработаны технологии получения композиционных материалов с армирующими наполнителями, относящимися к различным классам волокон. В разработках максимально реализованы преимущества механических свойств неоксидных волокон и высокая окислительная стойкость оксидных волокон. При этом недостаток указанных классов волокон можно снизить путем оптимального подбора матричного компонента.

Композиционный материал на основе боросиликатной матрицы и углеродной ленты «Кулон»

Высокие прочностные характеристики углеродных волокон реализованы при разработке материала марки ВМК-2 — углестеклокерамического композиционного материала на основе боросиликатной матрицы (B₂O₃ – SiO₂), армированного углеродной лентой марки «Кулон» из высокомодульных углеродных волокон с высокой степенью графитации, модифицированных компонентами, повышающими их окислительную стойкость. При разработке технологии получения композиционного материала проведены комплексные исследования, направленные на создание матричных органогидроксупензий, а также отработку технологии импрег-

нирования суспензии в армирующие элементы в виде углеродных однонаправленных лент, жгутов и тканевых наполнителей объемной структуры. Матричные суспензии были синтезированы с применением золь-гель метода, при этом введение в золи специфичных функциональных поверхностно-активных добавок позволило улучшить технологические характеристики гелей и, как следствие, повысить уровень свойств матричного состава [13]. Применение разработанной технологии импрегнирования суспензии в армирующие элементы позволило создать заданную степень наполнения и направленную анизотропию углеродных волокон. В результате проведенных разработок получен материал с высокими значениями механических свойств и повышенной окислительной стойкостью (табл. 2) [14].

Таблица 2

Технические характеристики углестеклокерамического композиционного материала ВМК-2

Рабочая температура, °С	700 – 800
Плотность, г/см ³ , менее	2,0
Предел прочности при 4-точечном изгибе, МПа	800
Термостойкость (800°С ↔ 20°С, 1 цикл — 1,5 мин), количество циклов (без разрушения)	более 1000
ТКЛР при 20 – 800 °С, 1/°С	$(0,8 - 1,15) \cdot 10^{-6}$

ВМК-2 предназначен для изготовления кольцевых элементов рабочего колеса малоинерционного компрессора высокого давления, теплонагруженных деталей с острой кромкой (таких как стойки, проставки переходных устройств, элементы резьбового крепежа и т.д.), применяемых в авиационной, космической технике и в машиностроении.

Развитие нового поколения газотурбинных двигателей требует повышения технических характеристик используемых конструкционных материалов, в первую очередь это касается рабочих температур. Как отмечено выше непрерывные ленты и жгуты марки “Кулон” показывают самую высокую термоокислительную устойчивость и остаются работоспособными на воздухе вплоть до температур 600–650 °С при сопоставимой прочности с другими углеродными материалами, что позволило получить композиционный материал, работоспособный при 700 – 800 °С. Однако применение таких композиционных материалов в области повышенных температур может быть ограничено из-за потери прочностных характеристик и сокращения ресурса работы вследствие окисления армирующего волокна кислородом матрицы. Для решения этой проблемы

наиболее оптимальным является использование класса оксидных волокон в качестве армирующих наполнителей.

Композиционный материал на основе аноритовой матрицы и муллитокремнеземистого волокна

Проведены исследования по получению композиционного материала с применением муллитокремнеземистого волокна, поскольку оно характеризуется более высокой окислительной стойкостью и сохранением прочностных характеристик при повышенных температурах. Для решения задачи оптимального подбора матричного состава для оксидного армирующего наполнителя проведен комплекс исследований в области разработки новых высокотемпературных составов матриц. Применение стеклокристаллических материалов алюмосиликатных систем в качестве матриц позволило получить целый класс новых материалов с более высоким уровнем термических характеристик. Ситаллы на основе алюмосиликатного стекла обладают рядом ценных свойств — это высокие температура размягчения, жаростойкость, физико-механические свойства, температуростабильные диэлектрические и теплофизические характеристики.

Преимущества золь-гель технологии были успешно применены для получения матриц на основе целльзиана $BaO - Al_2O_3 - SiO_2$, барий-стронцевого аноритита $BaO - SrO - Al_2O_3 - SiO_2$, стронцевого аноритита $CaO - Al_2O_3 - SiO_2$. Отличительными особенностями этих систем являются высокая температура деформации (выше 1600 °С), стабильный фазовый состав, коэффициент линейного термического расширения в широком интервале температур, высокий уровень диэлектрических характеристик.

В качестве исходных компонентов для синтеза данных систем были выбраны: тетраэтоксисилан ТЭОС (алкоксид кремния) для ввода стеклообразующего компонента SiO_2 и водорастворимые соли для ввода остальных компонентов (CaO , SrO , BaO и Al_2O_3). Для золь-гель синтеза необходимо применять соли с высокой растворимостью в воде и спиртах и относительно низкой температурой термического разложения. В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют ацетаты и нитраты металлов. Для обеспечения смешиваемости ТЭОС и воды в качестве растворителя выбран изопропиловый спирт.

Важной характеристикой золь-гель является его относительно высокая устойчивость, то есть способность сохранять свою гомогенность и подвижность в течение некоторого промежутка времени. Кри-

териум потери устойчивости служили такие признаки, как выпадение осадка и появление видимой границы расслоения жидкостей. Поэтому исследовали влияние соотношения и последовательности введения исходных компонентов на устойчивость зольей и на время гелеобразования. В ходе работы установлена первоочередность добавления к растворам солей спирта и кислоты по отношению к ТЭОС.

Процесс гелеобразования имеет особо важное значение в технологии получения материалов золь-гель методом, поскольку именно на этом этапе формируется структура геля, включающая в себя фрагменты структуры будущего материала, и во многом обуславливает протекание последующих процессов [15]. Для выбора оптимального количества воды и спирта было изучено поведение зольей при различных соотношениях воды, ТЭОС, спирта, в результате чего установлены оптимальные соотношения компонентов.

Проведено изучение процессов фазообразования, протекающих в процессе термической обработки гелей при получении стеклокерамического порошка [16, 17]. Выбран оптимальный режим процесса направленной кристаллизации гелей. С целью определения температур физико-химических превращений, протекающих в процессе нагрева высушенных гелей, был проведен высокотемпературный синхронный термический анализ. Установлено, что в интервале температур 150 – 210 °С протекают процессы удаления с развитой внутренней поверхности геля химически-связанной воды, продуктов гидролиза и избытка растворителя. Разложение солей алюминия и щелочноземельных металлов происходит при 920 – 965 °С.

Проведен рентгенофазовый анализ (РФА) кальцинированных порошков, термообработанных в интервале температур 1250 – 1550 °С в с шагом 100 °С. Выявлено, что фазовый состав барийалюмосиликатной системы стабилен во всем интервале температур и представлен цельзианом моноклинной и гексагональной модификациями. Фазовый состав барийстронцийалюмосиликатной системы на начальных этапах воздействия температуры включает орторомбическую форму цельзиана и моноклинную форму стронцийбариевого анортита, после термообработки при температуре 1350 °С цельзиан полностью переходит в анортит, а после термообработки при температуре 1550 °С в фазовом составе наблюдается присутствие корунда Al_2O_3 во всех образцах кальцийалюмосиликатной системы, после термообработки при температуре 1300 °С и выше в качестве кристаллической фазы присутствует только анортит $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$.

По результатам изучения физико-химических и фазовых превращений, сопровождающих процесс синтеза золь-гель прекурсоров были определены технологические параметры синтеза многокомпонентных алюмосиликатных систем. Свойства кальцийалюмосиликатной системы (CAS) исследованы с целью использования в качестве матрицы стеклокерамического композиционного материала с повышенным уровнем температуры эксплуатации, термической стойкости и механических свойств (табл. 3).

Таблица 3

Свойства образцов стеклокерамического материала матричного состава на основе кальцийалюмосиликатной системы (CAS)

Температурустойчивость при 1400 °С, ч	50
Термостойкость по режиму 20↔1400°С, циклы	100
ТКЛР, 1/°С	$(4,0 - 4,4) \cdot 10^{-6}$
Рабочая температура, °С	1400

Получены образцы стеклокерамического композиционного материала на основе анортитовой матрицы и муллитокремнеземистого волокна. Матрицу вводили методом шликерной пропитки армирующего наполнителя. Формирование композиционного материала проводили методом горячего прессования. Исследован комплекс свойств стеклокерамического композиционного материала на основе анортитовой матрицы (табл. 4).

Таблица 4

Свойства образцов стеклокерамического композиционного материала на основе стеклокерамической матрицы

Плотность, г/см ³	2,60 – 2,65
Рабочая температура, °С	1400
Термостойкость по режиму 20 – 1400 °С, циклы	100
Ударная вязкость, кДж/м ²	40 – 45
Прочность при изгибе, МПа, при температуре:	
20 °С	520 – 530
1400 °С	410 – 420

В результате проведенных исследований разработан состав стеклокерамического материала и технология его получения путем синтеза зольей с применением элементарорганических соединений и последующего процесса направленной кристаллизации. Разработанный стеклокерамический материал перспективен для применения в качестве матрицы высокотемпературного композиционного материала конструкционного назначения.

Стеклокерамический композиционный материал на основе кальцийалюмосиликатной системы, работоспособный при температуре 1400 °С, значительно превосходит по своим термомеханическим свойствам зарубежные аналоги, что значительно повышает ресурс работы ответственных высоконагруженных деталей перспективных газотурбинных двигателей, изготовленных из разработанного материала.

Перспективы разработки новых радиопрозрачных материалов

Как известно, в целях развития гиперзвуковых летательных аппаратов и авиакосмических систем в настоящее время остро встает вопрос разработки новых радиопрозрачных материалов с повышенными рабочими температурами [18, 19].

В настоящее время применяют материалы литийалюмосиликатного и магнийалюмосиликатного составов. Из них изготавливают обтекатели ракет классов “З-В”, “В-В”, “К-В”, развивающих скорости 5 – 7 Мах (Мах — единица измерения сверхзвуковых скоростей; 1 Мах — скорость звука в воздухе на уровне моря при 20 °С). Обтекатели изготавливают по традиционной стекольной технологии с применением метода центробежного формования.

В России же производство радиопрозрачных обтекателей, предназначенных для оснащения зенитных и авиационных ракет аэродромного и корабельного базирования, сосредоточено на единственном предприятии ФГУП “ОНИПП “Технология” (г. Обнинск). Обтекатели изготавливают из литийалюмосиликатной стеклокерамики, применяется метод шликерного литья в пористые формы с последующим спеканием

и кристаллизацией в совмещенном режиме термообработки.

Однако с развитием скоростей и маневренности летательных аппаратов требования к радиопрозрачным материалам существенно возрастают, в первую очередь по температуре эксплуатации, которая для используемых в настоящее время не превышает 1100 – 1200 °С. К их недостаткам также относятся низкая термостойкость, недостаточная стабильность диэлектрических, термических и прочностных свойств в интервале рабочих температур.

Проведены исследования комплекса свойств стеклокерамических материалов на основе алюмосиликатных систем с целью разработки новых радиопрозрачных материалов (табл. 5). Полученные результаты показывают, что стронцийалюмосиликатная стеклокерамика имеет высокий уровень термических и механических свойств, что делает ее перспективной для применения в качестве матрицы композиционного материала. По уровню диэлектрических свойств с учетом более полных исследований стеклокерамику на основе стронцийалюмосиликатных систем можно рекомендовать как перспективный радиопрозрачный материал.

В качестве армирующих наполнителей радиопрозрачных композиционных материалов на основе алюмосиликатных систем, таких, как анортит, цельзиан и т.п., находят применение волокна, усы, гранулы нитрида кремния или нитрида алюминия. Известны попытки изготовления композиционных радиопрозрачных материалов с цельзиановой матрицей барийалюмосиликатной системы, армированной непрерывными цельзиановыми волокнами.

В настоящее время во ФГУП “ВИАМ” проводят поисковые исследования, в области создания компо-

Таблица 5

Свойства стеклокерамических материалов на основе алюмосиликатных систем

Свойства	Алюмосиликатная система		
	SrO – Al ₂ O ₃ – SiO ₂	BaO – Al ₂ O ₃ – SiO ₂	BaO – SrO – Al ₂ O ₃ – SiO ₂
Кристаллическая фаза	Стронциевый анортит	Цельзиан	Барийстронциевый анортит
Температура плавления кристаллической фазы, °С	1760	1650	выше 1600
Температура деформации материала, °С	выше 1600	выше 1600	выше 1600
Плотность, кг/м ³	2940	2940 – 2950	2810 – 2820
ТКЛР, 1/°С в интервале 100 – 1400 °С	4,3·10 ⁻⁶	4,0·10 ⁻⁶	3,7·10 ⁻⁶
Термостойкость, °С	выше 1450	выше 1450	выше 1450
Прочность при изгибе, МПа	140 ± 10	до 110	до 70
Микротвердость, МПа	8000 ± 30	—	—
Ударная вязкость, кДж/м ²	8,2	8,0	7,3
Диэлектрическая проницаемость (при 20 °С и частоте 10 ⁶ Гц)	6,06	4,83	4,87
Тангенс угла диэлектрических потерь (при 20 °С и частоте 10 ⁶ Гц)	0,001	0,009	0,009
Теплопроводность, Вт/(м·К) в интервале температур 20 – 1200 °С	0,991 – 1,45	1,9 – 1,4	1,7 – 1,2

зиционных материалов для изготовления радиопрозрачных обтекателей и окон летательных аппаратов гиперзвуковых систем вооружения с применением высокотемпературных безщелочных алюмосиликатных стеклокерамических матриц, доминирующими кристаллическими фазами которых являются цезиан и стронциевый анортит с температурой плавления не ниже 1650 °С, низкими значениями диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь.

Заключение

В результате проведенных исследований по созданию материалов конструкционного назначения разработаны стеклокерамические композиционные материалы на основе боросиликатной матрицы и углеродной ленты “Кулон” марки ВМК-2 и анортитовой матрицы имуллиитокремнеземистого волокна.

Материалы обладают высоким уровнем механических характеристик и устойчивостью к воздействию окислительной среды. Оптимальный подбор матричного компонента позволяет максимально реализовать преимущества прочностных свойств неоксидных наполнителей и высокую окислительную стойкость оксидных волокон при создании композитов.

Применение золь-гель метода при синтезе стеклокерамических матричных компонентов перспективно для создания новых радиопрозрачных композиционных материалов.

Литература

- Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов. Научно-технический сборник “80 лет. Авиационные материалы и технологии” (Приложение к журналу Авиационные материалы и технологии), Москва, 2012, с. 231 – 242.
- 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.
- 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.
- Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение. Все материалы. Энциклопедический справочник, 2008, № 3, с. 2 – 14.
- Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. и др. Композиционные материалы: Справочник. М.: Машиностроение, 1990, 512 с.
- Сайфуллин Р.С. Неорганические композиционные материалы. М.: Химия, 1983, 304 с.
- Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А. Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов. Труды ВИАМ, 2013, №2 (электронный журнал).
- Тинякова Е.В., Гращенков Д.В. Теплоизоляционный материал на основе муллито-корундовых и кварцевых волокон. Авиационные материалы и технологии, 2012, № 3, с. 43 – 47.
- Симоненко Е.П., Симоненко Н.П., Севастьянов В.Г., Гращенков Д.В., Кузнецов Н.Т., Каблов Е.Н. Функционально градиентный композиционный материал SiC/(ZrO₂-HfO₂-Y₂O₃), полученный с применением золь-гель метода. Композиты и наноструктуры, 2011, т. 4, с. 52 – 64.
- Bansal N.P. SiC Fibre-Reinforced Celsian. In: Handbook of Ceramic Composites. 2005, p. 227 – 250.
- Саркисов П.Д., Орлова Л.А., Уварова Н.Е. К вопросу об индивидуальных особенностях получения высокотемпературных материалов с использованием золь-гель метода. В сб. Вопросы оборонной техники. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении, 2009, вып. 2, с. 153 – 157.
- Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Уварова Н.Е. Исследования методом инфракрасной спектроскопии структурных изменений гелей в процессе термической обработки при получении высокотемпературных стеклокерамических материалов по золь-гель технологии. Авиационные материалы и технологии, 2011, № 2, с. 22 – 25.
- Kablov E.N., Solntsev S.S., Grashchenkov D.V. Properties of Carbon-glass-ceramic composites. Proceedings of the 10th International Ceramic Congress, part of CIMTEC-2002 10-th International Ceramic Congress and 3-th Forum on New Materials, Florence, Italy. 2002, p. 176 – 182.
- Kablov E., Solntsev S., Grashchenkov D. Investigation of Carbon-glass-ceramics Composites. HTCMC 5: 5-th International Conference on High-Temperature Ceramic Matrix Composites. The American Ceramic Society, September 12 – 16 2004, Seattle, Washington, USA, p. 223 – 227.
- Уварова Н.Е., Орлова Л.А., Лебедева Ю.Е., Гращенков Д.В. Применение метода электронного парамагнитного резонанса для изучения структурных изменений в процессе гелеобразования при получении керамики и стеклокерамики золь-гель методом. Авиационные материалы и технологии, 2011, № 3, с. 26 – 30.
- Щеголева Н.Е., Саркисов П.Д., Орлова Л.А., Попович Н.В. Физико-химические и структурные процессы, протекающие при термической обработке стекол стронцийалюмосиликатного состава. Стекло и керамика, 2012, № 4, с. 16 – 21.
- Щеголева Н.Е., Гращенков Д.В., Саркисов П.Д., Орлова Л.А., Попович Н.В. Влияние добавок В₂О₃ и Р₂О₅ на кристаллизационную способность стронцийалюмосиликатного стекла. Техника и технология силикатов, 2012, т. 19, № 2, с. 2 – 4.

18. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. Научно-технический сборник “80 лет. Авиационные материалы и технологии” (Приложение к журналу Авиационные материалы и технологии), Москва, 2012, №5, С. 7 – 17.
19. Саркисов П.Д., Орлова Л.А., Гращенко Д.В., Уварова Н.Е., Исаева Н.В. Высокотемпературные радиопрозрачные материалы: сегодня и завтра. Авиационные материалы и технологии, 2010, № 1, с. 16 – 20.

References

1. Grashchenkov D.V., Chursova L.V. Strategiya razvitiya kompozitsionnykh i funktsionalnykh materialov [Strategy of development of composite and functional materials]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation materials and technologies*, 2012. №5 (suppliment), pp. 231 – 242.
2. Kablov Ye.N., Grashchenkov D.V., Isayeva N.V., Solntsev S.S. Perspektivnye vysokotemperaturnye keramicheskiye kompozitsionnye materialy [Promising high-temperature ceramic composites]. *Rossysky khimichesky zhurnal — Russian journal of general chemistry*. 2010, vol. LIV, no. 1, pp. 20 – 24.
3. Kablov Ye.N., Grashchenkov D.V., Isayeva N.V., Solntsev S.S., Sevastyanov V.G. Vysokotemperaturnye konstruktivnyye kompozitsionnye materialy na osnove stekla i keramiki dlya perspektivnykh izdeliy aviatsionnoy tekhniki [High-temperature structural composite materials based on glass and ceramic for advanced aircraft]. *Steklo i keramika — Glass and ceramics*, 2012, no. 4, pp. 7 – 11.
4. Kablov Ye.N. Aviakosmicheskoye materialovedeniye [Aerospace materials science]. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik — All the materials. Encyclopaedic reference book*. 2008, no. 3, pp. 2–14.
5. Vasilyev V.V., Protasov V.D., Bolotin V.V. et al. *Kompozitsionnye materialy: Spravochnik* [Composite materials. Handbook] Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1990. 512 p.
6. Sayfullin R.S. *Neorganicheskiye kompozitsionnye materialy* [Inorganic composites]. Moscow, Khimiya Publ., 1983, 304 p.
7. Kablov Ye.N., Shchetanov B.V., Ivakhnenko Yu.A., Balinova Yu.A. Perspektivnye armiruyushchiye vysokotemperaturnye volokna dlya metallicheskiy i keramicheskiy kompozitsionnykh materialov [Perspective reinforcing high-temperature fibres for metal and ceramic composite materials]. *Trudy VIAM — Proceedings of VIAM*. 2013, no. 2 (<http://viam-works.ru/>).
8. Tinyakova Ye.V., Grashchenkov D.V. Teploizolyatsionnyy material na osnove mullito-korundovykh i kvartsevykh volokon [Heat insulation material on the base of mullite-corundum and quartz fibers]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation materials and technologies*. 2012, no. 3, p. 43 – 47.
9. Simonenko Ye.P., Simonenko N.P., Sevastyanov V.G., Grashchenkov D.V., Kuznetsov N.T., Kablov Ye.N. Funktsionalno gradyentnyy kompozitsionnyy material SiC/(ZrO₂-HfO₂-Y₂O₃), poluchenny s primeneniyyem zol-gel metoda [Functionally gradient SiC/(ZrO₂-HfO₂-Y₂O₃) composite material, obtained by sol-gel method]. *Kompozity i nanostruktury — Composites and nanostructures*. 2011, vol. 4, pp. 52 – 64.
10. Bansal N.P. SiC Fibre-Reinforced Celsian. In: Handbook of ceramic composites. 2005, pp. 227 – 250.
11. Sarkisov P.D., Orlova L.A., Uvarova N.E. K voprosu ob individualnykh osobennostyakh polucheniya vysokotemperaturnykh materialov s ispolzovaniyyem zol-gel metoda. V sb. Voprosy oboronnoy tekhniki. Kompozitsionnye nemetallicheskiye materialy v mashinostroyeniye [Individual features of high-temperature materials obtaining by sol-gel method]. Questions of defense equipment. Nonmetallic composite materials in engineering. South Ural State Univ. Publ, 2009, iss. 2, pp. 153 – 157.
12. Kablov Ye.N., Grashchenkov D.V., Uvarova N.E. Issledovaniya metodom infrakrasnoy spektroskopii strukturnykh izmeneniy geley v protsesse termicheskoy obrabotki pri poluchenii vysokotemperaturnykh steklokeramicheskikh materialov po zol-gel tekhnologii [Study of gels structural changes by infrared spectroscopy during heat treatment under obtaining of high-temperature ceramic materials by sol-gel method]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation materials and technologies*. 2011, no. 2, pp. 22 – 25.
13. Kablov E.N., Solntsev S.S., Grashchenkov D.V. Properties of Carbon-glass-ceramic composites. Proceedings of the 10-th International Ceramic Congress, part of CIMTEC-2002 10-th International Ceramic Congress and 3-th Forum on New Materials, Florence, Italy. 2002, pp. 176 – 182.
14. Kablov E., Solntsev S., Grashchenkov D. Investigation of carbon-glass-ceramics composites. HTCMC 5: 5-th International Conference on High-Temperature Ceramic Matrix Composites. The American Ceramic Society, September 12 – 16 2004, Seattle, Washington, USA, pp. 223 – 227.
15. Uvarova N.E., Orlova L.A., Lebedeva Yu.E., Grashchenkov D.V. Primeneniye metoda elektronnoy paramagnitnoy rezonans dlya izucheniya strukturnykh izmeneniy v protsesse geleobrazovaniya pri poluchenii keramiki i steklokeramiki zol-gel metodom [Application of electron paramagnetic resonance method to study structural changes during gel formation under obtaining of ceramics and glass-ceramics by sol-gel method]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation materials and technologies*. 2011, no. 3, pp. 26 – 30.
16. Shchegoleva N.E., Sarkisov P.D., Orlova L.A., Popovich N.V. Fiziko-khimicheskiye i strukturnyye protsessy, protekayushchiye pri termicheskoy obrabotke stekol strontsiyalumosilikatnogo sostava [Physico-chemical and structural processes takes place during thermal treatment of strontium-aluminum-silicate glass]. *Steklo i keramika — Glass and ceramics*. 2012, no. 4, pp. 16 – 21.
17. Shchegoleva N.Ye., Grashchenkov D.V., Sarkisov P.D., Orlova L.A., Popovich N.V. Vliyaniye dobavok B₂O₃ i P₂O₅ na kristallizatsionnyuyu sposobnost strontsiyalumosilikatnogo stekla [Effect of B₂O₃- and P₂O₅-additives on the crystallization ability of strontium-aluminosilicate glass]. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov — Technique and technology of silicates*. 2012, vol. 19, no. 2, pp. 2 – 4.

18. Kablov Ye.N. Strategicheskiye napravleniya razvitiya materialov i tekhnology ikh pererabotki na period do 2030 g. [Strategic directions of materials development and processing up to 2030]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation materials and technologies*. 2012, no. №S (suppliment), pp. 7 – 17.
19. Sarkisov P.D., Orlova L.A., Grashchenkov D.V., Uvarova N.E., Isayeva N.V. Vysokotemperaturnye radioprozrachnye materialy: segodnya i zavtra [High-temperature radio transparent materials: today and tomorrow]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation materials and technologies*. 2010, no. 1, pp. 16 – 20.

Статья поступила в редакцию 1.10.2013 г.

Щеголева Наталья Евгеньевна — Федеральное государственное унитарное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов”, кандидат технических наук, и. о. начальника сектора, специалист в области технологии стекла, стеклокерамики, стеклокерамических композиционных материалов.

Гращенков Денис Вячеславович — Федеральное государственное унитарное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов”, кандидат технических наук, заместитель генерального директора, специалист в области материаловедения керамических и металлокерамических композиционных материалов, технологии теплозащитных материалов.

Ваганова Мария Леонидовна — Федеральное государственное унитарное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов”, кандидат химических наук, и. о. старшего научного сотрудника, специалист в области технологии стеклокерамики, стеклокерамических и керамических композиционных материалов. E-mail: magva@rambler.ru

Солнцева Сергей Станиславович — Федеральное государственное унитарное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов”, и.о. начальника лаборатории, специалист в области технологии стеклокерамических и керамических композиционных материалов, антиокислительных и защитных покрытий.

Investigation of mechanical and thermal properties of various fillers reinforced ceramic composite materials

N. E. Shchegoleva, D. V. Grashchenkov, M. L. Vaganova, S. S. Solntsev

The use of different reinforcing fillers for ceramic composite structural materials are reviewed. Technological approaches of preparation and properties of carbon fiber tape “Kulon” and mullite-silica fibers based glass-ceramic composite materials are discussed. Perspective of sol-gel method application for glass-ceramic matrix composite materials developing are shown.

Key words: composite material, glass-ceramic matrix, reinforced filler, carbon tape, mullite-silica fibers, sol-gel method, aluminosilicate system.

Shchegoleva Natalya — All-russian scientific research institute of aviation materials, Moscow, PhD, acting head of department.

Grashchenkov Denis — All-russian scientific research institute of aviation materials, Moscow, PhD, deputy general director.

Vaganova Mariya — All-russian scientific research institute of aviation materials, Moscow, PhD, acting senior research worker. E-mail: magva@rambler.ru

Solntsev Sergey — All-russian scientific research institute of aviation materials, Moscow, acting head of laboratory.